ЗБОРНИК РАДОВА
5. српски конгрес о путевима, 30-31. мај 2024.

PROCEEDINGS
5th Serbian Road Congress, May 30-31, 2024

Издавач
Српско друштво за путеве “Via-Vita”
Булевар Пека Дапчевића 45, 11000 Београд

За издавача
Душан Савковић, дипл. инж. грађ.

Уредници
проф.др Владан Тубић
Доц.др Сања Фриц, дипл.инж.грађ.

Графички дизајн и умножавање зборника
Омнибус, Београд

Тираж
300

ISBN 978-86-88541-18-3

CIP - Каталогизација у публикацији -
Народна библиотека Србије, Београд

625.7/.8(082)(0.034.2)

СРПСКИ конгрес о путевима (5 ; 2024)
Зборник радова [Електронски извор] / 5. српски конгрес о путевима, 30-31. мај 2024 = Proceedings / 5th Serbian Road Congress, May 30-31, 2024 ; [уредници Владан Тубић, Сања Фриц]. - Београд : Српско друштво за путеве “Via Vita”, 2024 (Београд : Омнибус). - 1 USB флеш меморија ; 1 x 2 x 4 cm

Системски захтеви: Нису наведени. - Насл. са насловне стране документа. - Радови на срп. и енгл. језику. - Тираж 300. - Напомене и библиографске референце уз радове. - Библиографија уз сваки рад. - Abstracts.

ISBN 978-86-88541-18-3

а) Путеви -- Зборници

COBISS.SR-ID 145413385

ЗБОРНИК РАДОВА

5. српски конгрес о путевима, 30-31. мај 2024.

PROCEEDINGS

5th Serbian Road Congress, May 30-31, 2024

Српско друштво за путеве “Via-Vita”
Београд, 2024. година

САДРЖАЈ

ТЕМА 1 ... Планирање и пројектовање – Примери и искуства
Planning and Design - Case Studies

NESTANDARDNA TURBO KRUŽNA RASKRSNICA – PRIMER: RASKRSNICA „BARIČ"
Mladen Kapetanović ... 1

PRIKAZ PROJEKTOVANIH INŽENJERSKIH KONSTRUKCIJA NA DRŽAVNOM PUTU IB REDA BR.28 (M-19.1), UŽICE – KADINJAČA – BAJINA BAŠTA, DEONICA OBILAZAK UŽICA
Dijana Milošević ... 9

ИСКУСТВА И ИЗАЗОВИ У ТОКУ ИЗВОЂЕЊА ХЛАДНЕ РЕЦИКЛАЖЕ У ОКВИРУ ГЛАВНОГ ПРОЈЕКТА ПОЈАЧАНОГ ОДРЖАВАЊА НА ДЕЛУ ДРЖ. ПУТА ІБ35 КМ 245+531 – КМ 249+000
Сузана Стефановић, Синиша Хаџи-Антић, Драган Стојнић, Миодраг Адамовић ... 21

THE EFFICIENCY OF CHEMICAL ADDITIVES FOR WARM MIX ASPHALT (WMA): LATEST ADVANCES AND CASE STUDIES
Shahin Eskandarsefat, Matteo Fumagalli, Loretta Venturini ... 33

GEOTEHNIČKI USLOVI IZGRADNJE NADVOŽNJAKA „BALAJNAC" NA AUTOPUTU E-80 DEONCA: NIŠ - MEROŠINA
Dragoslav Rakić, Nikola Božović ... 41

PROBLEMATIKA VOĐENJA BICIKLISTIČKIH KRETANJA U GRADSKIM USLOVIMA
Sanja Fric, Dejan Gavran, Vladan Ilić, Filip Trpčevski, Stefan Vranjevac, Miloš Lukić, Nikola Milovanović ... 52

АНАЛИЗА ЕФЕКАТА ПРИМЕНЕ МЕРА ЗА УСПОРАВАЊЕ САОБРАЋАЈА
Милан Милановић, Вук Богдановић, Немања Гаруновић ... 62

SISTEM ODVOĐENJA ATMOSFERSKIH VODA SA AERODROMA „NIKOLA TESLA"-BEOGRAD, POSLE IZGRADNJE NOVE UMETNUTE POLETNO – SLETNE STAZE
Duško Božović, Vesna Tomić ... 70

TIPOVI DENIVELISANIH RASKRSNICA NA VIŠETRAČNIM PUTEVIMA
Nikola Nikitović, Filip Trpčevski, Dejan Despotović, Danijela Rotula, Mihajlo Kuzmanović ... 80

PRIMENA SAVREMENIH METODA ISPITIVANJA REOLOŠKIH KARAKTERISTIKA BITUMENSKOG VEZIVA
Đorđe Tošković, Goran Mišanović, Želimir Perić, Radomir Jakovljević ... 92

КАНАЛИСАЊЕ ДРЕНАЖНИХ, ПОВРШИНСКИХ И КИШНИХ ВОДА НА АУТО ПУТУ Е-75 ИЗМЕЂУ КРАЈА МОСТА МОРАВА 1 И ПОЧЕТКА МОСТА МОРАВА 2 ПОДДЕОНИЦЕ ЦАРИЧИНА ДОЛИНА - ТУНЕЛ"МАНАЈЛЕ" ОД КМ 888+600 ДО КМ 890+250
Јован Деспотовић, Милоје Васиљевић ... 104

ТЕМА 2 ... Планирање и пројектовање - Нове технологије
Planning and Design - New Technologies

МОДЕЛ ИЗРАДЕ ПОДЛОГА ЗА ПЛАНИРАЊЕ И ПРОЈЕКТОВАЊЕ ПУТЕВА ДАЉИНСКОМ ДЕТЕКЦИЈОМ
Драган Мићановић ... 111

INŽENJERSKOGEOLOŠKI IZAZOVI PRI PROJEKTOVANJU I IZVOĐENJU TUNELA "MUNJINO BRDO" SA OSVRTOM NA BENEFITE PRIMENE DFN METODOLOŠKOG PRISTUPA U BUDUĆNOSTI
Dragana Slavković, Toplica Novaković, Darko Lisinac, Vladimir Filipović ... 122

PASIVNI IN-SITU TRETMAN OCEDNE VODE POMOĆU AKTIVNIH GEOKOMPOZITA
Marija Bakrač, Thomas Hasslacher, Stefan Niewerth ... 132

THE LADISER LANDSLIDE MITIGATION PROJECT WITH A FLEXIBLE HIGH TENSILE STEEL MESH PROTECTION SYSTEM
Vjekoslav Budimir, Helene Lanter, Armin Roduner ... 138

UTICAJ REFERENTNOG PERIODA MJERODAVNE TEMPERATURE NA PRORAČUN DILATACIJA U KOLOVOZNIM KONSTRUKCIJAMA
Milan Marinković ... 148

PRIMENA SAVREMENIH GEODETSKIH METODA KOD IZRADE TOPOGRAFSKIH PODLOGA ZA POTREBE PROJEKTOVANJA I ODRŽAVANJA PUTEVA
Momir Mitrović, Željko Cvijetinović, Igor Nedeljković ... 155

TEMA 3 ... Управљање, грађење и одржавање путева
Management, Construction and Maintenance of Roads and Structures

ПРОБЛЕМИ КОД МАШИНСКЕ ИЗРАДЕ БЕТОНСКЕ РИГОЛЕ У АСФАЛТНОМ КОЛОВОЗУ (пример Изградња државног пута IБ реда бр. 27 Лозница-Ваљево-Лазаревац, деоница Иверак-Лајковац)
Милован Ћеранић ... 169

ANALIZA MOGUĆNOSTI POTPUNE ZAMENE BITUMENA U ASFALTNIM MEŠAVINAMA BIO-BITUMENOM SA ASPEKTA MASTIKSA
Stefan Trifunović, Johannes Büchner, Michael P. Wistuba ... 175

UTILIZATION OF B-WIM DATA COLLECTED AT STOPANSKI DVOR
Bajko Kulauzović, Zoran Slamkov, Nexhat Bajrami ... 182

ZNAČAJ GEOPROSTORNIH BAZA PODATAKA U UPRAVLJANJU PUTNOM IMOVINOM
Zoran Pešović, Marija Dotto, Ana Vučićević ... 194

USE OF REACTIVE MODIFIER FOR BITUMEN AND IMPROVEMENT OF ASPHALT MIXTURE PERFORMANCE
Goran Mladenović, Olivier Fleischel, Aleksandar Đureković, Felix Brueggemann ... 203

DEVELOPMENT OF A DECISION SUPPORT SYSTEM FRAMEWORK FOR CONSTRUCTION AND MAINTENANCE OF SUSTAINABLE ASPHALT PAVEMENTS
Rosa Veropalumbo, Cristina Oreto, Francesca Russo ... 213

EMBEDDED SENSORS FOR PAVEMENT MONITORING: TECHNOLOGY REVIEW AND CHALLENGES
Nemanja Nešković, Kim J Jenkins ... 226

UTICAJ PETROGRAFSKOG SASTAVA ŠLJUNKA NA OTPORNOST NA DROBLJENJE I POSLEDIČNO NA SPRAVLJANJE BETONA I IZRADU ASFALTNIH MEŠAVINA
Olivera Đokić, Marko Nikolić, Bojana Đokić, Miodrag Dančetović ... 238

SPECIFIČNOSTI IZVOĐENJA ASFALTNIH RADOVA NA REKONSTRUKCIJI POLETNO-SLETNE STAZE AERODROMA „NIKOLA TESLA“ – BEOGRAD
Branislav Krsmanović, Saša Bodiroga, Nikola Ivović ... 249

ИЗАЗОВИ ПРЕД УПРАВЉАЧЕМ ОПШТИНСКИХ ПУТЕВА И УЛИЦА
Јелена Кртенић, Александар Милентијевић, Џафер Џафербеговић, Валбона Самарџија ... 255

MOGUĆNOSTI PRIMENE INSAR TEHNOLOGIJE ZA DALJINSKU DETEKCIJU DEFORMACIJE GEOMETRIJE PUTA
Nikola Milovanović, Dejan Gavran, Goran Mladenović, Sanja Fric, Vladan Ilić, Filip Trpčevski, Stefan Vranjevac, Miloš Lukić ... 266

USE OF BRIDGE WEIGH-IN-MOTION DATA: A CASE STUDY OF THE REPUBLIC OF SERBIA
Martin Hauptman, Miloš Milosavljević ... 274

ЕВАЛУАЦИЈА ПОДУЖНЕ РАВНОСТИ КОЛОВОЗА ПРИМЕНОМ ОБЛАКА ТАЧАКА ДОБИЈЕНИХ МОБИЛНИМ ЛИДАР СИСТЕМОМ
Милош Берока, Никола Миловановић, Милена Милојевић, Горан Младеновић ... 281

PRIMENA ASFALTNE MEŠAVINE AC DUOPAVE 16 ZA IZRADU KOLOVOZNIH ZASTORA
Uroš Tatić, Jovan Mladenović ... 293

MOTORWAY SPEED LIMITS AS A FUNCTION OF CLIMATE CHANGE
Franci Šoba ... 301

SISTEM UPRAVLJANJA INFRASTRUKTUROM AUTOPUTEVA U SLOVENIJI
Mitja Jurgele ... 309

ТЕМА 4 ... ITS и нове технологије у саобраћају
ITS and New Technologies in Transport

ПРИМЕНА HCM МОДЕЛА УТВРЂИВАЊА НИВОА УСЛУГЕ НА „МОРАВСКОМ КОРИДОРУ“
Александар Цанић ... 321

DEVELOPMENT AND IMPLEMENTATION OF DATA-DRIVEN TOOLS FOR ENHANCING TRAFFIC SIGNAL MANAGEMENT EFFICIENCY: CASE STUDIES FROM PENNSYLVANIA AND OHIO - 009-T4-0126
Nemanja Dobrota, Burak Cesme ... 333

KONCEPT IZMENJIVE SAOBRAĆAJNE SIGNALIZACIJE U FUNKCIJI INFORMISANJA KORISNIKA
Stamenka Stanković, Nikola Čelar, Jelena Kajalić ... 349

STRUKTURA UPRAVLJAČKIH MERA U ODNOSU NA HIJERARHIJU ELEMENATA AUTOPUTA
Nikola Čelar, Stamenka Stanković, Jelena Kajalić ... 356

METODOLOGIJA ZA EVALUACIJU UTICAJA AUTONOMNIH VOZILA NA SAOBRAĆAJNI SISTEM
Milan Knežević, Slavica Gavrić, Aleksandar Stevanović ... 363

REGULATORNI IZAZOVI U IMPLEMENTACIJI INFORMACIONO-KOMUNIKACIONIH TEHNOLOGIJA U KONTEKSTU POVEZANIH I AUTONOMNIH VOZILA
Aleksandra Kostić Ljubisavljević, Branka Mikavica, Momir Manović ... 378

ANALIZA EFIKASNOSTI UVOĐENJA STIMULATIVNIH MJERA ZA UPOTREBU SISTEMA ENP NA AUTOPUTU „9. JANUAR“
Bojan Mihaljčić, Goran Mihaljčić, Vuk Bogdanović, Vladimir Gatarić ... 389

OVERVIEW OF AUTOMATED TRAFFIC SIGNAL PERFORMANCE MEASURES (ATSPM) AND LESSONS LEARNED FROM DEPLOYMENTS - 055-T4-0217
Nemanja Dobrota, Stevanovic Aleksandar, Burak Cesme, Shannon Warchol ... 397

COOPERATIVE INTELIGENT TRANSPORT SYSTEMS (C-ITS) BRING THROUGH VEHICLE2X COMMUNICATION SIGNIFICANT REDUCTION OF TRAFFIC JAMS, ACCIDENTS AND EMISSIONS
Milena Vučković, Milan Radivojević ... 408

ТЕМА 5 ... Ефикасност и безбедност саобраћаја на путевима
Efficiency and Safety of Road Traffic

RAZVOJ MODELA ZA DOBIJANJE INTERVALA SLEĐENJA SA ASPEKTA EFIKASNOSTI I BEZBEDNOSTI DVOTRAČNIH PUTEVA
Marko Subotić, Vladan Tubić, Željko Stević, Suzana Miladić-Tešić ... 421

UTICAJ PUTA I OKOLINE NA NASTANAK SAOBRAĆAJNE NEZGODE U ZONI RADOVA NA PUTEVIMA U REPUBLICI SRBIJI
Dalibor Pešić, Aleksandra Obradović ... 430

ISKUSTVA PROVERE BEZBEDNOSTI SAOBRAĆAJA U TUNELIMA
Emir Smailović, Dalibor Pešić, Boris Antić, Zoran Pešović, Ivan Terzić, Krsto Lipovac ... 437

DISTRIBUCIJA SAOBRAĆAJNIH NEZGODA U ODNOSU NA PROBLEME ISPUNJENOSTI ZAHTEVANE I PRETICAJNE PREGLEDNOSTI
Đorđe Sokić, Mišel Sabo ... 444

ANALIZA MEĐUZAVISNOSTI BRZINE I PROTOKA NA DEONICI DVOTRAČNOG PUTA U REPUBLICI SRBIJI
Marijo Vidas, Vladan Tubić, Nemanja Stepanović ... 459

ŠTETE UZROKOVANE NALETOM VOZILA NA DIVLJAČ NA JAVNOJ CESTI – PRIKAZ NORMATIVNIH REŠENJA
Tatjana Potkonjak ... 466

АНАЛИЗА УТИЦАЈА ВРЕМЕНСКИХ УСЛОВА НА БРЗИНУ КРЕТАЊА: ПРИМЕР СЛУЧАЈА ДВОТРАЧНОГ ПУТА (ДП IB – 22)
Драган Пантелић, Маријо Видас ... 478

АНАЛИЗА ПРЕКОРАЧЕЊА БРЗИНА НА ПРОЛАСКУ АУТОПУТА КРОЗ БЕОГРАД, ДЕОНИЦА ПЕТЉА БЕОГРАД – ПЕТЉА БУБАЊ ПОТОК
Милош Тубић, Лазар Стојановић, Немања Степановић ... 490

ANALIZA EFEKTA REKONSTRUKCIJE NESEMAFORIZIRANOG RASKRIŽJA U KRUŽNO ZA RAZLIČITE PROMETNE UVJETE– STUDIJA SLUČAJA IZ RIJEKE, HRVATSKA
Irena Ištoka Otković, Aleksandra Deluka-Tibljaš, Sanja Šurdonja ... 501

RSA NA LOKALNOM PUTU SA PROMENLJIVIM POPREČNIM PRESEKOM
Riste Ristov, Slobodan Ognjenović, Vasko Gacevski, Ivona Nedevska - Trajkova, Zlatko Zafirovski ... 515

PROCES PROJEKTOVANJA PRISTUPNOG PUTA I PLATOA VETRENJAČE U DRENU
Riste Ristov, Slobodan Ognjenović, Vasko Gacevski, Ivona Nedevska - Trajkova, Zlatko Zafirovski ... 522

УРБАНИСТИЧКО ПЛАНИРАЊЕ И БЕЗБЕДНОСТ САОБРАЋАЈА
Александар Павловић, Дарија Павловић ... 529

PREGLED REZULTATA PRAKTIČNE PRIMENE ODREĐIVANJA POVRŠINSKIH KARAKTERISTIKA KOLOVOZA U OKVIRU PROVERE BEZBEDNOSTI SAOBRAĆAJA MREŽE AUTOPUTEVA U RS
Aleksandar Đureković, Krsto Lipovac, Emir Smailović ... 538

АНАЛИЗЕ КАПАЦИТЕТА У ПОСТУПЦИМА ПЛАНИРАЊА АУТОПУТЕВА
Милица Тубић, Данијела Ротула, Марија Стојановић, Ана Русић, Милош Мицковић ... 548

НОВИНЕ У МЕТОДОЛОГИЈИ ЗА ПРОРАЧУН НИВОА УСЛУГЕ ВАНГРАДСКОГ ДВОТРАЧНОГ ПУТА
Владан Тубић, Немања Степановић, Маријо Видас ... 560

УТВРЂИВАЊЕ ГРАНИЧНЕ ВРЕДНОСТИ ИНТЕРВАЛА СЛЕЂЕЊА СЛОБОДНОГ ТОКА НА ДВОТРАЧНИМ ПУТЕВИМА І РЕДА У СРБИЈИ
Немања Степановић, Маријо Видас, Владан Тубић ... 571

ANALIZA PODATAKA O SAOBRAĆAJNIM NEZGODAMA U REPUBLICI SRBIJI I MOGUĆI DORINOSI UNAPREĐENJU SISTEMA BEZBEDNOSTI I OČUVANJU ŽIVOTNE SREDINE
Marija Mladenović ... 579

POTRAŽNJA ZA PARKIRG MESTIMA ZA TEŠKA TERETNA VOZILA DUŽ AUTO-PUTEVA U SLOVENIJI
Marko Čelan, Franci Šoba ... 592

UTICAJ LOKACIJE BROJAČA SAOBRAĆAJA NA DOBIJENE PODATKE ZA ANALIZU, PLANIRANJE I OPTIMIZACIJU SAOBRAĆAJNOG TOKA NA PRIMERU SEMAFORIZACIJE ČETVOROKRAKE RASKRSNICE U NOVOM PAZARU
Milana Šarenac, Aleksandar Petrić, Goran Đokić ... 602

ANALIZA I IZBOR MERA ZA UPRAVLJANJE BRZINAMA - PRIMER GRADA SREMSKA MITROVICA
Nemanja Garunović, Vuk Bogdanović, Obrad Vučenović, Marko Marković ... 612

ТЕМА 6 ... Одрживи развој и заштита животне средине
Sustainable Development and Environmental Protection

ULOGA INFORMACIONO-KOMUNIKACIONIH TEHNOLOGIJA U ODRŽIVOM RAZVOJU: SMANJENJE UTICAJA KLIMATSKIH PROMENA U PUTNOM SEKTORU
Milica Pavić, Igor Jokanović ... 623

POSTIZANJE RAVNOTEŽE: NAVIGACIJA RAZVOJEM INFRASTRUKTURE I OČUVANJEM BIODIVERZITETA U SRBIJI - OTKRIVANJE IZAZOVA I REŠENJA
Miloš Despotović, Iva Mišić, Matija Petković ... 633

ENVIRONMENTAL LIFE CYCLE ASSESSMENT OF SUSTAINABLE SOLUTIONS FOR ROAD ASPHALT PAVEMENTS
Cristina Oreto, Rosa Veropalumbo, Nunzio Viscione, Francesca Russo ... 644

Традиција дуга 90 година

Српско друштво за путеве “Via-Vita”

[1934 - 2024]

NESTANDARDNA TURBO KRUŽNA RASKRSNICA – PRIMER: RASKRSNICA „BARIČ”

Mladen Kapetanović, dipl.građ.inž.[1]

[1] *Institut za puteve AD Beograd, Srbija, m.kapetanovic@highway.rs*

Rezime: *Kružne raskrsnice sa spiralnim kružnim tokom (turbo kružne raskrsnice) su posebna vrsta višetračnih kružnih raskrsnica kod kojih su neke vozne trake fizički odvojene (ispred uliva, na delu spiralnog kružnog toka i na izlivu). Fizička odvojenost voznih traka se prekida samo na mestima predviđenog uliva (unutrašnje kružne vozne trake) u kružnu raskrsnicu. Primena turbo kružnih raskrsnica u Republici Srbiji je na samom početku. Cilj ovog rada je da se na konkretnom primeru primene turbo kružne raskrsnice na brzoj saobraćajnici Ostružnica-Obrenovac prikaže način primene nestandardnog tipa raskrsnice. Kraci raskrsnice povezuju saobraćajnice različitih rangova saobraćajnog opterećenja. Pojedini kraci raskrsnice su vođeni denivelisano. Obrazložene su prednosti primene ovakvog rešenja u odnosu na standardnu površinsku kružnu raskrsnicu. Data je grafička interpretacija primenjenih rešenja. Takođe, prikazani su kriterijumi odabira projektnih rešenja.*

Ključne reči: *turbo kružne raskrsnice, turbo blok, širina traka u turbo kružnoj raskrsnici*

NON-STANDARD TURBO ROUNDABOUT – CASE STUDY: INTERSECTION ”BARIČ”

Mladen Kapetanović, dipl.građ.inž.[1]

[1] *The Highway Institute JSC, Belgrade, Serbia, m.kapetanovic@highway.rs*

Abstract: *Roundabouts that provides spiraling flow of traffic (turbo roundabouts) are a special type of multi-lane roundabout where some traffic lanes are physically separated (in front of the inlet, on the part of the spiral roundabout and on the outlet). The physical separation of traffic lanes is interrupted only at the places of the intended flow (internal circular traffic lanes) into the roundabout. The implementation of turbo roundabouts in Republic of Serbia is at the very beginning. The aim of this paper is to show the way of applying a non-standard type of intersection through particular example of turbo roundabout on the motorway Ostružnica – Obrenovac. Roads with different traffic loads meet at the same place. Certain approach legs are designed at different elevation levels. The advantages of the application of this solution compared to the standard one are explained. A graphical representation of the applied solutions is given. Also, the project solutions selecion criteria are presented.*

Keywords: *Turbo roundabouts, turbo block, turbo roundabouts lane widths*

1. UVOD

Kružne raskrsnice sa spiralnim kružnim tokom (turbo kružne raskrsnice) su posebna vrsta višetračnih kružnih raskrsnica kod kojih su neke vozne trake fizički odvojene (ispred uliva, na delu spiralnog kružnog toka i na izlivu). Fizička odvojenost voznih traka se prekida samo na mestima predviđenog uliva (unutrašnje kružne vozne trake) u kružnu raskrsnicu.

Uobičajene površinske kružne raskrsnice se primenjuju na lokacijama sa približno istim saobraćajnim opterećenjem glavnog i sporednog pravca. Turbo kružne raskrsnice se primenjuju i pri povezivanju saobraćajnica sa naglašenim intezitetom saobraćajnog toka na glavnom pravcu. Imajući u vidu na kojem izlivu će napustiti raskrsnicu, vozač bira odgovarajuću voznu traku već na ulivu, i ne može je naknadno menjati prilikom kretanja na delu spiralnog kružnog toka. Ovom osobinom se smanjuje broj konfilktnih tačaka i omogućava veća protočnost i viši nivo usluge saobraćaja. Primena turbo kružnih raskrsnica u Republici Srbiji je na samom početku. Stoga su veoma korisna razmatranja primene ovakvog projektnog rešenja na različitim kategorijama puteva.

Što se tiče postojeće regulative koja se odnosi na ovu oblast u Republici Srbiji, može se reći da osnovni pravilnik za oblast projektovanja puteva, Pravilnik o uslovima koje sa aspekta bezbednosti saobraćaja moraju da ispunjavaju putni objekti i drugi elementi javnog puta, ne razmatra primenu turbo kružnih raskrsnica. Priručnik za projektovanje puteva u republici Srbiji – 5. Funkcionalni elementi i površine puteva – 5.3 Kružne raskrsnice sadrži poglavlje koje se odnosi na kružne raskrsnice sa spiralnim kružnim tokom, stoga to trenutno predstavlja jedinu postojeću domaću regulativu kojom se definišu projektni elementi.
Kroz ovaj rad predstavljena je primena važeće regulative kroz studiju slučaja, i to prvenstveno sa aspekta projektovanja građevinskog objekta saobraćajnice.

2. METODOLOGIJA ISTRAŽIVANJA

Za metodologiju istraživanja odabrana je studija slučaja, i to primena turbo kružne raskrsnice na brzoj saobraćajnici deonice Ostružnica-Obrenovac, u zoni naselja Barič. Položaj raskrsnice je takav, da su se projektnim rešenjem morali zadovoljiti i harmonizovati saobraćajni tokovi koji, sa osnovnog pravca i na osnovni pravac, usmeravaju saobraćaj vozila, i to ka industrijskoj zoni sa jedne strane, postojećem državnom putu sa druge strane i ka autoputu „Miloš Veliki".
Planirana trasa Brze saobraćajnice počinje od postojeće denivelisane raskrsnice „Ostružnica" na južnoj obilaznici grada Beograda (deo koridora X), pruža se duž trase postojećeg puta uz planirano proširenje sa njegove desne strane, sve do planiranog denivelisanog ukrštanja sa tzv. „starim Ostružničkim putem". Na dalje, Brza saobraćajnica se novoplaniranom trasom pruža desnom obalom reke Save na području naselja Umka (uz značajne planirane radove na regulaciji reke Save, izgradnji nasipa i stabilizaciji klizišta), do naselja Barič, gde se planirana trasa odvaja od linije obale. Dalje se novoplanirana trasa pruža uz postojeći put kroz industrijsku zonu Bariča, sve do planirane denivelisane raskrsnice „Obrenovac" na autoputu „Miloš Veliki", kao završnoj stacionaži.
Osnovni projektni elementi brze saobraćajnice su: širina vozne trake 4x3.50 m; širina ivične trake 4x0.50 m; širina razdelne trake minimum 1x3.00 m; širina bankine minimum 2x1.5 m; širina ulivno/izlivne trake 3.50 m; širina dodatne trake na nagibima 3.50 m. Na delovima trase gde se planira izgradnja servisnih saobraćajnica, širina kolovoza servisnih saobraćajnica je 5.5-6 m.

3. DEFINISANJE PROJEKTNOG REŠENJA

Prilikom određivanja koncepcije raskrsnice, izvršene su saobraćajne analize za varijantna rešenja. Za ulazne procenjene parametre saobraćajnog toka dobijene su vrednosti nivoa usluge prema raspodeli pravaca na raskrsnici.

PARAMETRI SAOBRAĆAJNOG TOKA

Approach Lane Flows (veh/h)

South: Obrenovac (motoput)

Mov. / From S / To Exit:	L2 W	T1 N	R2 E	Total	%HV	Cap. veh/h	Deg. Satn v/c	Lane Util. %	Prob. SL Ov. %	Ov. Lane No.
Lane 1	290	-	-	290	3.0	1010	0.287	100	NA	NA
Lane 2	221	109	-	330	3.0	1148	0.287	100	NA	NA
Lane 3	-	-	518	518	3.0	1563	0.331	100	NA	NA
Lane 4	-	-	518	518	3.0	1563	0.331	100	0.0	3
Approach	511	109	1036	1655	3.0		0.331			

East: Beograd (motoput)

Mov. / From E / To Exit:	L2 S	T1 W	R2 N	Total	%HV	Cap. veh/h	Deg. Satn v/c	Lane Util. %	Prob. SL Ov. %	Ov. Lane No.
Lane 1	452	-	-	452	3.0	830	0.545	100	NA	NA
Lane 2	591	-	-	591	3.0	1086	0.545	100	NA	NA
Lane 3	-	239	109	348	3.0	818	0.425	78	NA	NA
Approach	1043	239	109	1391	3.0		0.545			

North: Industrijska zona

Mov. / From N / To Exit:	L2 E	T1 S	R2 W	Total	%HV	Cap. veh/h	Deg. Satn v/c	Lane Util. %	Prob. SL Ov. %	Ov. Lane No.
Lane 1	120	38	-	157	3.0	357	0.440	100	NA	NA
Lane 2	-	71	98	169	3.0	384	0.440	100	NA	NA
Approach	120	109	98	326	3.0		0.440			

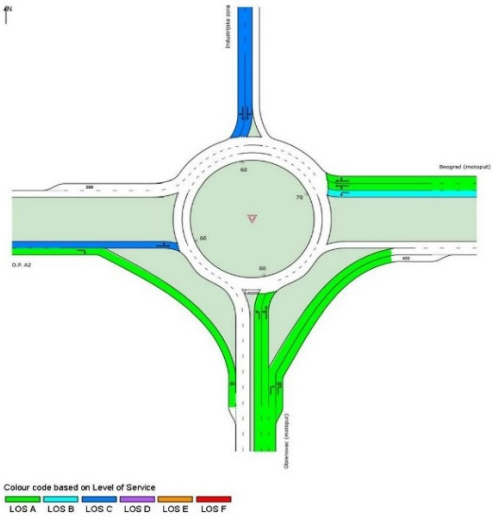
West: D.P. A2

Mov. / From W / To Exit:	L2 N	T1 E	R2 S	Total	%HV	Cap. veh/h	Deg. Satn v/c	Lane Util. %	Prob. SL Ov. %	Ov. Lane No.
Lane 1	109	61	-	170	3.0	316	0.536	100	NA	NA
Lane 2	-	-	435	435	3.0	1563	0.278	100	NA	NA
Approach	109	61	435	604	3.0		0.536			

	Total	%HV	Deg.Satn (v/c)
Intersection	3977	3.0	0.545

NIVO USLUGE

	Approaches				Intersection
	South	East	North	West	
LOS	A	B	C	A	B



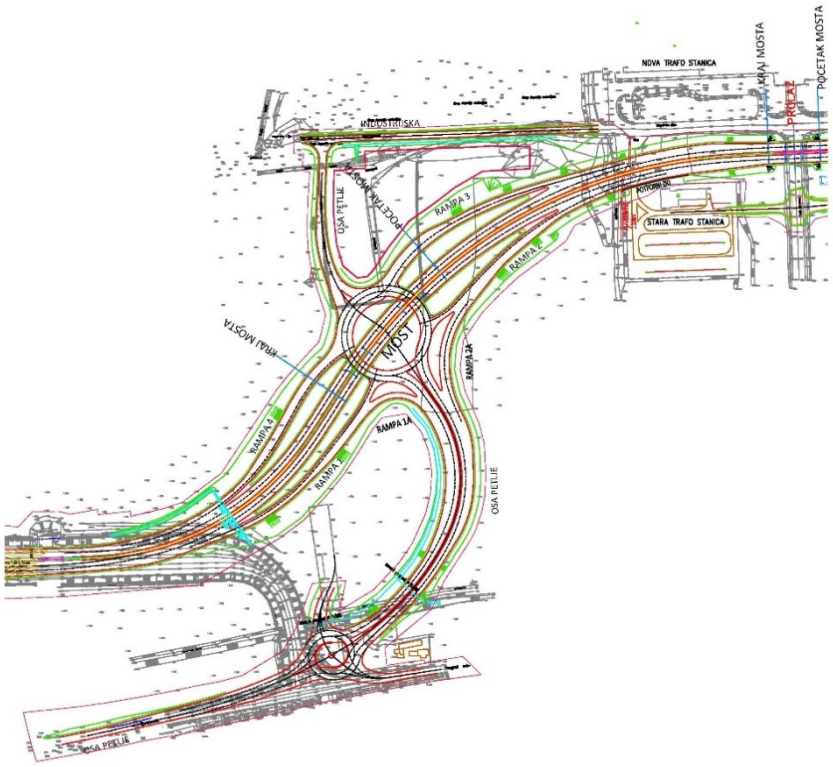
Slika 1. *Nivo usluge na raskrsnici – desno, na osnovu procene saobraćajnog opterećenja na delu turbo kružnog toka – levo*
Izvor: (8)

Vršeno je poređenje efekata koji se dobijaju primenom klasične površinske višetračne kružne raskrsnice i denivelisanih rešenja. Rezultati su takvi da se kompletno površinskim rešenjem drastično povećavaju vremenski gubici, što ukazuje na to da je potrebno primeniti denivelisano projektno rešenje.
Na osnovu saobraćajne analize izvršena je raspodela saobraćajnih traka na delu kružnog podeonika i prilaznih rampi.

4. GEOMETRIJSKO OBLIKOVANJE PROJEKTNOG REŠENJA

4.1. Tip raskrsnice

Raskrsnica je planirana na kraju deonice brze saobraćajnice Ostružnica – Obrenovac. Na projektno rešenje situacione dispozicije raskrsnice utiču brojna prirodna i stvorena ograničenja koja se nalaze u toj zoni. Odabir tipa turbo kružne raskrsnice koji će biti primenjen, je u studiji slučaja, prvenstveno zavisio od glavnog saobraćajnog pravca. Primenjen je standardni (basic) tip.
Poluprečnici su izabrani tako da se ivične linije nadovezuju jedna na drugu pri kreiranju spiralnog toka. Odabrane dimenzije su veće od tipskih. Naime, unutrašnji radijus je veličine Ru=32m. U cilju povećanja propusne moći i indirektnog povećanja sigurnosti odvijanja saobraćaja, na priključnim pravcima sa naglašenim saobraćajnim opterećenjem, primenjeni su izdvojeni kolovozi za desna skretanja.

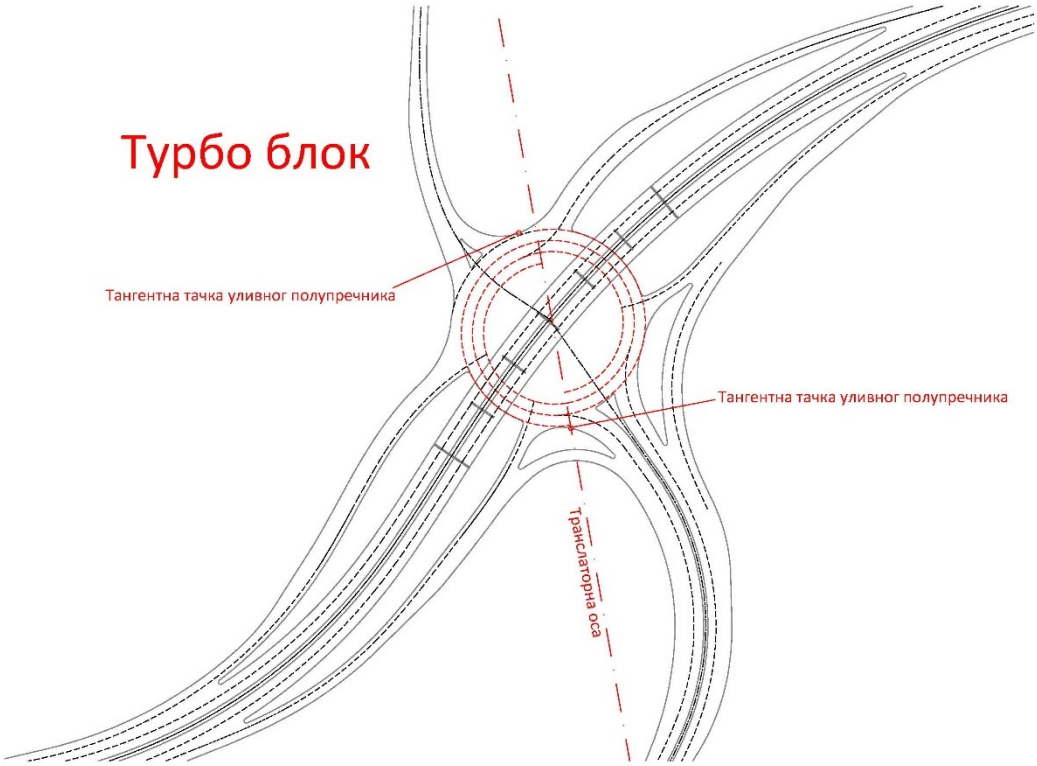


Slika 2. *Situaciona dispozicija turbo kružne raskrsnice „Barič”*
Izvor: (8)

4.1.1. Turbo blok

Geometrijski oblik osnove turbo kružne raskrsnice se formira pomoću turbo bloka. Turbo blok je skup svih potrebnih poluprečnika koje je potrebno na određeni način zarotirati, i na taj način dobiti vozne linije, odnosno vozne trake.
Turbo blok sadrži, osim svih poluprečnika i translatornu osovinu. Translatorna osovina je osa po kojoj se izvodi pomeranje (rotiranje) određenih poluprečnika.
Središte turbo bloka je pozicionirano tako da je omogućeno radijalno priključivanje svih uliva u raskrsnicu.
Prilikom određivanja položaja translatorne osovine težilo se tome da položaj tangentnih tačaka ulivnog prečnika na oba kraja bude takav da što približnije leže na translatornoj osi. Turbo blok je zarotiran tako da ovaj uslov bude ispunjen.

Ose priključnih pravaca su projektovane tako da budu što približnije pravom uglu, i sa ravnomernom raspodelom na četiri kvadranta. S obzirom da je predmetna turbo kružna raskrsnica četvorokraka, translatorna osovina je postavljena u približan položaj kao kad kazaljke na satu pokazuju vreme „pet minuta do pet". Takav položaj omogućava najpovoljnije uslove po pitanju brzine prolaska i vozne dinamike kroz raskrsnicu. Uslovi vozne dinamike se prvenstveno odnose, pri tome, na udobnost vožnje i smanjenje osećaja bočnog udara.



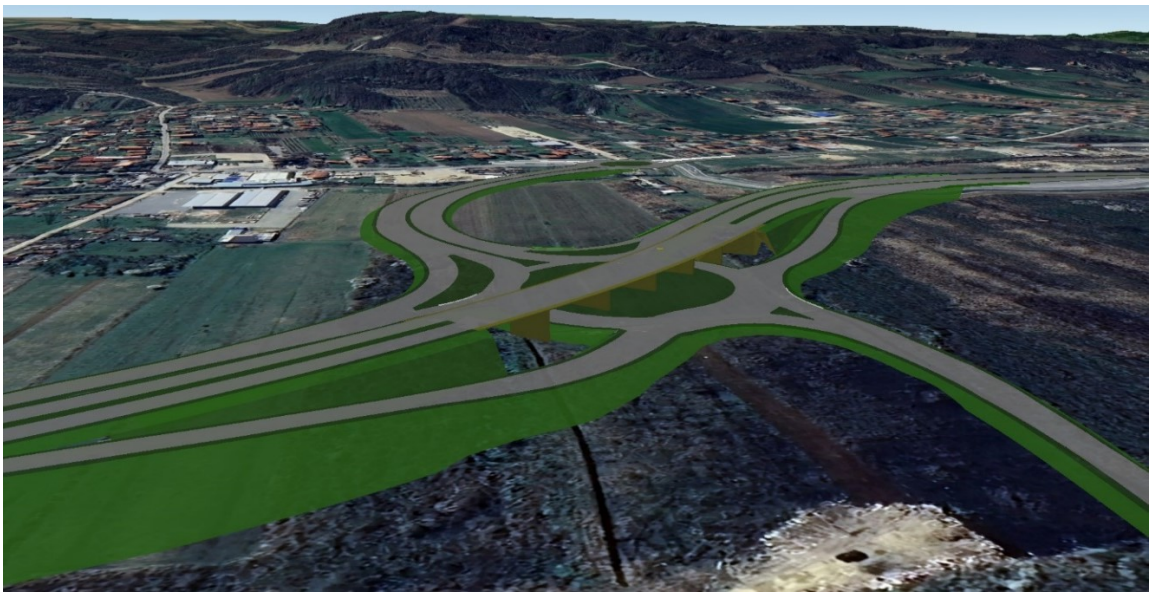
Slika 3. *Turbo blok turbo kružne raskrsnice*
Izvor: (8)

4.1.2. Merodavno vozilo

Na celokupnom području raskrsnice duž svih saobraćajnih traka, izvršena je provera prohodnosti merodavnog vozila. Posebno je izvršena provera za kritičan manevar skretanja za 270°. Za merodavno vozilo je odabran sedlasti tegljač sa poluprikolicom dužine 16.5m. U Priručniku za projektovanje puteva u republici Srbiji – 5. Funkcionalni elementi i površine puteva – 5.3 Kružne raskrsnice ovo vozilo je navedeno da se obično koristi kao merodavno, pri čemu su karakteristike vozila preuzete u skladu sa Pravilnikom o uslovima koje sa aspekta bezbednosti saobraćaja moraju da ispunjavaju putni objekti i drugi elementi javnog puta.

4.1.3. Nivelaciono rešenje

Nivelaciono rešenje raskrsnice je takvo da se spiralni kružni tok sa priključnim pravcima dva kraka spaja u nivou, dok se rampama denivelisano povezuje sa brzom saobraćajnicom. Kako bi brza saobraćajnica mogla trasom da pređe preko zone raskrsnice, potrebna je primena mostovske konstrukcije sa stubnim mestima na lokacijama koje ne ugrožavaju projektne elemente turbo kružne raskrsnice. Obezbeđen je slobodan profil između površine kružnog kolovoza i donje ivice mostovske konstrukcije. Odabir dimenzija projektnih elemenata same kružne raskrsnice je zavisio, takođe i od odnosa prema brzoj saobraćajnici i ograničavajućim objektima koji se nalaze u toj zoni. Naime, u neposrednoj blizini se nalazi postojeća trafostanica, zatim, industrijsko postrojenje i mreža postojećih državnih puteva. Kako bi se nivelaciono povezale rampe sa osnovnom trasom, i savladale ove visinske razlike, u zonama visokih nasipa, primenjene su mere armiranja materijala koji se ugrađuje u nasip, a između ostalog, u cilju omogućavanja dovoljno uskog područja zauzeća ovih delova saobraćajnica.
Na slici br 4. prikazano je 3D modelom, kako je novoprojektovana raskrsnica uklopljena u postojeće stanje.



Slika 4. *3D model prikaz turbo raskrsnice „Barič”*
Izvor: (8)

4.1.4. Razdelna ostrva

U projektnom rešenju su primenjena razdelna ostrva, koja imaju funkciju usmeravanja vozila na ulivu u kružnu raskrsnicu. Na taj način se podiže bezbednost učesnika u saobraćaju i poboljšava protočnost saobraćaja. Geometrijski oblik razdelnih ostva je proistekao u zavisnosti od stepena usmerenja vozila duž priključnih pravaca.

4.1.5. Centralno ostrvo

Centralno ostrvo je predviđeno da se sastoji iz tri dela: pregaznog dela, uslovno pregaznog dela i nepregaznog dela. Pregazni deo predstavlja perlaz sa kružne vozne trake na uslovno pregazni deo. Predviđena je izrada od prefabrikovanih betonskih elemenata kojima će se postići izdizanje u odnosu na voznu traku za 2cm, a na spoljašnjem delu za 12cm. Uslovno pregazni deo ima dvojaku funkciju: da se na njemu mogu zaustaviti vozila koja su nepredviđeno sišla sa vozne trake ili da se mogu zaustaviti vozila za održavanje. Ova površina je potrebno da bude izvedena korišćenjem materijala koji odvraća vozače od redovne vožnje po njemu, i omogućava zaustavljanje samo u prethodno opisanim izuzetnim situacijama. Predviđena je širina od 2.5m i poprečni nagib od 4% ka spoljnoj ivici ostrva. Nepregazni deo je planiran sa zatravljenom površinom na kojoj se, između ostalog, nalaze i osnove stubova mostovske konstrukcije kojom osnovna trasa brze saobraćajnice prelazi preko same raskrsnice.

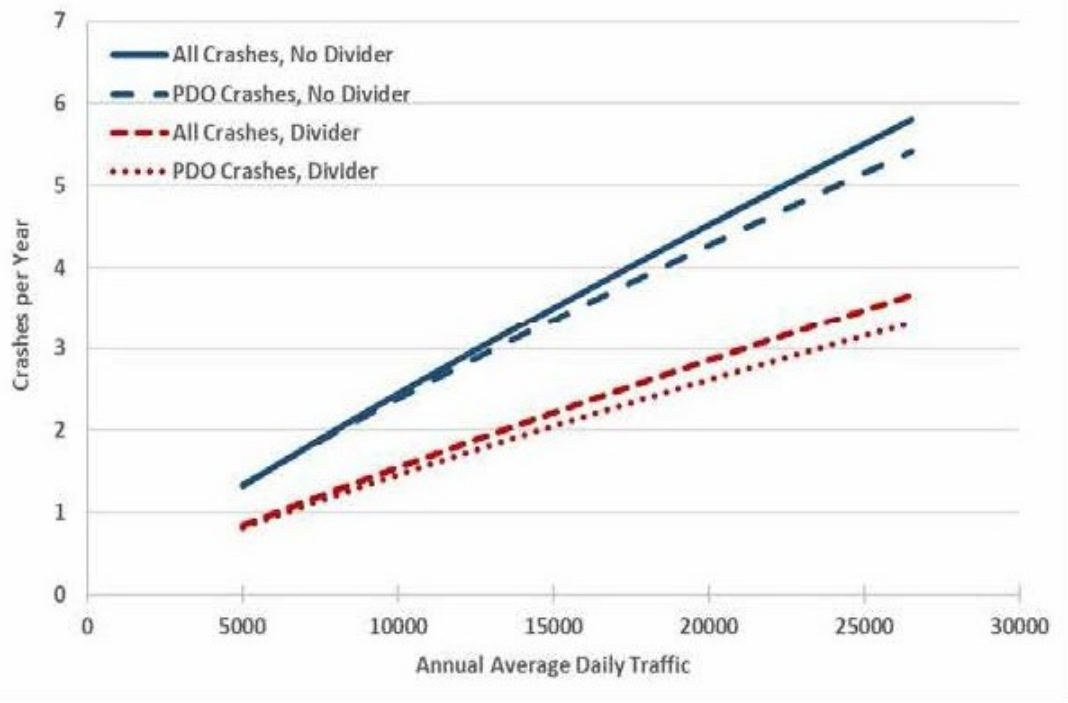
Slika 5. Primer centralnog ostrva sa naznačenim delovima
Izvor: (8)

4.1.5. Brzina prolaska kroz raskrsnicu

Prilikom određivanja dimezija geometrijskih elemenata raskrsnice u studiji slučaja, jedan od ključnih kriterijuma je predstavljala i brzina prolaska kroz raskrsnicu. Definisano je da brzina prolaska kroz raskrsnicu bude Vp=30km/h. Ovako odabrana brzina omogućava učesnicima u saobraćaju, takve uslove vožnje da mogu dovoljno pažnje da usmere jedni na druge, pri čemu se takođe smanjuje mogućnost nastanka saobraćajnih nezgoda sa težim posledicama.

4.1.6. Element za sprečavanje preplitanja u kružnom kolovozu

Pojedine države u svojim smernicama propisuju element za sprečavanje preplitanja u kružnom kolovozu turbo kružne raskrsnice koji nije izdignut. Razlozi za primenu takvog tipa elementa se prvenstveno odnose na bezbednost motociklista u saobraćaju i procedure zimskog održavanja.
Međutim postoje istraživanja koja pokazuju da se primenom elementa za sprečavanje preplitanja koji nije izdignut povećava učestalost saobraćajnih nezgoda u kružnom kolovozu.



Slika 6. *Uticaj primene izdignutog elementa za sprečavanje preplitanja na smanjenje broja saobraćajnih nezgoda u kružnom kolovozu na primeru poljske putne mreže*
Izvor: (5)

U inostranoj literaturi se može naići na različite tipove izdignutog elementa za sprečavanje preplitanja, čak i u kombinaciji sa podužnim horizontalnim osvetljenjem čime se dodatno ističe razdvajanje u noćnim uslovima. Inače, saobraćajna signalizacija i oprema puta predstavljaju naročito bitnu oblast prilikom projektovanja turbo kružnih raskrsnica, kojoj je potrebno posvetiti posebnu pažnju sa stanovišta odgovarajućih struka, i stoga nije razmatrana kao deo ove studije slučaja. Specifično geometrijsko rešenje, zatim potreba za blagovremenim obaveštenjem učesnika u saobraćaju o raspodeli saobraćajnih pravaca radi odabira odgovarajuće trake pred ulazak u samu raskrsnicu i nemogućnost naknadne promene trake u kružnom kolovozu, u prvom redu govore u prilog tome. Na raskrsnici Barič je predviđen izdignut element za sprečavanje preplitanja u skladu sa domaćom regulativom, prikazan na slici 7.

Slika 7. *Detalj elementa za sprečavanje preplitanja*
Izvor: (2)

4.1.7. Širina traka

Širina vozne trake turbo kružne raskrsnice je u funkciji poluprečnika (što su manji poluprečnici, veće su širine voznih traka) i merodavnog vozila.
Poluprečnici su određeni tako da se ivične linije priključuju jedna na drugu. Širina voznih traka na delu spiralnog kružnog toka je dobijena kao offset unutrašnjeg radijusa ka spolja za po 5m, pri čemu se, između traka, postavlja fizičko razdvajanje širine 0.35m ka unutra i spolja, što kao rezultat daje voznu traku širine 4.3m.
Širine voznih traka su odabrane tako da je omogućen kritičan manevar merodavnog vozila.
Poluprečnici ulivnih i izlivnih radijusa su odabrani u skladu sa veličinom turbo kružne raskrsnice, merodavnog vozila i brzine unutar raskrsnice. Poluprečnici ulivnih radijusa su manji od poluprečnika izlivnih radijusa. Dimenzije su odabrane tako da ulivni radijus ne treba da bude manji od 12m, a izlivni ne manji od 15m i ne veći od najvećeg poluprečnika turbo kružne raskrsnice.

5. REZULTATI

Na osnovu ulaznih saobraćajnih parametara, rezultat ove studije slučaja je odabir primenjenog tipa raskrsnice. Primenom odgovarajućeg tipa raskrsnice omogućeno je da se saobraćajnice koje karakterišu četiri različita ranga saobraćajnog opterećenja sustiču na jednom mestu. Naime, saobraćajni tokovi koji gravitiraju ka ovoj raskrsnici se slivaju sa autoputa, brze saobraćajnice, postojećeg dvotračnog puta i dvotračnog puta sa malim intezitetom tokova. Takođe, primenom nivelacionog razdvajanja tokova po visini i izdvojenih kolovoza za desna skretanja, kao što je dato u ovom nestandardnom denivelisanom rešenju raskrnice, omogućena je veća protočnost saobraćaja. Na osnovu analiza sprovedenih kroz ovu studiju slučaja, odabrani su takvi elementi projektne geometrije i usaglešen njihov međusobni odnos na način koji omogućava kretanje vozila kroz raskrsnicu brzinama koje pružaju u datim uslovima maksimalan nivo bezbednosti za učesnike u saobraćaju.

6. ZAKLJUČAK

Primena jednotračnih kružnih raskrsnica je predstavljala veliki iskorak u odnosu na vođenje saobraćaja klasičnim površinskim raskrsnicama. Međutim punu primenu i smisao ove raskrsnice imaju samo ako su priključni pravci približnih nivoa saobraćajnog opterećenja. One su ograničenog kapaciteta, što dalje upućuje na to da je kao alternativa za veća opterećenja, potrebno predvideti dodavanje traka u kružnom kolovozu. Sa druge strane, višetračne kružne raskrsnice izrazito ispoljavaju problem broja konfliktnih tačaka, posebno sa aspekta vozila koje se kreću unutrašnjim kružnim voznim trakama.

Turbo kružne raskrsnice se mogu uspešno primeniti i na spoju saobraćajnica sa naglašenim intezitetom saobraćajnog toka na glavnom pravcu. Između ostalih karakteristika, glavna prednost i preporuka za primenu ovog tipa raskrsnica je povećanje bezbednosti za učesnike u saobraćaju u poređenju sa klasičnim višetračnim kružnim rasrksnicama. Sa njihovom širom primenom prethodnih godina, povećava se i obim dostupne literature i istraživanja vezana za njih, što će u budućnosti biti veoma korisno prilikom odabira tipa raskrnice za primenu.

Literatura

[1] Pravilnik o uslovima koje sa aspekta bezbednosti saobraćaja moraju da ispunjavaju putni objekti i drugi elementi javnog puta ("Sl. glasnik RS", br. 50/2011)

[2] Priručnik za projektovanje puteva u republici Srbiji – 5. Funkcionalni elementi i površine puteva – 5.3 Kružne raskrsnice (2012). Javno preduzeće „Putevi Srbije", Beograd

[3] Fortuijn, L. G. H. and V. F. Harte. (1997). "Meerstrooksrotondes: verkenning can nieuwe vormen" ("Turbo-roundabouts: A well-tried concept in a new guise"). Verkeerskundige werkdagen 1997, CROW, Ede., Netherlands

[4] NCHRP report 672 Roundabouts: An Informational Guide (2010). Transportation research board of the national academies, Washington DC

[5] Kiec, M.; Ambros, J.; Bak, R.; Gogolin, O (2019). Evaluation of safety effect of turbo-roundabout lane dividers using floating car data and video observation, Accident analysis & prevention, Volume 125: 302-310.

[6] Chan, S.; Livinsgston, R. (2014). Design vehicle's influence to the geometric design of turboroundabouts, International roundabout conference, 1-17.

[7] Roundabouts - Application and design - A practical manual (2009). Ministry of Transport, Public Works and Water management Partners for Roads, Royal Haskoning DHV

[8] Projektna dokumentacija Instituta za puteve AD Beograd

PRIKAZ PROJEKTOVANIH INŽENJERSKIH KONSTRUKCIJA NA DRŽAVNOM PUTU IB REDA BR.28 (M-19.1), UŽICE – KADINJAČA – BAJINA BAŠTA, DEONICA OBILAZAK UŽICA

Dijana Milošević[1]
[1] *Institut za puteve a.d., dp.milosevic@highway.rs*

Rezime: *U radu su prikazane neke od inženjerskih konstrukcija iz Idejnog projekta trase puta buduće saobraćajnice. Projektovanje trase puta na ovoj lokaciji je izuzetno zahtevno u smislu morfologije, litološke građe i geotehničkih svojstava terena. Brojni faktori na terenu kao i projektni uslovi doveli su do potrebe za projektovanjem izuzetno zahtevnih i skupih potpornih konstrukcija. Izbor projektnih rešenja uzeo je u obzir sve nepovoljne efekte kojima je predmetni teren podložan, činjenicu da ima puno nestabilnih padina i klizišta, pa je veoma važno da u svim fazama gradnje bude obezbeđena stabilnost. Projektna rešenja su direktno zavisna od dostupnih ulaznih podataka za ovu fazu projekta - Idejni projekat.*

Ključne reči: *idejni projekat, potporne konstrukcije, trasa puta, klizišta, nestabilne padine*

REVIEW OF DESIGNING STRUCTURES ON THE MAIN ROAD NO.28(M-19.1), UŽICE – KADINJAČA – BAJINA BAŠTA, SECTION UŽICE BYPASS ROAD

Dijana Milošević[1]
[1]*Highway Institute a.d., dp.milosevic@highway.rs*

Abstract: *In this paper are given some of engineering structures from Preliminary design of road alignment. Designing retaining structures at this location is very requiring because of terrain conditions such as: morphology, lithology and geotechnical characteristics. Design conditions and numerous factors on the field have caused a demand for expensive retaining structures. Choice of project solutions has taken into account all the unfavorable effects on the field, for example a lot of unstable slopes and slidings, therefore stabilization of earth slopes in all phases of construction is essential. Design solutions are directly dependant from available entrance data using for this phase of project.*

Keywords: *preliminary design, retaining structures, road alignment, landslides, unstable slopes.*

1. UVOD

U cilju izrade Idejnog projekta saobraćajnice IB reda, deonica obilazak Užica na potezu Zlatiborski put (petlja „Surduk“) – Sinjevac – Volujac, u dužini oko L ≈ 4.8km, javila se potreba za projektovanjem potpornih konstrukcija. Na pojedinim lokalitetima, registrovane su nestabilnosti i klizišta koje je neophodno sanirati. Pored postojećih nestabilnosti, položaj projektovane trase puta uslovio je projektovanje velikog broja potpornih konstrukcija . Morfologija terena je brdovito-planinska što je ograničavajući faktor da se razviju škarpe u usecima i nasipima adekvatnog nagiba.
Projektovano je nekoliko tipova potpornih konstrukcija: AB potporni zidovi, zavese AB šipova i AB zidovi na šipovima.
Projektovana rešenja su rezultat raspoloživih arhivskih podataka, novih istraživanja i analiza kao i poznatog iskustva pri izvođenju potpornih konstrukcija na ovom terenu u prošlosti. Pokušaji izgradnje pojedinih konstrukcija kao i izvedeni potporni zidovi prema ranijim projektima su s pažnjom propraćeni i poslužili su kao jedan od važnih iskustvenih podataka za projektovanje.
Na osnovu izvršenog geodetskog snimanja terena, geotehničkog elaborata i građevinskog projekta trase puta, urađen je Idejni projekat inženjerskih konstrukcija čiji koncept je prikazan u narednom tekstu.

[1] Autor zadužen za korespodenciju: dp.milosevic@highway.rs

2. GEOLOŠKA GRAĐA

U morfološkom pogledu teren je brdsko-planinskog tipa - veoma razuđen, mestimično sa strmim nagibima padina, izložen uticaju temperaturnih promena i atmosferilija.
Širi istražni prostor je tokom geološke istorije bio intenzivno tektonski aktivan, što je imalo za posledicu da je građa terena sa čestim promenama osnovne stene i kompleksa padinskih depozita promenljivih debljina.
Teren izgrađuju stenske mase različite starosti i geneze. U podlozi terena preovlađuju krečnjaci trijasa i kompleksi škriljaca, argilošista, filita i podređeno metapeščara karbonske starosti. Najmlađe kvartarne sedimentne tvorevine na terenu su zastupljene u vidu padinskih deluvijalnih (d) nanosa, u zonama jaruga proluvijalnih (pr) nanosa, i aluvijalnih (al) naslaga u zaravnjenim dolinama potoka, a lokalno i njihovih varijateta, zavisno od geomorfoloških karakteristika terena. Strmije padine su prekrivene zaglinjenom osulinskom drobinom, pretežno krečnjačkog porekla, produktom raspadanja osnovne stene. Kvartarne naslage se odlikuju izrazitom heterogenošću sa naizmeničnim smenjivanjem glinovito-prašinastih i peskovito-šljunkovitih i drobinskih komponenti u masi.
Duž trase obilaznice Užica, u pogledu stabilnosti, mogu se izdvojiti sledeće kategorije terena:

- stabilni tereni,
- uslovno - stabilni tereni,
- nestabilni tereni.

Stabilne terene grade pojedini delovi oslabljene zone krečnjaka, odnosno slabije zaglinjene poluvezane krečnjačke drobine, kao i deluvijum ukoliko mu je debljina manja, a prekriva čvrstu i stabilnu stensku masu. Ovi delovi terena su stabilni u prirodnim uslovima, a stabilnost će zadržati i po izvršenim inženjerskim radovima pri izgradnji puta, mestimično uz minimalne geotehničke meliorativne mere.
Uslovno stabilni tereni obuhvataju prirodne kosine i padinske delove terena. To su padine izgrađene od jače zaglinjene poluvezane do nevezane krečnjačke drobine, deluvijalne prašinasto-peskovite gline sa promenljivim učešćem drobine u masi, i padine izgrađene od degradirane i oslabljene zone škriljaca. U prirodnim uslovima, generalno su u stabilnom stanju do stanju granične ravnoteže. Njihova stabilnost može biti narušena usled povećanja pornog pritiska tj. provlažavanjem, zasićenjem, kao i neadekvatnim zasecanjem. Poslednja stavka može biti posebno nepredvidiv faktor koji uzrokuje nestabilnost.
U nestabilne delove terena spadaju klizišta i aktivni sipari. Prilikom izgradnje buduće trase puta, klizišta se obavezno moraju sanirati. Pojedine lokacije klizišta i nestabilnih terena su predviđene da se premoste objektima – mostovskim konstrukcijama (ove lokacije nisu nije predmet ovog rada).

3. GEOTEHNIČKO PROJEKTOVANJE

Na osnovu izvršenog geodetskog snimanja terena, geotehničkog elaborata i građevinskog projekta trase puta projektovane su potporne konstrukcije na ukupno 23 lokaliteta.

Tabela 1. *Projektom predviđeni potporni zidovi*

Red. broj	pozicija	pozicija	početna stacionaža	krajnja stacionaža	ukupna dužina	OPIS
	levo	desno	km	km	m'	
1	L-1		0+890.88	1+251.40	364.84	AB potporni zid na šipovima
2		D-1	0+846.40	1+219.91	368 (75 na šipovima)	AB potporni zid / AB potporni zid na šipovima
3	L-2		1+375.30	1+478.15	101.75	AB potporni zid
4		D-2	1+375.30	1+494.15	120	AB potporni zid
5	L-3		1+589.01	1+687.22	87.66	Zavesa AB šipova
6		D-3	1+683.40	1+729.51	48	AB potporni zid na šipovima

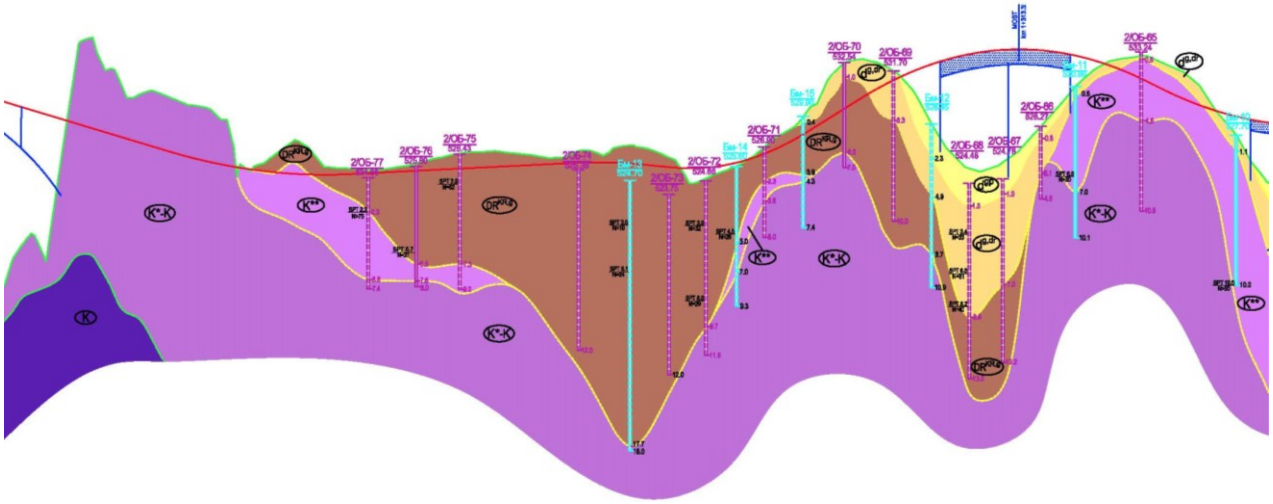
7	L-4		1+746.53	1+814.99	68	Zavesa AB šipova
8		D-4	2+073.66	2+189.43	116	AB potporni zid na šipovima
9	L-5		2+560.00	2+698.00	132	AB potporni zid
10	L-6		3+076.98	3+116.88	40	AB potpornizid
11		D-5	3+070.88	3+123.00	52	AB potporni zid
12	L-7		3+251.51	3+334.14	80	Zavesa AB šipova
13		D-6	3+324.61	3+419.98	96	AB potporni zid
14	L-8		3+440	3+485	45	AB potporni zid
15		D-7	3+492.12	3+532.85	40	AB potporni zid
16	L-9		3+628.13	3+756.14	90	Zavesa šipova sa prednapregnutim ankerima
17		D-8	3+680	3+705.40	25	AB potporni zid
18		D-9	3+775	МОСТ 8 3+887.05	132.45	AB potporni zid na šipovima
19	L-10		4+126.58	4+223.42	96	AB potporni zid na šipovima
20		D-10	4+140.28	4+163.79	24	AB potporni zid
21	L-11		4+260	4+286.41	27.4	AB potporni zid na šipovima
22	L-12		4+679.86	4+710	30	AB potporni zid
23		D-11	4+710.02	4+745	35	AB potporni zid

Izvor: IDP-Projekat inženjerskih konstrukcija

2.1 Projektna rešenja na potezu do km 1+500

Na početnom delu trase (od kraja mosta preko Đetinje) do km 1+500, preovlađuje raspadnuta krečnjačka stenska masa do dubine od 20m na pojedinim potezima (bušotina BM-13). U podlozi se nalazi litološka sredina degradiranih do potpuno kompaktnih krečnjaka (K**) - (K). Sporadično se pojavljuju potezi gde se stena uočava na površini terena, ali pretežno preovlađuju potezi sa zaglinjenom krečnjačkom drobinom (DR,KR,g) deluvijalno-osulinskog, siparskog porekla, sa odlomcima krečnjaka i blokovima „bez korena“. Generalno, sa porastom dubine, procenat odlomaka i blokova krečnjaka u masi se povećava sve do kompaktnije stenske mase.
Ispod drobinskog materijala zastupljena je sredina degradiranih, intenzivnije mehanički raspadnutih krečnjaka (K**) do nivoa slabovezane blokovske drobine. Ova sredina predstavlja površinsku zonu stenske mase, promenljive debljine. U odnosu na svežiju stenu (K*- K) ona je znatno oslabljenih mehaničkih karakteristika.
Tabela 1. *Karakteristike materijala*

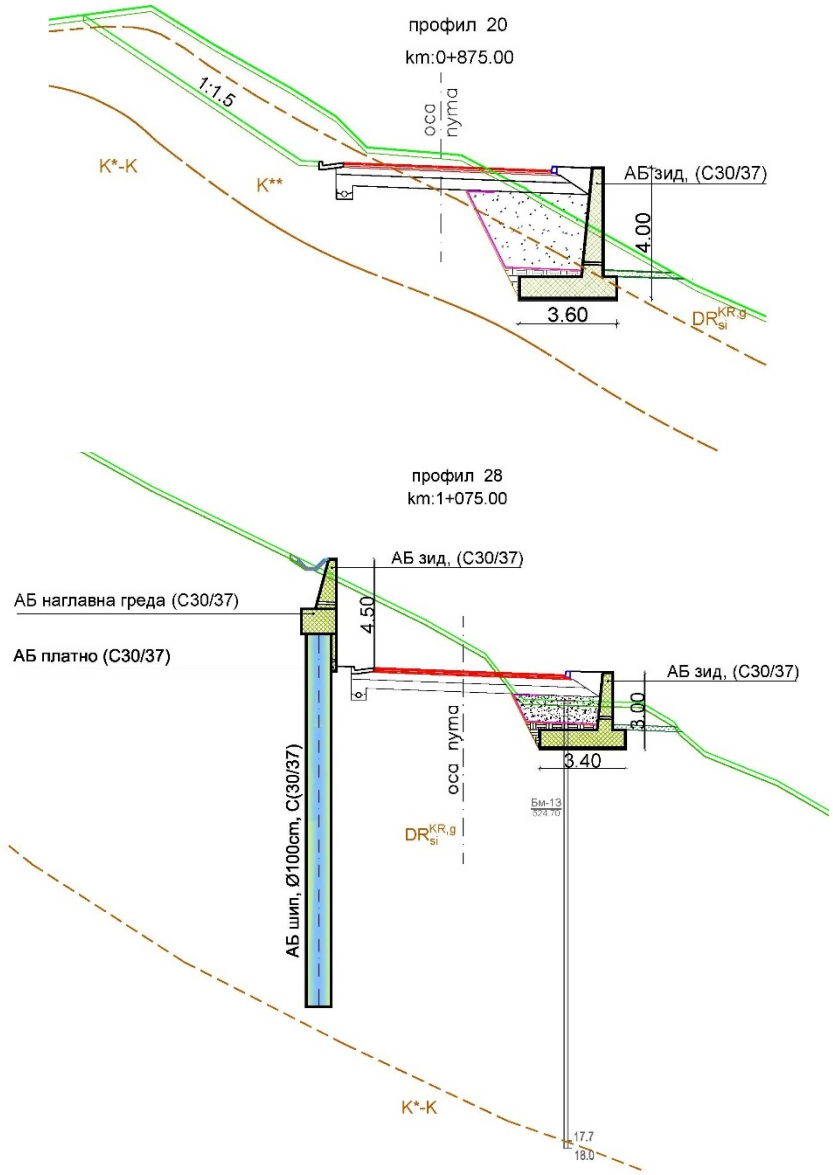
Parametri smičuće čvrstoće	**DR**	**K****
zapreminska težina γ(kN/m^3)	20.0-20.5	22.0-23.0
ugao unutrađnjeg trenja φ (°)	30-32	32-35
Kohezija c (kPa)	0-10	40-60
modul stišljivosti Mv (kPa)	25000 - 35000	
Jednoaksijalna čvrstoća qn(Mpa)		5-7



Slika 1. *Podužni geotehnički presek do km 1+500*
(Izvor :IDP - EL2.1 Elaborat geotehničkih uslova izgradnje trase)

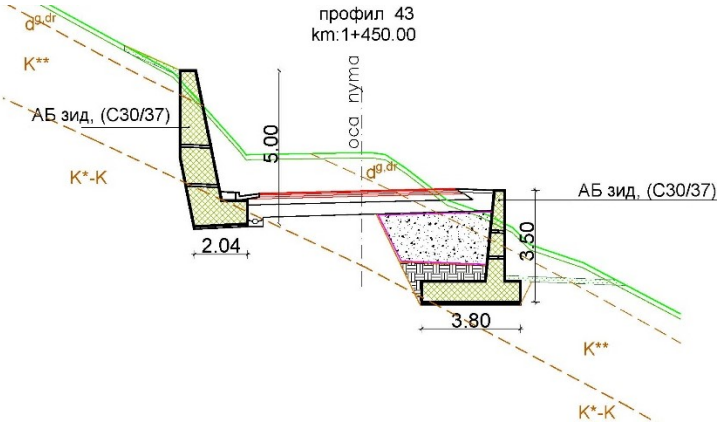
Slika 2. *Prikaz jezgra u drobinski raspadnutom krečnjaku* (DR,KR,g) *- bušotina BM13 do dubine 18m*
(zvor: IDP - EL2.1 Elaborat geotehničkih uslova izgradnje trase)

Pri dubljim zasecanjima, ova sredina je sklona odronjavanju, pa je zaštita kosina neophodna. Razmatrani potez obiluje pištevinama i izvorima brdske vode koja se pukotinski proceđuje i može izazvati veoma nepovoljne uslove na terenu. Geotehničkim analizama i proračunima, uz uzimanje u obzir nepovoljnih hidroloških uslova i vlažnosti preko koeficijenta pornog pritiska do Ru=0.15, dokazano je da su kosine u ovom materijalima dugoročno stabilne u nagibu blažem od 1:1.5, uz ograničenu visinu do 7m.
Iako je drobinski raspadnuti krečnjak povoljnih karakteristika za fundiranje objekata, u slučaju projektovanja potpornih konstrukcija ovo je samo jedan podatak koji nije dovoljan za odluku o plitkom fundiranju. Padine u ovakvim geotehničkim uslovima su sklone nestabilnostima, pa je procena o ponašanju padine tokom gradnje kao i nakon izgradnje veoma značajna. Iz tog razloga je usvojeno betonsko platno na AB šipovima sa leve strane puta u dužini od 365m – L1. Projektovani zidovi na ovom delu puta su prikazani na slici 3. Za narednu fazu projekta neophodno je uraditi još istražnih bušotina kako bi se rešenje još jednom sagledalo i prilagodilo uslovima na terenu.



Slika 3. *Zid L1,Zid D1(bušotina BM-13)*
(Izvor: IDP-Projekat inženjerskih konstrukcija)

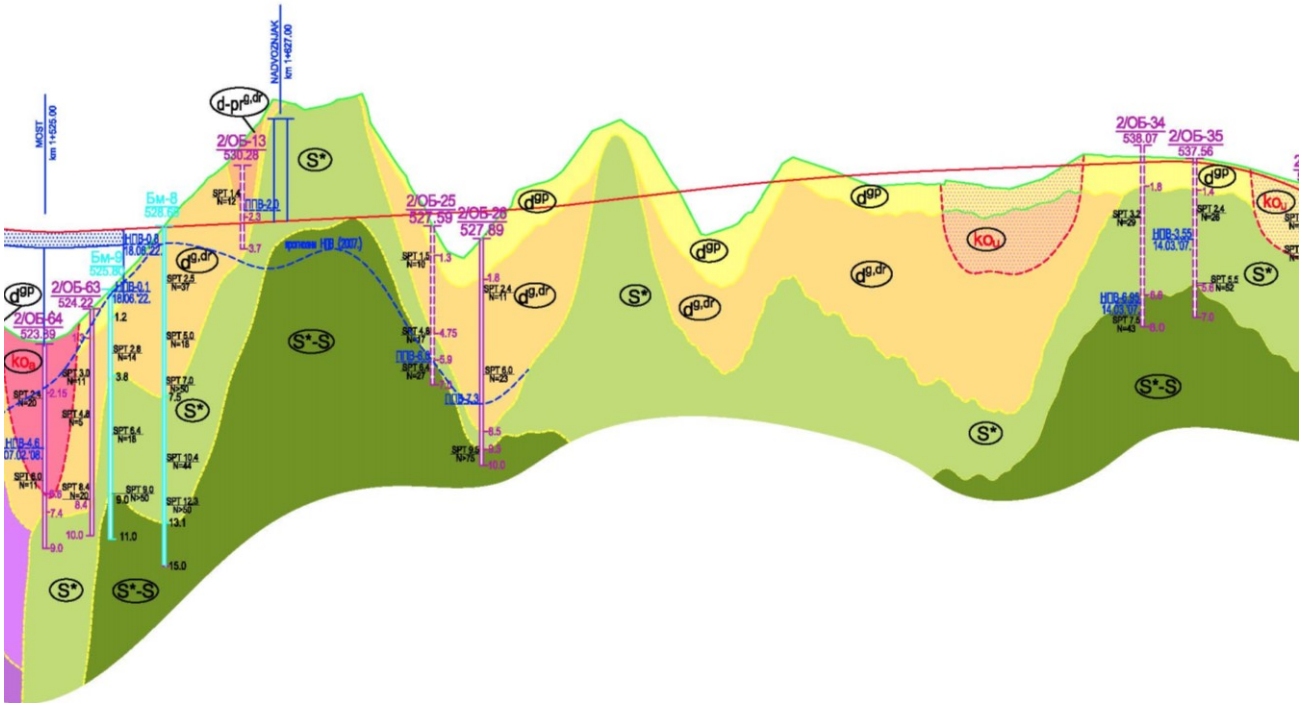
Na delovima trase puta gde se na površini terena pojavljuje delimično raspadnuta krečnjačka stenska masa K**, projektovane su plitko fundirane potporne konstrukcije - potporni zidovi. Svrha ovih inženjerskih konstrukcija je da obezbede dugoročnu stabilnost u zaseku i nasipu trupa puta. Tip potpornog zida zavistan je od stepena degradacije stenske mase. Geotehničkim analizama i proračunima, dokazano je da su kosine u ovom materijalima K** dugoročno stabilne u nagibu blažem od 1:1, uz ograničenu visinu do 7m.



Slika 4. *Zid L2,Zid D2*
(Izvor: IDP-Projekat inženjerskih konstrukcija)

2.2 Projektna rešenja na potezu od km 1+500 do km 2+150

Na delu trase puta od km 1+500 do km 2+150, u geološkoj građi preovlađuje kompleks škriljaca (S*, S*-S) u kojem se mogu izdvojiti zone u zavisnosti od kvaliteta stenske mase.



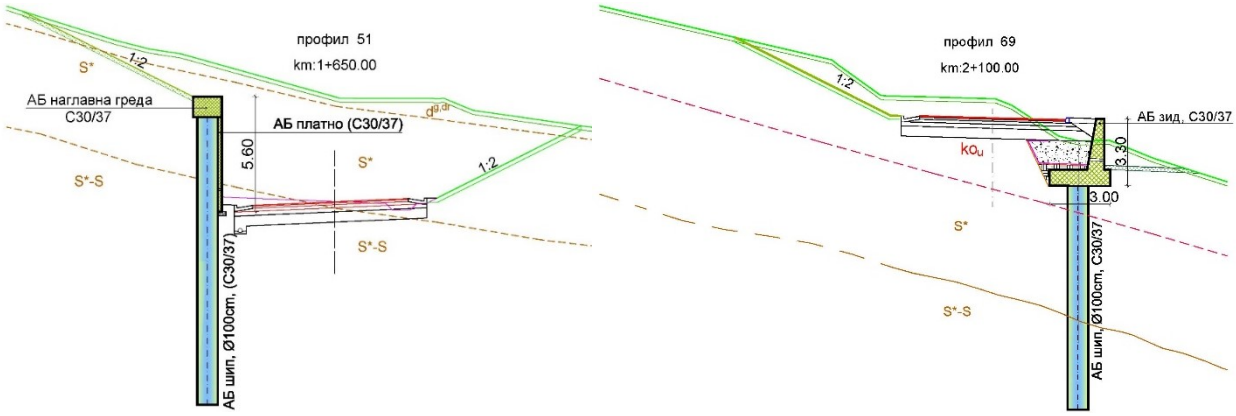
Slika 5. *Podužni geotehnički presek od km 1+500 do km 2+150*
(Izvor: IDP - EL2.1 Elaborat geotehničkih uslova izgradnje trase)

Povlatna fizičko-hemijski degradirana i izmenjena zona škriljaca (S*) je visokog stepena degradiranosti, u kontaktnoj zoni sa površinskim drobinsko-glinovitim naslagama. Ova litološka sredina je raspadnuta do zemljaste mase ili prašinasto-peskovite drobine sa mm-cm fragmentima pretežno glinenih i podređeno peskovitih škriljaca. Sredina je slabo vodopropusna do vodonepropusna, suva do lokalno malo provlažena. Degradirani, oslabljeni i raspadnuti škriljci su podložni eroziji, a u uslovima vodozasićenja, odronjavanju i kliženju. Uslovno stabilne i nestabilne padine su izrazito prisutne na ovom potezu .
Poludegradirana do svežija zona škriljaca -S*-S je nešto boljih fizičko mehaničkih karakteristika. U prisustvu vode ova sredina sklona je razaranju strukture dok je u suvom stanju malo stišljiva do nestišljiva. Usvojene karakteristike za proračune date su u tabeli. Sa porastom dubine, usvojene su gornje vrednosti prikazanih parametara.
Geotehničkim analizama i proračunima, dokazano je da su kosine u kompleksima škriljaca dugoročno stabilne u nagibu blažem od 1:2, uz ograničenu visinu do 7m.

Tabela 3. *Karakteristike škriljci*

Parametri smičuće čvrstoće	**S***	**S*-S**
zapreminska težina γ (kN/m^3)	20.5-21.5	22.0-23.0
ugao unutrašnjeg trenja φ (°)	26-28	29-33
Kohezija c (kPa)	5-8	10-15
modul stišljivosti Mv (kPa)	15000 - 25000	25000 - 40000

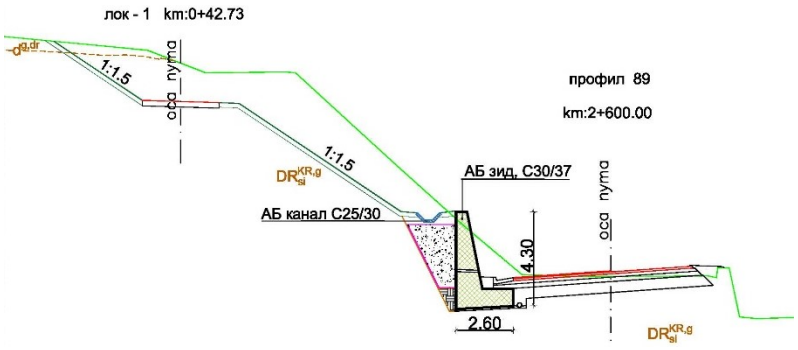
Na ovom delu trase projektovane su duboko fundirane potporne konstrukcije L3,L4,D3,D4 iako je sredina povoljnih karakteristika za fundiranje. Na slici su prikazane tipske konstrukcije za ovaj potez- zavese šipova i potporni zidovi na šipovima.

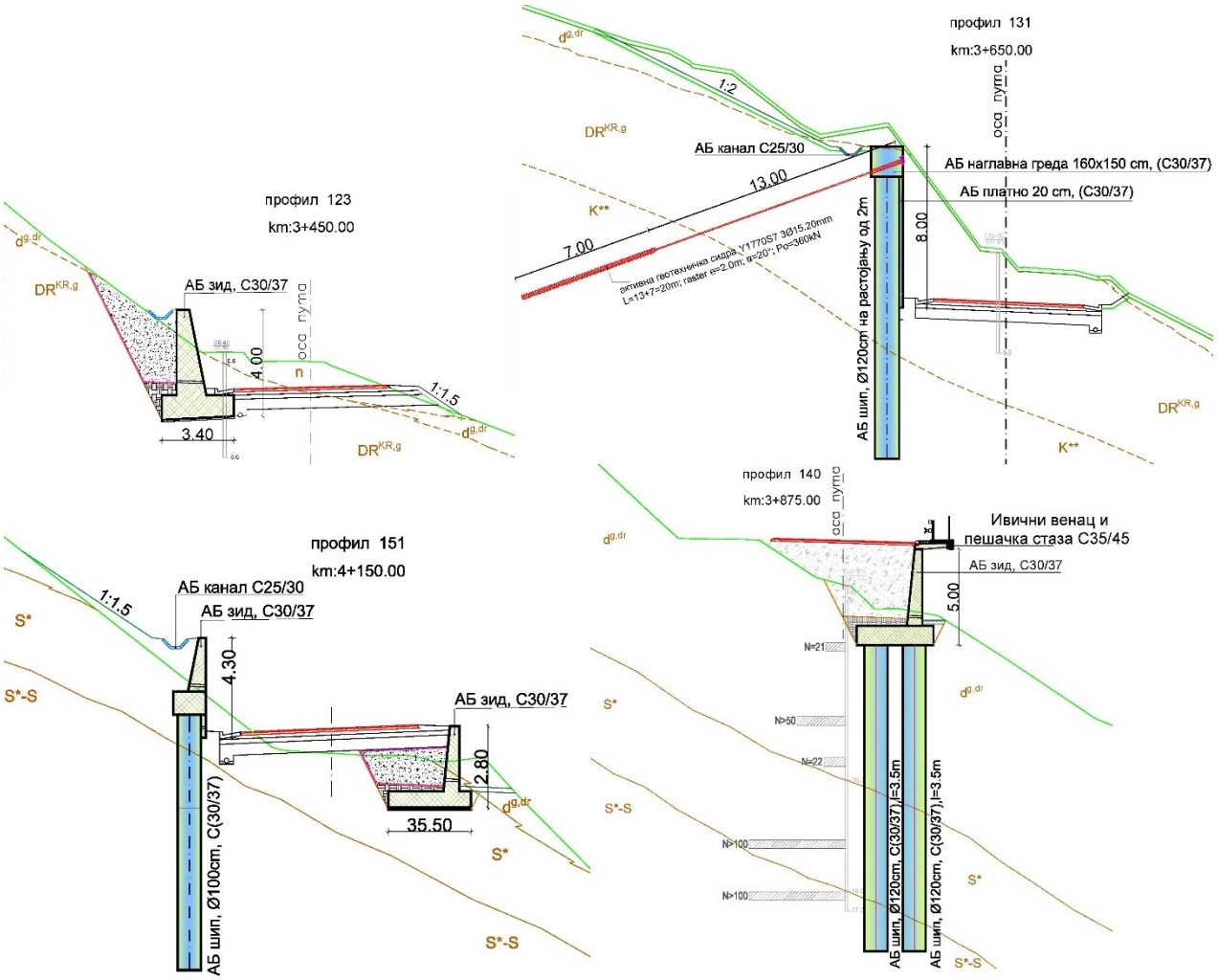


Slika 7. *Zid L3(L4),(D3)D4*
(Izvor : IDP-Projekat inženjerskih konstrukcija)

2.3 Projektna rešenja na potezu od km 2+725 do kraja trase-km 4+800

Od km 2+725 pa do kraja trase km 4+800, smenjuju se potezi sa krečnjačkom drobinom I kompleksom škriljaca. Zastupljena je veoma heterogena litološka građa gde se ne mogu izdvojiti duži potezi samo sa krečnjačkom ili samo sa škriljavom stenskom litološkom građom.
S obzirom da su pojedine konstrukcije na trasi puta već izvedene prema projektnim rešenjima iz 2007. godine a da su izvedene konstrukcije u solidnom stanju, projektom je predviđeno da se trasa puta uklopi u postojeće zidove. Ovo znači da je položaj trase puta uslovljen postojećim izvedenim konstrukcijama.
Na svakoj mikrolokaciji ponaosob, razmatrani su geotehnički uslovi i u skladu s tim projektovana je odgovarajuća potporna konstrukcija. Tipovi konstrukcija su veoma raznoliki zbog heterogenosti geološke građe i morfologije terena.





Slika 9. Tipovi konstrukcija od km 2+725 do km 4+800
(Izvor: IDP-Projekat inženjerskih konstrukcija)

2.4 Geostatički proračuni

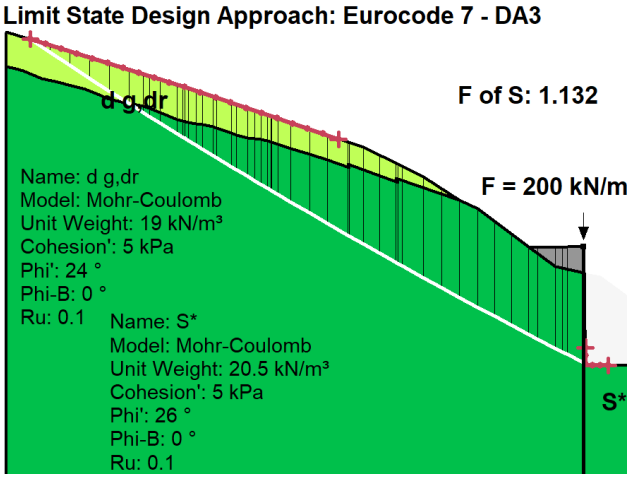
Geostatički proračuni, sprovedeni su razmatranjem dejstava osnovnog opterećenja:

- sopstvena težina konstrukcije;
- pritisak tla iza konstrukcije;
- pokretno (korisno) opterećenje od saobraćaja ;
- seizmičko opterećenje zona 7.0° (stepena) MCS skale – u skladu sa važećim normama sračunat je horizontalni seizmički koeficijenat za horizontalno ubrzanje oscilovanja tla Acc=0.15g.

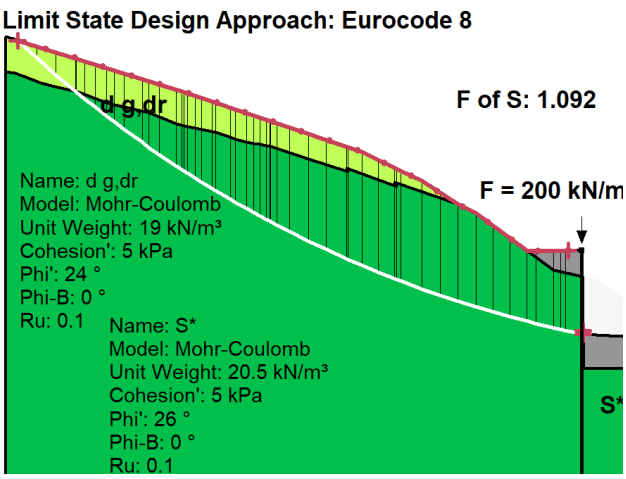
Kontrole globalne stabilnosti izvršene su metodom granične ravnoteže međulamelarnih sila, u skladu sa SRPS EN 1997-1 standardom, koristeći proračunski pristup 3. Kontrolom globalne stabilnosti, za stalnu i seizmičku proračunsku situaciju, određeno je opterećenje koje deluje na potporne konstrukciju, za koje je uslov stabilnosti ispunjen. U pojedinim slučajevima, za sprovođenje neophodnih geostatičkih i statičkih dokaza stabilnosti potporne konstrukcije merodavna je sila po Rankin-u.

Sa dobijenim potrebnim računskim opterećenjem, izvršene su kontrole nosivosti (ULS) i upotrebljivosti (SLS). Proračuni su vršeni u skladu sa SRPS EN 1997-1 standardom, koristeći proračunski pristup 2 za stalnu i seizmičku situaciju.

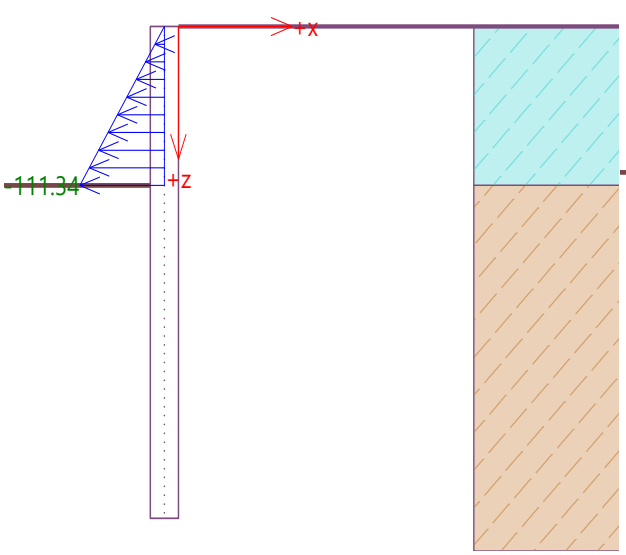
Geostatički i statički proračuni su rađeni kombinacijom geotehničkih softverskih paketa GeoStudio (Slope/W), Slide, GEO-5 kao i Tower softvera za strukturnu analizu konstrukcija.



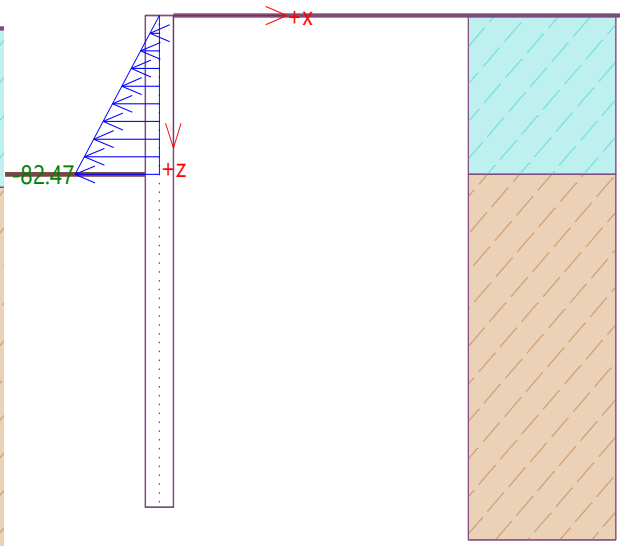
Stalna proračunska situacija



Seizmička proračunska situacija



Model - ULS

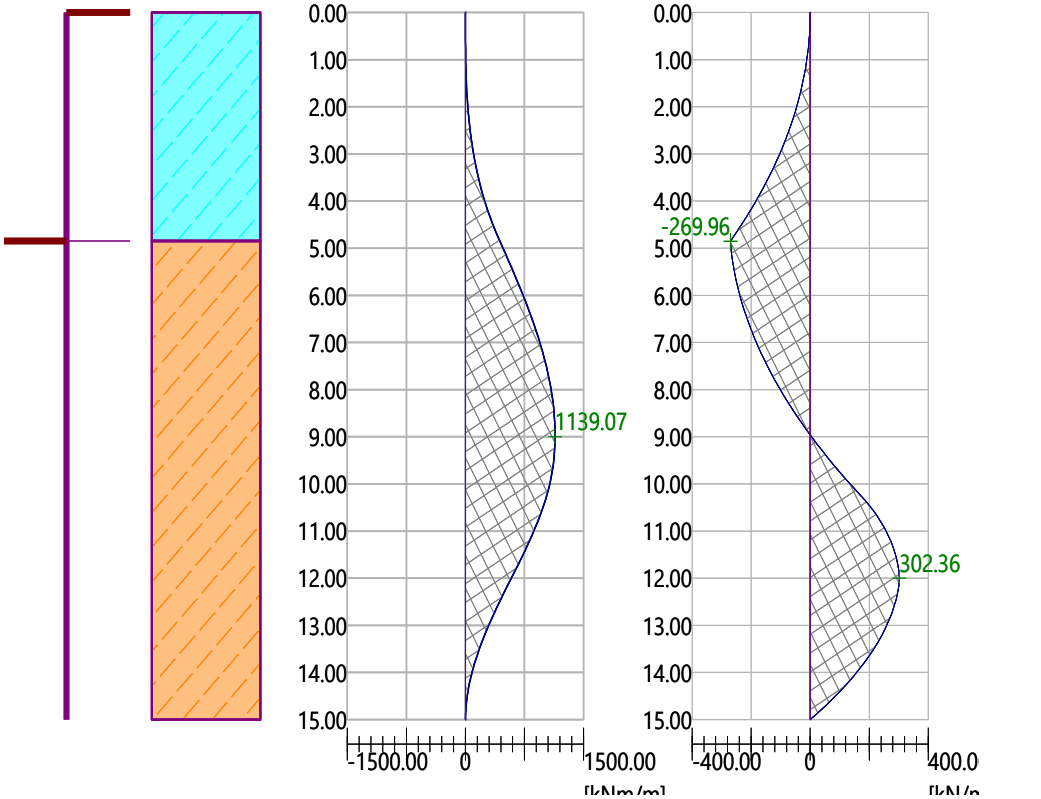


Model - SLS

Geometry of structure
Length of structure = 15.00m

Bending moment
Max. M = 1139.07 kNm/m

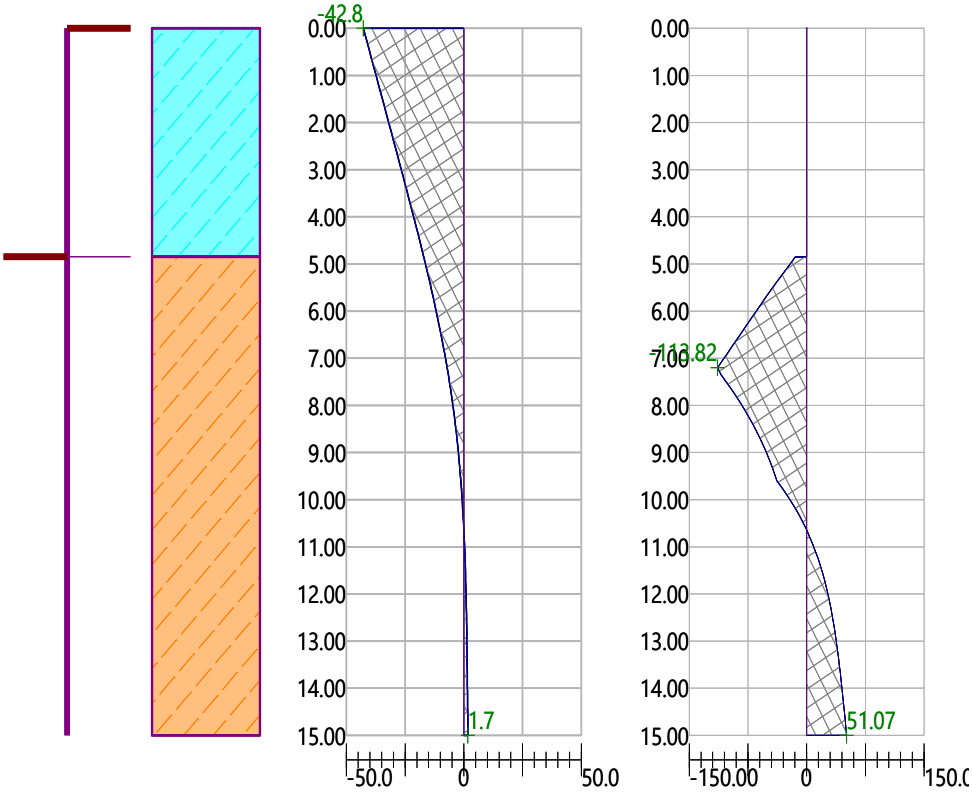
Shear force
Max. Q = 302.36 kN/m



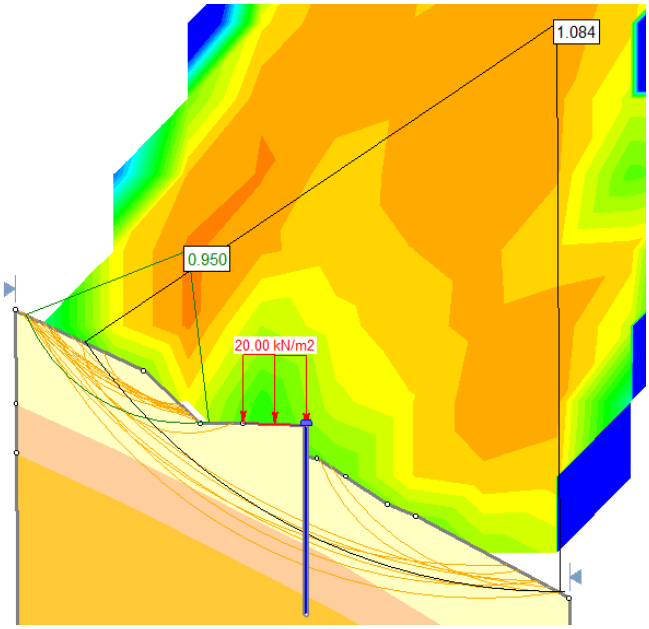
Geometry of structure
Length of structure = 15.00m

Displacement of structure
Max. disp. = 42.8 mm

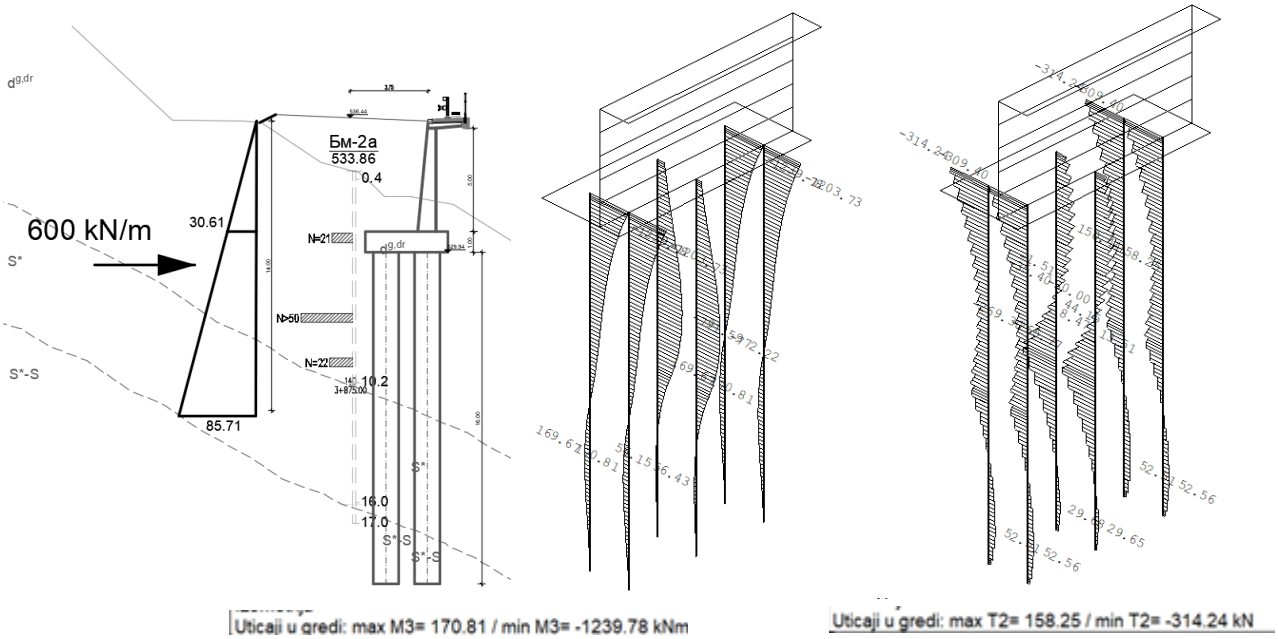
Pressure acting on structure
Max. pressure = 113.82 kPa



Limit State Design Approach: Eurocode 7 - DA3



Material Name	Color	Unit Weight (kN/m3)	Strength Type	Cohesion (kN/m2)	Phi	Water Surface	Ru
d g,dr		19	Mohr-Coulomb	10	24	None	0.1
S*		20.5	Mohr-Coulomb	5	26	None	0.05
S*-S		22	Mohr-Coulomb	10	29	None	0



Slika 9. Primeri proračuna
(Izvo: IDP-Projekat inženjerskih konstrukcija)

3. ZAKLJUČAK

Idejni projekat je izuzetno važna faza projektovanja gde je ključna stvar pravilan odabir trase puta. Iskustvo je pokazalo da je ova faza projektovanja presudna za sva iskustva koja slede tokom projektovanja i izgradnje. Globalno sagledavanje uslova na terenu i pravilan odabir objekata na trasi, doprinosi da se neočekivani troškovi gradnje svedu na minimum. Brdovita morfologija terena zahteva pažljiv odabir rešenja jer su nepredviđeni radovi zbog padinskih procesa veoma cesta pojava.

Literatura

[1] Milošević D., (2023). - Državni put IB - 28 (M-19.1) Užice - Kadinjača - Bajina Bašta deonica: Obilazak Užica, na potezu Zlatiborski put (petlja „Surduk“) - Sinjevac – Volujac (km 0+000 - 4+845),IDP - Idejni projekat , 2/1.3 Projekat inženjerskih konstrukcija, Projektna dokumentacija Institut za puteve, Beograd
[2] Badjić D., (2023) - Državni put IB-28 (M-19.1) Užice – Kadinjača – Bajina Bašta deonica: obilazak Užica, na potezu Zlatiborski put (petlja „Surduk“) – Sinjevac – Volujac IDP - EL2.1 Elaborat geotehničkih uslova izgradnje trase, Projektna dokumentacija Institut za puteve, Beograd
[3] Basurić N., (1992.) - Geotehničke podloge za izradu Glavnog građevinskog projekta magistralnog puta M-19/1 Užice – Kadinjača – Bajina Bašta, deonica obilazak Užica, na potezu Zlatiborski put – Sinjevac – Volujac Projektna dokumentacija Institut za puteve, Beograd
[4] Evrokod 7: Geotehničko projektovanje. Institut za standardizaciju Srbije, Beograd.

ИСКУСТВА И ИЗАЗОВИ У ТОКУ ИЗВОЂЕЊА ХЛАДНЕ РЕЦИКЛАЖЕ У ОКВИРУ ГЛАВНОГ ПРОЈЕКТА ПОЈАЧАНОГ ОДРЖАВАЊА НА ДЕЛУ ДРЖ. ПУТА IБ35 KM 245+531 – KM 249+000

Стефановић Сузана
Институт за путеве АД Београд, suzana.stefanovic@highway.rs
Хаџи-Антић Синиша
Институт за путеве АД Београд, s,hadzi-antic@highway.rs
Стојнић Драган
Институт за путеве АД Београд, d.stojnic@highway.rs
Адамовић Миодраг
Србијааутопут д.о.о., m.adamovic@srbijaautoput.rs

Резиме: *Рад се бави проблемима насталим приликом извођења радова појачаног одржавања на делу деонице држ. пута IБ реда бр.35: Белољин-Куршумлија–Рударе, km 245+531–km 249+000 где је према Главном пројекту предвиђена израда хладне рециклаже дела невезаног носећег слоја у дебљини од 20cm док остатак невезаног носећег слоја (очекиване дебљине 20 – 25cm) остаје нетакнут. Резултати обављених истражних радова Пројектанта пре израде Главног пројекта појачаног одржавања су се поклопили са резултатима истражних радова Извођача пре самог извођења 4 године касније и све је указивало на добру претпоставку структуре постојећег коловоза. Ипак се 2 месеца након израде битуменизираног носећег слоја БНС22сА на површини асфалтног слоја појављују мрежасте пукотине на одређеним потезима предметне деонице. Детаљнија испитивања утврдила су да невезани носећи слој испод хладно рециклираног слоја није постојао или је био знатно мањих дебљина у оси и на десној страни коловозне конструкције у односу на леву страну. Овим се покреће питање потребе додатне безбедности радника при вршењу истражних радова у специфичним случајевима или додатних испитивања постојеће структуре коловоза употребом савременијих технологија (Георадар).*

Кључне речи: *хладна рециклажа, истражни радови, коловозна конструкција*

EXPERIENCES AND CHALLENGES DURING THE EXECUTION OF COLD RECYCLING WITHIN THE MAIN PROJECT OF ENHANCED MAINTENANCE IN THE SECTION OF ROAD IB35 KM 245+531 – KM 249+000

Stefanović Suzana
Highway Institute Belgrade, suzana.stefanovic@highway.rs
Hadži-Antić Siniša
Highway Institute Belgrade, s,hadzi-antic@highway.rs
Stojnić Dragan
Highway Institute Belgrade, d.stojnic@highway.rs
Adamović Miodrag
Србијааутопут д.о.о., m.adamovic@srbijaautoput.rs

Abstract: *The paper deals with the problems that arose during the performance of enhanced maintenance works on part of the section road IB no. 35: Beloljin-Kuršumlija-Rudare, km 245+531–km 249+000 where, according to the Main Project, cold recycling of a part of the unbound bearing layer with a thickness of 20 cm is foreseen, while the rest of the unbound bearing layer (expected thickness of 20 - 25 cm) remains intact. The results of the investigations carried out by the Designer before the development of the Main Project of enhanced maintenance coincided with the results of the investigations carried out by the Contractor before the execution itself 4 years later and everything pointed to a good assumption of the structure of the existing roadway. However, 2 months after the construction of the BNS22sA, alligator cracks appear on the surface of the asphalt layer on certain sections of the section in question. More detailed investigations determined that the unbound bearing layer under the cold recycled layer did not exist or was significantly smaller in thickness in the axis and on the right side of the pavement structure compared to the left side. This raises the issue of the need for additional worker safety when performing investigative work in specific cases or additional testing of the existing roadway structure using more modern technologies (Georadar).*

Keywords: *cold recycling, investigation works, pavement construction.*

1. УВОД

Почетком 2022.године, Институт за путеве а.д. Београд је ангажован од стране фирме Србијааутопут д.о.о. за мерење дефлексија и израду Извештаја о носивости коловозне конструкције на државном путу IБ реда бр.35 деоница: Белољин - Куршумлија – Рударе, на потезу km 245+531 – km 249+000, на ком су се 2 месеца након израде хладне рециклаже дела постојећег невезаног носећег слоја и новог битуменизираног носећег слоја БНС22сА, на слоју БНС22сА појавиле мрежасте пукотине на појединим деловима предметног потеза.

На предметном потезу према решењу из Главног пројекта појачаног одржавања државног пута IБ-35, Белољин - Куршумлија – Рударе, km 237+881 - km 262+052, који је израдио Институт за путеве а.д. 2017/2018.године, пројектним решењем предвиђено је:

- Рушење постојећег коловоза до дубине max. 12cm у односу на новопројектовану нивелету
- Хладна рециклажа постојећег невезаног слоја.....d=20cm
- Израда битуменизираног носећег слоја БНС22сА…….d=7cm
- Израда хабајућег слоја АБ11с…….d=5cm

Да би се открио узрок појаве пукотина, Извођач (Србијааутопут д.о.о.) је извео додатне истражне јаме на местима оштећења. Овај рад се бави приказом утврђеног чињеничног стања на предметној деоници.

2. ИСПИТИВАЊА

Испитивања која су вршена на предметној деоници, рађена су у више фаза. Структура је испитивана током година:

- 2011, 2017 - приликом израде Главног пројекта појачаног одржавања државног пута IБ-35, Белољин - Куршумлија – Рударе, km 237+881 - km 262+052, 2017.год,
- 2022 - непосредно пре почетка извођења радова и
- у марту 2023.године измерене су дефлексије на новоизграђеном слоју БНС22сА.

2.1. Мерење дефлексија

2.1.1. Хронологија мерења дефлексија

Дефлексије, као показатељи стања структуре утврђени недеструктивном методом, измерене су тешким дефлектометром са падајућим теретом (HWD 8081- Dynatest), у априлу, 2017. год. и у јулу и августу 2022.год, на постојећем коловозу, ради потврде стања коловоза у односу на период пројектовања. У марту 2023. год. мерене су дефлексије на изведеном слоју БНС-а.

Избором терета и висине пада, наношена је сила од ~50 kN на кружну плочу пречника ∅300 mm, која је била постављена на површину коловоза. Контактно оптерећење је било ~707 kPa. На свакој мерној тачки на коловозу, извршена су 3 ударца.

У току израде Главног пројекта појачаног одржавања, 2017.год, мерење је вршено у трагу точка на сваких 100 m, при температури асфалта Тасф = 17-29°C.
За потребе израде Извештаја о промени носивости коловозне конструкције у односу на стање 2017.год, државни пут IБ реда бр.35, деоница: Белољин - Куршумлија – Рударе, km 240+346 – km 241+556, дужина L1= 1210 m, km 245+531 – km 250+741, дужина L2= 5210 m, km 251+741 – km 252+300, дужина L3= 559 m, km 252+300– km 262+150, дужина L4= 9850 m, у јулу и августу 2022.год. су извршена мерења дефлексија на наведеним потезима, укупне дужине L= 16829m, на којој нису започети радови на коловозу. Мерење је вршено ноћу, у трагу точка на сваких 200m у свакој траци при температури асфалта $T_{асф}$ = 10-21°C.

Приликом израде Главног пројекта, анализа носивости није рађена одвојено за леву и десну страну коловоза, тако да су ради упоређења и анализе промене носивости коловозне конструкције дефлексије мерене 2017.год. и 2022.год. кориговане на исти начин.

Након појаве пукотина на новом слоју БНС-а, вршено је мерење дефлексија на сваких 100m у левој и десној траци и у осовини. На потезима на којима је уочена појава пукотина мерења су вршена на сваких 20m у левој и десној траци и у осовини. Мерење је при температури асфалта Тасф = 18-20°C.

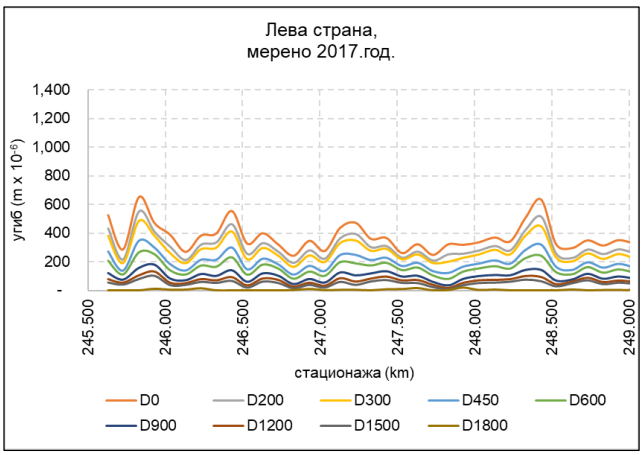
Ради адекватног поређења све дефлексије су кориговане на референтну температуру од 20°C и на силу оптерећења од 50kN.

2.1.2. Фактори корекције због температуре

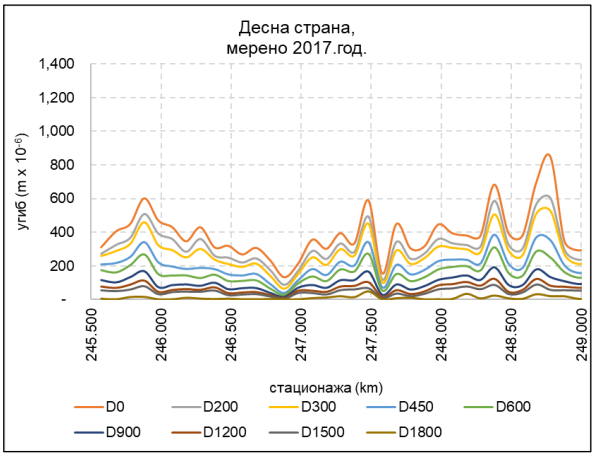
Одређивање фактора корекције угиба за површине са асфалтним застором, због температуре, вршено је према Моделу за факторе корекције угиба флексибилних и полукрутих коловозних конструкција[1]. Прорачун температуре асфалтних слојева извршен је на основу температуре површине коловоза и средње температуре ваздуха 1 дан пре извођења мерења, у складу са поступком који су дефинисали Lukanen, E., R.S. Stad и R. Briggs[2], 2000. године.

2.1.3. Поређење дефлексија измерених 2017. и 2022.год.

На следећим дијаграмима приказане су вредности измерених дефлексија коригованих на референтну температуру од 20°C и на силу оптерећења од 50kN, посебно за десну и леву траку коловоза:



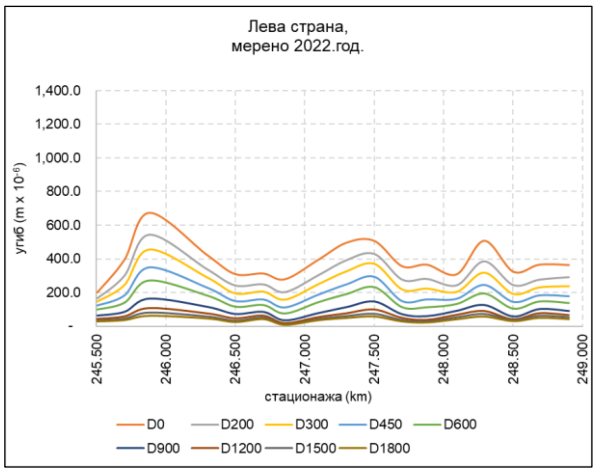
слика 1: Вредности измерених дефлексија, потез km 245+500 – km 249+000, лева страна, мерено 2017.год.



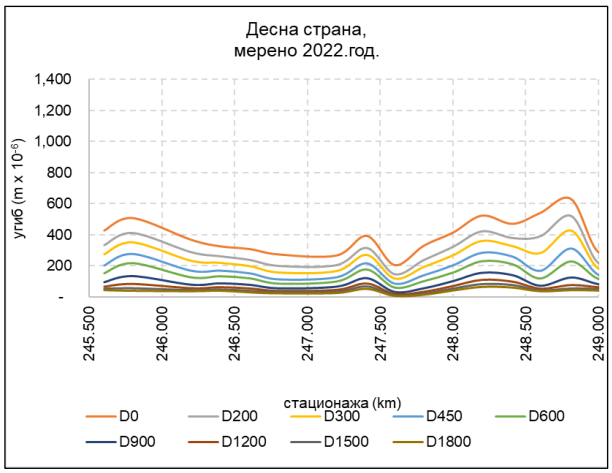
слика 2: Вредности измерених дефлексија, потез km 245+500 – km 249+000, десна страна, мерено 2017.год.

[1] РАЗВОЈ МОДЕЛА ЗА ФАКТОРЕ КОРЕКЦИЈЕ УГИБА ФЛЕКСИБИЛНИХ КОЛОВОЗНИХ КОНСТРУКЦИЈА С ОБЗИРОМ НА ТЕМПЕРАТУРУ - Младеновић Горан (Универзитет у Београду, Грађевински факултет), Иштока Отковић Ирена Свеучилиште Јосипа Јурја Строссмауера у Осијеку, Грађевински и Архитектонски факултет Осијек, Орешковић Марко (Универзитет у Београду, Грађевински факултет)

[2] Lukanen, E., R.S. Stand and R. Briggs, 2000. Temperature prediction and adjustment factors of asphalt pavement. Office of Infrastructure Research and Development Federal Highway Administration. McLean, Virginia.



слика 3: Вредности измерених дефлексија, потез km 245+500 – km 249+000, лева страна, мерено 2022.год



слика 4: Вредности измерених дефлексија, потез km 245+500 – km 249+000, десна страна, мерено 2017.год.

Карактеристичне вредности дефлексија по потезима, за мерења и 2017.год. и 2022.год, приказане су у следећој табели:

Табела 1. Карактеристичне вредности дефлексија, за мерења и 2017.год. и 2022.год

Стат. под.	Измерене дефлексије (10^{-3} mm)									SCI $d_0 - d_{200}$[3]	BDI $d_{600}-d_{900}$[4]
	$d_{0,\text{кор.}}$	d_{200}	d_{300}	d_{450}	d_{600}	d_{900}	d_{1200}	d_{1500}	d_{1800}		
km 245+531 - km 249+000, лева страна											
2017.год.											
avg	376	310	275	201	158	101	70	52	4	66	118
stdev	103	88	79	59	48	33	25	20	6	18	36
kv	0.27	0.28	0.29	0.29	0.30	0.33	0.36	0.38	1.37	0.27	0.31
85%	**474**	**411**	**382**	**272**	**207**	**136**	**95**	**69**	**10**	**83**	**160**
2022.год.											
avg	387	304	252	190	149	93	65	49	39	83	103
stdev	111	92	79	63	50	34	24	18	15	22	32
kv	0.29	0.30	0.32	0.33	0.34	0.36	0.37	0.37	0.37	0.27	0.31
85%	**503**	**390**	**324**	**246**	**193**	**124**	**87**	**68**	**55**	**100**	**131**
km 245+531 - km 249+000, десна страна											
2017.год.											
avg	390	319	281	204	158	99	66	49	8	71	123
stdev	149	119	107	79	63	40	28	20	11	36	50
kv	0.38	0.37	0.38	0.39	0.40	0.41	0.42	0.42	1.28	0.51	0.40
85%	**467**	**390**	**332**	**252**	**204**	**133**	**91**	**67**	**18**	**91**	**174**
2022.год.											
avg	390	304	250	188	147	94	65	47	37	86	103
stdev	118	100	84	66	53	35	24	18	14	23	38
kv	0.30	0.33	0.34	0.35	0.36	0.37	0.37	0.38	0.39	0.26	0.37
85%	**518**	**405**	**344**	**271**	**217**	**133**	**87**	**63**	**49**	**100**	**130**

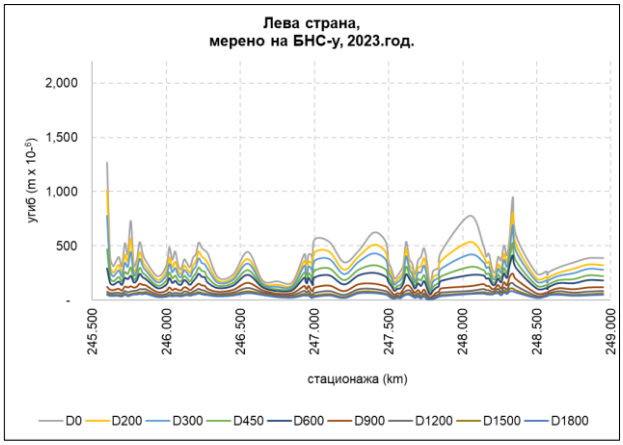
На основу приказаних резултата може се закључити:

- уочено је увећање дефлексија просечно 20%, што указује на пад носивости коловоза у односу на стање 2017.год.
- **Просечне вредности дефлексија су у истом распону и на левој и десној страни, не указују на значајнију разлику у структури и дебљини коловозне конструкције**

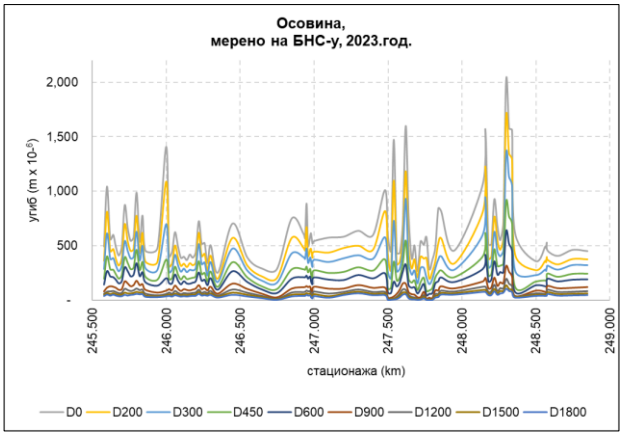
[3] *SCI – Индекс закривљености површине*
[4] *BDI – Индекс оштећења подлоге*

2.1.4. Резултати мерења дефлексија на површини новог БНС-а

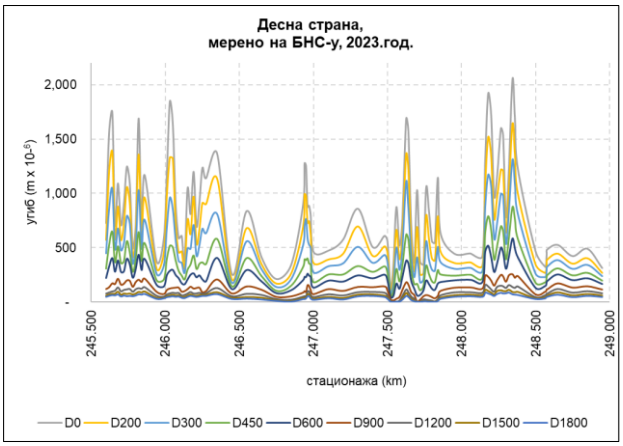
На следећимм дијаграмима приказане су вредности измерених дефлексија коригованих на референтну температуру од 20°C и на силу оптерећења од 50kN, посебно за сваку траку коловоза и осовину:



Слика 5: Вредности измерених дефлексија, потез km 245+500 – km 249+000, лева страна, мерено на слоју БНС-а, 2023.год.



Слика 6: Вредности измерених дефлексија, потез km 245+500 – km 249+000, осовина, мерено на слоју БНС-а, 2023.год.



Слика 7: Вредности измерених дефлексија, потез km 245+500 – km 249+000, десна страна, мерено на слоју БНС-а, 2023.год.

Уочено је **значајно увећање дефлексија на десној страни, делом у осовини** у односу на стање 2022.год.

2.1.5. Анализа носивости постојеће коловозне конструкције према методи AASHTO

Анализа носивости постојеће коловозне конструкције и прорачун потребног појачања, заснива се на Revised AASHTO overlay design procedure / 1993 [5]исказује носивост постојеће коловозне конструкције ефективним структурним бројем SN_{eff}. Прорачун структурног броја постојеће коловозне конструкције SN_{eff} могућ је на основу:

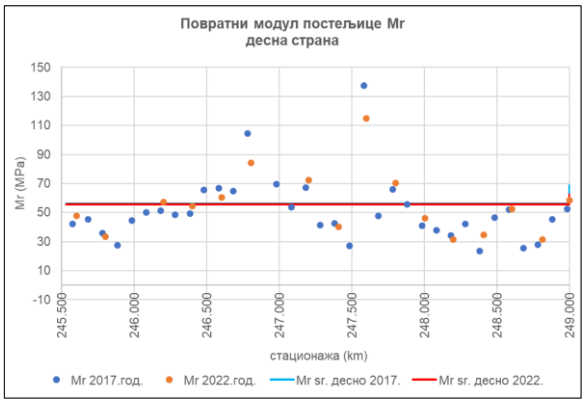
- дефлексија површине коловоза
- оштећености површине коловоза
- преосталог века коловозне конструкције коришћењем сазнања о обиму протеклог саобраћајног оптерећења.

За потребе овог пројекта прорачун структурног броја постојеће коловозне конструкције SN_{eff}, Ефективног модула постојеће конструкције Ep и повратни модул постељице Mr, срачунати су на основу измерених дефлексија.

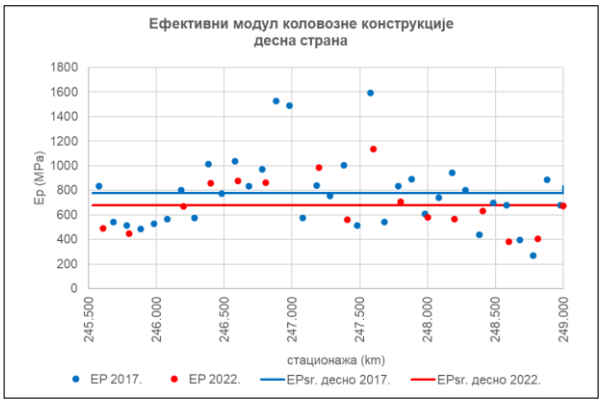
2.1.5.1. Носивост коловоза утврђена 2017. и 2022.год.

На следећим дијаграмима дат је приказ вредности повратног модула постељице, ефективног модула коловозне конструкције, појединачне и средње вредности, добијене на основу мерења дефлексија 2017.год. и 2022.год.

Напомена: При прорачуну су коришћени подаци о структури коловоза из Главног пројекта појачаног одржавања и Елаборат истражних радова на коловозу на деоници Белољин – Куршумлија – Рударе (237+881 – 262+052), урађеног од стране извођача радова "Србијааутопут" д.о.о. Београд.

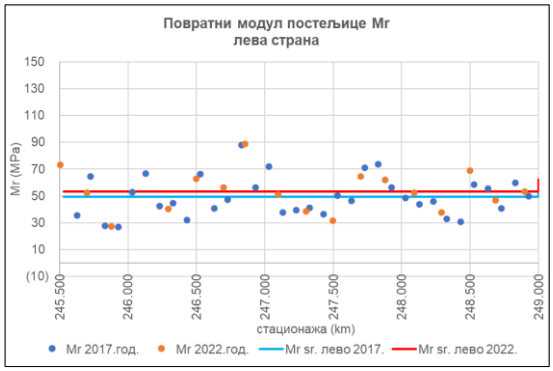


Слика 8. Повратни модул постељице, десна страна

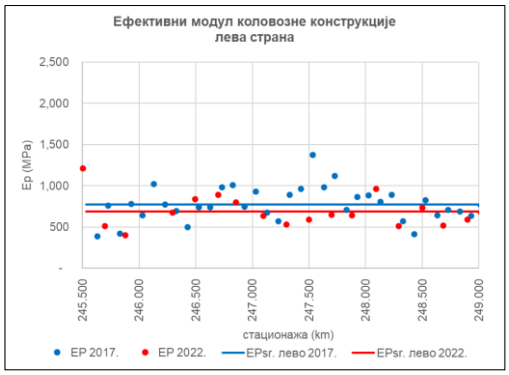


Слика 9. Ефективни модул коловозне конструкције, десна страна

[5] *AASHTO Guide for Design of Pavement Structures 1993, American Association of the State Highway and Transportation Officials*



Слика 10. Повратни модул постељице, лева страна



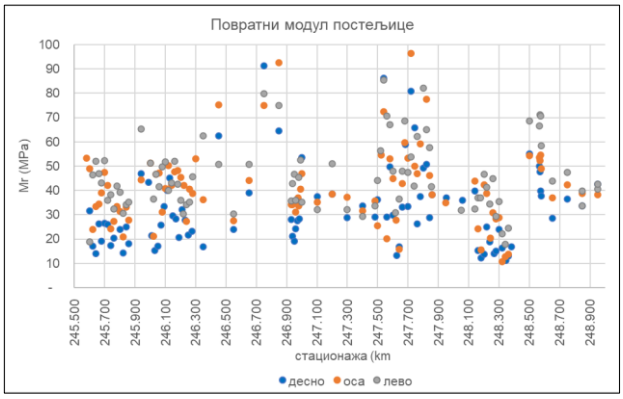
Слика 11. Ефективни модул коловозне конструкције, лева страна

На основу приказаних резултата може се закључити да је у периоду од 2017.-2022.год. уочен пад носивости постојећег коловоза изражене преко ефективног модула коловозне конструкције, ~10%, док је вредност повратног модула постељице приближно исти, Mr = 49 – 56 MPa.

2.1.5.2. Носивост коловоза након изведене рециклаже и битуменизираног слоја, 2023.год.

На следећим дијаграмима дат је приказ вредности повратног модула постељице и ефективног модула коловозне конструкције, добијене на основу мерења дефлексија 2023.год. на битуменизираном слоју.

При прорачуну ефективног модула коловозне конструкције узети су обзир нови подаци о дебљини коловозне конструкције.



Слика 12. Повратни модул постељице, 2023.год.

Слика 13. Ефективни модул коловозне конструкције, 2023.год.

Уочава се **значајни пад повратног модула** постељице на десној страни. Средња вредност повратног модула постељице износи **$Mr_{пр.-десно}$=36 MPa,** на појединим потезима **$Mr_{пр.-десно}$=26-27 MPa**, док је 2017. и 2022.год. добијена вредност $Mr_{пр-десно}$=56 MPa ⇒ указује на повећану влажност подлоге.

На левој страни средња вредност повратног модула постељице износи **$Mr_{пр-лево}$=47 MPa**, док је 2017. и 2022.год. добијена вредност $Mr_{рг-лево}$=49-53 MPa. ⇒ очекивано за ту врсту материјала.

Средња вредност ефективни модул коловозне конструкције на десној страни износила је 2017.год. $Ep_{,2017.}$= 776 MPa, 2022.год. $Ep_{,2022.}$= 677 MPa, док је мерењем 2023.год. утврђена вредност $Ep_{,2022.}$= 474 MPa, као и у осовини $Ep_{,2022.}$= 479 MPa.

На левој средња вредност ефективни модул коловозне конструкције износила је 2017.год. $Ep_{,2017.}$= 775 MPa, 2022.год. $Ep_{,2022.}$= 688 MPa, док је мерењем 2023.год. утврђена вредност $Ep_{,2022.}$= 773 MPa.

2.2. Оцена стања коловоза са аспекта оштећености

Подаци о оштећености коловоза, прикупљени су континуалним и детаљним визуелним прегледом уз одмеравања и стационирање у септембру 2017 године, у складу са PAVER методологијом и каталозима (врста хабајућег слоја; тип, интезитет и количина оштећења).

Визуелним снимањем је утврђено је следеће:

- тип застора
- интезитет сваког запаженог типа оштећења (ознаке L, M или H)
- количина запаженог оштећења

На основу прикупљених података о оштећености коловозног застора на предметном потезу уочена је појава и утврђени су следећи типови оштећења:

- мрежасте пукотина типа крокодилске коже – структурне пукотине
- улегнућа

У следећој табели дат је приказ оштећености уочен 2023.год., након извођења слоја рециклаже и БНС-а, као и 2017.год. приликом израде пројекта, према хомогеним потезима по оштећености из 2023.год.

Табела 2. оштећеност 2023.год., на слоју новог БНС-а и 2017.год. приликом израде пројекта, према хомогеним потезима по оштећености из 2023.год.

Од km	До km	Оштећеност 2017.год.	Оштећеност 2023.год.
245+580	245+860	Мрежасте пукотине преко целе површине средњег интензитета, у средини високог интензитета са улегнућем.	Мрежасте пукотине средњег интензитета уз десну ивицу, ширине 1.0 m, повремено у осовини.
245+860	245+985	Задњих 40m обострано, по пола траке уз ивицу, мрежасте пукотине средњег интензитета са улегнућем средњег интензитета.	
245+985	246+280	- Првих 50m десно пола траке мрежасте пукотине средњег интензитета са улегнућем средњег интензитета, повремено мрежасте пукотине средњег интензитета на обе траке, - од km 246+163 – km 246+261 мрежасте пукотине средњег интензитета по средини.	Мрежасте пукотине средњег интензитета делом уз десну ивицу делом у осовини, ширине 0.4 – 1.0 m.
246+280	246+920	Првих 80m десно уз ивицу мрежасте пукотине средњег интензитета са улегнућем средњег интензитета.	
246+920	246+990	Десно уз ивицу мрежасте пукотине средњег интензитета са улегнућем средњег интензитета.	Мрежасте пукотине средњег интензитета уз десну ивицу, ширине 0.5 m
246+990	247+470	Последњих 20m мрежасте пукотине средњег интензитета са улегнућем средњег интензитета преко обе траке.	
247+470	247+870	Обострано јако лоше, мрежасте пукотине средњег до високог интензитета са улегнућем средњег интензитета преко обе траке.	Мрежасте пукотине средњег интензитета уз десну ивицу, ширине 1.0 – 1.5 m, повремено у осовини и уз леву ивицу, 0.5 – 1.0 m .
247+870	248+125	Десно уз ивицу мрежасте пукотине средњег интензитета са улегнућем нижег интензитета.	
248+125	248+385	Мрежасте пукотине средњег интензитета по средини и уз десну ивицу са улегнућем. Последњих 20m преко обе траке.	Мрежасте пукотине средњег интензитета уз десну ивицу, ширине 0.3 – 1.0 m, делом у осовини, ширине 1.0 – 1.5 m
248+385	248+560	Мрежасте пукотине средњег интензитета преко обе траке.	

Од km	До km	Оштећеност 2017.год.	Оштећеност 2023.год.
248+560	248+581	Мрежасте пукотине средњег интензитета у десној траци.	Мрежасте пукотине средњег интензитета у осовини, ширине 0.3 m
248+581	249+000	До km 248+810 јако лоше, мрежасте пукотине средњег до високог интензитета са улегнућем средњег интензитета	

Из приложене табеле, уочени су потези где се још нису појавиле пукотине, иако је 2017.год. уочено слично стање са аспекта оштећености.

2.3. Структура постојеће коловозне конструкције

Састав постојеће коловозне конструкције и дебљине слојева утврђени су бушењем истражних јама (уз ивицу коловоза), са залажењем у доњи строј пута. Радови су изведени у септембру 2017. године. На предметном потезу је ископано 4 истражне бушотине.

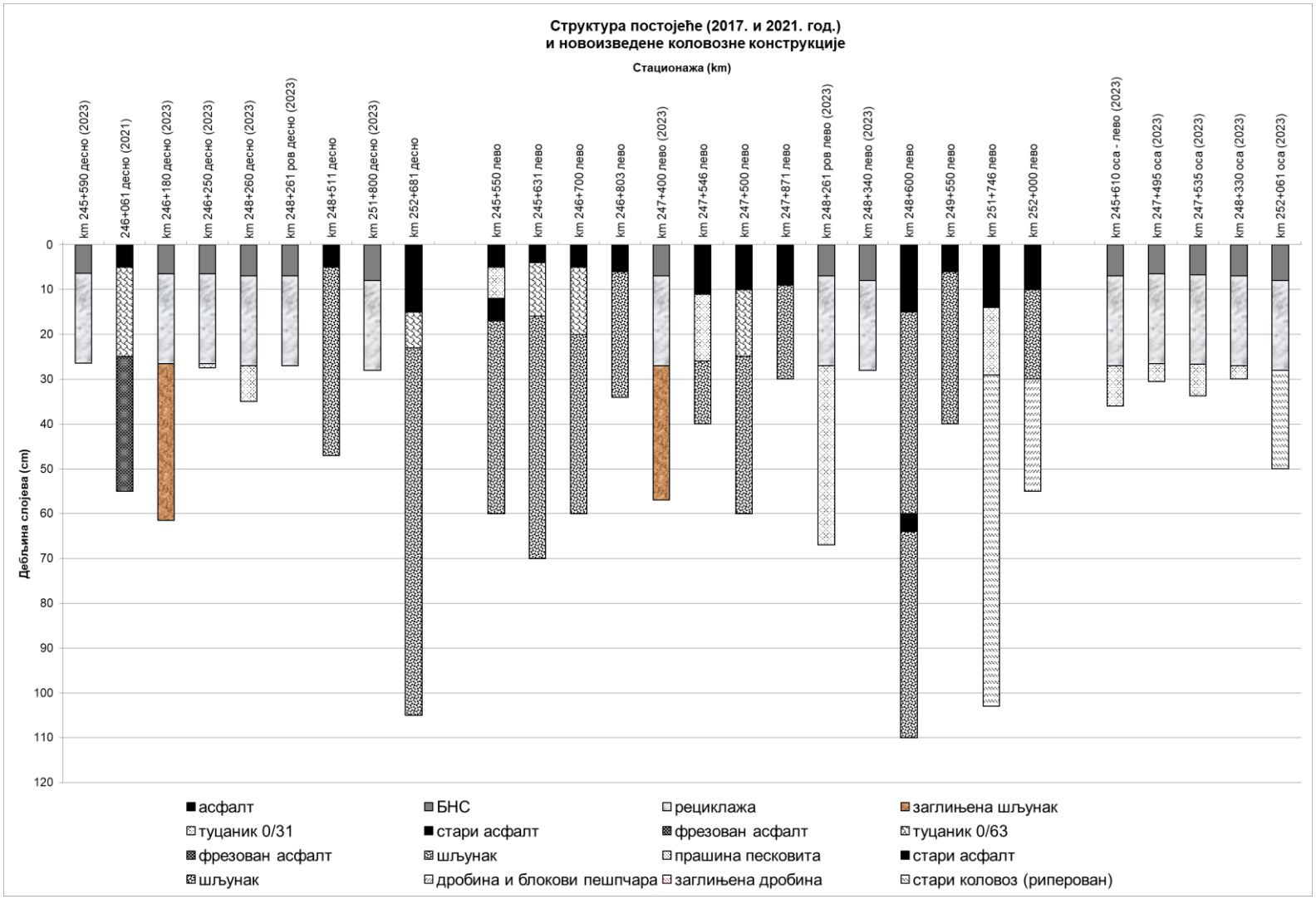
На основу утврђених дебљина и врсте уграђеног материјала у постојећу коловозну конструкцију Пројектант је за даљи прорачун усвојио просечне дебљине слојева коловоза. За прорачун потребног појачања за предметну деоницу усвојена је дебљина постојећег коловоза од 40-70 cm.

За потребе израде претходне мешавине за слој хладне рециклаже Извођач је извршио ископ јама у новембру 2021.год. Извршен је ископ 4 јаме на међусобном растојању од ~1km.

Подаци о утврђеној дебљини и структури коловоза добијени ископом јама у новембру 2021.год. не одступају од података добијених током истражних радова за потребе израде Главног пројекта одржавања.

Извођач је у новембру 2022,год. извео све предвиђене позиције радова, сем хабајућег слоја. Након 2 месеца, у јануару су уочене појаве мрежастих пукотина. Да би открио узрок појаве пукотина, Извођач је у зони појаве пукотина извео додатне истражне јаме.

На следећој слици дат је приказ структуре коловоза допуњен и са подацима из 2023.год. Ради лакшег сагледавања јаме су сортиране на основу положаја у попречном профилу.



Слика 14. Структура коловоза утврђена 2017.год.и 2021.год. допуњена подацима из 2023. након извођења слоја рециклаже и БНС-а

Утврђено је да испод хладно рециклираног слоја на већини локација, на десној страни коловоза, нема или је у малој дебљини је присутан невезани слој. Такво стање знатно одступа од утврђеног 2017. и 2021.год. Ископ истражних јама и 2017. и 2021.год. вршен је углавном на левој страни коловоза из безбедносних разлога сходно пројектном задатку. Резултати осталих истражних радова, мерење дефлексија и снимање оштећености, су били слични за обе траке, тако да нису указивали на различиту носивост коловоза леве у односу на десну траку, што би указало на различиту дебљину коловоза и условило додатна истраживања.

Табела 3. Дебљина слојева и врсте материјала коловозне конструкције након израде слоја хладне рециклаже и БНС22сА, 2023.год.

Записник о примећеним пукотинама на изведеном слоју БНС22сА на потезу km 245+000 - km 249+000		
Дебљина слоја (cm)	**Материјал**	**Нема невезаног слоја. Не задовољава**. По пројекту очекивано испод рециклаже минимум 20-25 cm шљунка
J- 1 km 245+590, десно (2023.)		
6,4	БНС22сА	
20	рециклажа	
Прашинасто глиновити материјал		
J- 5 km 245+610, оса - лево (2023.)		**Не задовољава**. По пројекту очекивано испод рециклаже минимум 20-25 cm шљунка
6,7	БНС22сА,	
20	рециклажа	
9	Невезани слој	
Прашинасто глиновити материјал		
J- 2 km 246+250, десно (2023.)		
6,4	БНС22сА	
20	рециклажа	
1	Невезани слој	
Глиновити песак		
J- 6 km 246+180, десно (2023.)		**Задовољава**. По пројекту очекивано испод рециклаже минимум 20-25 cm шљунка
6,5	БНС22сА	
20	рециклажа	
35	Невезани слој	
Глиновити шљунак		
J- 7 km 247+495, оса (2023.)		**Не задовољава**. По пројекту очекивано испод рециклаже минимум 20-25 cm шљунка
6,7	БНС22сА	
20	рециклажа	
4	Невезани слој	
Прашинасто глиновити материјал		
J- 3 km 247+535, оса (2023.)		
6,7	БНС22сА,	
20	рециклажа	
7	Невезани слој	
Прашинасто глиновити материјал		
J- 8 km km 248+260, десно (2023.)		
7	БНС22сА,	
20	рециклажа	
8	Невезани слој	
Прашинасто глиновити материјал		
J- 4 km km 248+330, оса (2023.)		
7	БНС22сА,	
20	рециклажа	
3	Невезани слој	
Прашинасто глиновити материјал		

3. ЗАКЉУЧАК

Након добијања одобрења, од стране Наручиоца, на достављени Програм истражних радова, 2017.године извршени су геотехнички истражни радови, као и радови предвиђени за оцену стања постојећег коловоза. Ископ контролних истражних јама од стране Извођача извршен је непосредно пред почетак радова, у новембру 2021.године. Ископ истражних јама и 2017. и 2021.год. вршен је углавном на левој страни из разлога безбедности самих радника.

Просечне вредности дефлексија измерених током пројектовања 2017.год. и непосредно пре извођења радова 2022.год. су у **истом распону и на левој и десној страни**, тако да нису указивале на значајну разлику са аспекта носивости коловоза.

На основу анализе оштећености и носивости коловоза није се могло доћи до закључка да постоји значајна разлика у структури и дебљини коловозне конструкције односно ништа није указивало да је на десној страни много мања дебљина тампонског слоја.

Мерење дефлексија 2023.год. вршено је у марту, после отапања снега и кишовитог периода тако да је то могло имати мали утицај на добијене вредности. Поред тога, подлога је од глиновитог материјала, а десна страна је у засеку, са великим бројем потпорних зидова, а коловозна конструкција није имала потребну дебљину тампона којом би било омогућено брже отицање воде и којом би се смањио доток воде у глиновиту подлогу, што је узроковало повећану влажност подлоге и значајан пад вредности повратног модула постељице на десној страни. Пад вредности повратног модула постељице и мања дебљина коловозне конструкције (изостанак претпостављеног преосталог невезаног носећег слоја) су проузрокавале и ниже вредности ефективног модула коловозне конструкције на десној страни и осовини.

Како би се у будућем раду смањиле могућности појаве наведених проблема требало би у будућности размислити о примени савременијих технологија за утврђивање постојеће структуре коловоза у комбинацији са деструктивним методама, поготово у случајевима конструкција у засеку. Поред тога неопходно је продужење рока планираног за вршење истражних радова, који су основни улазни параметри приликом пројектовања.

Захвале

Аутори се захваљују Јовици Стевановићу и Чедомиру Љубисављевићу на несебичној сарадњи при изради Извештаја о носивости коловозне конструкције на државном путу IБ реда бр.35 деоница: Белољин - Куршумлија – Рударе, на потезу km 245+531 – km 249+000, на основу ког је и настао овај рад.

Литература

[1] AASHTO Guide for Design of Pavement Structures 1993, American Association of the State Highway and Transportation Officials.

[2] Младеновић Горан, Иштока Отковић Ирена, Орешковић Марко - Развој модела за факторе корекције угиба флексибилних коловозних конструкција с обзиром на температуру - Зборник радова - 4. српски конгрес о путевима, Београд, 2- 3. јун 2022., 2022

THE EFFICIENCY OF CHEMICAL ADDITIVES FOR WARM MIX ASPHALT (WMA): LATEST ADVANCES AND CASE STUDIES

Shahin Eskandarsefat[1] , Matteo Fumagalli[2], Loretta Venturini[3], Zoran Krušić[4]
[1-3] Iterchimica S.p.A., Italy, [4] HSH Chemie d.o.o., Serbia

Abstract: As sustainable road pavements are considered the transportation infrastructures' resource management pivot, green materials and technologies have gotten more attention. Among these, asphalt recycling and low-temperature production, which allow sustainability targets, have been the most efficient used techniques. Warm Mix Asphalt (WMA) enables various technical, environmental, and economic advantages and can be used even for a specific technical target. This paper introduces several WMA case studies in Serbia and Germany. In these projects, asphalt pavements were produced via WMA technology for different reasons e.g., to enhance the compactability of asphalt at reduced laying temperature. This condition is common for road paving projects in cold climate regions or long-distance hauling cases. Regardless of the defined technical goal, the practical in situ observations and pre-/post production laboratory tests of these projects show promising results on using chemical WMA additives for various technical targets of asphalt paving projects. These obtained results are backed up with the results from investigating the cores taken from the job site.

Keywords: Sustainable road pavements, Green materials and technologies, Warm Mix asphalt (WMA), Compactability, Chemical additives.

EFIKASNOST HEMIJSKIH ADITIVA ZA TOPLU ASFALTNU MEŠAVINU (WMA): NAJNOVIJA UNAPREĐENJA I PRIMERI IZ PRAKSE

Apstrakt: Pošto se održivi kolovozi smatraju osnovom za upravljanje resursima transportne infrastrukture, zeleni materijali i tehnologije su dobili više pažnje. Među njima, reciklaža asfalta i proizvodnja na sniženim temperaturama, koji omogućavaju ciljeve održivosti, su najefikasnije korišćene tehnike. Topla asfaltna mešavina (WMA) omogućava različite tehničke, ekološke i ekonomske prednosti i može se koristiti čak i za određeni tehnički cilj. Ovaj rad predstavlja nekoliko studija slučaja WMA u Srbiji i Nemačkoj. U ovim projektima asfaltni kolovozi su proizvedeni pomoću WMA tehnologije iz različitih razloga, na primer, da bi se poboljšala ugradljivost asfalta pri sniženoj temperaturi polaganja. Ovo stanje je uobičajeno za projekte asfaltiranja puteva u regionima sa hladnom klimom ili za slučajeve transporta na velike udaljenosti. Bez obzira na definisani tehnički cilj, praktična posmatranja na terenu i laboratorijska ispitivanja pre i posle ovih projekata pokazuju obećavajuće rezultate u korišćenju hemijskih WMA aditiva za različite tehničke ciljeve projekata asfaltiranja. Ovi dobijeni rezultati su potkrepljeni rezultatima istraživanja uzoraka asfalta uzetih sa gradilišta.

Ključne reči: Održivi kolovozi, Zeleni materijali i tehnologije, Topla asfaltna mešavina (WMA), Ugradljivost, Hemijski aditivi.

1. INTRODUCTION

1.1. Sustainable asphalt production techniques

Ever-increasing environmental challenges have made engineers concentrate more on the principles of sustainability. Within infrastructures, the road pavement sector is considered one of the largest consumer of materials and thus plays a key role in the sustainability of transportation systems. Consequently, many technologies have been introduced and applied aiming at reducing the environmental impact of construction and maintenance of roads. These technologies involve mainly asphalt re-using/recycling, recycled-based additives, and Warm Mix Asphalt (WMA) technologies. All these techniques enable benefits and advantages on all the tripartite principles of sustainability including environmental, social, and economic impacts.
Among the introduced techniques, perhaps asphalt recycling is the most practiced one. After years of low-quantity Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) inclusion in new asphalt production, nowadays medium to high quantities have become common, thanks to the evolved knowledge of logistics and mix design protocols. However, many research works have shown that the level of success in asphalt recycling is highly dependent on the correct choice of the type and dosage of the recycling agent [1]. According to the literature, asphalt recycling agents could be classified into flux oils (softeners) and rejuvenator groups. The latter can restore some of the lost chemical properties of the aged binder in addition to physical/rheological properties such as penetration, softening point, etc., [2-3]. Technically, these multi-functional additives would also guarantee the long-term performance of the recycled asphalt.
In addition to asphalt recycling, in recent years, WMA has also shown potentials in green sustainable asphalt production and therefore has been included in decarbonization roadmap plans of nations. WMA production

[1] Shahin Eskandarsefat: s.eskandarsefat@iterchimica.it

enables several technical, operational, and environmental advantages such as less fuel consumption, less fumes and air pollution and therefore safer for the workers, and extended working season. Research carried out over the last years showed that, although emissions of PAH in the fumes increase proportionally with the PAH concentration in the material (especially when using RAP), temperature is still the major factor determining the emissions in the 140°C to 200°C range. For these reasons, the use of technologies to reduce asphalt manufacturing and laying temperatures is the most effective tool of asphalt industry to meet the current environmental objectives and occupational exposure limits. The effectiveness of WMA on this matter has been shown in a recent research work in Norway [4]. In addition to the mentioned advantages, WMA leads to less aging of bitumen during the asphalt production and transportation. This could consequently allow more durable asphalt pavement [5-6].

1.2. WMA technologies

From the technological point of view, WMA techniques are classified in 4 groups: I) Organic additives (waxes and fatty amides); II) Chemical additives (surfactants); III) Plant-production foaming techniques; IV) Foaming additives (Hydrophilic minerals).

- Organic additives (e.g., waxes and fatty amides)
  These additives are usually added directly to the mixer at the same time or shortly after the binder is added. It should not be added directly to the dry and hot aggregates. The post-mixing time after adding the viscosity-modifying additives in the mixer should be increased by at least 5-10 s.

- Chemical additives (e.g., surfactants)
  An advantage of using chemical additives is that they usually do not cause any permanent rheological changes in the binder. Once the compaction is finished, there is no influence on the performance at high or low temperature. Only chemical additives can guarantee an adequate moisture susceptibility. Organic waxes and zeolite tend to reduce this property of WMA mixtures.

- Production-plant foaming techniques (e.g., foaming equipment)
  The direct method of foaming is to inject a small and controlled amount of water into hot bitumen via a foaming nozzle. This results in the sudden evaporation of the water, which produces a large but temporary increase in the effective volume and surface area of the binder.

- Foaming additives (Hydrophilic minerals) (e.g., Zeolite)
  Zeolite is a crystalline hydrated aluminum silicate that contains about 20 percent of crystalline water, which is released above 100°C. This release of water creates a controlled foaming effect.

1.3. WMA mix design considerations

The goal of WMA design procedure is to achieve mixtures with similar strength, durability, and performance characteristics as HMA while using substantially reduced energy and emissions. To date, several technical guidelines focused on WMA design principles have been published. The National Cooperative Highway Research Program (NCHRP) published a report titled "*Mix Design Practices for Warm-Mix Asphalt*" [7]. This report explores a mix design method specifically tailored to the unique material properties of warm mix asphalt technologies. It also provides guidance on designing WMA mixtures to achieve desired performance. The report covers aspects such as aggregate gradation, binder selection, and volumetric properties.

Additionally, the American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) has a standard practice called AASHTO R 35. Instead of creating a separate standard, the research resulted in a draft recommended appendix to AASHTO R 35, which is the standard practice for Superpave volumetric design for Hot Mix Asphalt (HMA) [8]. This draft appendix specifically addresses WMA and is titled "*Special Mixture Design Considerations and Methods for Warm Mix Asphalt (WMA).*" It provides guidelines for designing WMA mixtures. The volumetric design approach ensures that the mixture meets performance requirements. However, at the optimum binder content determined in accordance with R 35, prepare WMA mixtures in accordance with the appropriate procedure for the following evaluations:

- Coating according (D 2489 – 02)
- Compactability (based on the density)
- Moisture sensitivity (T 283-14)
- Rutting resistance (T 324-14)

1.4. Objectives

This case study paper provides some information and data regarding test tracks where WMA was produced containing a chemical additive. The paper introduces different technical goals for WMA production and laying depending on the specific condition of each project. While for the first and third projects, the application of WMA involved production temperature reduction, for the second presented project the main goal was improving the workability during the pavement installation at low temperatures. These pavements were constructed successfully in Serbia and Germany and no technical issue was observed during the laboratory investigation and construction phases. The main objective of this paper was to present knowledge obtained through real-scale WMA projects that could provide insights for future WMA projects.

2. MATERIALS

The WMA chemical additive used in the introduced projects is a mixture of amino derivatives and specific additives. Depending on the operational conditions (temperatures, type of mixture to be produced, etc., the typical recommended dosage by the producer is 0.2 - 0.5% on the weight of total bitumen of the asphalt mixture. This consists in the additional bitumen plus bitumen in the RAP (if it is contained in the mixture). Table 1 summarizes some of the properties provided in the product's Technical Data Sheet (TDS).

Table 1. *Some of the given properties of the WMA chemical additive*

Property	Unit	Value/aspect
Physical state and colour	–	Yellow - dark brown Liquid
Density @25°C	gr/cm3	0.95 – 1.05
Viscosity @25°C	c.P.	150 – 250
Flash point	°C	> 105
Pour point	°C	≤ -5

3. METHODS

The applied methods during the presented test sections were all followed by local and European standards mentioned at each section results and analysis. The specimens tested during the post-production phase were manufactured by means of 50 blows (each face) Marshall hammer.
In addition to laboratory tests, the pavements' condition is set to be monitored by pavement experts, investigating the occurrence of premature cracks, rutting (by means of straight edge), and surface disintegration.
In addition, in one of the presented projects, due to the importance of the motorway pavement and according to the requirements of the specifications of the projects, the surface evenness was assessed by means of International Roughness Index (IRI).

4. RESULTS AND ANALYSIS

4.1. Case study I; Belgrade, Serbia

The project involved the resurfacing (inlay) of an urban street in the east part of Belgrade applying WMA technology for reducing the conventional temperature of 165°C. For this purpose, 5 trucks of asphalt (Approx. 100 t) were produced and laid applying certain temperatures during the production and laying.
The list below summarizes the project's profile and details.

- Location: Belgrade, Serbia, https://maps.app.goo.gl/ShTpJm2vBo62UtabA
- Construction date: 30.06.2023
- Type of road: Urban Street
- Type of asphalt: AC11
- Grade and type of bitumen: 50/70
- Bitumen content: 5.3%
- Layer type: Wearing course

- RAP content: 0%
- Additive: Iterlow T, 0.4% to bitumen
- Dosing system: added to the bitumen tank, 1 day before production (approx. 16h before),
- Production temperature: 145°C ± 5°C (regularly 165°C)
- Contractor: JKP Beograd-put (public enterprise)

As one of the targets of this project, the pavement condition was set to be controlled under a regular plan. For this purpose, the pavement experts control the distress such as early cracks, raveling, rutting, etc. representing the durability and performance of the asphalt produced via WMA chemical additive technology. Figure 1 shows the paved section during the construction and Figure 2 the condition of the pavement after 9 months, during the first round of pavement condition monitoring.

Figure 1. *The paved asphalt during the construction*

Figure 2. *The paved asphalt after 9 months during quality monitoring.*

4.2. Case study II, Serbia
4.2.1. Project profile

As it was mentioned earlier, one of the main applications of WMA chemical products is improving workability and consequently compaction levels. This characteristic allows long-distance asphalt transportation and/or laying at cold temperatures. In fact, for this purpose, the asphalt is produced at common temperatures and no reduction is expected and the target is responding to the technical challenges. This case study in Serbia,

shown in Figure 3, is an example of such applications, where a typical production temperature was applied but the laying and compaction took place at significantly low temperatures. The project profile is elaborated below:

- Location: E761, Pojate - Preljina, Serbia
- Construction date: December 2022
- Type of road: Motorway (E761) km 6
- Type of Asphalt: BNS 22s
- WMA additive: 0.3% Iterlow T
- Paving bitumen: 45/80-65 SBS PmB
- Production temperature: ave. 165°C
- Final roller compaction temperature: ave. 100±5°C
- Ambient temperature: 0°C ± 5°C

Figure 3. *The roller compaction of the asphalt at 0°C.*

4.2.2. Post-production tests

The quality of the produced asphalt mixture was investigated in two phases of mixture control and site testing. As for the mixture properties, the tests included volumetric and mechanical properties of the mixtures collected from the job site and recompacted manufacturing the test specimens. Additionally, to complete the investigation as per quality control, the in situ tests were conducted by means of volumetrics properties and level of compaction. Table 2 and Table 3 summarize the obtained results in each phase, where the results have been compared with the technical specification of the project.
Comparing the values with requirements of the technical specifications of the project, it can be deduced that despite the low compaction temperature, the quality of the installed asphalt layer met the technical requirements as quality control. This could be attributed to the WMA compaction aids that allowed completion of the compaction reaching the design air void content.

Table 2. *Post-production tests' result.*

Characteristic	Unit	Method	Sample ID		Ave. value	Specifications
			I	II		
Bulk Density	kg/mm^3	12697-6: 2020	2407	2399	2403	–
Maximum Theoretical density	kg/mm^3	12697-5: 2019	2554	2550	2552	–
Voids filled with bitumen	%	12697-8: 2019	60.4	58.3	59.4	60 – 68
Air void content	%		5.8	5.9	5.9	5 – 7
Marshall Stability	kN	12697-34:2020	10.9	11.4	11.2	Min. 8
Marshall Flow	mm		1.7	1.6	1.7	–
Marshall Quotient	kN/mm		6.4	7.1	6.8	Min. 2.5

Table 3. *Installed layer quality control.*

Characteristic	Unit	Sample ID		Ave. Value	Specification
		Point I	Point II		
In situ Density	kg/mm^3	2414	2431	2423	–
Layer Thickness	mm	75	77	76	59.8 – 80.5
Degree of Compaction	%	100.3	101.3	100.8	98.0
Air void content	%	5.5	4.7	5.1	4.0 – 9.0

4.2.3. Surface characteristics

Since its introduction in 1986, the IRI has become the most used road roughness index worldwide for evaluating and managing road systems. The International Roughness Index (IRI) is a widely used measurement that quantifies the unevenness of road pavement surfaces. It is primarily obtained from measured longitudinal road profiles. The IRI plays a crucial role in ensuring smoother and safer road travel for all of us. The calculation involves a quarter-car vehicle math model, which accumulates the vehicle's response to yield a roughness index with units of slope (in/mi, m/km, etc.). Unlike other pavement performance indicators, such as Pavement Condition Index (PCI), the IRI has less stochasticity and subjectivity.
For this test section, the test was carried out after a month of the pavement installation and according to EN 13036-5:2019. Table 4 provides the measured IRI values compared with the specifications of the projects required for the quality control of the installed pavement. For both lanes the values perfectly comply with the specification's threshold and the low-temperature compaction did not degrade the surface properties.

Table 4. *In situ installed layer quality control.*

Distance	Fast lane		Slow lane	
	Left wheel pass	Right wheel pass	Left wheel pass	Right wheel pass
	IRI (mm/m)		IRI (mm/m)	
0	0.95	1.02	2.03	1.19
100	1.28	1.19	1.33	1.45
Ave.	1.11		1.5	
Specification*	IRI 100: 2 mm/m			

**Projects quality control plan, Book 7, Laboratory and site testing for pavement construction materials*

4.3. Case study III, Tutow, Germany

4.3.1. Project profile

Considering the new asphalt regulations in Germany (with a transition period lasting until 2024), the maximum occupational exposure level to asphalt fumes has been set to be less than 1.5 mg/m^3. This led to many trial sections and projects (HMA) to verify various WMA technologies in recent years. With the target of investigating practical issues of WMA containing also RAP, the project presented shown in Figure 4 consisted of a wearing and binder course of a pavement. The project details are summarized as follows:

- Location: Tutow; Germany
- Construction date: 5 July 2021
- Type of road: Bypass (B110)
- Type of Asphalt:
  AC 22mm Base Binder, 50% RAP
  AC 8 mm Surface course, 45% RAP
- WMA additive: 0.5% Iterlow T
- Paving Bitumen: PEN 50/70
- Production Temperature: ave. 135°C
- Compaction Temperature: ave. 120°C
- Compaction mode: Both static and vibrating rollers were tried in different sections

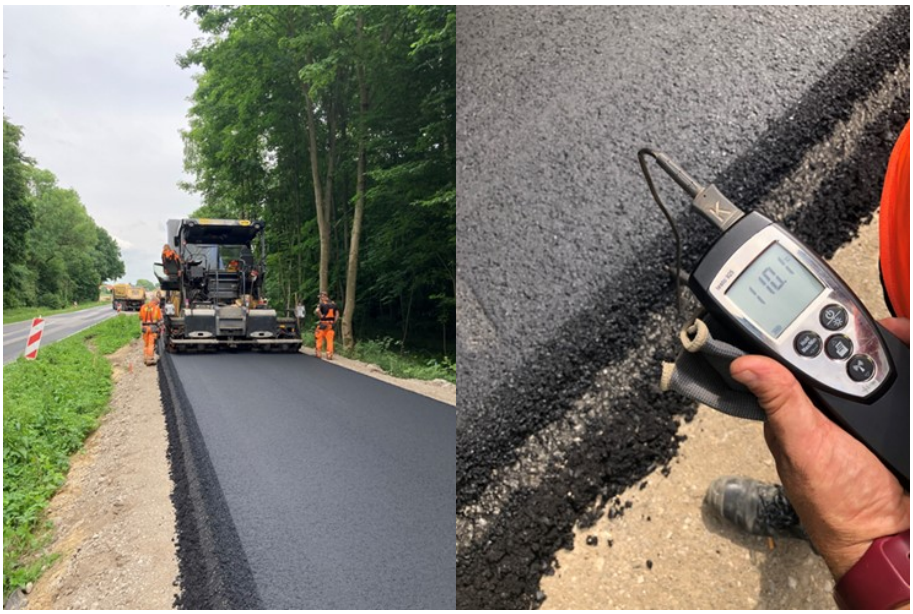


Figure 4. *The paved asphalt during the construction and the temperature control after final compaction.*

4.3.2. laboratory results

As mentioned, one of the characteristic properties of the chemical additives is that these additives do not impact the rheological properties of the bitumen and, consequently, the mix design. To verify this matter, binder-scale conventional tests, and rheological analysis were carried out via Dynamic Shear Rheometer (DSR). Table 2 reports the measured values for the reference bitumen with and without the WMA chemical additive. According to the results, the changes are insignificant and this allows to keep the same mix design and relying on the job mix formula. In practice, this characteristic could play an important impact on projects' costs and operation.

Table 2. *Binder-scale post-production tests' results.*

Binder/Sample	Penetration (0.1 mm)	Softening point (C°)	Viscosity (cP)	Upper PG (°C)
Virgin 50/70	64.5	48.8	529.3 (rpm :50)	64 (exact: 69.8)
Virgin 50/70 + 0.5% ITERLOW T	64.9	48.2	495.0 (rpm :50)	64 (exact: 68.7)

To determine the achieved compaction level, cores were taken from the finished layers and examined by the IBB Bischof engineering office in Stralsund. The test results summarized in Table 3, showed a degree of compaction of 99.7% for the base course and 98.6% for the wearing course sections compacted with a vibrating roller. In the second section, for which compaction was only carried out by static, the degree of compaction achieved was 97% and 98% for the base and wearing course, respectively. Considering ≥ 98% as the ZTV Asphalt-StB technical requirement for the degree of compaction of finished layers, the obtained values were slightly less. However, compacting asphalt layers containing RAP with just static roller is technically not common and the correct choice.

Table 3. *Mixture-scale tests' results.*

Test parameter	Unit	AC 8 mm			AC 22 mm		
		Core location		Specification	Core location		Specification
		0+025	0+150		0+025	0+150	
Air void content	(%)	2.4	3.0	≤ 5.5	–	–	–
Field density	g/cm^3	2356	2343	–	2352	2263	–
Laboratory density	g/cm^3	2390	2391	–	2358	2333	–
Level of compaction	(%)	98.6	98	≥ 98	99.7	97	≥98

5. CONCLUSION

This study reviews the impact of incorporating a chemical additive into Warm Mix Asphalt (WMA) projects, where the main target of applied WMA technology was different. According to the laboratory and in situ findings of these test sections, the use of chemical WMA additive demonstrated several key benefits as follows:

- Improved workability: the WMA mixtures containing the chemical additive exhibited enhanced workability during construction. As shown in one test section, the additive allowed a better compaction, leading to improved pavement quality even at low compaction temperature.
- Reduced production temperature: by using the chemical additive, it was possible to achieve a significant reduction in asphalt production temperature. This not only contributes to energy savings but also minimizes environmental impact.
- Enhanced durability: the WMA mixtures maintained their performance properties over time. The chemical additive positively influenced the rutting resistance and fatigue life of the asphalt, ensuring long-lasting pavement performance.
- Sustainable construction: WMA technology, coupled with the chemical additive, offers a sustainable approach to road construction. It balances economic incentives, environmental preservation, and pavement performance.

In summary, the incorporation of the chemical additive into WMA represents a promising solution for achieving both technical and environmental goals in asphalt pavement construction. Further research and field validation are recommended to fully explore its potential benefits.

Acknowledgements

The authors would like to thank all individuals at BECHTEL ENKA UK, HSH Chemie and Iterchimica S.p.A. for preparing this article and their contribution in the presented test sections.

References

[1] Loise, V.; Oliviero Rossi, C.; Venturini, L.; Eskandarsefat, S.; Sangalli, L. 2019. Rejuvenating vs. softening agents; rheological and microscopic study. First Macedonian Road Congress.

[2] Caputo, P.; Eskandarsefat, S.; Porto, M.; Loise, V.; Oliviero Rossi, C.; Scarpelli, F.; Penelope di Santo, M.; Venturini, L. 2021. Towards advances in differentiating recycling agents: softening agents vs. rejuvenating agents. 7th E&E Congress Eurasphalt & Eurobitume.

[3] Tabatabaee, H.; Kurth, T. 2017. Analytical investigation of the impact of a novel bio-based recycling agent on the colloidal stability of aged bitumen. Road materials and pavement design 18 (S2), 131 – 140. http://dx.doi.org/10.1080/14680629.2017.1304257

[4] Raymond, o. et. Al. 2021. Occupational Exposure during Asphalt Paving Comparison of Hot and Warm Mix Asphalt in Field Experiments. Annals of Work Exposures and Health, 2021, 1–12 http://dx.doi.org/10.1093/annweh/wxaa129

[5] Bueche, N.; Probst, S.; Eskandarsefat, S. 2024. Warm mix asphalt containing reclaimed asphalt pavement: A case study in Switzerland. Infrastructures.

[6] Oliveira Nunes, P.; Fernandes, N.; Letras Ribeiro, T.; Baccellieri, L.; Eskandarsefat S. 2024. Simultaneous Use of Rejuvenator and Warm Mix Asphalt Chemical additive to produce Sustainable Asphalt Pavements: A Case Study in Portugal. 10th International Conference on Maintenance and Rehabilitation of Pavements (MAIREPAV10).

[7] National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. 2011. Mix Design Practices for Warm-Mix Asphalt. Washington, DC: The National Academies Press. https://doi.org/10.17226/14488.

[8] AASHTO R 35-15. TS 2d. 2015. Special mixture design considerations and practices for Warm Mix Asphalt (WMA)

GEOTEHNIČKI USLOVI IZGRADNJE NADVOŽNJAKA „BALAJNAC“ NA AUTOPUTU E-80 DEONCA: NIŠ - MEROŠINA

Dragoslav Rakić[1], Nikola Božović[2]
[1] *Univerzitet u Beogradu – Rudarsko-geološki fakultet, Đušina 7, Beograd, dragoslav.rakic@rgf.bg.ac.rs*
[2] *Institut za ispitivanja materijala – IMS, Beograd, nikola.bozovic0@gmail.com*

Rezime: *U sklopu prve deonice autoputa E-80 Niš – Merošina, izgrađen je nadvožnjak u zoni sela Balajnac koji je oslonjen na tri stubna mesta na međusobnom rastojanju od oko 26 m. Svaki stub je fundiran na šipovima i to sa predloženim rasporedom od 2 šipa u grupi na međusobnom rastojanju od 3.6 m. U radu su na osnovu izvršenih geotehničkih istraživanja terena, analizirani rezultati nosivosti vertikalno opterećenog šipa prečnika 1.2 m i dužine šipa od L = 23 m. Analiza je izvršena primenom različitih metoda koristeći rezultate statičke i standardne penetracije, laboratorijskih ispitivanja tla kao i probnog opterećenja šipa.*

Ključne reči: *nadvožnjak „Balajnac“, šip, probno opterećenje šipa, projektni pristup, granična stanja.*

GEOTECHNICAL CONDITIONS FOR THE CONSTRUCTION OF "BALAJNAC" OVERBRIDGE ON THE HIGHWAY E-80 SECTION: NIŠ - MEROŠINA

Dragoslav Rakić[1], Nikola Božović[2]
[1] *University of Belgrade – Faculty of Mining and Geology, Djusin 7, Belgrade, dragoslav.rakic@rgf.bg.ac.rs*
[2] *IMS Institute, Belgrade, nikola.bozovic0@gmail.com*

Abstract: *As part of the first section of the E-80 highway Niš - Merošina, an overbridge was built in the area of the village of Balajnac, which is supported by three piles at a distance of about 26 m. Each pillar is founded on piles with the proposed arrangement of 2 piles in a group at a distance of 3.6 m. Based on the geotechnical investigations of the terrain, the results of the bearing capacity of a vertically loaded pile with a diameter of 1.2 m and a pile length of L = 23 m were analyzed in the paper. The analysis was performed by applying different methods using the results of static and standard penetration test, laboratory soil tests as well as pile load test.*

Keywords: *"Balajnac" overbridge, pile, pile load test, design approach, limit states.*

1. UVOD

U Srbiji je počela izgradnja autoputa E-80 od Niša do Merdara, a prva deonica u dužini od 5.5 km je završena i puštena u saobraćaj krajem jula 2023. god. Ovaj autoput je od posebnog ekonomskog i društvenog interesa za R. Srbiju i Toplički kraj, jer će predstavljati saobraćajno čvorište zapadnog Balkana i biće deo glavne regionalne transportne mreže jugoistočne Evrope.

Slika 1. *Izgled postojećeg nadvožnjaka pre i u fazi rušenja*

Ukupna dužina autoputa je 77 km, i podeljena je na dva Sektora. Prvi Sektor kreće od isključenja sa autoputa E-75, a završava se blizu neolitskog naselja Pločnik tj. kod planirane petlje Beloljin, čija je dužina 32.65 km. Preostali deo trase pripada drugom Sektoru od petlje Beloljin do Merdara. Prva izgrađena deonica

[1] Dragoslav Rakić: dragoslav.rakic@rgf.bg.ac.rs

u okviru Sektora 1 je dužine 5.5 km, i u okviru ove deonice izgrađeno je nekoliko objekata, a kao najznačajniji mogu se izdvojiti: petlja „Merošina 1“, dva kraća mosta dužine po 15 m i nadvožnjak u zoni sela Balajnac. Ovaj nadvožnjak je izgrađen na lokaciji starog – postojećeg nadvožnjaka na približnoj stacionaži od km: 1+713 i to na zaravnjenom terenu bez izraženih reljefnih oblika sa približnim kotama između 219 i 221 m (Slika 1). Na osnovu urađene inženjerskogeološke rejonizacije terena, lokacija nadvožnjaka pripada zoni A tj. terenima sa minimalnim ograničenjima, u kojima su prirodni uslovi povoljni i stabilni [8], [9].

2. GEOLOŠKA GRAĐA TERENA NA LOKACIJI NADVOŽNJAKA „BALAJNAC“

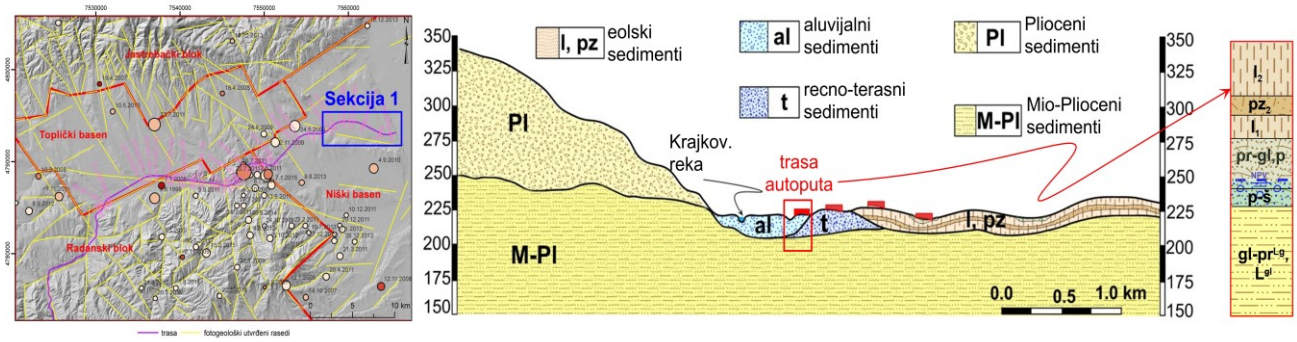
Za definisanje geološke građe i geotehničkih karakteristika terena na lokaciji nadvožnjaka „Balajnac“, izveden je zavidan obim terenskih i laboratorijskih istraživanja. Istraživanja su izvedena u tri faze. Prva faza urađena je za potrebe Idejnog projekta-IP, druga faza za potrebe Projekta za građevinsku dozvolu-PGD i treća faza obuhvatila je dopunska geotehnička istraživanja za potrebe izrade studije izvođenja-SI. Zbirni prikaz vrste i obima izvedenih geotehničkih istraživanja u zavisnosti od faze projektovanja nadvožnjaka, prikazan je u Tabli br. 1 [7], [10].

Tabela 1. *Geotehnička istraživanja terena izvedena na lokaciji nadvožnjaka „Balajnac“*

Geotehnički istražni radovi	I faza - Idejni projekat (2016-2017)	II faza - Proj. za građ. dozvolu (2020).	III faza - Studija izvođenja (2022)
Inženjerskogeološko kartiranje terena	inženjerskogeološka karta 1 : 2500	inženjerskogeološka karta 1 : 500	-
Istražno bušenje	2 istražne bušotine ukupne dužine 22.8 m (plitko fundiranje)	3 istražne bušotine ukupne dužine 58.6 m (duboko fundiranje)	1 istražna bušotina DB-1 dubine 28.2 m.
SPT opiti	5 opita	9 opita	-
CPT opiti	-	2 opit	-
Geofizička ispitivanja	definisanje seizmičkog hazarda i određivanje projektnih parametara seizmičnosti	-	-
Laboratorijska geomehanička ispitivanja	5 uzoraka	17 uzoraka	6 uzorka
Probno opterećenje šipa	-	-	1 opit statičkog probnog opterećenja šipa

Od terenskih istraživanja, značajno je pomenuti i istraživanja koja se odnose na šire područje trase autoputa u fazi idejnog projekta, a koja su omogućila registrovanje krupnih – regionalnih struktura i dali ulazne podatke za ocenu seizmičke aktivnosti i njen uticaj na građenje nadvožnjaka (Slika 2).

Trasa autoputa uglavnom prolazi preko blago zatalasanog reljefa koji u široj zoni nadvožnjaka „Balajnac“ pretežno izgrađuju vezane sitnozrne sredine, gde dominiraju prašinasti eolski sedimenti (Q_1l,pz – les i pogrebena zemlja) i sredine Neogenog kompleksa koje odgovaraju gornjem Miocenu i donjem Pliocenu (M-Pl - laporovito-glinoviti i prašinasto-peskoviti sedimenti). Inženjerskogeološki presek terena, sa izraženim eolskim, aluvijalnim i rečno terasnim zaravnima, karakterističan za širu zonu nadvožnjaka „Balajnac“, prikazan je na Slici 2 [7].

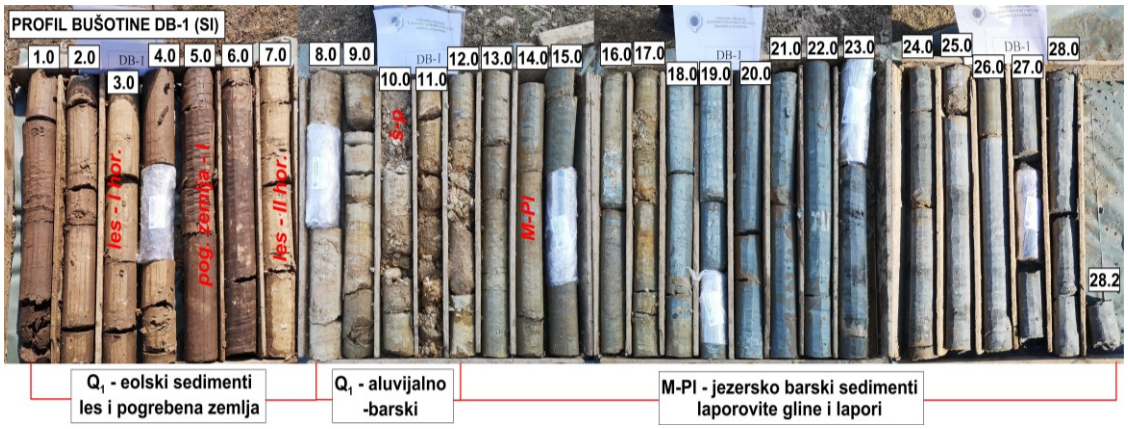


Slika 2. *Karakterističan geološki presek terena u široj zoni nadvožnjaka „Balajnac“*

Širi prostor obuhvata i pritoke Krajkovačke reke, gde su konstatovani aluvijalni i aluvijalno proluvijalni sedimenti heterogenog litološkog sastava, nastali difuznim spiranjem, transportom povremenih voda i gravitacijom. Tereni pobrđa su prekriveni eolskim, deluvijalnim, proluvijalnim i deluvijalno-proluvijalnim

sedimentima. Neogeni sedimenti zastupljeni su u podini kvartarnih sedimenata na čitavom istražnom prostoru. Razlikuju se dva horizonta: donji - u kome preovlađuju sedimenti finozrnog sastava i gornji – izgrađen pretežno od peskova sa retkim proslojcima peskovitih glina i sočivima šljunka. U zoni nadvožnjaka izdvojen je mlađi neogeni kompleks veoma heterogenog litološkog sastava sa čestim facijalnim promenama. Glavni litološki predstavnici su: laporovite gline i lapori.

Na lokaciji nadvožnjaka „Balajnac“ izdvojena su dva osnovna geološka kompleksa. Prvi, kvartarni kompleks izgrađuju prašinasta tla Pleistocene starosti koja u potpunosti po genetskom sastavu odgovaraju eolskim sedimentima (izdvojena su dva sloja padinskog lesa i sloj pogrebene zemlje, ukupne debljine oko 7.5 m, Slika 3). Ispod ovih eolskih sedimenata do dubine od 11.0-11.5 m utvrđen je glinovito-prašinasto-peskoviti, sloj u čijoj podini se nalazi tanji peskovito-šljunkoviti sloj. Ispod ovih kvartarnih slojeva nalazi se Mio-Plioceni kompleks sa zonom površinskog raspadanja lapora (gl-pr^{Lg}) u vidu laporovitih glina debljine oko 5.0-6.0 m i osnovnim slojem glinovitog lapora (L^{gl}), gde će se formirati baze svih šipova.

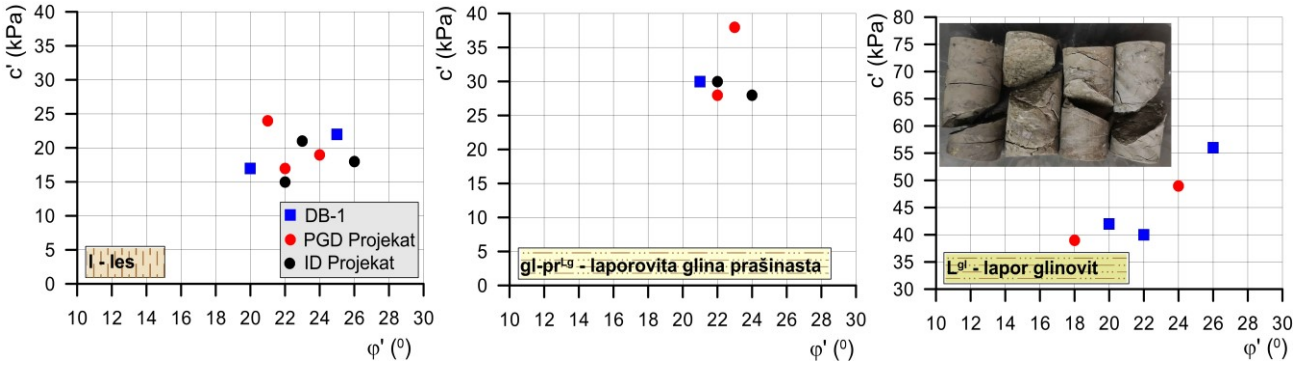


Slika 3. *Fotografija jezgra dopunske bušotine DB-1*

Izmereni nivo podzemne vode u istražnim bušotinama koje su izvedene za potrebe PGD, kretao se od 10.2 – 10.5 m, dok je u dopunskoj istražnoj bušotini DB-1, došlo do blagog spuštanja nivoa koji je u trenutku istraživanja iznosio 11.0 m.

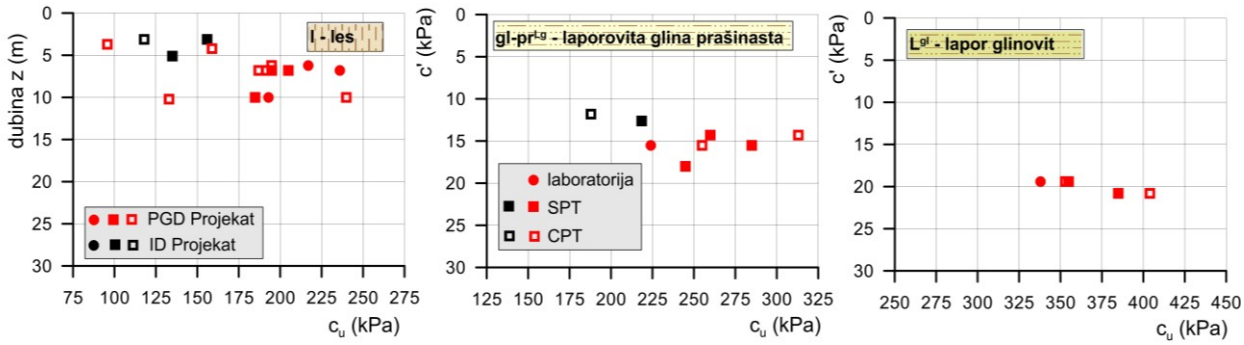
3. DEFINISANJE GEOTEHNIČKIH MODELA TERENA

Laboratorijskim ispitivanjima uzoraka tla, određivani su identifikaciono-klasifikacioni pokazatelji kao i otporno deformabilne karakteristike. Rezultati parametara čvrstoće smicanja, tokom svih faza istraživanja za izdvojene sedimente na lokaciji nadvožnjaka, prikazani su na Slici 4. Najveći broj ispitivanja urađen je za potrebe izrade PGD, gde su pored opita direktnog smicanja, parametri čvrstoće smicanja određivani i na osnovu opita triaksijalne kompresije.



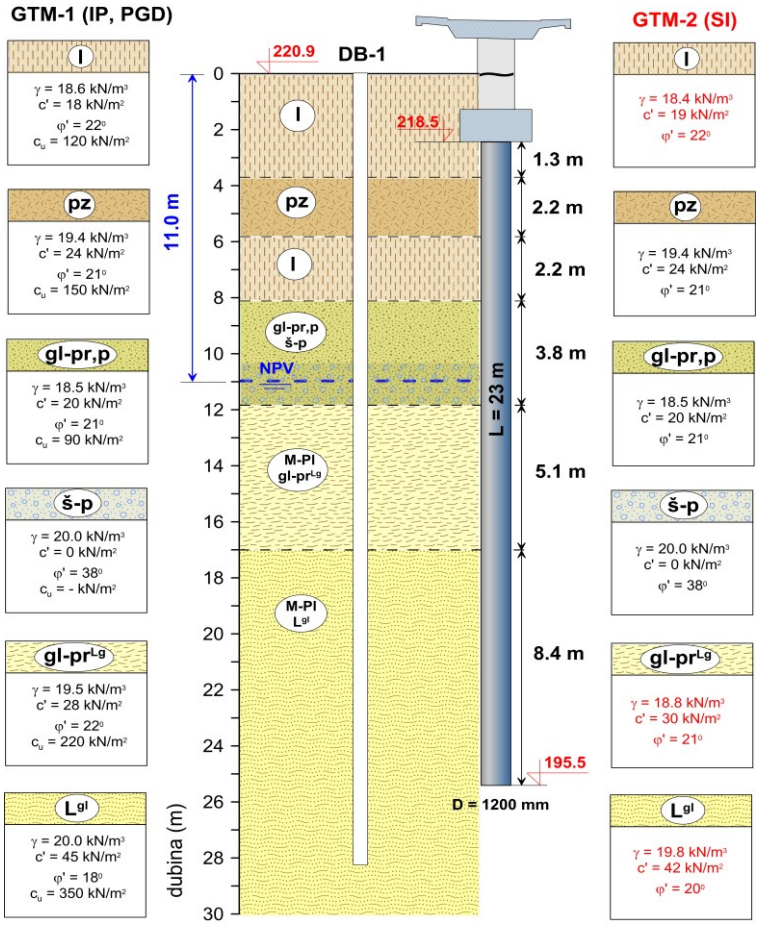
Slika 4. *Zbirni prikaz efektivnih parametara čvrstoće smicanja*

S obzirom na nivo podzemne vode, parametri čvrstoće smicanja su definisani i za nedrenirane uslove (Slika 5). U pitanju su sitnozrni materijali, tako da je određena nedrenirana kohezija i to na osnovu rezultata laboratorijskih ispitivanja, kao i na osnovu rezultata statičke – CPT i standarne penetracije – SPT, primenom odgovarajućih korelacionih zavisnosti.



Slika 5. *Zbirni prikaz nedrernirane čvrstoće smicanja*

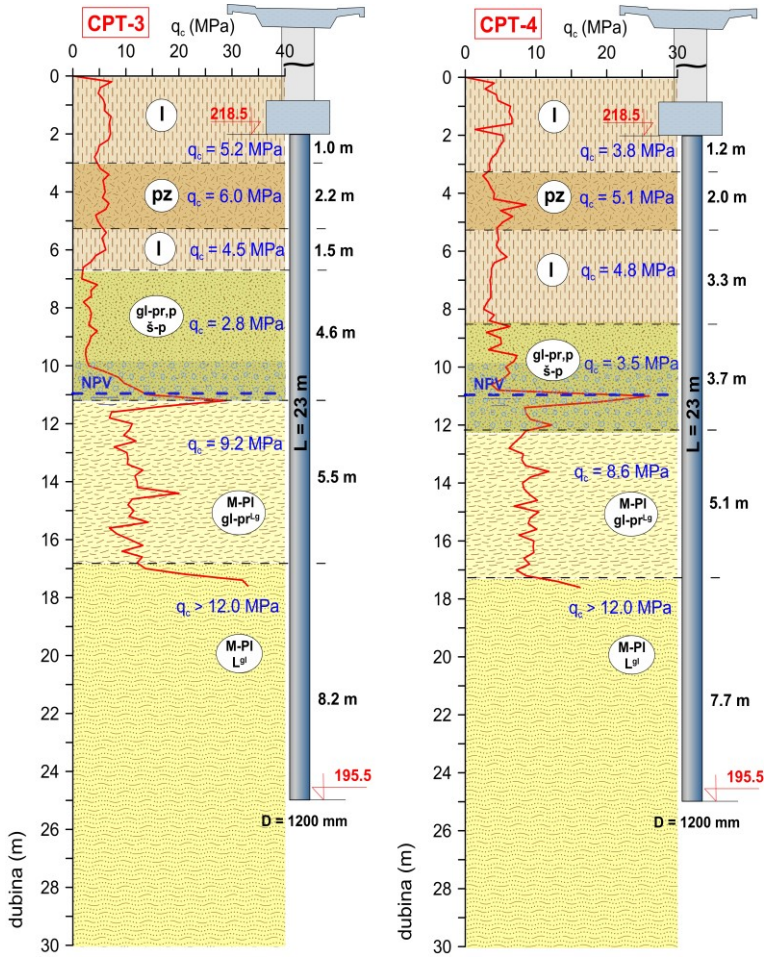
Dobijeni podaci omogućili su da se formiraju dva geotehnička modela terena na osnovu rezultata laboratorijskih ispitivanja (Slika 6). Prvi geotehnički model-GTM1 formiran je na osnovu rezultata laboratorijskih i terenskih ispitivanja koja su izvedena u okviru I faze (idejni projekat) i II faze istraživanja (projekat za građevinsku dozvolu), dok su za definisanje drugog geotehničkog modela-GTM2, korišćeni samo rezultati iz III faze tj. rezultati laboratorijskih ispitivanja u okviru dopunskih istraživanja na uzorcima iz istražne bušotine koja je izvedena u zoni probnog šipa (u okviru dopunskih istraživanja nisu vršeni opiti za definisanje nedrenirane čvrstoće smicanja).



Slika 6. *Usvojeni proračunski modeli tla na osnovu rezultata laboratorijskih ispitivanja*

U zoni nadvožnjaka izvedena su i 2 opita statičke penetracije (CPT-3 i CPT-4). S obzirom da je nadvožnjak oslonjen na 3 stuba, ovim opitima nisu obuhvaćene lokacije stubnih mesta, tj. CPT-3 opit je izveden duž ose nadvožnjaka dok je CPT-4 opit izveden u istoj geološkoj sredini, ali na udaljenosti od oko 250 m od nadvožnjaka. Kako su oba opita završena u glinovitim laporima (L^{gl}), ali iznad fundiranja baze šipa, otpornost konusa na većim dubinama glinovitih lapora, definisana je na osnovu opita CPT-5 i CPT-6 koji su većim delom obuhvatili i sloj u kojem je izvedena baza šipa.

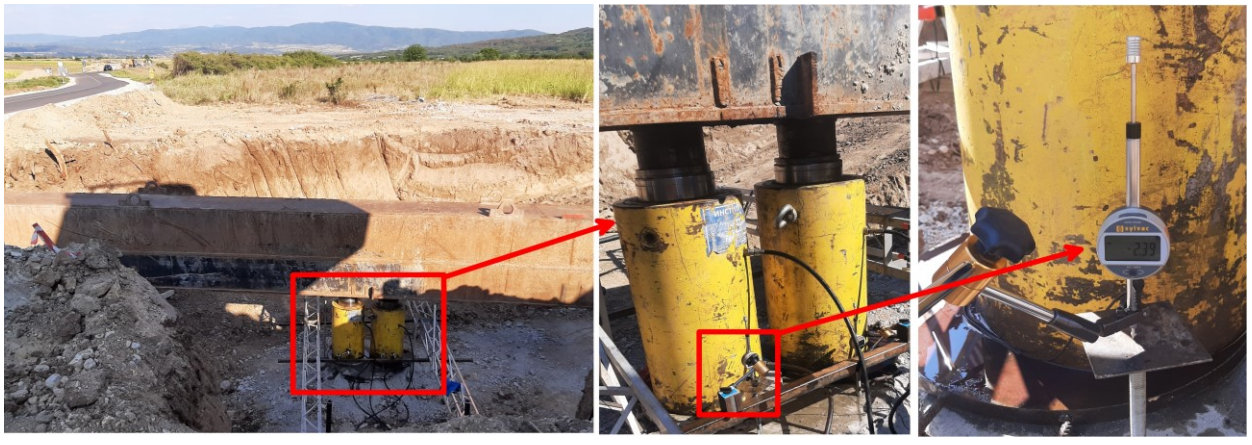
Za potebe geotehničke analize, korišćena su dva modela i to jedan formiran prema CPT-3 opitu koji je izveden u neposredno uz probni šip, kao i novoformirani model na osnovu rezultata CPT-4, CPT-5 i CPT-6 opita, koji su izvedeni u sredinama istog geološkog sastava. Rezultati ovih opita sa interpretacijom za definisanje proračunskih modela šipa, prikazani su na Slici 7.



Slika 7. *Proračunski geotehnički modeli šipa na osnovu CPT opita*

4. IZVOĐENJE OPITA PROBNOG OPTEREĆENJA ŠIPA

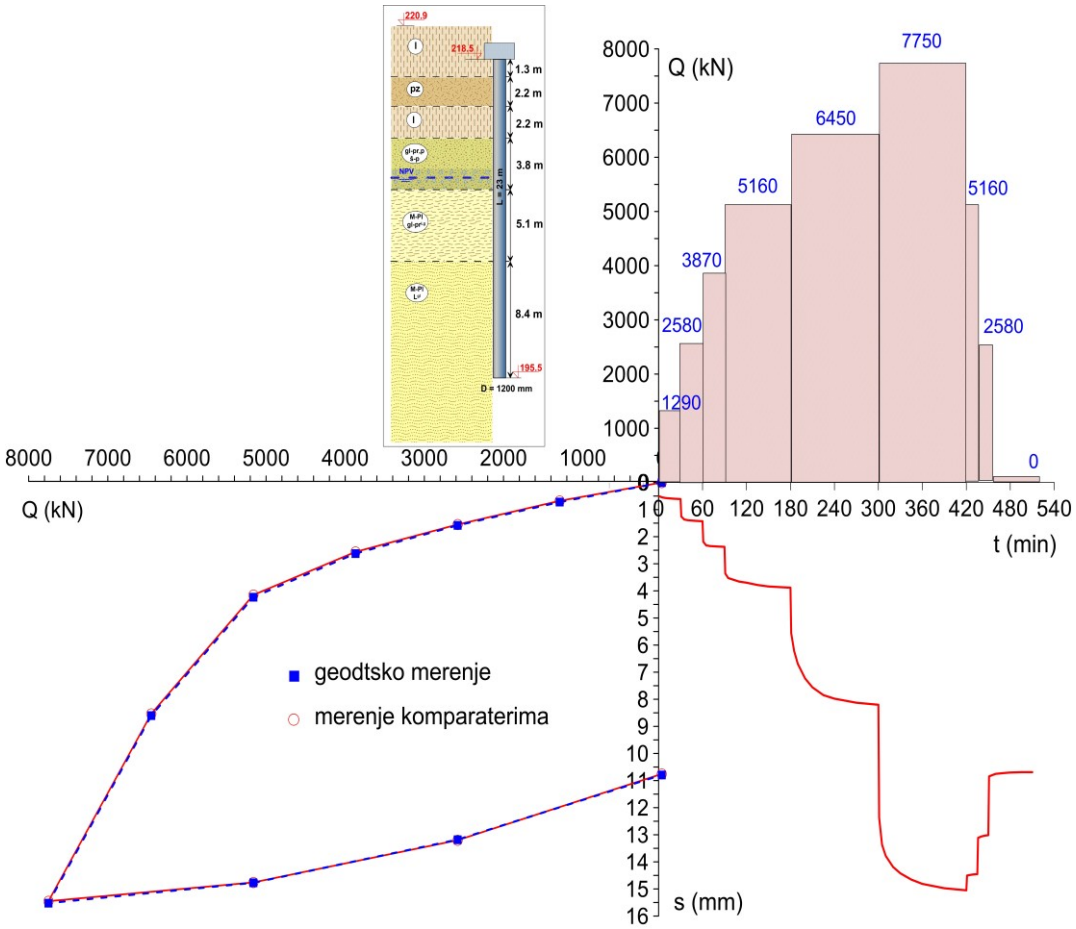
Probno opterećenje izvedeno je na armiranobetonskom bušenom šipu prečnika D = 1.2 m i dužine L = 23.0 m. Da bi se postigao kontrateret, izgrađena je specijalna čelična greda koja je debelim limovima zavarena za dva susedna šipa koji su fundirani na dovoljnom rastojanju od ose šipa (Slika 8).



Slika 8. *Konstrukcija sistema za opit probnog opterećenja šipa*

Za ostvarivanje vertikalne pritiskajuće sile na šip korišćene su dve hidrauličke prese, pojedinačnog kapaciteta od približno 6000 kN, koje su centrično postavljene na glavu šipa. Prese su preko creva sa visokim pritiskom, povezane sa hidrauličkom pumpom. Između hidrauličkih presa i grede koja povezuje ankerne (pomoćne) šipove, kao i između prese i glave šipa, postavljen je podmetač od čelične ploče dovoljno otporan da ravnomerno prenese silu na gornju konstrukciju, odnosno na šip [10].

Za merenje pomeranja glave šipa, korišćena su četiri digitalna komparatera koji su vezani za referentne čelične grede pod uglom od 90^0. Ovaj sistem referentnih greda predstavlja međusobno kruto povezan skelet, koji se preko četiri oslonca oslanja na tlo. Uporedo sa merenjem vertikalnog pomeranja šipa komparaterima, vršeno je i geodetsko merenje vertikalnog pomeranja preko dve tačke na naspramnim stranama glave šipa. Ispitivanje šipa izvršeno je u jednom ciklusu do maksimalne sile koja je iznosila Q_{max} = 7750 kN. Rezultati opita probnog opterećenja šipa prikazani su na Slici 9.

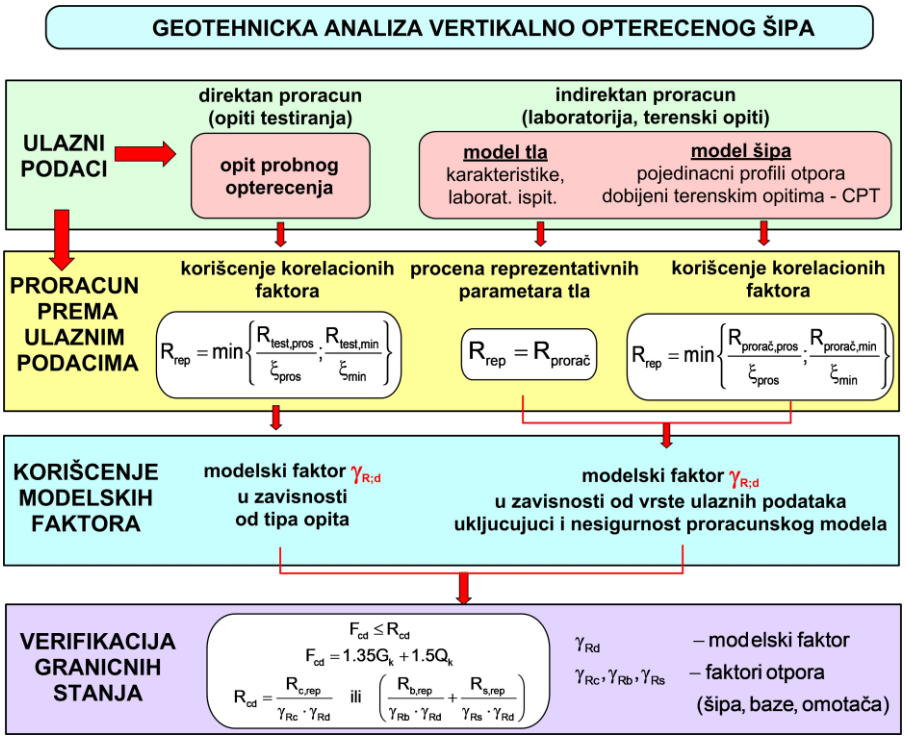


Slika 9. *Prikaz rezultata probnog opterećenja šipa*

Pri opterećenju vrednost svakog inkrementa aplicirane sile održavana je na konstantnoj vrednosti uz postizanje uslova brzine konsolidacije od 0.25mm/h. Pri svakom stupnju opterećenja, aplicirane sile su održavane na konstantnim vrednostima u vremenskim intervalima od 30 min. do 120 min, dok su vremenski intervali za dva stupnja rasterećenja održavani po 15 min, a za potpuno rasterećenje primenjen je vremenski period od 60 min.

5. GEOTEHNIČKA ANALIZA VERTIKALNO OPTEREĆENOG ŠIPA

Prilikom analize vertikalno opterećenog šipa, korišćeni su rezultati opita testiranja (opit probnog opterećenja šipa) kao i opšte prihvaćene indirektne metode zasnovane na modelima tla (laboratorijski određenim parametrima čvrstoće smicanja) i modelima šipa (korišćenjem rezultata CPT opita). Opšta primenjena metodologija proračuna prikazana je na Slici 10.



Slika 10. *Prikaz rezultata probnog opterećenja šipa*

Geotehnička analiza urađena je u skladu sa standardom SRPS EN 1997-1, uzimajući u obzir nacionalni prilog koji podrazumeva korišćenje projektnog pristupa DA-2, sa sledećom kombinacijom skupova parcijalnih koeficijenata [3], [11]:

$$\text{"A1"} + \text{"M1"} + \text{"R2"} \qquad (1)$$

Za potrebe proračuna neophodno je poznavanje vrednosti parcijalnih koeficijenata za dejstva (γ_F) i uticaje dejstva (γ_E), za parametre tla (γ_M) i za koeficijente otpora (γ_R). Vrednosti ovih koeficijenata prikazane su u Tabeli 2, dok je predložena vrednost modelskog faktora prema nacionalnom prilogu SRPS EN 1997-1/NA, γ_{Rd} = 1.5 [11].

Tabela 2. *Vrednosti parcijalnih koeficijenata prema nacionalnom prilogu SRPS EN 1997-1/NA*

Dejstva „A1“		**Parametri tla „M1“**				**Otpori za šipove „R2“**		
stalno	povremeno	zap. tež.	ugao unutrašnjeg trenja	kohezija	nedr. kohezija	šip	baza	omotač
(γ_G)	(γ_Q)	(γ_γ)	($\gamma_{\varphi'}$)	($\gamma_{c'}$)	(γ_{cu})	(γ_t)	(γ_b)	(γ_s)
1.35	1.5	1.0	1.0	1.0	1.0	1.1	1.1	1.1

5.1. Analiza rezultata probnog opterećenja šipa

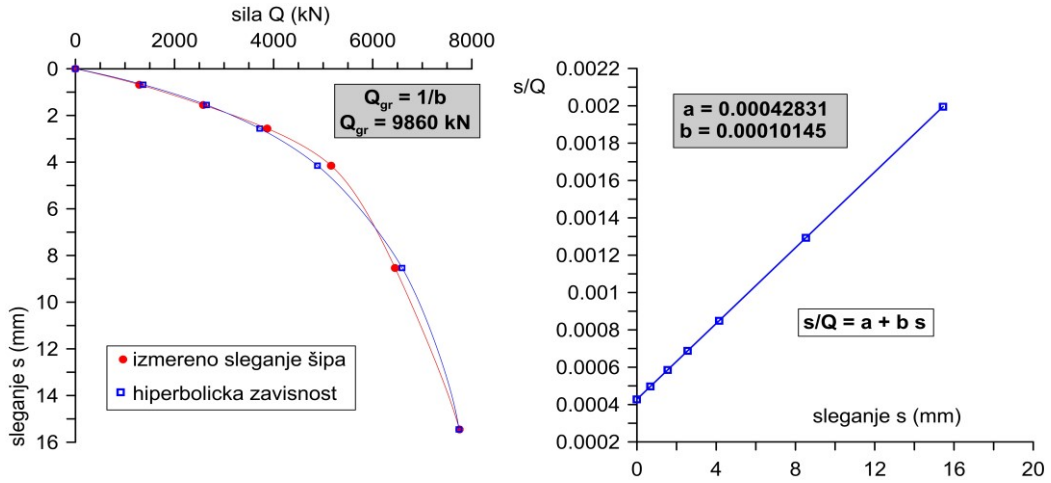
Kada se analiza vrši na osnovu rezultata probnog opterećenja šipa, dobijene vrednosti se redukuju u zavisnosti od broja izvedenih opita probnog opterećenja, preko korelacionih faktora ξ_1 i ξ_2 čije se vrednosti kreću od min. $\xi_1 = \xi_2 = 1.0$ do max. $\xi_1 = \xi_2 = 1.4$ (EN 1997 -1:2004 Tabela A.9.) i to prema sledećim jednačinama

$$R_{c;d} = \frac{R_{c;k}}{\gamma_t}; \qquad R_{c;k} = min\left\{\frac{(R_{c;m})_{sred}}{\xi_1}; \frac{(R_{c;m})_{min}}{\xi_2}\right\} \qquad (2)$$

gde je: $(R_{c;m})_{sred}$ – srednja vrednost graničnih nosivosti šipa u odnosu na broj opita probnog opterećenja, a $(R_{c;m})_{min}$ – dobijena minimalna vrednost granične nosivosti šipa iz izvedenih opita probnog opterećenja.

Sa Slike 9 se može videti da šip tokom probnog opterećenja nije dostigao granično opterećenje. Pojedine definicije loma za granično opterećenje šipa proglašavaju silu koja utisne šip za veličinu koja je jednaka nekom procentu prečnika šipa (EC7 predlaže 10 %) [5]. U ovom radu, interpretacija je izvršena korišćenjem

hiperboličkog odnosa između sile Q i sleganja šipa (Chin-Kondner, 1970), kao i na osnovu metode Decourta (1999) pomoću linije koja je dobijena linearnom regresijom para tačka u sistemu (Q/s; Q). Rezultati sprovedene analize primenom hiperboličkog odnosa, prikazani su na Slici 11, gde sračunate vrednosti *a* i *b* predstavljaju parametre prave transformisane hiperbole, koji su dobijeni iz merenih veličina sleganja, pomoću metode najmanjih kvadrata [5], [6].

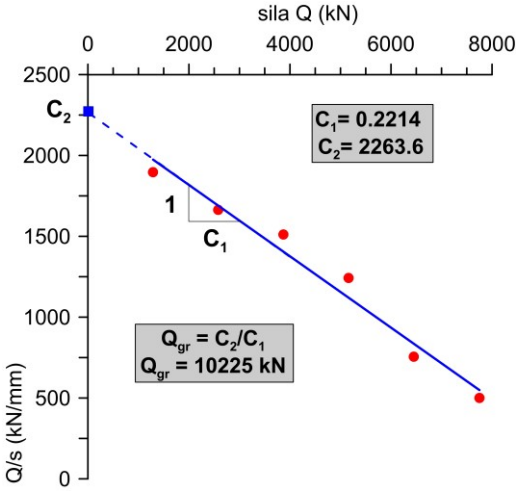


Slika 11. *Prikaz definisanja graničnog opterećenja šipa na osnovu hiperboličke zavisnosti*

Kako je na lokaciji nadvožnjaka izveden samo jedan opit probnog opterećenja šipa, to su vrednosti $(R_{c;m})_{sred}$ i $(R_{c;m})_{min}$ identične, kao i vrednosti korelacionih faktora $\xi_1 = \xi_2 = 1.4$. Prema projektnom pristupu „DA2“, ovako dobijene vrednosti se koriguju i parcijalnim faktorom otpornosti $\gamma_t = 1.1$., pa je proračunska nosivost šipa:

$$R_{c;k} = min\left\{\frac{9860}{1.4}\right\} = 7045\ kN; \qquad R_{c;d} = \frac{7045}{1.1} = 6405\ kN \tag{3}$$

Rezultati sprovedene analize primenom metode Decourta [3], prikazani su na Slici 12, gde odnos sračunatih vrednosti koeficijenta C_1 i C_2 predstavlja graničnu nosivost šipa ($Q_u = C_2/C_1$).



Slika 12. *Prikaz definisanja graničnog opterećenja šipa korišćenjem Decourtove metode*

$$R_{c;k} = min\left\{\frac{10225}{1.4}\right\} = 7300\ kN; \qquad R_{c;d} = \frac{7300}{1.1} = 6635\ kN \tag{4}$$

5.2. Analiza šipa zasnovana na modelima tla – laboratorijska ispitivanja

Šipovi prenose opterećenje na tlo preko površine baze šipa i površine po omotaču šipa, pa se njihova nosivost računa na sledeći način:

$$R_{c;d} = \frac{R_{c;k}}{\gamma_t}; \qquad R_{c;d} = \frac{R_{b;k}}{\gamma_b} + \frac{R_{s;k}}{\gamma_s} \tag{5}$$

gde je: $R_{b,k}$ - granična nosivost baze šipa, $R_{s,k}$ – granična nosivost omotača šipa, a γ_t, γ_b, γ_s, su parcijalni faktori otpornosti za ukupnu nosivost odnosno pojedinačnu nosivost baze i omotača. Kada se za proračun koriste indirektne metode zasnovane na modelima tla (parametrima čvrstoće smicanja), granična nosivost baze, odnosno granična nosivost omotača šipa, izračunavaju se na sledeći način

$$R_{b,k} = A_b \cdot q_{b,k}; \qquad R_{s,k} = \sum_i A_{s,i} \cdot q_{s,k,i} \tag{6}$$

gde je: $q_{b,k}$ - granični pritisak tla u nivou baze šipa, $q_{s,k}$ - granična vrednost otpora smicanja po omotaču šipa, A_b - površina baze šipa, A_s - površina omotača šipa. Ovako dobijene vrednosti se redukuju modelskim faktorom ($\gamma_{R,d}$), čija je vrednost prema nacionalnom aneksu prSRPS EN 1997-1_NA, $\gamma_{R,d}$ = 1.5. Analiza je urađena korišćenjem Mayerhofog rešenja gde se karakteristične vrednosti graničnog opterećenja tla u nivou baze šipa, odnosno karakteristična otpornost trenjem duž omotača šipa, računaju na sledeći način

$$q_{b,k} = c'_k \cdot N_c^* + K_0 \cdot \sigma'_v \cdot N_q^*; \qquad q_{s,k,i} = c'_{k,i} + K_{0,i} \cdot \sigma'_{v,i} \cdot \tan\varphi'_{k,i} \tag{7}$$

Rezultati sprovedene analize za oba geotehnička modela, prikazani su u Tabeli 3.

Tabela 3. *Karakteristične nosivosti šipa prema analiziranim geotehničkim modelima tla*

model tla	nosivost baze šipa		nosivost omotača šipa		proračunska nosivost šipa
	$R_{b,k}$ (kN)	$R_{b,d}$ (kN)	$R_{s,k}$ (kN)	$R_{s,d}$ (kN)	$R_{c,d}$ (kN)
GTM-1	3975	2410	6725	4075	6485
GTM-2	4275	2590	6730	4080	6670

U slučaju da se granična nosivost šipa analizira preko ukupnih napona, čvrstoća se izražava preko nedrenirane kohezije c_u. U tom slučaju najčešće se primenjuje α metoda za definisanje granične nosivosti smičuće otpornosti po omotaču šipa, dok se granična nosivost baze šipa računa kao i u slučaju plitkih temelja, na sledeći način

$$q_{b,k} = N_c \cdot c_u + \sigma_v \qquad q_{s,k,i} = \alpha_{u,i} \cdot c_{u,i} \tag{8}$$

gde je α_u adhezioni faktor, tj. koeficijent redukcije nedrenirane smičuće čvrstoće na kontaktu tla i omotača šipa. On se kreće u relativno širokim granicama zbog različite osetljivosti sitnozrnog tla na lokaciji ispitivanja, i posebno se daje za pobijene, a posebno za bušene šipove (u radu je primenjena metoda API [1], [2]). Analiza je sprovedena samo za GTM 1, s obzirom da istraživanjima koja su rađena za studiju izvodljivosti, nedrenirana čvrstoća smicanja nije određivana. Rezultati su prikazani u Tabeli br. 4.

Tabela 4. *Grnaična nosivosti šipa za nedrenirane uslove (ukupni naponi)*

model tla	nosivost baze šipa		nosivost omotača šipa		proračunska nosivost šipa
	$R_{b,k}$ (kN)	$R_{b,d}$ (kN)	$R_{s,k}$ (kN)	$R_{s,d}$ (kN)	$R_{c,d}$ (kN)
GTM-1	4120	2495	5750	3485	5980

5.3. Analiza nosivosti na osnovu modela šipa – rezultati CPT opita

Analiza nosivosti šipa na osnovu modela šipa, tj. korišćenjem pojedinačnih profila dobijenih terenskim opitom statičke penetracije – CPT, izvršena je primenom metode Bustamanate & Gianeselli (poznata i kao LCPC metoda, 1982), gde se karakteristične vrednosti graničnog opterećenja tla u nivou baze šipa, odnosno karakteristična otpornost trenjem duž omotača šipa, računaju na sledeći način

$$q_{b,k} = q_{cb} \cdot k_b; \qquad q_{s,k,i} = \frac{q_{cs,i}}{k_{s,i}} \tag{9}$$

U gornjim jednačinama su k_b i k_s bezdimenzioni koeficijenti koji zavise od vrste tla i njegove penetracione otpornosti. Za otpornost tla u nivou baze šipa, usvaja se srednja aritmetička vrednost merena na visini

između +aD iznad baze i –aD ispod baze šipa, uz prethodnu korekciju krive. S obzirom da su oba opita završena u sloju lapora glinovitih iznad baze šipa, vrednost q_c je usvojena prema modelima prikazanim na Slici 7, tj. usvojeno je q_c = 12 MPa. Otpornost duž omotača šipa zavisi od vrste tla i izmerenog otpora vrha konusa, uz napomenu da je za sve sredine definisana maksimalna vrednost koja zavisi od načina izvođenja šipa i vrste tla.

Sam postupak proračuna je sličan postupku probnog opterećenja šipa. I u ovom slučaju se dobijene vrednosti redukuju u zavisnosti od broja analiziranih modela šipa koji se formiraju na osnovu CPT opita. Međutim, vrednosti korelacionih faktora su nešto drugačije i za slučaj analize dva modela šipa oni su ξ_3 = 1.35, odnosno ξ_4 = 1.27 (prSRPS EN 1997 -1/NA Tabela A.10.), tako da se granična nosivost šipa računa prema sledećim jednačinama

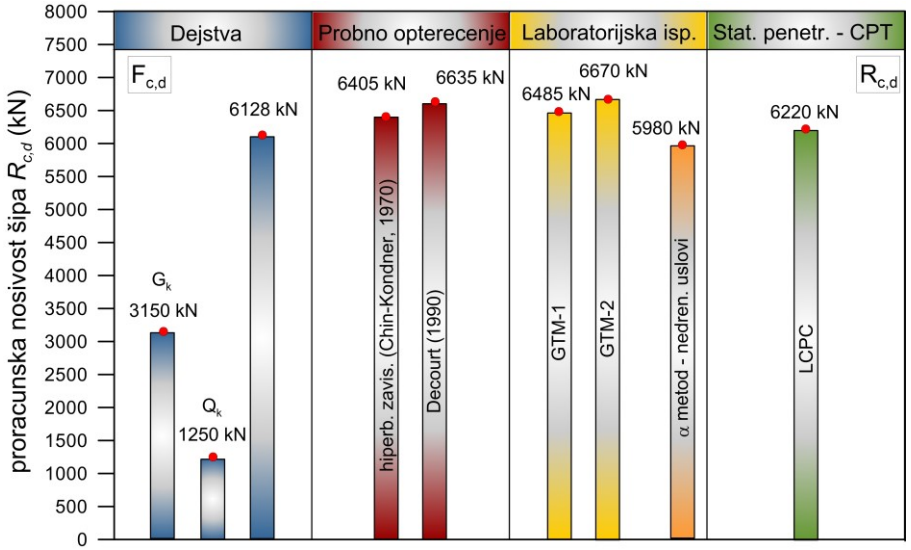
$$R_{c;d} = \frac{R_{b;k}}{\gamma_b} + \frac{R_{s;k}}{\gamma_s}; \quad R_{b;k} = \min\left\{\frac{(R_{b;m})_{sred}}{\xi_3}; \frac{(R_{b;m})_{min}}{\xi_4}\right\}; \quad R_{s;k} = \min\left\{\frac{(R_{s;m})_{sred}}{\xi_3}; \frac{(R_{s;m})_{min}}{\xi_4}\right\} \qquad (10)$$

Kada se za proračun koristi više modela šipa, onda se računa prosečna kao i minimalna vrednost nosivosti baze i nosivosti omotača za svaki model šipa, a kao krajnji rezultat usvaja se manja vrednost. Rezultati sprovedene analize za oba modela šipa koji su prikazani na Slici 7, dati su u Tabeli 4.

Tabela 4. *Karakteristične nosivosti šipa prema analiziranim modelima šipa*

model tla	nosivost baze šipa		nosivost omotača šipa		proračunska nosivost šipa
	$R_{b,k}$ (kN)	$R_{b,d}$ (kN)	$R_{s,k}$ (kN)	$R_{s,d}$ (kN)	$R_{c,d}$ (kN)
CPT-3	4070		5290		
CPT-4	4070		5045		
Sred.	4070	2740	5170	3480	
Min.	4070	2915	5045	3610	
$R_{c,d}$ (kN)					6220

U prethodnim analizama nisu prikazani uticaji efekta opterećenja, koji se u proračun uvode preko parcijalnih faktora dejstva (γ_F). Granično stanje loma provereno je za slučaj stalnog dejstva – parcijalni faktor γ_G i za slučaj promenljivog dejstva – parcijalni faktor γ_Q. Analiza je urađena za stalno opterećenje od G_k = 3150 kN i za promenljivo opterećenje od Q_k = 1250 kN. Zbirni prikaz rezultata proračunske nosivosti šipa ($R_{c,d}$), u zavisnosti od primenjenih metoda proračuna, prikazan je na Slici 13.



Slika 13. *Zbirni prikaz rezultata proračunske nosivosti šipa u zavisnosti od metoda proračuna*

Sa slike se vidi da dobijene vrednosti variraju u zavisnosti od ulaznih podataka, ali su proračunske nosivosti šipa u svim analiziranim slučajevima za efektivno naponsko stanje, veće od proračunske vrednosti aksijalne sile pritiska ($F_{c,d}$), bez obzira da li su primenjene direktne ili indirektne metode proračuna (Fc,d ≤ Rc,d). Treba napomenuti da je prilikom analize zanemarena težina šipa, s obzirom da šip ne izlazi iznad površine terena i da se ne očekuje uticaj negativnog trenja.

6. ZAKLJUČAK

Analize su urađene prema graničnim stanjima u skladu sa SRPS EN 1997-1:2017 standardom, odnosno predlogom nacionalnog anaksa prSRPS EN 1997-1/NA 2020. Koristeći preporuke koje su date u EC 7, dobijeni rezultati na osnovu rezultata laboratorijskih ispitivanja i rezultata opita statičke penetracije (CPT), pokazali su relativno dobro slaganje sa rezultatima probnog opterećenja šipa.

Treba naglasiti da je EC 7 standard uveo novi koncept projektovanja/proračuna preko „graničnih stanja“. Suština koncepta „graničnih stanja“ jeste izbegavanje njihovog prekoračenja. Prekoračenje graničnog stanja podrazumeva da konstrukcija/građevina više ne ispunjava relevantne kriterijume za projektovanje.

Prva generacija EC 7 standarda se uveliko primenjuje u praksi, ali se očekuju i određena unapređenja, s obzirom da je objavljena i draft verzija druge generacije EC 7 standarda. U vezi sa tim tokom 2022.i 2023. god. održano je i nekoliko webinara („Webinar on pile design in the second generation of Eurocode 7“), a očekuje se da će konačna verzija biti objavljena tokom 2026. god. Objavljivanjem druge generacije EC 7 standarda, aktuelna verzija (koja sadrži dva dela: opšta pravila i uputstva vezana za istraživanje i ispitivanje terena) će pretrpeti i određene izmene i dopune. Druga generacija EC 7 standarda, sadržaće tri dela i to: opšta pravila EN 1997-1: 2024 (dopunjena opisom materijala, uticajima podzemne vode, geotehničkim analizama i dr.), svojstva tla EN 1997-2: 2024 (daju se novine i uputstva za istraživanje terena, načinu prikupljanja informacija, pripremi proračunskih modela i dr.) i geotehničke konstrukcije EN 1997-3: 2024 (koji predstavlja novi deo sa prikazom posebnih pravila koja se koriste za projektovanje i verifikaciju geotehničkih konstrukcija). U okviru trećeg dela i to u poglavlju 6 prikazana su i pravila koja se odnose na fundiranje objekata na šipovima.

Literatura

[1] American Petroleum Institute (API). 2014. *Recommended practice 2A-WSD, Planning, designing and constructing fixed offshore platforms-Working stress design*, 22th ed. American Petroleum Institute. pp. 310.

[2] Cherubini, C., Vessia, G. 2007. Reliability approach for the side resistance of piles by means of the total stress analysis (α Method). Canadian Geotechnical Journal, No 44, pp. 1378-1390.

[3] Decourt, L. (1999). Behavior of foundations under working load conditions. Proceedings of the Pan-American Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Brazil, Vol. 4. pp 453-488.

[4] Frank, R. (2008). Evaluation of Eurocode 7 – Two pile foundation design examples, International seminar on EUROCODE 7 and geotechnical aspects of EUROCODE 8, Struga, R. Macedonia, pp. 88-96.

[5] Rakić, D., Ćorić, S. and Šušić, N. (2010). Application of EC 7 standards in defining geotechnical conditions for the kiln foundation of cement factory “Holcim – Serbia”, Proceedings of the 14th Danube-European Conference on Geotechnical Engineering DECGE2010, Bratislava, Slovakia, CD-Session 2.

[6] Rakić, D., Šušić, N., Basarić, I., Đoković. K., Berisavljević, D. (2014). Load test of Large Diameter Piles for the Bridge Across Danube River in Belgrade, 15th Danube-European Conference on Geotechnical Engineering DECGE2014 – “Geotechnics of Roads and Railways”, Vienaa, Austria, Conference Proceedings Volume 2, pp. 867-872.

[7] Rakić, D.; Berisavljević, Z.; Basarić, I.; Lazić, M.; Stevanović, M. (2017). Opšti geotehnički uslovi izgradnje autoputa E-80 Niš – Merdare, Deonica: Niš – Pločnik, II Deo, Zbornik radova VII naučno-stručnog međunarodnog savetovanja: Geotehnički aspekti građevinirastva, 83-92.

[8] Rakić, D.; Berisavljević, Z.; Basarić, I.; Lazić, M.; Stevanović, M. (2018). Inženjerskogeološki uslovi izgradnje prve deonice autoputa Niš – Merdare, Zbornik radova - CD (Book of papers - CD), Treći Srpski kongres o putevima, Beograd, str. 12-23.

[9] Rakić, D.; Berisavljević, Z.; Basarić, I.; Bogdanović, S.; Janković, J. (2019). Geotechnical zoning of the terrain along the first section of E-80 highway in Serbia – SEETO route 7”, Proceedings of the XVII European Conference of Soil Mechanics and Geotechnical Engineering ECSMGE-2019, Geotechnical Engineering foundation of the future, Reykjavik, Iceland.

[10] Rakić, D.; Božović, N.; Stevanović, M.; Bogdanović, M. (2023). “Analiza nosivosti vertikalno opterećenog šipa za potrebe izgradnje petlje „Merošina 1“ na autoputu E-80 Deonica: Niš - Merošina“, Zbornik radova međunarodnog naučno-stručnog savetovanja – Zemljotresno inženjerstvo i geotehnički aspekti građevinarstva, Vrnjačka Banja, str. 392-403.

[11] SRPS EN 1997-1 Evrokod 7: Geotehničko projektovanje – Deo 1: Opšta pravila.

PROBLEMATIKA VOĐENJA BICIKLISTIČKIH KRETANJA U GRADSKIM USLOVIMA

Doc.dr Sanja Fric, dipl.građ.inž.[1]
[1] Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu – sfric@grf.bg.ac.rs
V.prof.dr Dejan Gavran, dipl.građ.inž.
Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu – gavran@grf.bg.ac.rs
Doc.dr Vladan Ilić, mast.inž.građ.
Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu – vilic@grf.bg.ac.rs
Istraž.saradnik Filip Trpčevski, mast.inž.građ.
Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu – ftrpcevski@grf.bg.ac.rs
Istraž.saradnik Stefan Vranjevac, mast.inž.građ.
Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu – svranjevac@grf.bg.ac.rs
Asistent Miloš Lukić, mast.inž.građ.
Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu – mlukic@grf.bg.ac.rs
Istraž.pripravnik Nikola Milovanović, mast.inž.građ.
Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu – nmilovanovic@grf.bg.ac.rs

Rezime: *Strategija unapređenja saobraćaja u gradskim uslovima, u skladu sa evropskim direktivama i principima održive urbane mobilnosti, podrazumeva između ostalog i redukciju korišćenja putničkog automobila uz istovremeno stvaranje uslova za veće i bezbednije odvijanje pešačkog i biciklističkog saobraćaja. Strategija koju je usvojio grad Beograd podrazumeva preko 100km novih biciklističkih staza u gradu Beogradu, odnosno povećanje nemotorizovanih sredstava prevoza na oko 30% u ukupnoj raspodeli. Međutim, bez obzira na preuzete obaveze strategijom, postavlja se osnovno pitanje koje sve vrste biciklističke infrastrukture postoje, koje su suštinske razlike između njih i kako uopšte projektovati biciklistička kretanja u našim urbanim sredinama. U radu će biti prikazani osnovni principi oblikovanja biciklističkih staza, traka i puteva, uz davanje konkretnih sugestija za unapređenje njihovog vođenja u gradskim uslovima, kroz primer grada Beograda.*

Ključne reči: *strategija, biciklistička staza, biciklistička traka, biciklistički put, slobodan profil, saobraćajni profil, raskrsnice.*

TYPICAL PROBLEMS RELATED TO BICYCLE TRAFFIC ASSIGNMENT IN URBAN SURROUNDING

Abstract: The strategy for traffic safety improvement in urban surrounding, in accordance with the European directives and principles of sustainable urban mobility, includes, among other things, the reduction of passenger car use while simultaneously creating conditions for increased and safer pedestrian and bicycle traffic. The strategy adopted by the city of Belgrade implies over 100 km of new bicycle paths inside the city , i.e. an increase in non-motorized means of transportation to about 30% in the total travel modal split. However, regardless of the commitments undertaken in line with the adopted strategy, the basic questions addressing which types of cycling infrastructure exist, what are the essential differences between them and how to provide for cycling movements in local urban environment arise. The paper presents the basic principles of bicycle paths', lanes' and tracks' design. Exact measures for improving bicycle traffic in the city of Belgrade are shown also.

Keywords: strategy, bicycle path, bicycle lane, bicycle track, clearance profile, intersections.

[1] Autor zadužen za korespodenciju: sfric@grf.bg.ac.rs

1. UVOD

Urbanizacija predstavlja realnost savremenog društva. Danas se ugrubo može reći da više od 50% svetske populacije živi u gradovima, sa neprestanim trendom porasta iz godine u godinu. Sudeći po ovom trendu, do 2030.g. 60% svetske populacije će živeti u gradovima a više od 2 milijarde ljudi će živeti u tzv.gradovima u razvoju. Uzimajući prethodno navedeno u obzir, uređenje i organizacija gradskog prostora godinama unazad postaju dominantan faktor razvoja savremenog društva.

Mobilnost stanovništva u Republici Srbiji je 2 do 3 puta manja u odnosu na razvijene evropske države. Pretpostavka je da se oko 96% svih dnevnih putovanja realizuje na teritoriji urbanih sredina, a da se oko 95% svih dnevnih putovanja realizuje u svega 6 najvećih urbanih naselja na teritoriji države. Iz ovoga jasno sledi da je potrebno saobraćajnu infrastrukturu u gradovima planirati i projektovati sa posebnom pažnjom, poštujući naročito ranjive kategorije učesnika u saobraćaju (pešake i bicikliste pre svega).

Neophodno je gradove budućnosti (pa i saobraćaj kao deo te integralne celine) planirati po meri ljudi koji će u tim gradovima živeti, odnosno *„ Moraju postojati područja dobrog okruženja u kojima ljudi mogu živeti, raditi, kupovati, razgledati i kretati se pešice u razumnoj slobodi od opasnosti motornog saobraćaja...“ ([L1]).*

Kako bi postigli ovaj imperativ, neophodno je u savremenom planiranju i projektovanju saobraćajnica u gradovima, prilikom raspodele raspoloživog prostora, dosledno poštovati princip - pešacima, biciklistima i javnom gradskom prevozu koliko i šta treba, a putničkim automobilima koliko i šta može. U ovom radu će akcenat biti na problematici vođenja biciklističkih kretanja u urbanoj sredini.

2. POJAM ODRŽIVE URBANE MOBILNOSTI

Na osnovu definicije Evropske komisije, pojam održive mobilnosti podrazumeva *„ Kretanje ljudi takvo da se potrebe pojedinca, poslovnog sektora i društva u celini zadovolje bezbedno i na način koji odgovara zdravlju čoveka i ekosistema, promoviše generacijska ravnopravnost, obezbeđuje pristupačnost, pravičnost i efikasnost, nudi izbor vidova transporta i podržava konkurentna ekonomija kao i uravnoteženi regionalni razvoj - ograničavajući emisije i otpad, koristeći obnovljive izvore energije, smanjujući buku i neefikasno korišćenje zemljišta“.*

Republika Srbija je, na osnovu urbane agende Ujedinjenih Nacija (2016.g.) i na osnovu Održive urbane mobilnosti u zemljama Jugoistočne Evrope ([L2]) donela strateški dokument pod nazivom *Strategija urbanog razvoja Republike Srbije 2030.g. Strategija unapređenja saobraćaja u gradu Beogradu* u skladu sa principima održive urbane mobilnosti, na osnovu navedene strategije, podrazumeva:

- održavanje postojećih i razvoj planiranih kapaciteta transportnog sistema i infrastrukture u funkciji saobraćaja;
- povećanje nivoa bezbednosti funkcionisanja transportnog sistema, povećanje pristupačnosti i korišćenja svih vidova transporta;
- smanjenje potrebe za putovanjem uz redukciju korišćenja putničkog automobila;
- razvoj svih podsistema u funkciji javnog putničkog prevoza;
- **stvaranje uslova za veće i bezbednije odvijanje pešačkog i biciklističkog saobraćaja;**
- smanjenje saobraćajnih zagušenja, buke i emisije izduvnih gasova

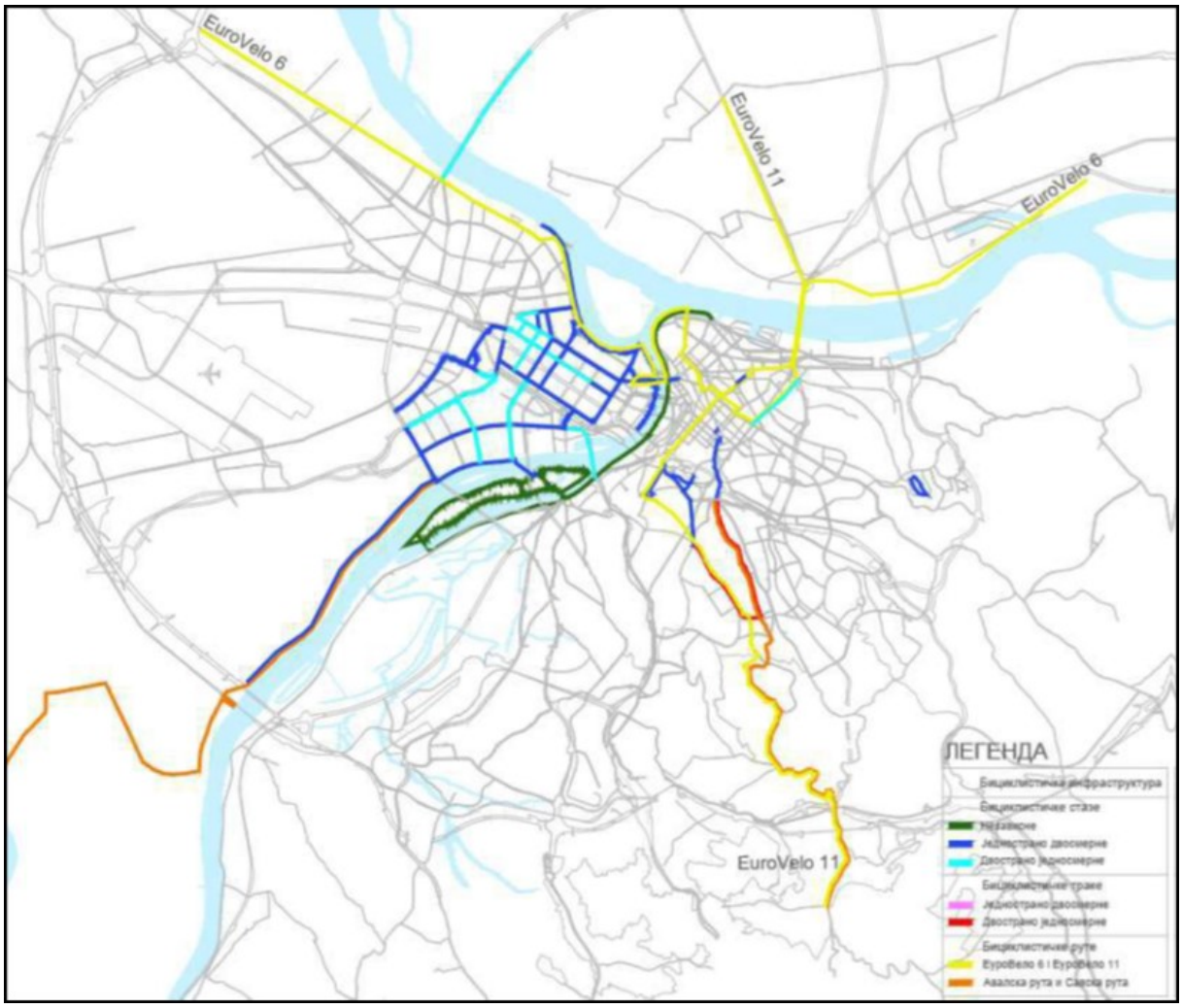
Bazirajući se na ovim principima, grad Beograd je 2020. god. usvojio *Plan održive mobilnosti za grad Beograd*:

Slika 1. *Plan održive mobilnosti za grad Beograd (Izvor: ([L3])*

3. BICIKLISTIČKA INFRASTRUKTURA U URBANIM SREDINAMA

3.1 Strategija unapređenja biciklističkih kretanja u gradu

Plan održive mobilnosti za grad Beograd kao jedan od svojih ciljeva postavlja unapređenje *pešačkih i biciklističkih kretanja* → u strategijama razvoja saobraćaja u gradu planirano je oko 100km novih biciklističkih staza do 2021.god. (trenutno ima oko 100km biciklističkih staza, planirano je ukupno 500km), kao i povećanje nemotorizovanih vidova saobraćaja na oko 30% u ukupnoj raspodeli vidova transporta.



Slika 2. *Postojeće biciklističke trake i staze 2020.god. Source: ([L3])*

Pored planova za realizaciju nove biciklističke infrastrukture, Planom je predviđeno i uvođenje sistema *Parkiraj i bicikliraj* u javnim garažama i parkiralištima na tertitoriji grada (Obilićev venac, Ada ciganlija i dr.), zatim uvođenje sistema javnih bicikala u gradu (oko 150 stanica sa planiranih 900 javnih bicikala, od čega bi polovina bili električni bicikli).

Preduslov za sve prethodno navedeno je postojanje uređene biciklističke infrastrukture u skladu sa standardima i pravilnicima iz ove oblasti.

3.2 Tehnički pravilnici i standardi

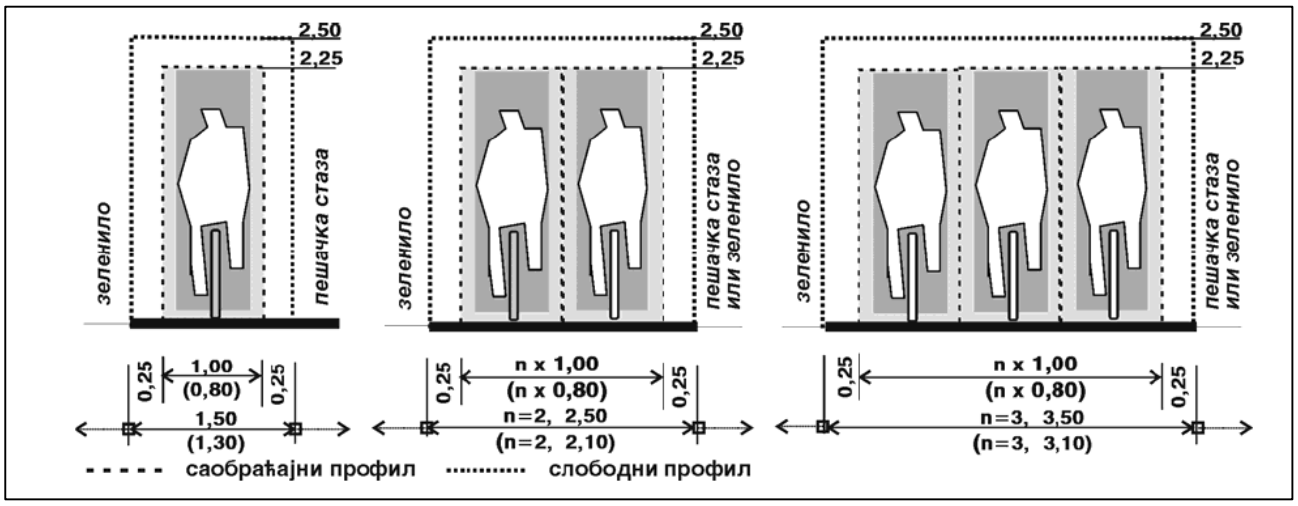
Osnovno pitanje koje se postavlja je koji je to odgovarajući položaj biciklista u poprečnom profilu gradskih saobraćajnica? Možemo izdvojiti dva osnovna slučaja - kada se takva kretanja predviđaju na primarnoj ili na sekundarnoj gradskoj mreži. Kod slabije opterećenih ulica moguće je izdvojiti deo kolovoza uz desnu ivicu za isključivo kretanje biciklista, pod uslovom da na tim deonicama nema površinskih vidova javnog gradskog

prevoza. Ako su u pitanju gradske saobraćajnice sa intezivnijim saobraćajem, biciklistima je potrebno obezbediti fizičko razdvajanje od motornog saobraćaja.

Kada je u pitanju oblast projektovanja saobraćajnica u gradovima, grad Beograd nažalost nije usvojio bazični dokument koji bi projektante usmerio ka ispravnim stručnim rešenjima i istovremeno im olakšao izuzetno složeni proces projektovanja gradskih saobraćajnica. Samim tim, u ovom trenutku ne postoji zvaničan propis ili standard koji bi u potpunosti tretirao i projektovanje biciklističkih puteva, traka i staza u urbanoj sredini.

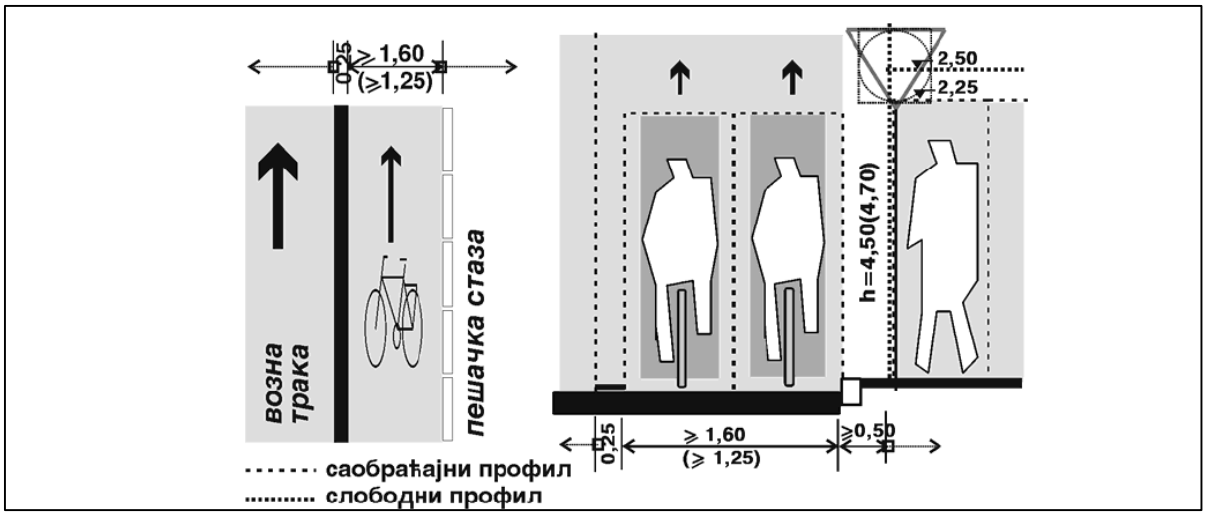
Na početku, potrebno je napraviti razliku između ovih pojmova. Na osnovu ([L4]), razlikujemo:

- *Samostalne biciklističke puteve.* Potpuno nezavisno vođeni biciklistički putevi od osnovnog profila gradske saobraćajnice, vođenje npr. kroz slobodne parkovske predele ili otvorene urbanističke blokove.



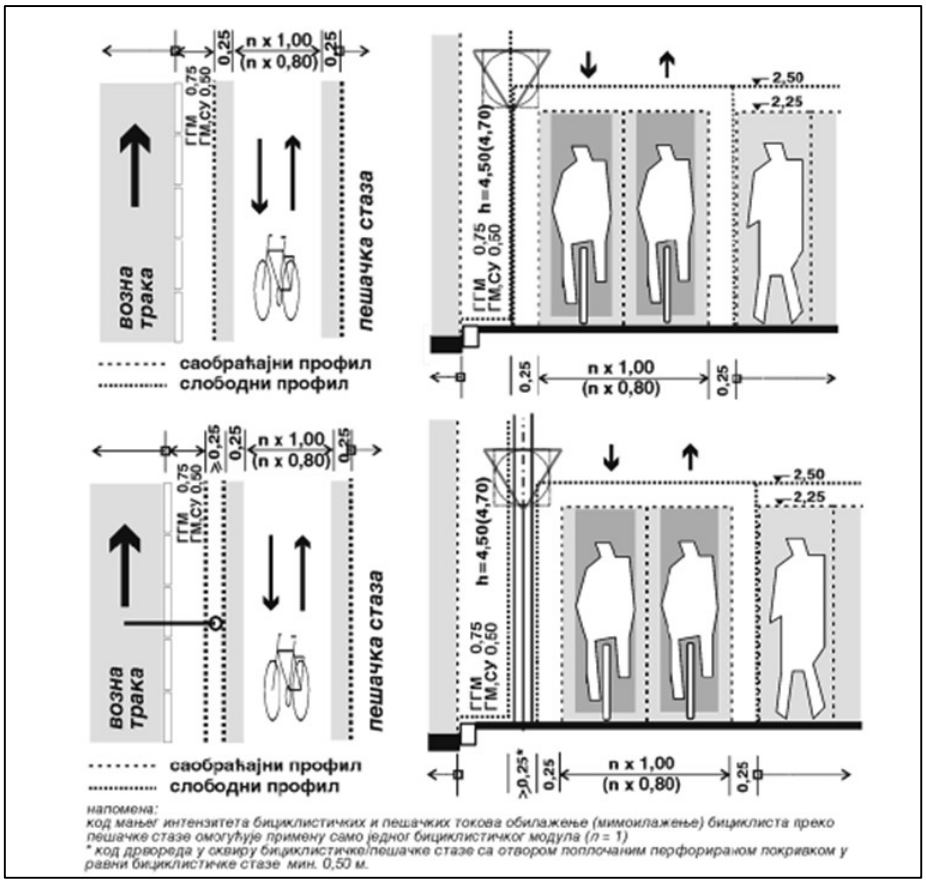
Slika 3. *Saobraćajni i slobodni profil samostalnih biciklističkih puteva (Source: ([L4])*

- *Biciklističke trake.* Planiraju se na saobraćajnicama sekundarne gradske mreže (SU, PU), odnosno saobraćajnicama manjeg značaja, uz desnu ivicu protočnog kolovoza obavezno u ravni kolovoza, sa jednosmernim kretanjem biciklista, ali uz neophodno obostrano formiranje (uz obe ivice kolovoza).



Slika 4. *Saobraćajni i slobodni profil biciklističkih traka (Source: ([L4])*

- *Biciklističke staze* su samostalni putevi koji se planiraju u regulacionom pojasu gradskih saobraćajnica primarnog ranga (GM, GS). Neophodno je formirati ih situaciono i nivelaciono razdvojene od protočnog kolovoza i podrazumevaju dvosmerno kretanje biciklista:



Slika 4. *Saobraćajni i slobodni profil biciklističkih staza (Source: ([L4])*

3.3 Postojeći izazovi u vođenju biciklističkih kretanja u gradovima

- Problematično vođenje biciklističkih traka u zonama gde postoji JGP i gde postoje stajališta istog (konstantan konflikt biciklističke staze i javnog gradskog prevoza)

Slika 5. *Biciklistička traka - Uzun Mirkova ulica i okretnica JGP (Source: ([L5])*

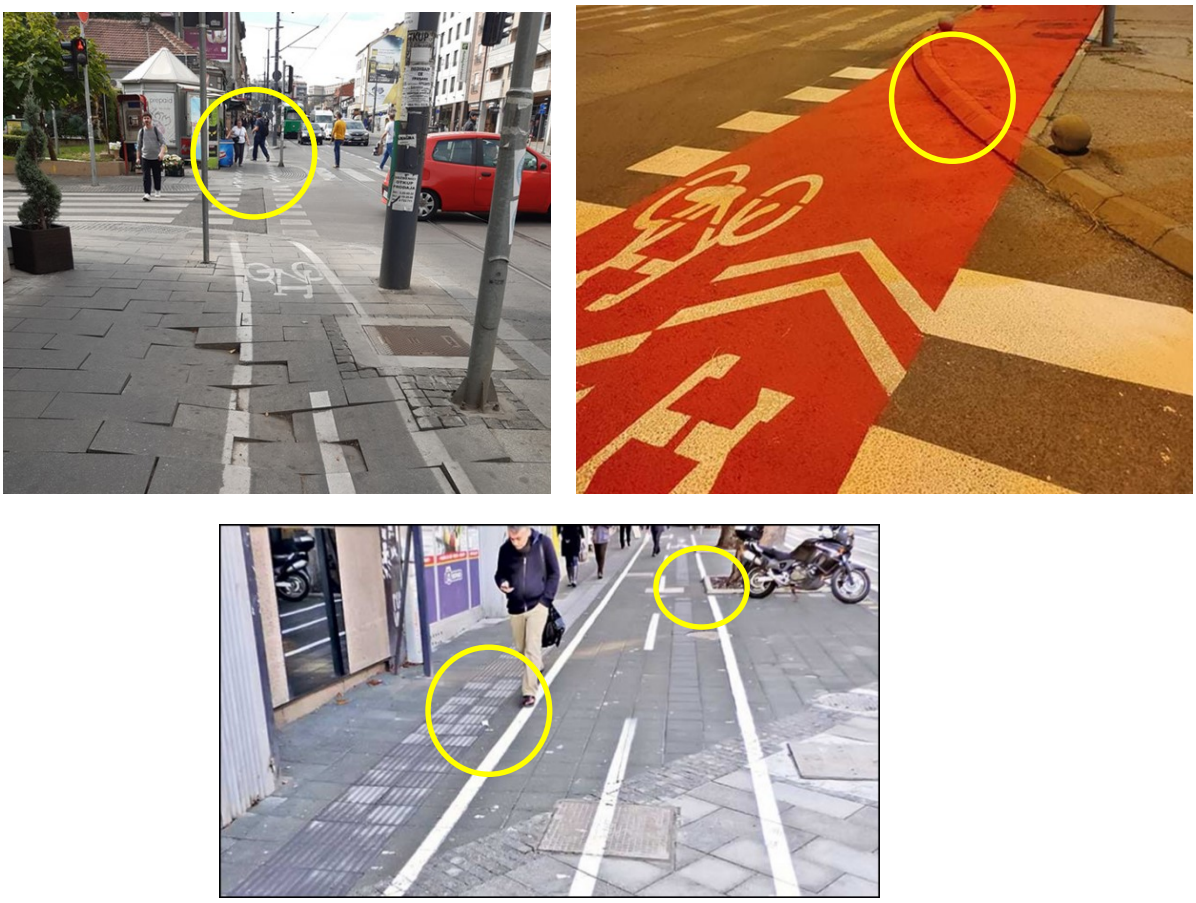
- Nepostojanje obostrane biciklističke trake (za oba smera kretanja biciklista)

Slika 6. *Biciklistička traka u Uzun Mirkovoj ulici u Beogradu (Source: ([L5])*

- Problematično vođenje biciklističkih traka u profilu saobraćajnica gde postoji koso ili upravno parkiranje izvan protočnog kolovoza (manevar ulaska/izlaska vozila se odvija preko biciklističke trake uz smanjene uslove preglednosti);
- Ako u profilu saobraćajnice postoje parking površine, preporučuje se primena biciklističkih staza (s obzirom da su prostorno odvojene od protočnog kolovoza), ali ne na uštrb drugih ranjivih kategorija učesnika u saobraćaju (pešaka pre svega);

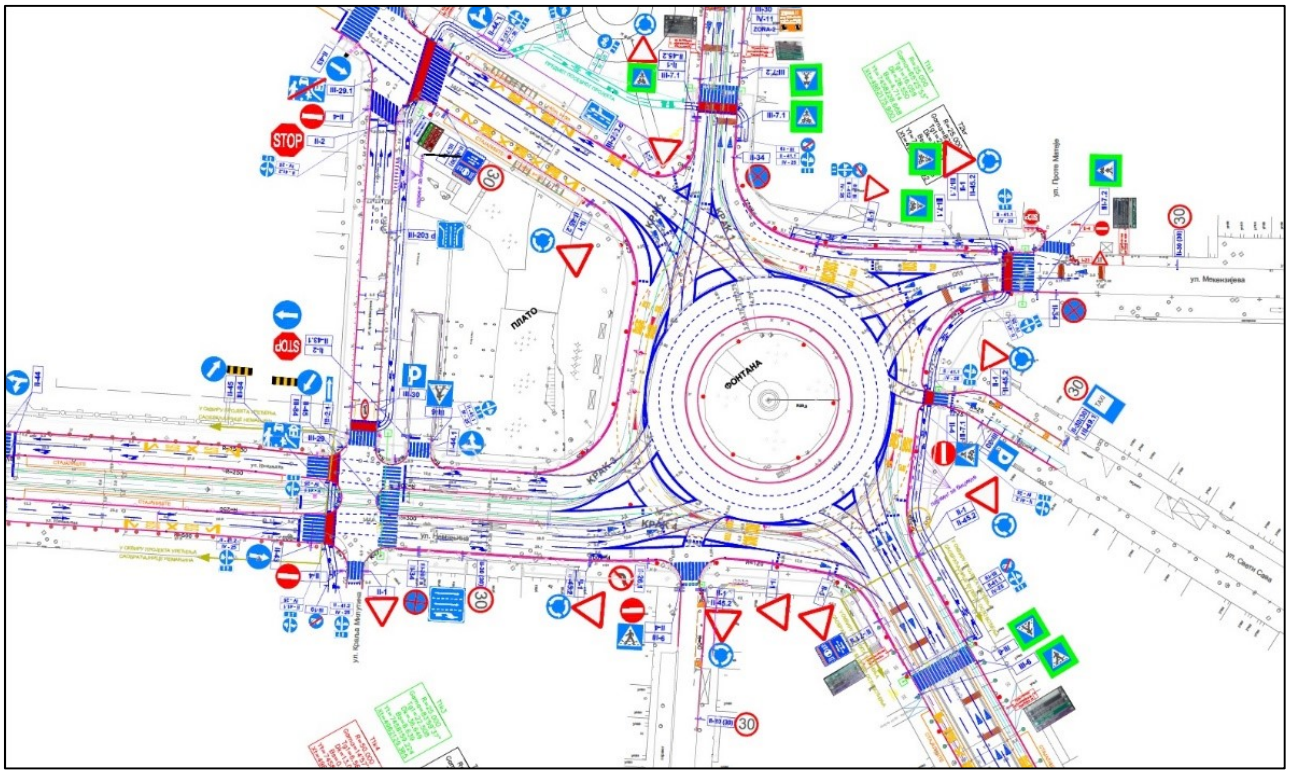
Slika 6. *Takovska ulica u Beogradu (pre i posle) (Source: ([L6])*

- U zonama perona (stanica) JGP biciklističke staze se vode iza perona (nadstrešnice) gde i pešačka kretanja
- Konflikt biciklističkih kretanja sa urbanim mobilijarom i opremom



Slika 7. *Primeri u Beogradu i Nišu (Source: ([L6])*

- Izazovno vođenje biciklističkih kretanja u zonama površinskih raskrsnica



Slika 8. *Biciklističke staze u projektu uređenja trga Slavija u Beogradu (Source: ([L7])*

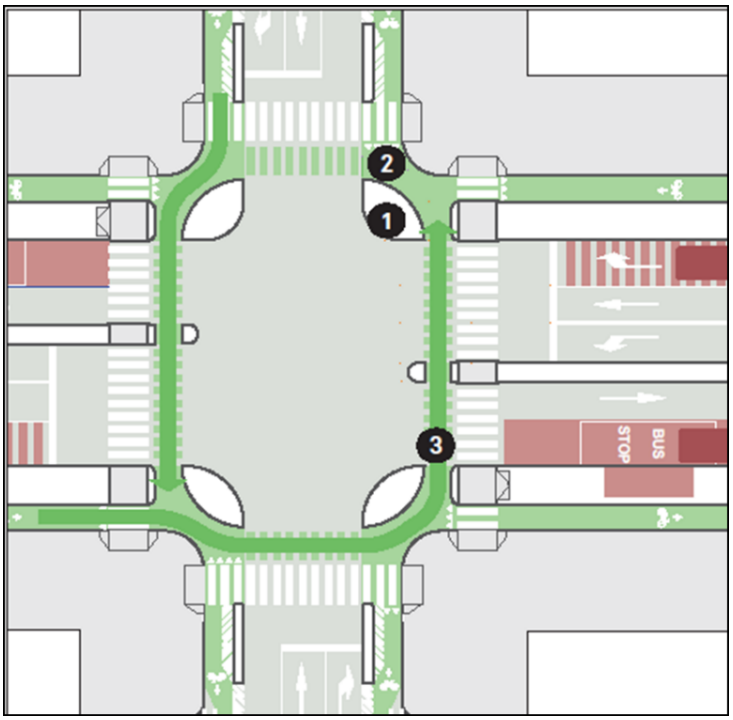
3.4 Primeri dobre prakse

Kao što se moglo zaključiti na osnovu prethodnog poglavlja, jedan od prvih izazova je gde smestiti biciklistička kretanja u regulacionom pojasu saobraćajnica u gradovima, poštujući njihovu funkcionalnu klasifikaciju (primarna ili sekundarna mreža), ali i postojeća prostorna ograničenja.

Ključ je izbeći konflikt biciklista sa ostalim učesnicima u saobraćaju (pešacima, javnim gradskim prevozom i motornim vozilima), što je najčešće moguće postići samo prostorno nezavisnim biciklističkim stazama:

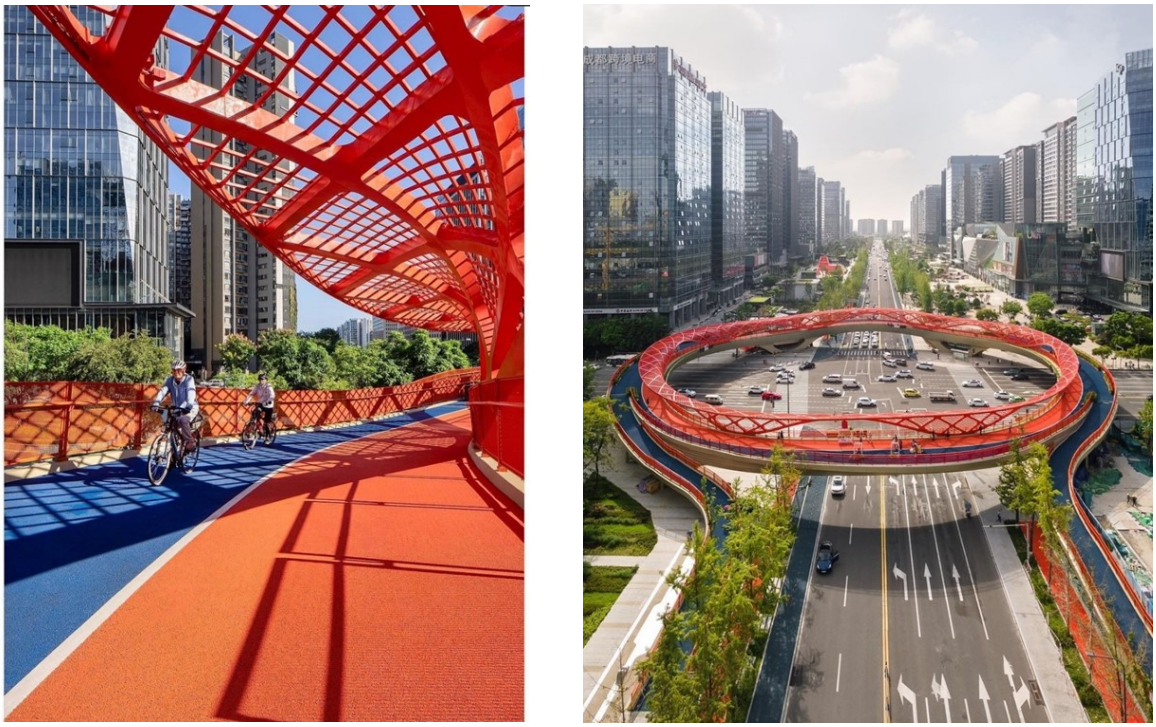
Slika 8. *Poželjan položaj biciklističke staze u poprečnom profilu gradske saobraćajnice (Source: ([L8])*

Posebnu pažnju treba posvetiti regulisanju biciklističkih kretanja u raskrsnicama, ne mešajući bicikliste sa pešacima, čak ni u zonama pečačkih prelaza:



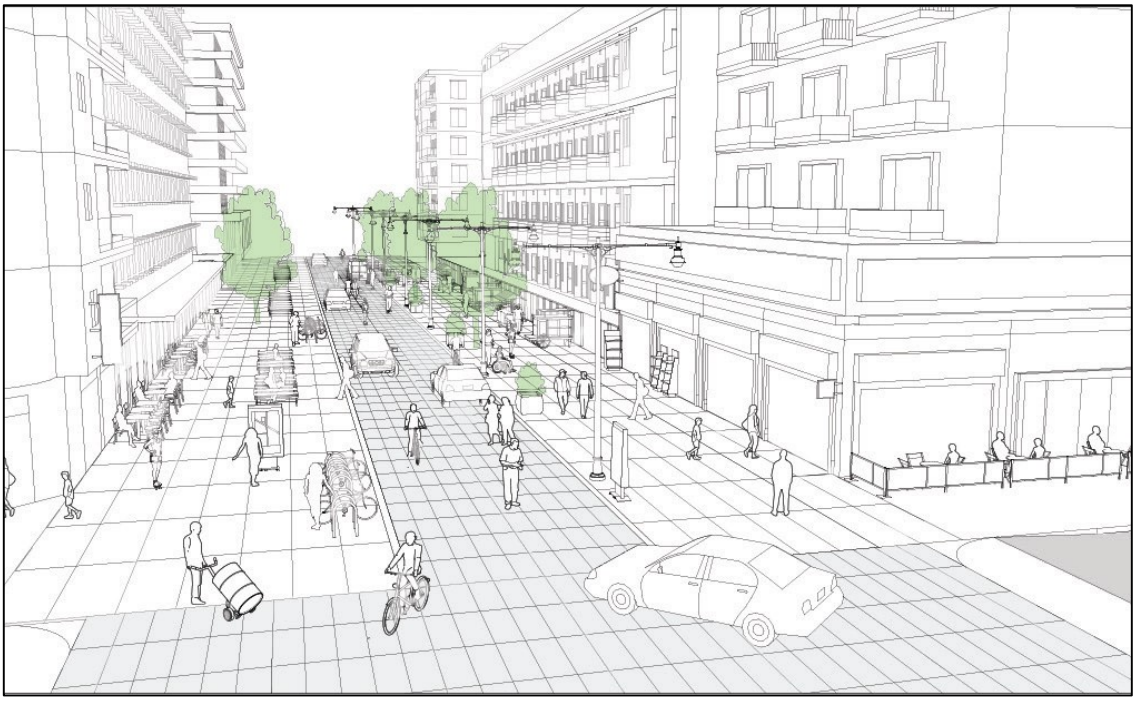
Slika 9. *Poželjan položaj biciklističke staze u zonama površinskih raskrsnica (Source: ([L8])*

Međutim, ako se površinskom raskrsnicom rešava zahtevan ukrštaj na kapacitativnoj gradskoj mreži, na saobraćajnicama sa više od dve vozne trake po smeru, onda je jedino ispravno rešenje potpuno prostorno razdvajanje (u više građevinskih nivoa) kako biciklističkih, tako i pešačkih kretanja, u zoni same raskrsnice. Ovakvo rešenje iako zahteva dodatna investiciona sredstva, u pogledu kako funkcionalnih, tako i bezbedonosnih kriterijuma, svakako predstavlja unapređenje klasičnog površinskog rešenja.



Slika 10. *Prostorno razdvajanje biciklističkih kretanja u zonama površinskih raskrsnica (Source: ([L9])*

Za razliku od poslednjeg primera, na sekundarnoj gradskoj mreži, najnižeg ranga (PU), u zonama tzv. umirenja saobraćaja, moguće je vođenje biciklističkih kretanja sa svim ostalim učesnicima, na jednoj zajedničkoj površini, naravno u uslovima ograničene brzine kretanja:



Slika 11. *Integracija različitih učesnika u saobraćaju na sekundarnoj gradskoj mreži (Source: ([L8])*

4. ZAKLJUČAK

U skladu sa osnovnim principima održive urbane mobilnosti, problematiku vođenja biciklističkih kretanja u urbanim sredinama potrebno je sagledati još u početnim fazama planiranja i projektovanja saobraćajnica u gradovima. Ključ u izboru tehnički i funkcionalno ispravnog rešenja predstavlja prvo izbor tipa saobraćajne infrastrukture (put, traka ili staza) a potom i njegovo prostorno pozicioniranje unutar regulacionog pojasa gradske saobraćajnice.

Primeri prikazani u ovom radu pokazali su da je izuzetno teško doći do kvalitetnih rešenja biciklističkih kretanja ako se do njih dolazi samo prenamenom jednog dela površine u poprečnom profile saobraćajnice biciklistima, ne sagledavajući na ispravan način sva funkcionalna i fizička ograničenja, ali i posledice po ostale učesnike u saobraćaju koje takva prenamena može izazvati.

Imajući u vidu osnovne postulate planiranja saobraćajne infrastrukture u gradovima, na primarnoj gradskoj mreži treba težiti segregaciji svih učesnika u saobraćaju (prostornom razdvajanju), dok je na sekundarnoj gradskoj mreži, ne toliko opterećenom i sa manjim brzinama kretanja, integracija različitih učesnika u saobraćaju, moguća, pod unapred definisanim uslovima i pravilima.

Polazeći od ovih bazičnih principa, jedino na taj način možemo ispuniti sve ciljeve za razvoj biciklističkog saobraćaja definisane Strategijom unapređenja saobraćaja u gradu Beogradu, i uopšte u ostalim urbanim sredinama.

Literatura

[1] C.Buchanon (1963), Traffic in Towns
[2] GIZ, Održiva urbane mobilnosti u zemljama Jugoistočne Evrope, avaliable at https://www.skgo.org/storage/app/uploads/public/155/534/228/1555342281_SRB%20SUMSEEC%20Roadmap.pdf, (08.04.2024.)
[3] Plan održive urbane mobilnosti SUMP (Sustainable urban mobility plan) (2020), available at https://bgsaobracaj.rs/uploads/files/%D0%9F%D0%9E%D0%A3%D0%9C/POUM-BG_usvojen%20Skupstina%2018-12-2020-za%20sajt_compressed.pdf, (08.04.2024.)
[4] M.Maletin, V.Andjus, J.Katanic (2007), Tehnička uputstva za projektovanje saobraćajnica u gradovima, Institut za saobraćajnice i geotehniku, Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu
[5] www.blic.rs (02.02.2022.)
[6] www.uzb.rs (02.02.2022.)
[7] https://www.beograd.rs/lat/beoinfo/1743064-nove-biciklisticke-staze-u-sklopu-uredjenja-slavije_2/ (08.04.2024.)
[8] Global Street Design Guide, Global Design Cities Initiative and Island Press (2016)
[9] https://cities-magazine.com/the-ring-of-jiaozi (08.04.2024.)

АНАЛИЗА ЕФЕКАТА ПРИМЕНЕ МЕРА ЗА УСПОРАВАЊЕ САОБРАЋАЈА

Милан Милановић[1]
[1] Факултет техничких наука Нови Сад, 22milan07@gmail.com
Вук Богдановић[2]
[2] Факултет техничких наука Нови Сад, vuk@uns.ac.rs
Немања Гаруновић[3]
[3] Факултет техничких наука Нови Сад, garunovic@uns.ac.rs

Резиме: *Многе локалне самоуправе примењују различите мере за успоравање саобраћаја на уличној мрежи. Веома често се уградња успоривача врши неселективно, без анализе негативних ефеката и избор успоривача у складу са стварним потребама. Из тог разлога, ефекти примене успоривача често су скромни, уз повећање буке и вибрација у њиховој околини. У оквиру рада извршена је анализа могућности примене различитих врста хоризонталних и вертикалних успоривача, као и могући ефекти њихове примене. У раду су приказани резултати истраживања вредности и карактеристика брзине возила приликом преласка преко одређених типова успоривача, као и брзине возила на деловима уличне мреже пре и након успоривача.*

Кључне речи: *Успоривачи саобраћаја, брзина, ефекти примене.*

ANALYSIS OF THE EFFECTS OF THE APPLICATION OF TRAFFIC SLOWING MEASURES

Milan Milanović[1]
[1] Faculty of Technical Sciences Novi Sad, 22milan07@gmail.com
Vuk Bogdanović[2]
[2] Faculty of Technical Sciences Novi Sad, vuk@uns.ac.rs
Nemanja Garunović[3]
[3] Faculty of Technical Sciences Novi Sad, garunovic@uns.ac.rs

Abstract: *Many local governments implement various measures to slow down traffic on the street network. Very often, installation of retarders is done indiscriminately, without analysis of negative effects and selection of retarders in accordance with real needs. For this reason, the effects of retarder application are often modest, with an increase in noise and vibration in their environment. As part of the work, the possibility of applying different types of horizontal and vertical retarders was analyzed, as well as the possible effects of their application. The paper presents the results of research into the values and characteristics of vehicle speed when crossing certain types of retarders, as well as vehicle speeds on parts of the street network before and after the retarders.*

Keywords: *Traffic retarders, speed, application effects.*

1. УВОД

Успоривачи саобраћаја представљају техничка средства којима се возачи приморавају да успоре, односно смање брзину. Најчешће се за то користе вертикални успоривачи, због јефтине и једноставне уградње, али и ефеката који се постижу њиховом применом. Наиме, прелазак возила преко верикалних успоривача брзином већом од пројектоване може бити веома непријатан за путнике у возилу због вибрација и буке, који се појачавају повећањем брзине. У претходном периоду развијен је већи број типова вертикалних успоривача, чија примена зависи од локације за примену, односно да ли се користе на сегментима уличне мреже између раскрсница, издвојеним пешачким прелазима или на раскрсници. Поред тога, примена вертикалних успоривача зависи и од категорије саобраћајнице, постојања линија јавног превоза, бициклистичког саобраћаја итд. Последњих година локалне заједнице поред вертикалних успоривача, као мера за успоравање саобраћаја, користе стационарне камере за детектовање и санкционисање прекорачења брзине.

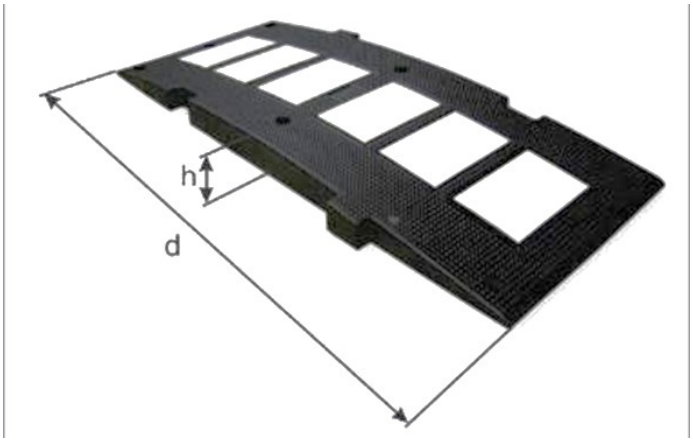
[1] Милан Милановић: 22milan07@gmail.com
[2] Вук Богдановић: vuk@uns.ac.rs
[3] Немања Гаруновић: garunovic@uns.ac.rs

Основни циљ рада јесте да се истраже ефекти утицаја успоривача на брзину, на различитим врстама вертикалних успоривача, као и ефеката примене станционарних камера за детектовање брзине.
У складу са основним циљем извршена су истраживања брзине на различитим врстама вертикалних успоривача: гумени (пластични) вертикални успоривач висине 7 cm, асфалтирани вертикални успоривач висине 7 cm и успоривачи – платформе, као и на једном сегменту уличне мреже на коме је постављена стационарна камера. Поред тога, истраживање је вршено и на месту где је претходно био постављен вертикални успоривач, који је из одређених разлога уклоњен.

2. ПРИМЕНА МЕРА ЗА УСПОРАВАЊЕ САОБРАЋАЈА

Возачи моторних возила остварују брзине кретања које често нису у складу са условима одвијања саобраћаја. У урбаним срединама, где је највећа хетерогеност саобраћајног тока, кретање возила већом брзином од дозвољене доводи до повећаног ризика, посебно за рањиве категорије учесника у саобраћају, пешаке и бициклисте. Иако се брзином управља уз помоћ саобраћајне сигнализације, често је за контролу брзину потребно користити и техничка средства за успоравање саобраћаја, односно, објкети, уређаји и опрема која приморава возаче на кретање мањом брзином. Једна од првих ефикасних мера која је у свету примењена у циљу успоравања саобраћаја била је употреба успоривача у виду вештачких избочина. Поводи за употребу успоривача могу бити различити, али најчешће је потреба да се кроз смањење брзине утиче на смањење броја саобраћајних незгода, односно да се утиче на жестину и умањење последица саобраћајних незгода. Поред тога, успоривачи се користе за ограничавање или отежавање приступа одређеним категоријама и врстама возила, односно за демотивацију возача да се крећу појединим путним правцима, смањење нивоа буке итд. Искуства употребе успоривача у свету су углавном позитивна, у ситуацијама када је област њихове употребе уређена.
Иако успоривачи представљају практично најефикаснији начин управљања брзинама, они се не могу поставити на сваком месту и на сваком путу и улици, чак ни у условима угрожене безбедности саобраћаја. Наиме, успоривачи генерално утичу на смањење комфора вожње, повећања буке и вибрација у зони њихове примене, растресања терета, успоравање или онемогућавање приступа возилима хитних служби итд [1].
У групу вертикалних успоривача спадају:
1. физичке препреке:
    - вештачка избочина,
    - плато (платформа),
2. шуштећа трака;
3. вибрациона трака

На слици 1 су приказане димензије вештачке избочине. Ознака „*d*“ представља ширину вештачке избочине, а знака „*h*“ максимална висина вештачке избочине, која се мери на средини ширине, односно највишој тачки.



Слика 1. *Димензије вертиалног успоривача -вештачке избочине*

Димензије вештачких избочина зависе од ограничене брзине кретања возила на посматраној деоници и дате су у табели 1 [1].

Табела 1. *Димензије вештачких избочина у зависности од ограничења брзине*

Ранг	Ограничена брзина кретања (km/h)	Висина вештачке избочине – h (cm)	Ширина вештачке избочине – d (cm)
1	50	3	60
2	40	5	90
3	30	7	120

2.1. Критеријуми и процедуре за уградњу успоривача

Иако успоривачи представљају практично најефикаснији начин управљања брзинама, они се не могу поставити на сваком месту, односно на свакој деоници пута или улице, чак ни у случају када је угрожена безбедност саобраћаја. Наиме, успоривачи генерално утичу на смањење комфора вожње, повећања буке и вибрација у зони њихове примене, растресања терета, успоравање или онемогућавање приступа возилима хитних служби итд. Из тог разлога, многе државе, али и локалне заједнице, су креирале приручнике у којима су дати критеријуми за постављање успоривача на путној и уличној мрежи [3].

2.1.1. Светска искуства

Највећи број критеријума за уградњу вертикалних успоривача настао је у Сједињеним Америчким Државама (САД) где су временом постали једна од најпопуларнијих мера за умиривање саобраћаја из разлога што су ефикасни у смањивању брзине, а трошкови уградње и одржавања су минимални. У САД легислативни акти везани за употребу успоривача на путној и уличној мрежи доносе се на нивоу савезних држава. Међутим, у ситуацији када на државном нивоу не постоје одговарајући прописи, њих доносе градови, односно локалне заједнице [3].

Према препорукама ИТЕ (*Institute of Transporation Engineers*), поред димензија и карактеристика вертикалних избочина, дефинисано је постојање планова за контролу брзине које треба да имају све институције које се баве уградњом успоривача [3]. Планови или подржавају постављање успоривача као широко прихваћено решење за смањење брзине и/или обима саобраћаја или безусловно одбијају њихову употребу. Приликом утврђивања да ли посматрана локација има неопходне саобраћајно – техничке услове за уградњу физичких препрека за смањење брзине, могу се јавити следећа ограничења за њихову употребу: улице које опслужује аутобуски превоз, улице са дневним обимом саобраћаја изнад унапред дефинисаних граница, сабирне улице, путеви ван насеља [3].

При анализи могућности примене успоривача применом критеријума дефинисаних у Калифорнији (САД) [3], важно је са једне стране узети у обзир оперативне карактеристике улице и карактеристике коловоза са друге стране. Улица мора бити класификована као локална, са пратећим елементима стамбеног блока и погодна за уградњу успоривача. Након избора димензија и облика платформе који су дефинисани стандардима у овој области примењује се критеријум приоритета. Приоритетне локације се дефинишу на основу измерених прекорачења брзине, броја и последица саобраћајних незгода и близине школа, паркова и институција [3].

Према важећим критеријумима у држави Вашингтон (САД) захтев за уградњу физичких препрека може бити једино разматран на улицама унутар стамбених блокова [3]. Критеријумима су прецизно наведене димензије платформи, као и позиционирање на уличној мрежи. Дефинисана је такође и процедура уградње физичких препрека која подразумева већинску сагласност локалног становништва, као и процедура уклањања физичких препрека [3].

Процедура уградње физичких препрека у Њујорку (САД) почиње од писаног захтева грађана или удружења грађана за постављањем успоривача [3]. Физичка препрека се може поставити искључиво на улицама другог реда, али уз обавезну анализу услова одвијања саобраћаја на локацији која је предвиђена за постављање успоривача. Постављање физичких препрека се увек изводи по приоритетима који зависе од измерене брзине, утврђене величине захтева за протоком, као и извештаја о саобраћајним незгодама. Постављени успоривачи се надгледају у периоду од шест месеци до годину дана. Ако се појаве проблеми који стварају небезбедне ситуације због неправилног постављања или одржавања, успоривач се уклања [3].

Према приручнику који је издат од стране DDOT (District Department of Transportation) [3] вертикалне платформе могу бити постављене након пријема захтева од стране грађана, а захтев подржава најмање 75% домаћинстава која се налазе у стамбеном блоку или у делу улице за који се захтева постављање препрека.Улице морају да испуњавају одређене критеријуме (улица мора бити локална, не сме бити на транзитном путу, нити сме бити примарна саобраћајница за возила хитних служби, подужни нагиб коловоза не сме прелазити 8% итд.). Након подношења захтева DDOT спроводи

вредновање испуњености услова пре постављања препрека ради утврђивања погодности предложене локације и усаглашености са критеријумима. DDOT може наложити уклањање или модификовање успоривача или примену других мера за умиривање саобраћаја, ако постојеће мере не испуњавају очекиване циљеве или ако доводе до појаве небезбедних ситуација у саобраћају [3].
У оквиру приручника за град Sacshe у држави Тексас [3] (САД) одређено је да улице морају испунити одређене опште карактеристике (ограничење брзине од 30 mph или мање, саобраћајно оптерећење од 500 voz/h, двотрачне улице итд.), као и геометријеске карактеристике (прегледност, пут не сме бити у кривини, уздужни нагиб не сме бити већи од 5% итд [3] .
У прописима „The Highways (Road Humps) Regulations“ [3] дефинисана је употреба и уградња вертикалних избочина на државним путевима у Енглеској и Велсу. У оквиру ове одредбе наведено је да је потребно извршити консултације са полицијом, локалном службом, ватрогасном службом, службом хитне помоћи и репрезентативним представницима организација које користе пут [3].
Основни критеријуми који се тичу ширине и висине успоривача који су постављени у Италији [3] зависе од постављеног ограничења брзине. Вертикалне избочине могу бити постављене на улице унутар стамбеног блока, на приватним или јавним паркиралиштима, али позиционирање ових успоривача на улицама које су укључене у руту кретања возила хитних служби је забрањено. Сваки успоривач чији је задатак смањење брзине мора бити постављен у складу са прописаним елементима и морају бити направљени од каучука (гуме) и пластичних материјала, док је употреба бетона ограничена на улице у којима је постављено ограничење брзине до 30 km/h [3].
У Републици Србији примена техничких средстава за успоравање саобраћаја, врсте, њихов изглед, техничке карактеристике и начин обележавања дефинисани су у оквиру важећих прописа које доноси Влада Републике Србије и министарство надлежно за послове саобраћаја (Закон о безбедности саобраћаја, Правилник о техничким средствима за успоравање саобраћаја на путу, Правилник о саобраћајној сигнализацији) [4].
Поред законских регулатива у оквир референтних норматива, а као документи нижег ранга, могу се сврстати и различита техничка упутства, приручници и смернице који се односе на примену средстава за успоравање саобраћаја [3].
Као такве објављене су смернице „Средстава и мере за успоравање саобраћаја“ [5], као део Приручника за пројектовање путева у Републици Србији, издатим од стране ЈП „Путеви Србије“. Ближе и детаљније дефинисање техничких услова које морају да испуне техничка средства за успоравање саобраћаја дефинисана су у оквиру националног СРПС стандард [5].

3. МЕТОДОЛОГИЈА ИСТРАЖИВАЊА

Истраживање које је спроведено за потребе рада обухватило је следеће:

- истраживање утицаја вертикалних препрека на брзину
- истраживање брзина на локацији са које је уклоњен вертикални успоривач
- истраживање карактеристика брзине на локацији стационарне камере за мерење и санкционисање прекорачења брзине.
- формирање база података
- анализу и синтезу резултата истраживања

Истраживање брзине на локацији са које је уклоњен успоривач вршена је мерењем брзина и анкетом грађана, односно становника који живе у близини локације са које је уклоњен успоривач.
Карактеристике брзина на локацијама стационарне камере, утврђене су мерењем брзина у непосредној локацији камера.
Мерење брзина вршено је ручним радаром *Bushnell Velocity Speed Gun Decetotor* који мери распон брзине од 16 до 322 km/h. С обзиром да је према техничким карактеристикама уређаја за брзине мање од 20 km/h, грешка мерења већа, у случају регистровања мање брзине, усвајана је вредност брзине од 20 km/h.
Истраживањем нису обухваћена возила која су се кретала у условима засићеног тока односно возила која су се кретала у колони, већ само возила која су се кретала у условима слободног тока. На овакав начин избегнут је утицај интеракције између возила на брзину вожње. У оквиру анализе нису узете у обзир брзине возила која су се непосредно пре или непосредно после локације мерења укључила односно искључила из саобраћајног тока. Разлог тога је да су возачи потенцијално прилагодили брзину пешацима на пешачком прелазу, а не успоривачу саобраћаја. Поред тога, приликом анализе нису узете у обзир брзине возила када су на кретање возила утицали пешаци, бициклисти или други учесници у саобраћају.

Слика 2. *Радар којим је вршено мерење брзине*

База података за анализу брзине преласка возила преко вертикалних успоривача формирана је мерењем брзине приликом нагаза возила на успоривач, односно непосредно пре тога. Мерења су вршена на следећим типовима вертикалних успоривача:

- гумени успоривач,
- асфалтирани успоривач,
- платформа.

Иако се ради о различитим типовима, мерењем је утврђено да висина успоривача на којима је вршено истраживање износи 7 cm.

3.1. Локације на којима је вршено истраживање

Локације на којима је вршено истраживање налазе се на територији Града Новог Сада и Инђије. Истраживање карактеристика брзина мерено је у два града, из разлога што се У Новом Саду у већој мери користе асфалтирани, а на уличној мрежи Инђије углавном гумени вертикални споривачи. Поред тога, у Новом Саду се за разлику од Инђије на појединим локацијама за успоравање саобраћаја користе платформе, док у Инђији постоје локације са фиксним радарским камерама.

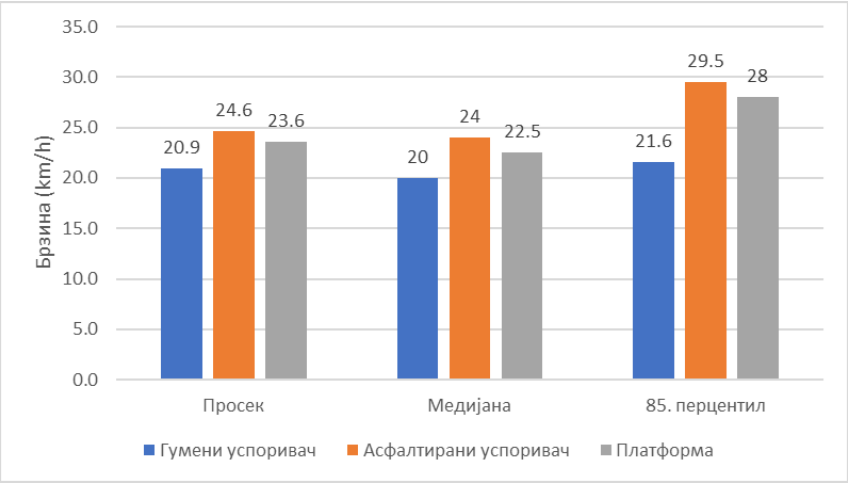
У Инђији је истраживање рађено на по једној локацији у улицама Ђорђа Војновића и Бошка Бухе где су постављени гумени вертикални успоривачи димензија, ширина 1,2 метра и висина 7 центиметара, као и у улици Цара Душана где се налази фиксна радарска камера. Поред тога, на другој локацији у улици Ђорђа Војновића вршено је истраживање локацији са које је уклоњен вертикални успоривач.

У Новом Саду истраживање је вршено на две локације на булевару Деспота Стефана. На првој локацији код Лиманског парка налази се платформа са два пешачка и један бициклистички прелаз, а друга локација је код студентског дома Цар Лазар на којој је постављен вертикални успоривач. Следећа локација је у улици 1300 каплара на којој је постављен асфалтирани вертикални успоривач. Поред тога истраживање је рађено у Крајишкој улици у Петроварадину у којој су након реконструкције изграђене платформе са пешачким прелазом.

4. РЕЗУЛТАТИ МЕРЕЊА БРЗИНЕ

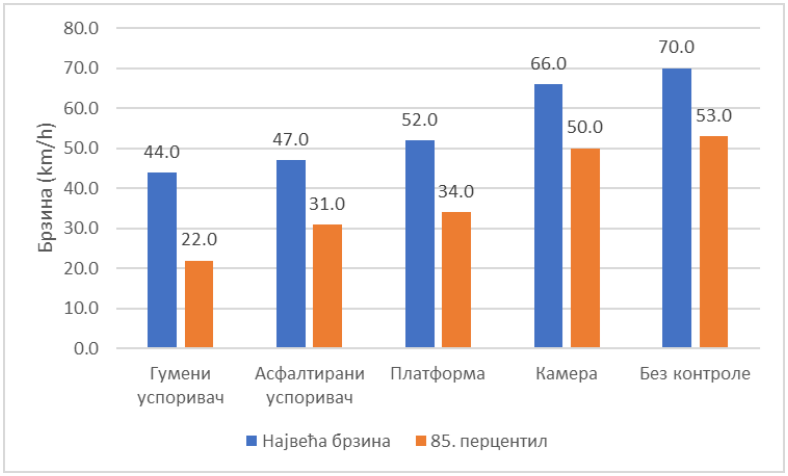
На наредној слици приказани су резултати истраживања брзина на гуменом вертикалном успоривачу, асфалтираном успоривачу и платформи. Као што је претходно наведено, мерење брзина је вршено на по две локације за сваки тип успоривача.

Иако су се асфалтирани вертикални успоривачи налазили у зони ограничења брзине 30 km/h, а гумени и платформе на делу уличне мреже са општим ограничењем брине од 50 km/h, резултати истраживања указују на чињеницу да су највеће брзине остварене на асфалтираним вертикалним успоривачима. Резултати анализе упућују на закључак да ограничење брзине није имало утицаја на брзину преласка возила преко успоривача. Поред тога, закључено је да брзина а преласка возила преко успоривача зависи првенствено од облика успоривача.



Слика 3. *Упоредни приказ брзина на вертикалним успоривачима*

Најниже вредности просечне брзине, медијалне брзине и 85. перцентила максималне брзине реализоване су на гуменом успоривачу. Са друге стране, највеће брзине преласка возила преко успоривача реализоване су на асфалтираном вертикалном успоривачу.
На наредној слици приказан је однос највеће забележене брзине и брзине 85. перцентила, на локацијама са гуменим успоривачем, асфалтираним успоривачем, платформом, локацијом са стационарном камером и локацијом са које је уклоњен вертикални гумени успоривач.



Слика 4. *Упоредни приказ брзина по врсти контроле*

Максимална измерена брзина приликом истраживања, на овим локацијама, износи 70 km/h. Ова брзина измерена је на локацији без конроле, на којој су генерално брзине очекивано биле највеће.
Резултати анализе показали су да су брзине преласка возила преко асфалтираног успоривача биле веће у односу на друге типове, чак и у случају када се успоривач налазио на локацији са ограничењем брзине од 30 km/h. Највеће расипање брзина, односно највеће разлике у брзинама на успоривачима, остварене су на платформама.
Резултати истраживања су показали да практично сва техничка средства за успоравање или контролу брзине утичу на одлуку возаче да смање брзину. Поред тога, резултати истраживања показали су да на локацијама без контроле, односно без успоривача или стационарне камере, 85. перцентил брзине износи 53 km/h, односно само 3 km/h више од општег ограничења. Ово упућује на закључак да је готово 85% возача поштовало опште ограничење брзине.
На локацији са стационарном радарском камером, навећи број возача, односно 88% возио је у границама дозвољене брзине.

5. РЕЗУЛТАТИ АНКЕТЕ

Током истраживања карактеристика брзина на локацији без контроле, у улици Ђорђа Војиновића у Инђији, извршена је циљана анкета којом су били обухваћени искључиво грађани који живе у

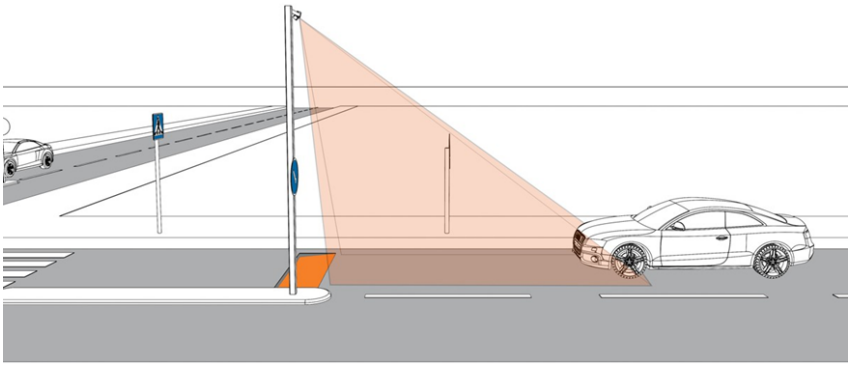
непосредној близини локације са које је претходно уклоњен успоривач. Из тог разлога, узорак се састоји од одговора само 52 грађана.
Мишљење већине становника је да се возила крећу превеликом брзином односно да нико не поштује ограничење брзине од 50 km/h. Поред тога, становници су износили мишљења да је у улици страшна бука и гужва, верујући да је то последица велике брзине којом се возила крећу кроз улицу. Из тог разлога, у оквиру анкете испитаницима је постављено само по једно питање: „*Да ли мислите да је потребно вратити лежећи полицајац*?“
Резултати анкете приказани су на наредној слици. Као што се види, велика већина становника који живе у околини локације са које је уклоњен успоривач је мишљења да је потребно поново поставити вертикални успоривач. То би према приручнику округног одељења за саобраћај у САД [3] био довољан разлог за постављање успоривача саобраћаја, с обзиром да он предвиђа постављање успоривача ако о томе позитивно мишљење има преко 75% станара тог дела улице.

Слика 6. *Резултати анкете*

Иако дозвољена брзина на локацији са које је уклоњен успоривач износи 50 km/h, уколоњени вертикални гумени успоривач био висине 7 cm, који се према Правилнику о техничким средствима за успоравање саобраћаја [4] поставља на локацијама са ограничењем брзине од 30 km/h.

6. ПРЕДЛОГ МЕРА

Резултати истраживања показали су да мали проценат возача значајније крши ограничење брзине. Наиме, на истраживаној локацији на којој не постоје средства за успоравање и контролу брзине, просечна просечна брзина свих возила која су прошла локацијом износи 46,7 km/h. 85. перцентил брзине је тек нешто изнад ограничења, унутар толеранције од +4 km/h који се у многим земљама толерише, односно не сматра прекорачењем брзине.
Познато је да физичке препреке за успоравање саобраћаја имају негативне утицаје на склопове на возилима, посебно у дужем временском периоду, што се избегава применом савремених система за успоравање. Са овог становишта нерационално је да због малог броја несавесних возача успорава комплетан саобраћајни ток, односно да сви возила прелазе преко вертикалних успоривача и умањују комфор. Из тог разлога се у последње време развијају интелигентни системи за успоравање саобраћаја, који за разлику од класичних успоравају само возила која прекорачују брзину. На наредној слици приказан је систем за успоравање који се примењује у скандинавским земљама [2].



Слика 6. *Паметни успоривач саобраћаја*

Овај систем се састоји од фиксног радара и платформе која је у равни са коловозном, али која има могућност спуштања у труп коловоза за неколико центиметара. Радарски систем мери брзину свих возила која прилазе успоривачу. Ако је брзина мања од ограничења, односно у границама толеранције, помична платформа остаје у равни коловоза и омогућава неометан пролазак возилу. Са друге стране, ако радар детектује возило које је прекорачило брзину, систем спушта платформу неколико центиметара и тако формира успоривач саобраћаја по принципу улегнућа на путу. Овај систем захтева већа улагања, али омогућава несметан пролазак возила која се крећу у границама дозвољене брзине.

7. ЗАКЉУЧАК

Истраживање које је презентовано у овом раду показало је да успоривачи представљају ефикасна средства за смањење брзине, које у највећој мери зависи од врсте успоривача. Брзина преласка возила преко вертикалних успоривача више зависи од висине, облика, изгледа и материјал од кога је направљен успоривач. Са друге стране, ограничење брзине саобраћајном сигнализацијом нема утицаја на брзину возила приликом преласка преко успоривача. Резултати истраживања показали су и да се најмање брзине реализују на гуменом вертикалном успоривачу, односно да је он ефикаснији од асфалтираног успоривача и платформе, који због ширине возилима омогућавају прелазак већом брзином. Фиксна радарска камера показала се као најбоље решење с обзиром да се највећи број возила (87) кретао брзином у границама од 45 km/h - 50 km/h.
Резултати анкете становника који живе у непосредној близини локацији са које је уклоњен успоривач имају позитивно мишљење о употреби успоривача, са субјективним ставом да већина возача вози брзином већом од дозвољене. Међутим, резултати истраживања показали су да је просечна брзина на овој локацији, која је тренутно без успоривача и уређаја за контролу брзине, мања од дозвољене, као и да се готово 85% возила креће у границама дозвољене брзине. Ово упућује на закључак да је пре постављања и избора успоривача корисно извршити мерење брзине, а у случају потребе анализирати могућност примене интелигентних система за успоравање саобраћаја. У овом раду није узета у обзир видљивост асфалтираних успоривача у односу на околни коловозни застор, као ни утицај различитих функција улица у мрежи на којима је вршено истраживање. Ову проблематику би требало истражити у неком наредном раду.

Захвалница

Резултати приказани у овом раду су део истраживања пројекта "*Савремени трендови и иновације у развоју курикулума у области саобраћаја и транспорта*", основаног од стране *Департмана за саобраћај, Факултета техничких наука у Новом Саду, Универзитета у Новом Саду, Република Србија*.

Литература

[1] Ass. dr Nenad Saulić, dipl. inž. saobraćaja; prof. dr Vuk Bogdanović, dipl. inž. saobraćaja; prof. dr Jelena Mitrović Simić, dipl. inž. saobraćaja; ass. dr Nemanja Garunović, dipl. inž. saobraćaja. Uticaj geometrije usporivača na brzine kretanja vozila.
[2] Anthony Davis, active speed bump launched at Intertraffic now available world-wide.
[3] Dr Vuk Bogdanović, dipl. inž. saobraćaja; dr Dragan Jovanović, dipl. inž. saobraćaja; dr Jelena Mitrović Simić, dipl. inž. saobraćaja; dr Nenad Ruškić, dipl. inž. saobraćaja; dr Zoran Papić, dipl. inž. saobraćaja; Nenad Saulić, master dipl. inž. saobraćaja; Nemanja Garunović, master dipl. inž. saobraćaja; Boško Matović, master dipl. inž. saobraćaja. Primena prinudnih usporivača saobraćaja na teritoriji Grada Novog Sada sa posebnim osvrtom na metodologiju i uslove za implementaciju mera.
[4] Pravilnik o tehničkim sredstvima za usporavanje saobraćaja na putu, Ministarstvo saobraćaja Republike Srbije, službeni glasnik RS broj 9/14.
[5] Priručnik za projektovanje puteva – Saobraćajna signalizacija i oprema, Sredstva i mere za usporavanje saobraćaja, JP Putevi Srbije, Beograd 2012.

SISTEM ODVOĐENJA ATMOSFERSKIH VODA SA AERODROMA „NIKOLA TESLA”- BEOGRAD, POSLE IZGRADNJE NOVE UMETNUTE POLETNO – SLETNE STAZE

Autor: Duško Božović,dipl.ing.građ.

Odgovorni projektant – NEO Aerodromes Engineering, Beograd, e-mail: dusko.bozovic@beoprodm.rs

Koautor: Vesna Tomić,dipl.ing.gradj.

Nadzor za hidrotehničke radove - Mašinoprojekt Kopring, Beograd, e-mail: vesna.tomic@masinoprojekt.co.rs

Rezime*: Glavna poletno - sletna staza sa pripadajućim sistemom za odvođenje atmosferskih voda, izgrađena je u periodu od 1958.- 1961. god. U periodu od 2020.- 2023. izgrađena je nova umetnuta poletno – sletna staza. Sistem odvođenja atmosferskih voda sa manevarskih površina umetnute PSS projektovan je kao autonomni (bez uključenja u sistem kišne kanalizacije ostalog dela aerodroma). Atmosferske vode sabirane su bočnim rigolama sa slivnicima i sistemom kolektora odvedene u otvorenu retenziju, a iz otvorene retenzije kontrolisanim protokom u recipijent - kanal Galovica.*

Izgradnja nove – umetnute PSS predstavlja složen građevinski poduhvat u pogledu odvođenja atmosferskih voda gde je bilo potrebno inkorporirati i postojeći sistem kišne kanalizacije glavne PSS. Pri tom, za deo voda predviđena je podzemna AB retenzija sa pumpnom stanicom i potisnim cevovodom za spoj sa ostalim delom gravitacionog odvodnog sistema. Sistem kišne kanalizacije izveden je ugradnjom HDPE spiralnih kanalizacionih cevi prečnika (DN300-DN2000) i obodnih krutosti SN8 i SN32.

Ključne reči: *poletno-sletna staza, kišna kanalizacija, drenaža, retenzija, rigola, slivnici*

Abstract: *The Main runway with associated rainwater drainage system was built in the period from 1958. to 1961. New inserted runway was built in the period from 2020. to 2023. The rainwater drainage system from the maneuvering surfaces of the inserted runway is designed as autonomous (without being included in the rainwater drainage system of the rest of the airport). Rain water was collected by lateral gutters with gullies and taken by collector system to an open detention pond, and from the open detention pond through a controlled flow to the Galovica drainage channel.*

The construction of a new – inserted runway represents a complex construction system in terms of rainwater drainage, where it was necessary to incorporate the existing rainwater drainage of the Main runway. At the same time, an underground RC detention pond with a pumping station and the boosted pipeline for connection with the rest of the gravity drainage system is planned for partial of the rain water. The rainwater drainage system was made by installing HDPE spiral drainage pipes with a diameter (DN300-DN 2000) of ring stiffness SN8 and SN32.

Keywords: *runway, rainwater drainage, perforated drainage, detention pond, gutter, gullies*

1.UVOD

Izgradnja umetnute PSS na Aerodromu NIKOLA TESLA, Beograd počela je u maju 2020. nakon 60 godina od izgradnje glavne PSS. Cilj izgradnje umetnute PSS bio je da se na Aerodromu NIKOLA TESLA, Beograd, omogući normalno odvijanje vazdušnog saobraćaja, kako bi se nakon izgradnje umetnute PSS pristupilo neometanoj rekonstrukciji postojeće glavne poletno-sletne staze (PSS). Izvođenje građevinsko-hidrotehničkih i AGL (airport ground lighting) radova pri izgradnji nove umetnute PSS (koja je projektovana između postojeće rulne staze TWY A i postojeće glavne PSS) predstavlja složen izvođački zadatak, uzimajući u obzir da su se radovi na umetnutoj PSS izvodili paralelno sa odvijanjem vazdušnog saobraćaja na postojećoj PSS.

2. OSNOVNA KONCEPCIJA REŠENJA ODVOĐENJA ATMOSFERSKIH VODA SA NOVE UMETNUTE PSS

2.1. TEHNIČKI OPIS KANALIZACIONE MREŽE

Na osnovu analize nivelacionog rešenja u zoni postojeće poletno-sletne staze (12L/30R) i planirane umetnute poletno-sletne staze (BCIR) došlo se do zaključka da nije moguće izbeći koliziju postojećih i planiranih cevovoda kišne kanalizacije, te je iz navedenog razloga deo postojeće atmosferske kanalizacije, a koja je u funkciji evakuacija površinskih atmosferskih voda sa postojeće piste 12L/30R, preusmeren na planirani sistem buduće BCIR. Imajući u vidu da je planiranim rešenjem evakuacije kišne kanalizacije za buduću BCIR predviđeno kontrolisano ispuštanje atmosferskih voda u recipijent (melioracioni kanal „Galovica“) i to preko dva retenziona bazena, preusmeravanjem pojedinih deonica postojeće kišne kanalizacije na budući cevni sistem i posledično na planirane retenzione bazene, neminovno će se smanjiti hidrauličko opterećenje na postojeće kolektore u sistemu kišne kanalizacije.

Trase razvoda kišne kanalizacije uz nove poletno – sletne staze (BCIR), rulne staze (TWY) i brze izlaze (RET) kao i izgradnja kolektora, kojim se sve prikupljene atmosferske otpadne vode evakuišu ka recipijentu, definisani su na način koji obezbeđuje adekvatno sakupljanje površinskog oticaja sa budućih površina i njegovu evakuaciju ka recipijentu.

Trasiranje razvoda kanalizacije je usklađeno sa raspoloživom topografijom terena, niveletom postojećih cevovoda i planiranom nivelacijom umetnute piste BCIR. Merodavni intenzitet kiše, koji je korišćen za dimenzionisanje svih elementa u sistemu, definisan je Master Planom. Oticaj površinskih otpadnih voda sa neke površine se definiše prema merodavnom intenzitetu padavina određenog povratnog perioda i za trajanje padavina od 20 minuta. Merodavni intenziteti padavina su preuzeti is Master plana i prikazani su u Tabeli 1.

Tabela 1.

Površina	Povratni period T (god)	Intezitet padavina (L/s/ha)
RWY-Poletno sletna staza	T = 10	232
TWY-Rulna staza	T = 5	198
Sve ostale površine	T = 2	141

Za proračun maksimalnog protoka atmosferskih voda korišćena je racionalna metoda programskog paketa Urbano Canalis. Maksimalni oticaj sa neke površine sračunat je prema sledećoj formuli:

$$Q_T = Ci_TA$$

Gde su:

Q_T proticaj atmosferskih otpadnih voda (l/s)

C koeficijent oticaja

i_T intezitet kiše trajanja 20min za defisani povratni period, T (l/s/ha)

A površina sliva (ha)

Za proračun kišne kanalizacije korišćeni su sledeći koeficijenti oticanja i prikazani su u Tabeli 2:

Tabela 2.

Površina	Koeficijent oticaja
Popločane površine (beton, aspfalt)	0.9
Zelene površine	0.2

Kriterijumi za dimenzionisanje projektovanih kolektora je brzina koja se kreće u granicama 1.0-2.5 m/s i punjenje profila koje je prosečno 70%.

Duž buduće piste BCIR trasiran je novi cevovod kišne kanalizacije. Cela površina piste je, u skladu sa niveletom, podeljena na tri sliva. Sliv sa zapadne strane se prirodno drenira ka zapadnoj granici kompleksa aerodroma, koja je nizvodno od recipijenta (granica projekata tj. recipijent je postojeće reviziono okno na glavnom kolektoru u okviru granice koncesije). Iz navedenog razloga predviđeno je da se atmosferske otpadne vode sa ovih slivnih površina upuste u podzemnu AB retenziju 1, odakle će se sakupljena kišnica kontrolisano, preko pumpne stanice, potisnog cevovoda i šahta za prekid pritiska, evakuisati ka planiranom kolektoru uz umetnutu poletno-sletnu stazu (BCIR). Sve prikupljene atmosferske vode sa centralne i istočne slivne površine se prirodno dreniraju ka konačnom recipijentu, te je za ove slivove predviđen gravitacioni cevovod koji se direktno vezuje na planiranu otvorenu retenziju 2. Na ovaj način je obezbeđen potpuno nezavisan sistem kišne kanalizacije za BCIR. Imajući u vidu da je recipijent atmosferskih voda sa područja aerodroma zajednički za postojeće i planirane instalacije, veza projektovane kišne kanalizacije sa postojećim sistemom je predviđena u okviru granice koncesije, tj. u šahtu na glavnom kolektoru.

Sistem atmosferske kanalizacije je projektovan od dvoslojnih spiralnih kanalizacionih cevi SPIROPIPE, izrađenih od polietilena visoke gustine HDPE, prečnika DN300mm – DN2000 mm, obodne krutosti SN8 i SN32 (ukrštanje glavnih kolektora sa pistom i rulnim stazama). Spajanje cevi se vrši tehnikom elektrofuzionog zavarivanja. Sve cevi su izrađene u skladu sa važećim EU normama EN13476 i DIN 16961.

Na svim horizontalnim i vertikalnim prelomima atmosferske kanalizacije predviđena je montaža prefabrikovanih PEHD revizionih okana, minimalnog unutrašnjeg prečnika D = 1000 mm. Telo revizionog okna treba da bude izrađeno od PEHD-a, korugovane spoljašnjosti i glatke unutrašnjosti. Svi elementi koji se koriste za izradu revizionih silaza moraju da budu u skladu sa važećom EU normom 8, i od istog proizvođača kao što je proizvođač cevnog materijala.

Prihvatanje i odvod atmosferskih voda iz rigola (širine 2,1m) sa BCIR, TWY i RET vrši se tačkastim slivnicima sa taložnikom i LG rešetkom 500x500 mm za klasu opterećenja F900 i linijskim sistemom šlic odvodnih kanala za klasu opterećenja F900 (u daljem tekstu "slot drain") Q-Max.

Umesto klasičnih betonskih bubanj slivnika Ø400 mm predviđena je ugradnja prefabrikovanih, PP korugovanih slivnika D400mm sa taložnikom i rešetkom dimenzija 500x500 mm, za klasu opterećenja F900 (900 kN) prema SRPS EN124.

Slivničke veze sa glavnim kolektorom ili revizionim oknom izvesti preko prefabrikovanog T komada sa integrisanim priključkom na glatku PVC cev. Projektom je predviđeno da se slivničke veze izvedu od glatkih PVC cevi SN8 u padu 3%.

Sistem šlic odvodnih kanala - "slot drain" predviđen je kako bi se zadovoljio zahtev za ekonomičnim odvođenjem velikih hidrauličkih kapaciteta. Sistem je predviđen za odvodnju velikih površina BCIR sa jednostranim padom.

Na pojedinim mestima predviđena je izgradnja AB revizionih okana. AB reviziona okna su predviđena na većini mesta gde se postojeći sistem kišne kanalizacije povezuje na projektovanu instalaciju, ili na mestima gde je zbog uslova na gradilištu procenjeno da je lakše izvesti AB šaht umesto prefabrikovanog okna.

Na svakom revizionom silazu montirani su LG poklopci svetlog otvora Ø605 mm, od nodularnog liva (GGG 40), za klasu saobraćajnog opterećenja D400, u skladu sa SRPS EN124 standardom.

Dimenzije i zapremina oba retenziona bazena su definisane prema pripadajućoj slivnoj površini.

Retenzije su pozicionirane u zelenom pojasu i skladište višak atmosferskih vode u ograničenom vremenskom periodu, ograničavanjem protoka na izlazu.

Retenzija br.1 i crpna stanica sa pumpnim agregatom i cevovodom pod pritiskom kontrolisano odvodi atmosferske vode preko primarnog gravitacionog razvoda do retenzije br. 2, dok se odvođenje retenzije br. 2 vrši gravitaciono sa dna retenzije i ograničava isticanje na maksimalno 530 l/s.

Retenzije su u sušnom vremenu prazne, a pune se privremeno vodom samo u slučaju padavina.

Kako bi se odredila potrebna zapremine retenzija sa dužim trajanjem kiše od 20min, koji su definisani Master planom, korišćeni su ulazni podaci koji su dobijeni sa meteo stanice Surčin.

Proračun transformacije poplavnog talasa izvršen je za uslove merodavne kiše povratnog perioda 10god intenziteta trajanja 40 minuta: I_T =119.53 l/s/ha (meteo stanica Surčin, podaci RHMZ).

Proračun potrebne zapremine retenzije 1 je izvršena za kišu povratnog perioda 10 godina pod sledećim pretpostavkama:

Površina sliva (ha):	34.0
Koeficijent oticaja:	0.9
Maks. kontrolisani oticaj (l/s):	200
Povratni period:	10 godina
Trajanje	40min

Potrebna zapremina zatvorene retenzije 1 definisana je prema sračunatoj zapremini oticaja, pretpostavljenom kapacitetu pumpnog agregata (200 l/s) i prema usvojenom trajanju kiše (40 minuta).

Usvojena zapremina retenzije 1 prema zadatim kriterijumima je 8500 m3.

Proračun potrebne zapremine retenzije 2 je izvršen za kišu povratnog perioda 10 godina, pod sledećim pretpostavkama:

Površina sliva (ha):	32.0
Koeficijent oticaja:	0.9
Kontrolisani doticaj iz retenzije 1 (l/s)	200
Maks. kontrolisani oticaj (l/s):	530
Povratni period:	10 godina
Trajanje	40min

Usvojena zapremina otvorene retenzije 2 prema zadatim kriterijumima je 7500 m3.

2.2. TEHNIČKI OPIS RETENZIJA

Kako bi se obezbedilo kontrolisano oticanje sa novih slivnih površina predviđene su dve retenzije u novom sistemu kišne kanalizacije. Iako je hidraulički za kontrolu oticaja dovoljna izgradnja jedne retenzije, zbog nivelacionog rešenja i topografije terena koje su uzrokovala podelu celokupnog sliva na tri površine, koje imaju različite prirodne i projektovane nagibe, predviđene su dve retenzije.

Retenzija 1 korisne zapremine 8500m3 je predviđena kao AB konstrukcija koja je locirana na zapadnoj strani u neposrednoj blizini RESE 12R. Imajući u vidu da je cela slivna površina koja gravitira ka novoj AB retenziji na suprotnoj strani kompleksa u odnosu na recipijent, projektom je predviđeno pražnjenje retenzije preko potopljenih drenažnih pumpi. Potisni cevovod trasiran je paralelno sa pistom i na adekvatnoj lokaciji je preko šahta za prekid pritiska povezan na projektovani gravitacioni razvod kišne kanalizacije koji gravitira ka projektovanoj otvorenoj retenziji 2.

U crpnoj stanici su smeštene dve radne i jedna rezervna uronjena pumpa, karakteristika Q= 200l/s i H=25m, snage 56 kW, svaka.

Takođe, u crpnoj stanici predviđena su i po četiri 4 plovka za svaku pumpu koji daju signal za uključenje /isključenje pumpi, zaštitu rada pumpi na suvo i alarma u slučaju prelivanja. Za potrebe sigurnog rada CS, obezbeđen je rezervni izvor napajanja – dizel električni agregat (DEA).

Kontrolisano isticanje iz novog sistema u postojeći kolektor kišne kanalizacije je obezbeđeno preko otvorene retenzije 2, koja je locirana na jugo-istočnoj strani kompleksa u zelenoj površini.

Kontrolisano isticanje iz retenzije je obezbeđeno ugradnjom regulatora protoka u sklopu izlivne građevine. Projektom je predviđena montaža regulatora protoka koji je izrađen od nerđajućeg čelika AISI 304 i opremljen zaptivnom gumom od EPDM-a. Regulator protoka je hidraulički dimenzionisan prema specifičnim potrebama projekta tj. za ispuštanje zadatog maksimalnog protoka od Q=530 l/s kod maksimalne visine vodenog stuba od 200 cm.

Projektom je predviđena izgradnja vodonepropusne retenzije sa nagibom kosina 1:1.5, korisne zapremine 7500m3. Odabir nagiba kosina retenzije izvršen je prema rezultatima proračuna provere stabilnosti kosina kojeg je izradila „Centralna putna laboratorija“ iz Novog Sada, imajući u vidu potrebnu zapreminu retenzije, projektovani maksimalni nivo vode i potrebu za racionalizacijom prostora za izgradnju.

Projektom je predviđeno je da se vodonepropusnost retenzije ostvari upotrebom EPDM geomembrane koja se ugrađuje između dva sloja geotekstila 200 gr/m2 i koja je prekrivena slojem šljunka debljine 20cm.

Projektom je predviđeno da se u dnu naspe sloj šljunka debljine 20 cm, granulacije d≥31mm. Imajući u vidu da je šljunak nekohezivan materijal, na mestu ulivne građevine predviđena je ugradnja sloja šljunka u cementnom malteru, kako bi se sprečilo ispiranje šljunka sa dna retenzije. Osiguranje je predviđeno izgradnjom rova na kruni nasipa koji se ispunjava šljunkom.

2.3 TEHNIČKI OPIS DRENAŽE POSTELJICE UMETNUTE POLETNO SLETNE STAZE (BCIR)

Drenaža posteljice BCIR se sastoji od drenažnog sloja od šljunka granulacije 0/63mm, minimalne debljine 30cm, koji će se izvesti ispod BCIR i podužnih drenažnih perforiranih kolektora koji se izvode oko BCIR. Izrada drenažnog tepiha ispod BCIR predstavlja tehničko rešenje (obezbeđuje filtraciju procednih atmosferskih voda i bolja geomehanička svojstva tla ispod BCIR) kojim će se rešiti odvođenje procednih atmosferskih voda ispod BCIR.

Ispod BCIR predviđeni su sledeći slojevi koji imaju pored ostalih i drenažnu funkciju:

- Podloga od nabijnog betona ispod poluperforirane drenažne perforirane cevi širine 60cm,
- Geotekstil kvaliteta 200gr/m2, postavlja se na nivelisani teren sa preklopom oko drenažne perforirane cevi,
- Oprani šljunak granulacije 0/31 mm debljine d=20cm iznad drenažne perforine cevi,
- Šljunak 0/63 mm, debljine min d=30 cm drenažni sloj,
- Šljunak 0/31 mm, debljine min d=30 cm noseći sloj.

U cilju obezbeđenja filtracione stabilnosti na kontaktu filterski granulat–osnovni materijal (sprečavanje pojave procesa sufozije i kontaktne deformacije), postavljen je geotekstil kvaliteta 200gr/m2 koji ima zahtevane tehničke karakteristike na celoj dužini drenažnog kolektora. Geotekstil je postavljen između filterskog zasipa i nasutog osnovnog materijala.

Drenažni tepih je izveden na celoj površini ispod BCIR. U cilju bržeg odvođenja prikupljene procedne atmosferske vode izvedeni su drenažni kolektori (cevna drenaža) od perforiranih drenažnih cevi prečnika DN160 sa revizionim oknima koji omogućuju kontrolu rada projektovane drenaže.

Horizontalna cevna drenaža izrađena je sa kvalitetnim perforiranim drenažnim PEHD cevima, prečnika DN160, SN8, pri čemu je površina perforacije cevi veća od 50 cm2/m. Prečnik otvora filterske konstrukcije, prema usvojenim kriterijumima, je Do= 1,4 mm.

Kolektor je postavljen pravolinijski od okna do okna, dok je za manje uglove skretanja predviđeno polaganje kolektora savijanjem, u skladu sa tehničkim uslovima koje propisuje proizvođač cevi.

Cevi su postavljene na podlozi od nabijenog betona MB20, sa širinom u dnu od 60cm i nagibom strana 1:5 i obložene geotekstilom 200gr/m2. Drenažna cev je zatrpana separisanim šljunkom granulacije 0/31mm po celoj širini rova, tako da nadsloj bude min 20cm iznad temena drenažne cevi. Visinski položaj drenaže uslovljen je visinskim položajem BCIR na početku drenaže.

Reviziona i inspekciona okna su izvedena od armirano-betonskih cevi prečnika 1m. Silazi su okruglog oblika, unutrašnjeg prečnika 1,0m do cca 1,8m ispod površine terena, gde se postavlja konusni završetak sa pločom

za liveno-gvozdeni poklopac prečnika 0,62m, za klasu opterećenja D400. Spojevi između cevi ispunjeni su bitumenskom masom i gumenim prstenom, u cilju sprečavanja iznošenja materijala iz osnovne sredine u drenažni kolektor. Dno šahta je ispunjeno nearmiranim betonom radi formiranja kinete.

Sve drenažne vode dovode se do glavnog kolektora na koga se priključuju ili direktno u kolektor ili u reviziono okno.

2.4. IZVOĐENJE HIDROTEHNIČKIH RADOVA PRI IZGRADNJI UMETNUTE PSS (BCIR)

Izvođenje građevinsko-hidrotehničkih radova na BCIR je povereno francusko-grčkom konzorcijumu Vinci Terna–Joint Venture (u daljem tekstu VT-JV) sa srpskim podizvođačima: „Han Put“, Vladičin Han; „Telekomunikacija“, Blace; „PEŠTAN“, Aranđelovac i „Srem Put“, Ruma.

Radovi na izgradnji umetnute PSS-BCIR su se odvijali u dve faze.

I faza radova na BCIR se odvijala u periodu od maja 2020.god. do juna 2023.god., i podrazumevala je izvođenje radova na novoj pisti i novim izlazima TWY 2,3,4,5,6 i 7, vezama sa postojećim rulnim stazama TWY A, B, C i E i brzim izlazima RET 1,2,3 i 4 (radovi su se izvodili do polovine dužine brzih izlaza, bez spajanja sa postojećom pistom), kao i ukidanju postojeće rulne staze TWY D. Završetkom I faze radova u junu 2023. godine puštena je u rad nova umetnuta PSS i time je avio saobraćaj prebačen sa glavne PSS na novu umetnutu PSS.

II faza radova na BCIR se odvijala od juna 2023. god. do kraja marta 2024. godine, uporedo sa rekonstrukcijom glavne PSS, i podrazumevala je radove na preostalim delovima brzih izlaza RET 1,2,3 i 4 i postojećim rulnim stazama TWY B,C i E, kao i vezu sa rekonstruisanom postojećom glavnom PSS. Deo atmosferskih voda sa glavne PSS je na mestima ukrštanja brzih izlaza sa glavnom pistom preusmeren na novi sistem kišne kanalizacije.

Situacija hidrotehničkih instalacija je podeljena na četiri sektora. Izvođenje hidrotehničkih radova na umetnutoj PSS 12R-30L – I faza radova na BCIR je počelo u pravcu Sektor 2 - Sektor 3 - RESA 30L (kraj piste). Uporedo sa izvođenjem radova na Sektoru 2 i 3 izvođeni su radovi na podzemnoj AB retenziji u blizini RESE 12R.

Izvođenju hidrotehničkih radova (radovi na polaganju cevovoda kišne kanalizacije, ugradnji slivnika i slivničkih veza, perforiranoj drenaži, polaganju potisnog cevovoda, ukrštanju trasa novih i postojećih kolektora, ukidanju postojećih rigola i slivnika) su prethodili obimni zemljani radovi. Nakon završetka radova na polaganju cevovoda kišne kanalizacije i ugradnji revizionih šahtova po pojedinim sektorima, pristupilo se ugradnji slivnika i slivničkih veza na svakih 20m, duž buduće BCIR, a potom i izradi betonskih rigola širine 2,1m, nagiba 5%.

Sl.1. *AB revizioni šaht sa ukrštanjem trasa novog i postojećeg kišnog kolektora*

Sl.2. *HDPE revizioni šaht sa ulivnom HDPE spiralnom kanalizacionom cevi DN 1400mm*

Sl.3. Priključak *PP slivnika D400 na postojeću cev*

Sl.4. *Slivnici sa LG slivničkim rešetkama F900 KN*

Sl.5. *Ručno betoniranje rigole*

Sl.6. *Mašinska izrada rigole*

Na mestima vitoperenja kolovozne konstrukcije – jednostrani nagibi kolovoza (Sektor 3 - desna strana piste između TWY D i TWY E) kao i proširenja piste – okretnica, zbog povećanih količina atmosferskih voda umesto tačkastih slivnika ugrađeni su linijski kanali - Qmax 550 i Qmax 350, koji imaju veći kapacitet i mogućnost bržeg odvođenja atmosferskih voda sa velikih površina, što je od izuzetnog značaja kada je u pitanju bezbednost avio saobraćaja.

Sl.7. *Polaganje Qmax 350 šlic kanala na podlogu od betona MB40*

Sl.8. *Završno betoniranje rigole sa Qmax šlic kanalom F900 KN*

Hidrotehnički radovi su nastavljeni na zaštitnoj površini kraja poletno - sletne staze - RESA 30L (najniža tačka na pisti) odvođenjem procednih voda sistemom drenažnih perforiranih cevi i AB revizionih šahtova, i

uvođenjem prikupljenih voda preko sabirnog šahta u upojni rov dužine 10m. Upojni rov je ispunjen drenažnim slojem – iberlaufom i obavijen geotekstilom projektovanih karakteristika. Od izuzetnog značaja za bezbednost avio saobraćaja je da zelena površina RESA 30L dobrim dreniranjem podloge zadrži projektovanu stabilnost, u slučaju da se avion prilikom sletanja ne zaustavi na kraju poletno-sletne staze.

Nastavak radova je išao u pravcu Sektora 4 i izvođenja obimnih građevinskih radova na otvorenoj retenziji 2, korisne zapremine 7500 m3 i približnih spoljnih dimenzija 118,0m x 86,0m i dubine 7,0m.

Sl.9. *Otvorena retenzija 2*

Sl.10. *Ulivna građevina sa ulivnom cevi DN2000mm*

Radovi su nastavljeni izgradnjom odvodnog cevovoda prečnika DN 800mm, u širokom iskopu na dubinama preko 8m, i podbušenjem saobraćajnice (ispod kružnog toka kod Tesla Parkinga), radi izrade priključka na postojeći kolektor na granici kompleksa.

Sl.11. *AB revizioni šaht sa cevovodom DN800mm*

Sl.12. *Priključak nove K.K. na postojeći kolektor kompleksa*

Sl.13. *AB revizioni šaht u toku izgradnje, preko koga se evakuišu sve atmosferske vode sa piste ka retenziji 2. Kroz šaht prolazi postojeći kolektor AB 110/60, koji je na kraju radova preusmeren na projektovani sistem kišne kanalizacije.*

Završetak hidrotehničkih radova se odvijao u Sektoru 1 u pravcu od TWY C do RESE 12R - početak piste i priključku dve linije kišnih kolektora prečnika DN1200 na podzemnu AB retenziju 1, kao i priključcima potisnih cevovoda pumpi na PE potisni cevovod DN400, dužine 1600m.

Nakon završetka radova na AB retenziji 1 korisne zapremine 8500 m3 (približnih spoljnih dimenzija 122,0mx31,0m i visine vodenog stuba 2,8m) u crpnoj stanici je izvršena ugradnja pumpnog postrojenja prema projektu, sa dve radne i jednom rezervnom pumpom karakteristika Q= 200l/s i H=25m, snage 56kW, svaka. Maksimalni i minimalni nivoi u retenziji se kontrolišu preko plovaka, a ostali nivoi se kontrolišu preko ultrazvučnog merača nivoa vode.

Sl.14. *Podzemna AB retenzija 1 sa priključcima potisnih cevovoda pumpi na PE potisni cevovod DN400mm*

Radovi na izgradnji nove BCIR su se odvijali pod otežanim uslovima, sa čestim prekidima zbog stalnog avio saobraćaja, prekidima u radu zbog nemogućnosti izlaska na gradilište usled smanjene vidljivosti - nepovoljnih vremenskih uslova (magla) - CAT 3. Takođe, ulazak Nadzorne službe i Izvođača radova na gradilište, kretanje mehanizacije, transport iskopanog materijala sa gradilišta, kao i dovoz materijala na gradilište, prelazi preko rulnih staza su se odvijali usporeno, uz stalnu pratnju aerodromskih službi i obavezu poštovanja procedura ANT-a za ulazak u restriktivnu zonu.

Izvođenje hidrotehničkih radova (radovi na kišnoj kanalizaciji i perforiranoj drenaži) su se odvijali paralelno sa pripremnim radovima na kolovoznoj konstrukciji piste.

Geodetsko obeležavanje trase projektovane kanalizacije, iskop rova, priprema podloge, polaganje cevovoda u projektovanom padu (0,1%-0,6%) je konstantno praćeno od strane geodetske službe Izvođača radova i kontrolisano od strane Nadzorne službe.

Zatrpavanje cevovoda peskom vršeno je u slojevima od po 30cm, sa naročitom pažnjom na podbijanje peska uz cev i nabijanje vibro pločom, uz konstantno vlaženje peska. Zbijenost slojeva materijala u rovu kontrolisala je laboratorijska služba IMS-a, koja je bila stalno prisutna na gradilištu u toku izvođenja radova.

Odabrani domaći proizvođač cevnog materijala je u toku četiri godine izvođenja radova vršio konstantnu isporuku HDPE spiralnih kanalizacionih cevi prečnika DN 300mm do DN 2000mm, obodnih krutosti SN8 i SN32, PE šahtova (prečnika od 1000 mm do 2500 mm, sa i bez konusa), perforiranih drenažnih PP cevi DN160, PP korugovanih slivnika, i sa svojom ekipom atestiranih varilaca vršio elektrofuziono varenje cevovoda izuzetno velikih prečnika.

Svi kolektori u zelenoj površini uz pistu su izvedeni HDPE spiralnim kanalizacionim cevima, obodne krutosti SN8 (KN/m2). Svi prolazi kišne kanalizacije ispod umetnute piste i postojećih rulnih staza su izvedeni HDPE cevovodom, obodne krutosti SN32 (KN/m2). Projektom su dati statički proračuni deformacija i napona za cevi koje prolaze ispod postojećih rulnih staza -TWY u zavisnosti od prečnika cevi i dubine polaganja (koji su u

granicama dozvoljenih veličina) prema softverskom paketu odabranog proizvođača cevnog materijala, koji je rađen prema standardu Udruženja za vodoprivredu, otpadne vode i otpad ATV-DVWK-A 127 Nemačka.

Nakon završenih radova Nadzorna služba je naložila da se dodatno izvrši vizuelna inspekcija kamerom unutrašnjosti cevovoda, na prolazima kolektora ispod nove piste prečnika DN1000 i DN1400. Zvaničnim Izveštajem je potvrđeno da su kolektori u dobrom stanju i da nema deformacija na cevovodima.

Tokom izvođenja hidrotehničkih radova ekipa odabranog proizvođača cevnog materijala je vršila stalna testiranja cevovoda i revizionih šahtova na vodonepropusnost. Testiranja cevovoda su vršena na pritisak vazduha, a testiranje revizionih šahtova na hidrostatički pritisak vode, u svemu prema srpskom standardu SRPS EN 1610:2016.

Svi ugrađeni materijali (HDPE cevi, HDPE šahtovi, PP slivnici, linijski kanali Qmax, PP slivnici, LG slivnici, geotekstil itd.) su imali odgovarajuće ateste, što je i potvrđeno usvajanjem MAR-ova (Material approval Request), dostavljenim od strane Izvođača radova VT-JV.

3. ZAKLJUČAK

Novi sistem kišne kanalizacije na BCIR izveden je ugradnjom spiralnih kanalizacionih cevi prečnika (DN300mm do DN2000mm) obodnih krutosti SN8 i SN32, ukupne dužine približno 14km. Dužina izvedenih perforiranih korugovanih drenažnih cevi DN160mm, obodne krutosti SN8 približno iznosi 8,5km. Broj ugrađenih HDPE revizionih šahtova iznosi preko 200 komada. Broj ugrađenih PP korugovanih slivnika je preko 350 komada.

Nakon završetka svih građevinsko – hidrotehničkih radova na novoj umetnutoj PSS-BCIR, a pre puštanja u rad nove PSS, Nadzorna služba je redovno posle velikih kiša vršila obilazak piste i retenzija i konstatovala da se atmosferska voda ne zadržava na pisti, kao i da novi i nezavisni sistem kišne kanalizacije sa pumnom stanicom u AB retenziji 1 kao i retenzija 1 i 2, dobro funkcionišu po pitanju odvođenja atmosferskih voda sa piste i postojećih rulnih staza. Takođe, u periodu od puštanja umetnute PSS u rad do danas, nije bilo primedbi na funkcionisanje novog sistema kišne kanalizacije.

Krajnji zaključak je da je novi, nezavisni sistem kišne kanalizacije na BCIR smanjio hidrauličko opterećenje na postojećem sistemu kišne kanalizacije na Aerodromu Nikola Tesla, kao i da se sa ugrađenim cevnim materijalom domaćeg proizvođača pokazao kao pouzdan u odvođenju atmosferskih voda sa Aerodroma Nikola Tesla, posle izgradnje umetnute PSS - BCIR.

Literatura

[1] Dr Miloje Milojević (1990) - *Snabdevanje vodom i kanalisanje naselja,* GRAĐEVINSKI FAKULTET-BEOGRAD, Naučna Knjiga 1990 god.
[2] SRPS EN 1610:2016 - *Izgradnja i ispitivanje drenažnih i kanalizacionih sistema*
[3] SRPS EN 13331:2011 - *Sistemi za podgrađivanje rovova*
[4] SRPS EN 752-4:2007(sr)- *Kanalizacioni sistemi izvan objekata - Deo 4: Hidraulički proračun i aspekti zaštite životne sredine*

TIPOVI DENIVELISANIH RASKRSNICA NA VIŠETRAČNIM PUTEVIMA

Nikola Nikitović, dipl.građ.inž., *Hidroprojekat-saobraćaj, d.o.o. Beograd,*
Filip Trpčevski, mast.inž.građ., *Univerzitet u Beogradu - Građevinski fakultet,*
Dejan Despotović, mast.inž.građ., *Hidroprojekat-saobraćaj, d.o.o. Beograd*
Danijela Rotula, dipl.inž.saob., *Hidroprojekat-saobraćaj, d.o.o. Beograd*
Mihajlo Kuzmanović, mast.inž.građ., *Hidroprojekat-saobraćaj, d.o.o. Beograd*

Rezime: *Višetračni putevi (motoputevi; brze saobraćajnice) kao funkcionalni tip saobraćajnica čija se intenzivna izgradnja planira u narednom periodu u Republici Srbiji, nisu u potpunosti obrađeni propisima za projektovanje puteva. Prilikom izrade projekata potrebno je praviti kompromise između pojedinih odredbi propisa za autoputeve i za dvotračne puteve. Za ukrštanje višetračnog puta sa drugim putnim pravcima različitih kategorija mogu se koristiti površinske i denivelisane raskrsnice. Za četvorotračne višetračne puteve sa računskom brzinom 100km/h, denivelisani ukrštaji bi trebali biti izbor u najvećem broju slučajeva, s obzirom na aspekte efikasnosti i bezbednosti. S obzirom da se radi o saobraćajnicama na kojima se ne planira naplata putarine na naplatnim stanicama, moguća je primena kompaktnijih rešenja u odnosu na uobičajene denivelisane raskrsnice na autoputevima. Izbor tipa denivelisane raskrsnice zavisi od funkcionalnog ranga i kategorije saobraćajnice sa kojom se višetračni put ukršta (autoput, višetračni put, državni put, priključak za veće naselje…), saobraćajnog opterećenja i uslova lokacije (topografska, geotehnička, urbanistička i druga ograničenja). Cilj rada je da se kroz iskustva u izradi idejnih projekata višetračnih puteva prikaže pregled mogućih rešenja denivelisanih raskrsnica. U radu su opisani relevantni tipovi denivelisanih raskrsnica i kriterijumi za njihov izbor prilikom projektovanja.*

Ključne reči: *motoput, višetračni put, denivelisana raskrsnica, kriterijumi*

TYPES OF INTERCHANGES ON MULTI-LANE ROADS

Nikola Nikitović, B.Sc.Civ.Eng, *Hidroprojekat-Saobraćaj, d.o.o. Belgrade,*
Filip Trpčevski, M.Sc.Civ.Eng, *University of Belgrade - Faculty of Civil Engineering,*
Dejan Despotović, M.Sc.Civ.Eng, *Hidroprojekat-Saobraćaj, d.o.o. Belgrade*
Danijela Rotula, B.Sc.Traf.Eng, *Hidroprojekat-Saobraćaj, d.o.o. Belgrade*
Mihajlo Kuzmanović, M.Sc.Civ.Eng, *Hidroprojekat-Saobraćaj, d.o.o. Belgrade*

Summary: *Multi-lane roads (Dual carriageway roads; high-speed roads) as a functional type of roads whose intensive construction is planned in the coming period in the Republic of Serbia, are not adequately processed by the regulations for road design. When drafting designs, it is necessary to make compromises between certain provisions of regulations for highways and for two-lane roads. For crossing the multi-lane road with other routes of different categories, intersections and interchanges (grade-separated junctions) can be used. For four-lane roads with a design speed of 100km/h, interchanges should be the choice in most cases considering aspects of efficiency and safety. Since these are roads where toll collection is not planned, it is possible to apply more compact solutions compared to the usual interchanges on highways. The choice of type of interchange depends on the functional rank and category of the road with which the multi-lane road intersects (highway, multi-lane road, state road, local connection for the settlement), traffic load and location conditions (topographic, geotechnical, urban and other restrictions). The aim of the paper is to present an overview of possible solutions of interchanges through the experience in the development of preliminary designs of multi-lane roads. The paper describes the relevant types of interchanges and criteria for their selection when designing.*

Keywords*: moto-road, multi-lane road, interchange, criteria*

1. UVOD

Višetračni putevi (motoputevi; brze saobraćajnice) kao funkcionalni tip saobraćajnica čija se intenzivna izgradnja planira u narednom periodu u Republici Srbiji, nisu u potpunosti obrađeni propisima za projektovanje puteva. Prilikom izrade projekata potrebno je praviti kompromise između pojedinih odredbi propisa za autoputeve i za dvotračne puteve. Za ukrštanje višetračnog puta sa drugim putnim pravcima različitih kategorija mogu se koristiti površinske i denivelisane raskrsnice. Za četvorotračne višetračne puteve sa računskom brzinom 100km/h, denivelisani ukrštaji bi trebali biti prvi izbor s obzirom na aspekte efikasnosti i bezbednosti. S obzirom da se radi o saobraćajnicama na kojima se ne planira naplata putarine na naplatnim stanicama, moguća je primena šireg spektra ekonomski racionalnijih rešenja u odnosu na uobičajene denivelisane raskrsnice na autoputevima. Izbor tipa denivelisane raskrsnice zavisi od funkcionalnog ranga i kategorije saobraćajnice sa kojom se višetračni put ukršta (autoput, višetračni put, državni put, lokalni priključak za naselje), saobraćajnog opterećenja i uslova lokacije (topografska, geotehnička, urbanistička i druga ograničenja). Cilj rada je da se kroz iskustva u izradi idejnih projekata višetračnih puteva prikaže pregled mogućih rešenja denivelisanih raskrsnica. U radu su opisani relevantni tipovi denivelisanih raskrsnica i kriterijumi za njihov izbor prilikom projektovanja.

2. VIŠETRAČNI PUTEVI (MOTOPUTEVI) KAO DEO PUTNE MREŽE

2.1 Definicija motoputeva i višetračnih puteva

Zakon o bezbednosti saobraćaja[4] definiše motoput kao državni put namenjen isključivo za saobraćaj motocikala, putničkih vozila, teretnih vozila i autobusa, sa ili bez priključnih vozila i kao takav obeležen propisanim saobraćajnim znakom. Ovim zakonom su definisana određena ograničenja saobraćaja i zabrane: isključivo mogu da ga koriste motorna vozila, maksimalna brzina 100km/h, uključenje na put samo na propisanim mestima. Zakonom nije definisan broj traka i razdvajanje po smerovima pa motoput može biti i dvotračni i višetračni.

Zakon o putevima[3] ne prepoznaje kategoriju motoputa ili višetračnog puta. Definisane su kategorije državnih puteva I i II reda. Za državne puteve prvog reda ovim Zakonom definisani su posebni parametri za autoputeve i ostale državne puteve I reda. Prema ovome višetračni putevi bi pripadali kategoriji ostalih puteva I reda.

Izmenom uredbe o kriterijumima za kategorizaciju javnih puteva[6] iz 2023. definisana je nova kategorija puteva IM reda koji podrazumevaju moto puteve sa razdvojenim kolovozima i minimum 2 trake po smeru.

Novom uredbom o kategorizaciji državnih puteva[5], državni putevi I reda su podeljeni na državne puteve IA, IMi IB reda. Državni putevi IA reda su autoputevi, dok višetračni putevi najčešće pripadaju kategoriji puteva IM reda-Motoputevima.
Pravilnik o uslovima koje sa aspekta bezbednosti saobraćaja moraju da ispunjavaju putni objekti i drugi elementi javnog puta[2] (u daljem tekstu Pravilnik) definiše višetračni put kroz kao međuprofil između autoputa i višetračnog puta. U Pravilniku nisu detaljno razmatrani i dati specifični kriterijumi za ovu vrstu puteva.

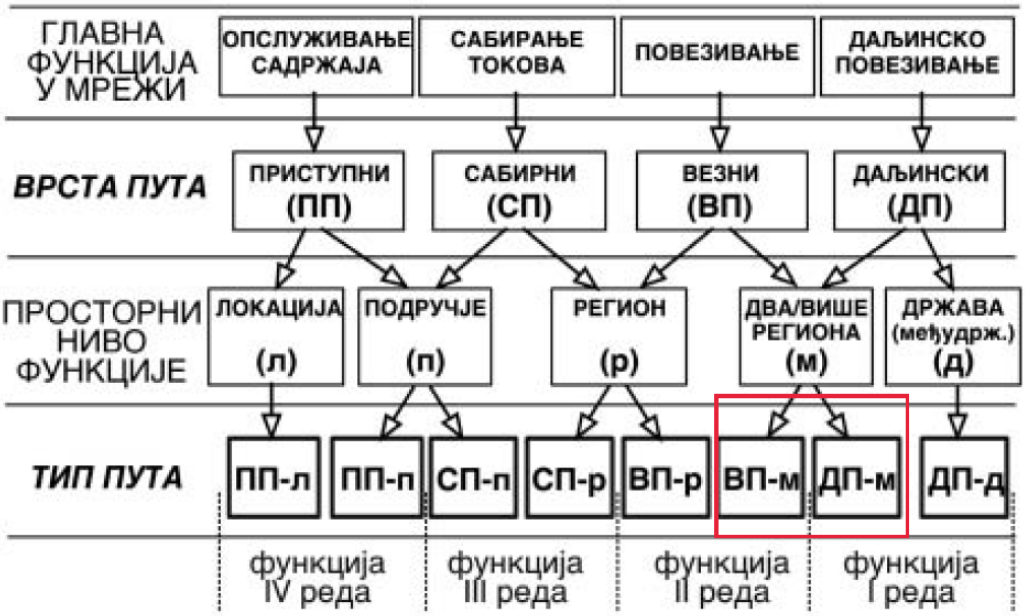
Na osnovu svega iznetog vidi se da je prilikom projektovanja četvorotračnih motoputeva teško naći jasnu potporu u regulativi, pa je potebno da projektant inženjerski razmišlja i upotrebi odgovarajuća rešenja kombinujući zadate elemente za dvotračne puteve i autoputeve.

Potrebno je da se u okviru svih relevantnih propisa za puteve višetračni motoputevi definišu na odgovarajući način kao posebna kategorija puteva uz usaglašavanje terminologije i detaljno definisanje projektnih i drugih uslova u skladu sa oblašću koje pojedini propis pokriva.

2.2 Položaj četvorotračnih puteva u domaćoj regulativi

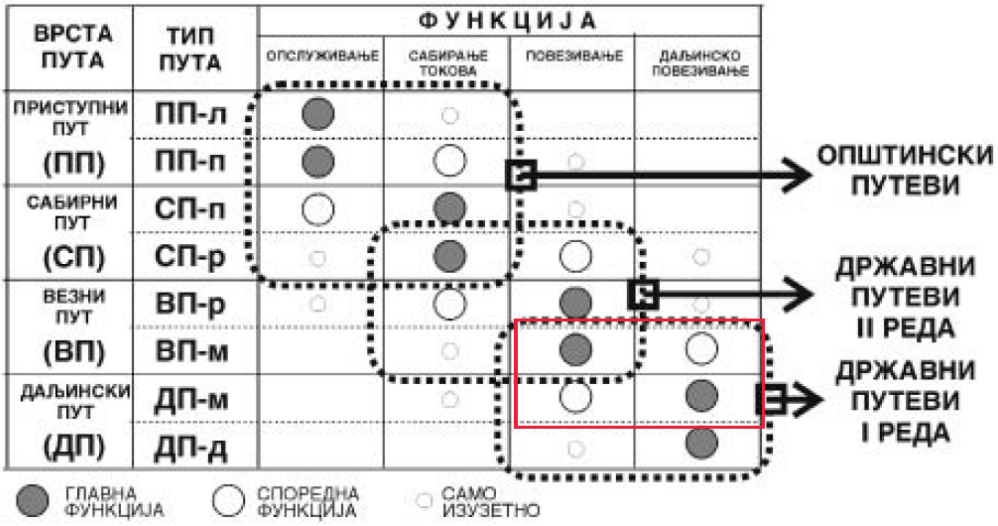
Četvorotračne motoputeve možemo svrstati u sledeće kategorije prema klasifikacijama datih Pravilnikom[2]:

- Prema funkcionalnoj klasifikaciji četvorotračni putevi su obično daljinski ili vezni putevi, odnosno pripadaju kategorijama Daljinski putevi međuregionalni (DP-m) ili Vezni putevi međuregionalni (VP-m)



Slika 1. *Položaj četvorotračnih puteva u funkcionalnoj klasifikaciji (Pravilnik[2])*

- Prema administrativnoj klasifikaciji ovi putevi pripadau državnim putevima I reda (izuzetno II reda)



Slika 2. *Položaj četvorotračnih puteva u administrativnoj klasifikaciji (Pravilnik[2])*

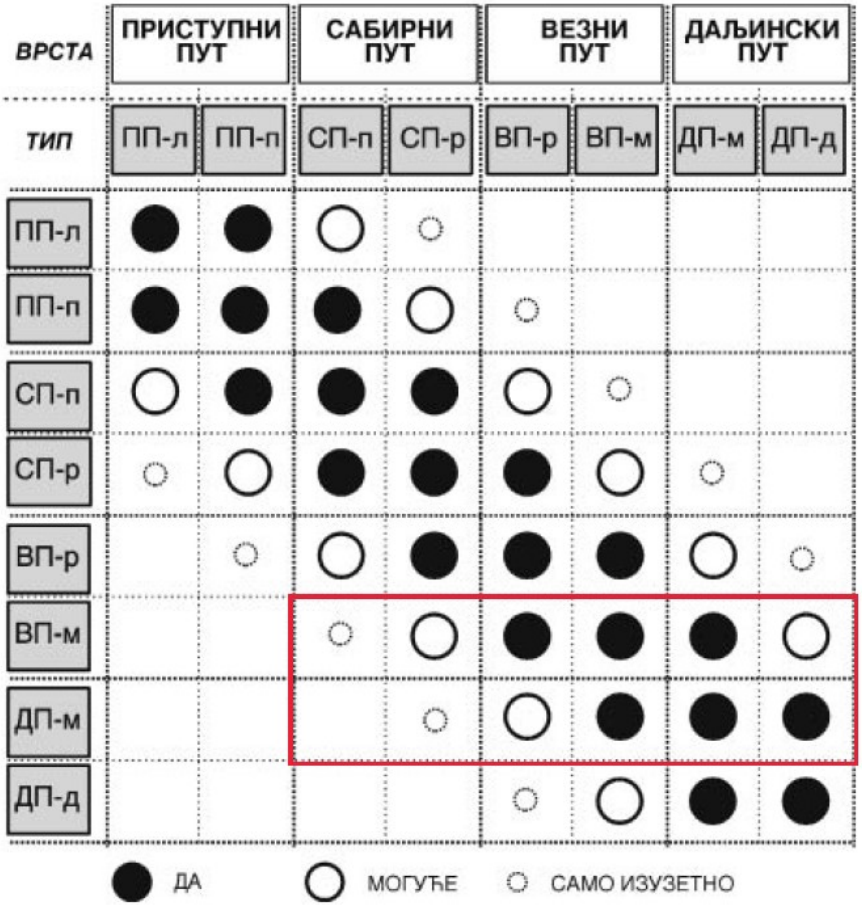
- Prema vrsti saobraćaja klasifikuju se kao putevi rezervisani za saobraćaj motornih vozila (prema novom zakonu o bezbednosti saobraćaja[4] – motoput)

3. PLANIRANJE RASKRSNICA NA VIŠETRAČNIM MOTO PUTEVIMA

Višetračni putevi treba da objedinjuju funkciju daljinskog i regionalnog povezivanja, pa se prilikom projektovanja raskrsnica mora voditi računa o logičnom definisanju položaja i rastojanja raskrsnica.

3.1 Povezivanje sa ostalim putevima
3.2

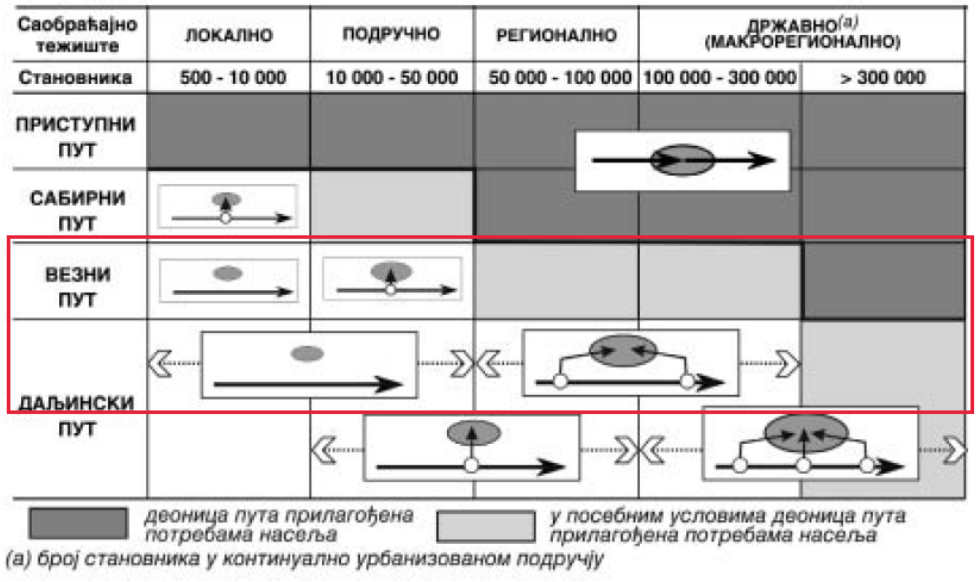
Svaka od kategorija puteva trebala bi da se direktno povezuje sa putevima koji pripadaju susednim kategorijama prema funkcionalnoj klasifikaciji. Četvorotračni moto putevi čiji je tip VP-m odnosno DP-m trebali bi da budu direktno povezani sa putevima kategorija VP-r, VP-m, DP-r i DP-m tj. sa svim državnim putevima. Lokalni putevi po pravilu se ne povezuju direktno već se denivelisano ukrštaju sa četvorotračnim putem.



Slika 3. *Uslovi hijerarhijskog povezivanja četvorotračnih puteva (Pravilnik[2])*

3.3 Odnos prema naseljima i potrebe za povezivanjem

Četvorotračni putevi se po pravilu vode van naselja, osim izuzetno za naselja preko 100.000 stanovnika gde se mogu integrisati u putnu mrežu naselja. Položaj trase kroz zonu naselja treba da bude takav da se izbegnu negativni uticaji puta i omogući širenje naselja u budućnosti, ali u isto vreme da se omogući povezivanje sa naseljem za izvorno ciljni saobraćaj. Izuzetno je moguće voditi put i kroz urbanizovano područje u slučaju složenih prostornih i topografskih uslova, ali uz maksimalnu moguću zaštitu naselja od negativnog uticaja puta. Imajući u vidu preporuke Pravilnika (Slika 4.) obzirom da su četvorotračni motoputevi na granici kategorija veznog i daljinskog puta, preporuka je da se izvrši povezivanje sa svim opštinskim središtima kroz čije teritorije četvorotračni put prolazi tj. sa naseljima većim od 10.000 stanovnika, najčešće povezivanjem na postojeću državnu ili gradsku putnu mrežu u blizini naselja, ili direktno izgradnjom posebnih veznih saobraćajnica od raskrsnice do grada.



Slika 4. *Odnos četvorotračnih puteva i naselja i uslovi povezivanja (Pravilnik[2])*

3.4 Izbor vrste raskrsnice – površinske ili denivelisane

Na četvorotračnim putevima, moguće je primeniti površinske i denivelisane raskrsnice. Izbor tipa raskrsnice zavisi od saobraćajnog opterećenja glavnog i sporednog pravca, uslova lokacije, programskih uslova Investitora.

Prilikom opredeljivanja za jednu od dve vrste raskrsnica treba uzeti u obzir celu deonicu i usaglasiti rešenje tako da se koristi ista vrsta raskrsnice na celoj deonici. Kod površinskih raskrsnica prednost imaju kružne raskrsnice pre svega iz razloga bezbednosti imajući u vidu veliku brzinu na glavnom pravcu. Statistike pokazuju da se 1/3 do 1/5 svih saobraćajnih nezgoda dešava na površinskim raskrsnicama [1].
Pravilnikom[2] je preporučeno da bi denivelisane raskrsnice trebalo projektovati na putevima sa više od 12.000 vozila dnevno i za opterećenje sporednog pravca veće od 3.000 vozila dnevno. Ovakav kriterijum prema saobraćajnom opterećenju može biti primenljiv za veoma opterećene dvotračne puteve pri odlučivanju za eventualnu primenu denivelisane raskrsnice. Kod autoputeva se upotreba denivelisanih raskrsnica podrazumeva. Uzimajući u obzir aspekte bezbednosti i efikasnosti kao i usaglašavanje tipa za celu deonicu četvorotračnog puta, apsolutna je preporuka da se za četvorotračne motoputeve sa računskom brzinom 100km/h koriste denivelisane raskrsnice.

3.5 Principi izbora tipova denivelisanih raskrsnica i njihovih projektnih elemenata

Osnovni kriterijumi prilikom izbora tipova denivelisanih raskrsnica na četvorotračnim putevima su:
- Vrsta puta sa kojim se ukršta četvorotračni put i način eksploatacije (put sa naplatom ili bez naplate)
- Saobraćajno opterećenje glavnog i sporednog pravca i same raskrsnice
- Prostorna ograničenja (topografski uslovi, urbanistički uslovi, geotehnički uslovi)
- Kompromisi između principa za autoputeve i želje za optimizacijom imajući u vidu niži nivo usluge.

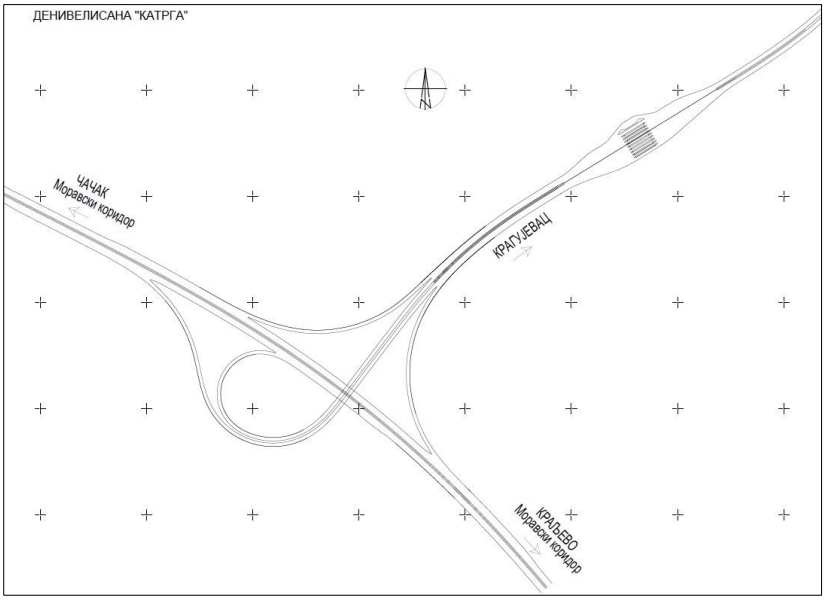
Osnovne postavke za izbor denivelisanih raskrsnica značajno se razlikuju od uobičajenih za autoputeve. U Republici Srbiji na četvorotračnim putevima nije planirana naplata putarina na naplatnim stanicama. Samim tim moguća je primena šireg spektra ekonomski racionalnijih rešenja bez potrebe sabiranja svih tokova na jedno mesto radi formiranja naplatne stanice. Obzirom na manju računsku brzinu osnovne trase četvorotračnog puta moguće je primeniti generalno manje računske brzine rampi denivelisanih raskrsnica što utiče na sam oblik i dimenzije raskrsnice i njenih elemenata. Obzirom na nekomercijalni karakter četvorotračnih puteva moguća je primena jednostranih pratećih sadržaja koje koriste oba smera kretanja, što je najekonomičnije primeniti u kombinaciji denivelisane raskrsnice sa pratećim sadržajima.

4. RASKRSNICE SA AUTOPUTEVIMA SA NAPLATOM PUTARINE

Prilikom ukrštaja sa autoputem ili priključka na autoput sa komercijalnom eksploatacijom (naplatom putarine klasičnim naplatnim stanicama) potrebno je obratiti pažnju na potrebu sabiranja svih tokova na jedno mesto radi naplate putarine. Ovo se postiže primenom standardnih tipova denivelisanih raskrsnica koji se koriste na komercijalnim autoputevima. Ovde se najčešće koristi denivelisana raskrinica tipa „truba“, mada je moguće koristiti i druge raskrsnice višeg nivoa usluge u zavisnosti od saobraćajnog opterećenja („trougao“, „kruška“). Imajući u vidu da je neophodno zaustavljanje svih učesnika na naplatnoj stanici koja sledi nakon petlje, preporučuje se denivelisana raskrsnica tipa „Truba“ sa nešto komfornijim elementima od uobičajenih za priključke nižeg ranga. Preporuka je korišćenje računske brzine indirektne rampe 50km/h (min 40km/h) i računske brzine poludirektne rampe minimalno 60km/h. Orijentacija raskrsnice treba da bude takva da se poludirektna rampa orijentiše prema većem saobraćajnom opterećenju, a indirektna ka manjem osim ako ima drugih ograničenja.

4.1 Priključak na autoput

Priključak brze saobraćajnice na autoput predstavlja praktično početak brze saobraćajnice. Neophodno je izvršiti naplatu putarine na naplatnoj stanici koja je obično velikog kapaciteta imajući u vidu značajno veće saobraćajno opterećenje brze saobraćajnice u odnosu na klasične priključke dvotračnih puteva na autoput. Denivelisana raskrsnica i naplatni plato pripada autoputu i projektuje se na osnovu projektnih uslova za autoput imajući u vidu specifičnosti većeg saobraćajnog opterećenja koje se očekuje na rampama. Najverovatniji izbor su rampe tipa R2 ili R3 koje podrazumevaju drugačiji profil na delu autoputa na kome se nalaze trake za ubrzanje i usporenje u smislu šireg profila i duže deonice na kojoj je proširen profil. Za primenu rampe R3 potrebno je da dužina deonice autoputa sa trakama za ubrzanje i usporenje produži na 500m. Ovo treba uzeti u obzir kod planiranja rekonstrukcija postojećih raskrsnica za potrebe priključenja četvorotračnih puteva na mestima priključaka postojećih dvotračnih puteva, jer podrazumeva značajne radove na postojećem autoputu. Pri ovakvim rekonstrukcijama takođe treba voditi racuna da ako je postojeća denivelisana raskrsnica služila kao veza sa državnim putem, onda je potrebno nakon naplatne stanice predvideti još jednu denivelisanu raskrsnicu na četvorotračnom putu za priključak postojećeg državnog puta.
Kao primer može se navesti denivelisana raskrsnica „Katrga“ na priključku brze saobraćajnice Kragujevac – Mrčajevci na Autoput E761 (Moravski koridor). Primenjena je denivelisana raskrsnica tipa „Truba“ sa rampama tipa R2 i računskim brzinama na direktnim rampama, poludirektnoj rampi Vp,r=80 km/h i indirektnoj rampi Vp,r=50km/h. Naplatni plato je lociran tako da se omogući pravovremeno uočavanje, prestrojavanje i zaustavljanje na naplatnim kapijama. Ova raskrsnica sadrži bočnu naplatnu stanicu za glavni pravac, koja ujedno predstavlja čeonu naplatnu stanicu za korisnike brze saobraćajnice, pa je obavezno odgovarajućom saobraćajnom signalizacijom i opremom upozoriti korisnike na obavezno zaustavljanje svih učesnika u saobraćaju.

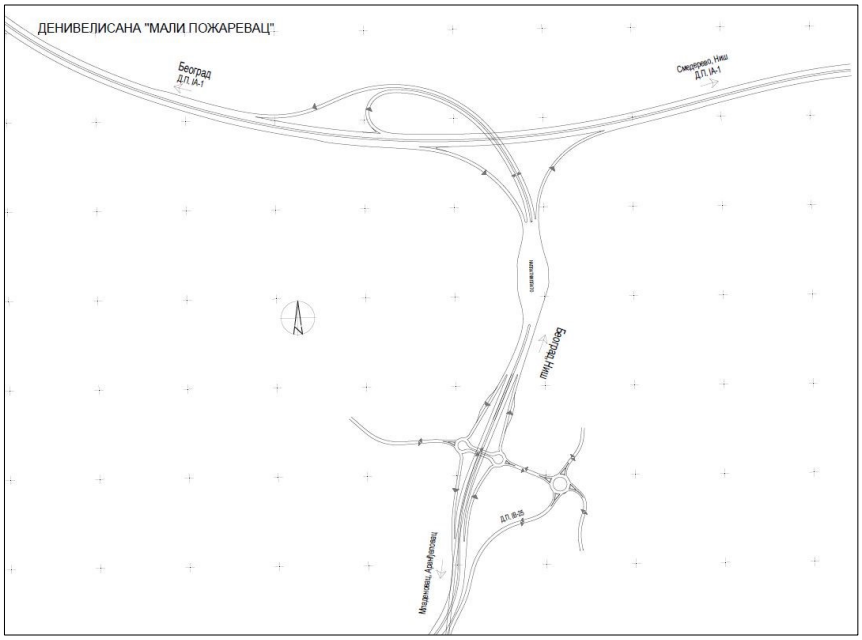


Slika 5. *Denivelisana „Katrga“ na priključku brze saobraćajnice Kragujevac – Mrčajevci na Autoput E761 (Moravski koridor).*

Naredni primer odnosi se na rekonstrukciju postojeće denivelisane raskrsnice Mali Požarevac na priključku Brze saobraćajnice Vožd Karađorđe na autoput E-75 Beograd-Niš. Postojeća petlja Mali Požarevac tipa truba predstavlja vezu izuzetno opterećenog državnog puta Ib reda Mali Požarevac – Mladenovac – Topola – Kragujevac i autoputa Beograd – Niš. Ovo isto mesto predstavlja početak deonice 5 brze sapbraćajnice Vožd Karađorđe za šta je neophodno značajno rekonstruisati postojeću raskrsnicu. Ograničavajući uslovi pored ostalog su:

- Topografska i urbanistička ograničenja (područje u kotlini sa značajnom izgradnjom putnih i privrednih objekata i postojećim spomenikom pod zaštitom).
- Potreba za priključenjem postojećih državnih puteva IB reda br25 ka Mladenovcu i IIb rada br.350 koji omogućavaju postojeći pristup područja ka autoputu, kao i mogućnost integrisanja autobuskih stajališta
- Potrebno proširenje rampi i naplatnog platoa imajući u vidu planirano saobraćajno opterećenje
- Neprekidno odvijanje saobraćaja tokom izgradnje.

Predviđeno je povećanje kapaciteta postojeće denivelisane raskrsnice tipa „Truba“ upotrebom dvotračnih rampi R3 ka Beogradu. Ovo je postignuto uklapanjem geometrijskih elemenata indirektne rampe tako da se izgradi jedan novi natputnjak uz korišćenje postojećeg dvosmernog natputnjaka za jedan smer vožnje. Naplatni plato je značajno proširen imajući u vidu prognozirano saobraćajno opterećenje. Nakon naplatne stanice formirana je petlja na četvorotračnom putu na mestu postojeće petlje na dvotračnom putu kojom se povezuju lokalni sadržaji i postojeći državni putevi. Sve ovo je formirano na izuzetno malom prostoru uz primenu graničnih elemenata, pa će primena odgovarajuće saobraćajne signalizacije povećati orjentaciju korisnika i nivo bezbednosti.



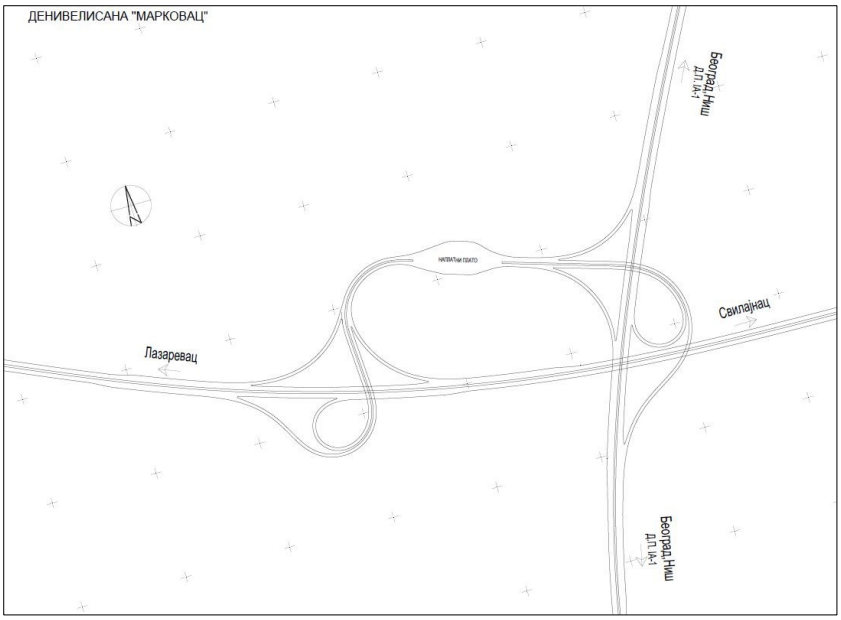
Slika 6. *Rekonstrukcija postojeće denivelisane raskrsnice Mali Požarevac na priključku Brze saobraćajnice Vožd Karađorđe na autoput E-75 Beograd-Niš*

4.2 Ukrštaj sa autoputem i veza na autoput

Na mestu denivelisanog ukrštaja četvorotračnog puta sa autoputem potrebno je povezati dve saobraćajnice na način koji će u najmanjoj meri ometati saobraćaj na ukrnim pravcima, omogućiti efikasno povezivanje uz formiranje platoa za naplatnu putarine. Za ove potrebe kao optimalno rešenje nameće se upotreba raskrsnice tipa „dupla truba“ sa naplatnom stanicom između dve denivelisane raskrsnice tipa „Truba“. Denivelisana raskrsnica na autoputu formira se u skladu sa principima iznetim u prethodnom poglavlju, dok se „truba“ na četvorotračnom putu može formirati uz korišćenje nešto skromnijih elemenata primerenim ovom rangu sabraćajnice i sabraćajnom opterećenju glavnog pravca i pojedinih rampi.

Naredni primer je denivelisana raskrsnica „Markovac 2“ na mestu ukraštaja autoputa Beograd – Niš i Brze saobraćajnice Vožd Karađorđe.

Brza saobraćajnica Vožd Karađorđe u perspektivi treba da ostvari vezu ka istočnoj Srbiji, pa se ukršta sa autoputem Beograd Niš između postojećih petlji Markovac i Lapovo. Na mestu ovog ukrštaja predviđeno je da se dve saobraćajnice povežu korišćenjem denivelisane raskrsnice tipa „dupla truba“ sa naplatnom stanicom velikog kapaciteta koja će omogućiti da se sav planirani saobraćaj u prvoj fazi upotrebe (do izgradnje nastavka beze saobraćajnice ka Boru) preko ove petlje ulije na autoput E-75. Ograničavajući faktori za pozicioniranje i dimenzionisanje bili su postojeće železničke pruge Beograd Niš i Markovac – Resavica, položaj postojeće denivelisane raskrsnice Markovac i odmorišta Lapovo, kao i nivelacioni odnosi na autoputu koji u neposrednoj blizini prelazi preko pruge i reke Rače.



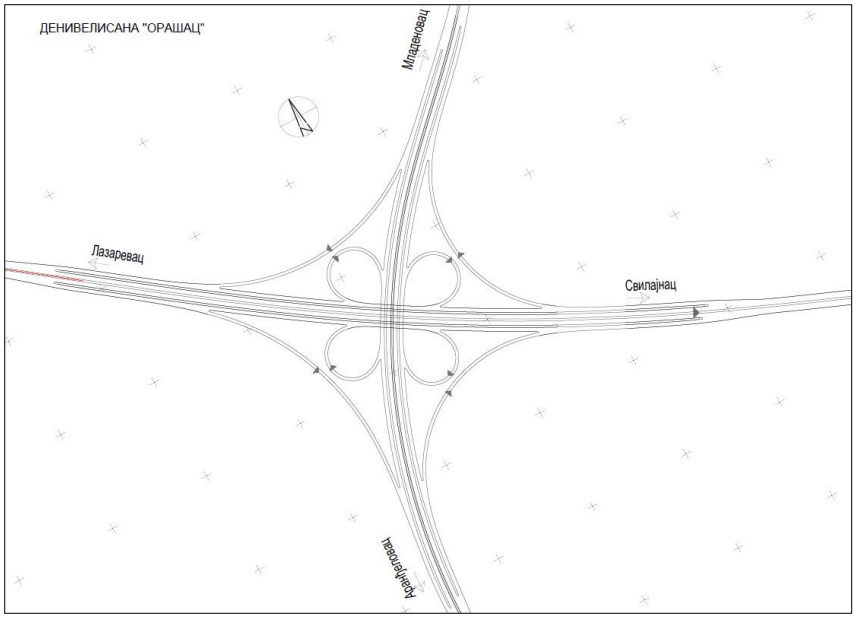
Slika 7. *Denivelisana raskrsnica „Markovac 2“ na mestu ukraštaja autoputa Beograd – Niš i Brze saobraćajnice Vožd Karađorđe*

5. RASKRSNICE SA DRUGIM VIŠETRAČNIM PUTEVIMA

Ukrštaj dva višetračna motoputa kao ukrštaj dva puta istog ranga može se ostvariti upotrebom različitih tipova denivelisanih raskrsnica. Kao optimalan tip nameće se „Detelina“ koja predstavlja kompaktno rešenje u dva nivoa sa punim programom veza kojim se efikasno povezuju dve visokokapacitivne saobračajnice istog ranga. Kako bi se na odgovarajući način izdvojili dva uliva i izliva na svakom priključnom pravcu treba da budu formirane servisne saobraćajnice.

Kao primer za ovo može se izdvojiti denivelisana raskrsnica „Orašac“ na ukrštaju dva kraka brze saobraćajnice Vožd Karađorđe.

Koridor Vožd Karađorđe sastoji se od dva osnovna kraka koji se protežu u pravcu istok-zapad i sever-jug. Ova dva pravca ukrštaju se kod Oršca. Na ukrštaju je projektovana denivelisana raskrsnica tipa deteline. Indirektne rampe su projektovane za brzinu 40km/h dok su direktne rampe projektovane za brzinu 60km/h. Projektovane su servisne saobraćajnice sa dužinom prepleta u skladu sa pravilnikom. Ova raskrsnica predstavlja ukrštaj dve brze saobraćajnice bez mogućnosti priključka lokalnih saobraćajnica, pa je za povezivanje ovog područja predviđena posebna raskrsnica koja je pozicionirana na oko 2km od čvora.

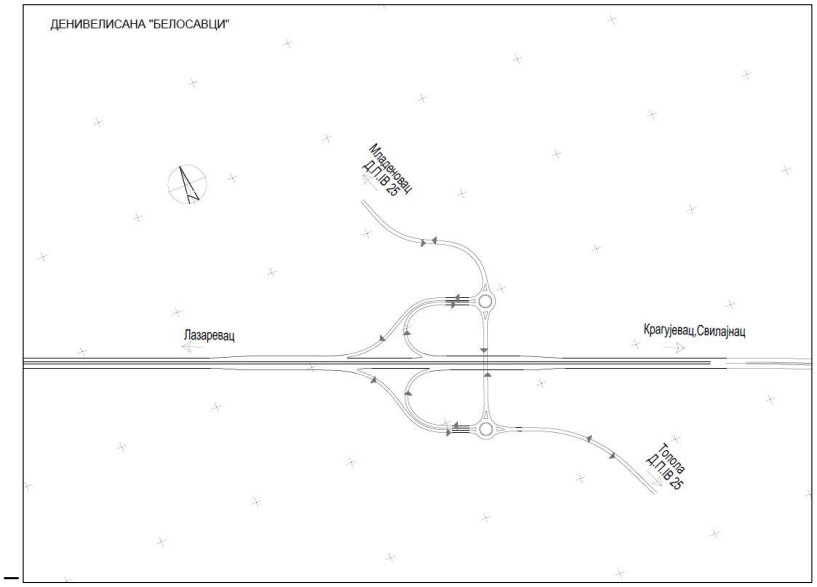


Slika 8. *Denivelisana raskrsnica „Orašac“ na ukrštaju dva kraka brze saobraćajnice Vožd Karađorđe*

6. RASKRSNICE SA DRŽAVNIM PUTEVIMA

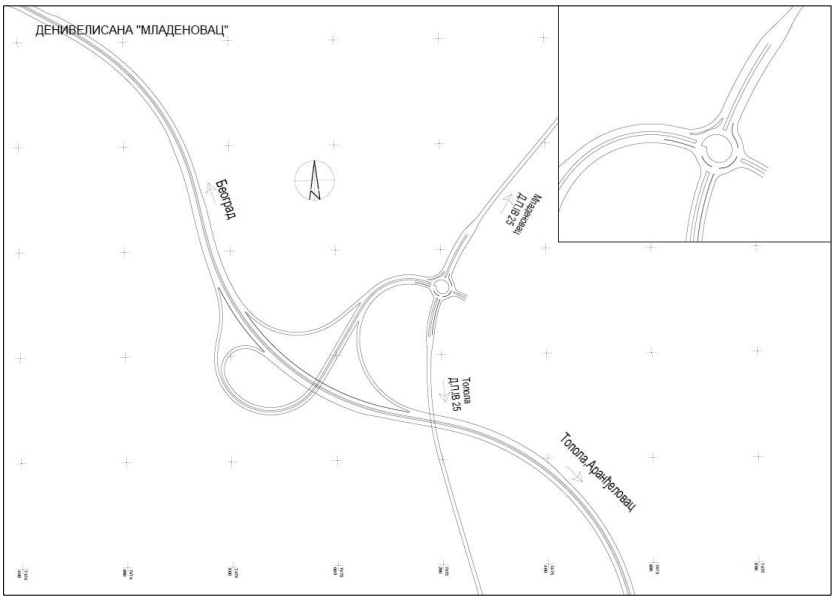
Na mestima ukrštaja četvorotračnog puta sa državnim putevima projektuju se denivelisane raskrsnice različitih tipova u zavisnosti od saobraćajnog opterećenja na sporednom pravcu i samoj raskrsnici. Prednost imaju kompaktna rešenja tipa romb ili pola deteline. Potreban je samo jedan objekat na denivelisanom ukrštaju glavnog i sporednog pravca dok se kraci denivelisane raskrsnice kače direktno na sporedni pravac površinskim raskrsnicama (prednost imaju kružne raskrsnice). Izuzetno, ukoliko je mesto ukrštaja četvortračnog puta i drugog državnog puta zbog prostornih i drugih ograničenja nepogodno za pozicioniranje denivelisane raskrnice, moguće je primeniti raskrsnicu tipa „truba“ uz izgradnju vezne saobraćajnice i jedne površinske raskrsnice na državnom putu (sporednom pravcu). Ovakvo rešenje takođe može imati prednost kod jako opterećenih sporednih pravaca zbog jedne površinske raskrsnice što manje utiče na saobraćajni tok na sporednom pravcu u odnosu na rešenja sa dve površinske raskrsnice. Denivelisana raskrsnica tipa „truba“ sa jednom površinskom raskrsnicom na sporednom pravcu i veznom saobraćajnicom takođe ima prednosti i sa aspekta bezbednosti jer smanjuje mogućnost greške i ulaska u vozila u suprotan smer na četvorotračnom putu. Primer za to je denivelisana raskrsnica Belosavci na ukrštaju Brze saobraćajnice Vožd Karađorđe i državnog puta Ib reda broj 25 Mladenovac – Topola.

Projektovana je denivelisana raskrsnica koja se može podvesti pod tip „pola deteline“ ali ima naspramne ulive i izlive kao kompaktno rešenje imajući u vidu prostorni položaj raskrsnice. Izvršena je devijacija sporednog pravca kako bi ukrštaj bio pod pravim uglom i objekat bio kraći. Primenjeni su izlivi i ulivi sa poludirektnim rampama za brzinu 50km/h i indirektnim za 30km/h što je u skladu sa funkcionalnim nivoom „D“ kome pripada ova vrsta raskrsnice.



Slika 9. *Denivelisana raskrsnica Belosavci na ukrštaju Brze saobraćajnice Vožd Karađorđe i državnog puta Ib reda broj 25 Mladenovac – Topola*

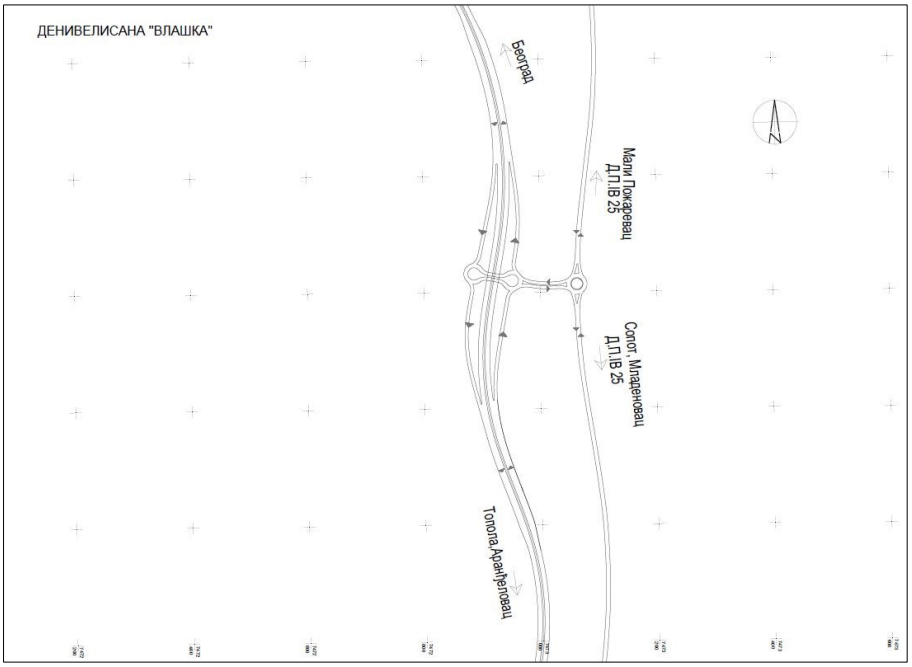
Denivelisana raskrsnica Mladenovac projektovana je na ukrštaju Brze saobraćajnice Vožd Karađorđe i državnog puta Ib reda broj 25 u zoni obilaznice Mladenovca. U pitanju je denivelisana raskrsnica tipa „truba“ imajući u vidu prostorna ograničenja lokacije, ali i saobraćajno opterećenje postojeće obilaznice Mladenovca na koju se petlja povezuje. Zato je izabrano rešenje funkcionalnog nivoa „C“ koje se povezuje jednom kružnom raskrsnicom na postojeći put na pogodnom mestu. Primenjena je turbo kružna raskrsnica koja ima značajno veći kapacitet i daje prednost levim skretanjima izliva sa brze saobracajnice u centar grada i povećava nivo bezbednosti.



Slika 10. *Denivelisana raskrsnica Mladenovac na ukrštaju Brze saobraćajnice Vožd Karađorđe i državnog puta Ib reda broj 25 u zoni obilaznice Mladenovca*

Denivelisana raskrsnica „Vlaška“ projektovana je na kontaktu Brze saobraćajnice Vožd Karađorđe i državnog puta Ib reda broj 25 Mali Požarevac – Mladenovac. To je denivelisana raskrsnica tipa „romb“ imajući u vidu prostorna i topografska ograničenja lokacije. Specifičnost lokacije je strma prirodna kosina sa leve strane, potok sa desne i položaj puta na koji se petlja priključuje koji se prostire praktično paralelno sa glavnim pravcem. Projektovan je kompaktni romb sa dve kružne raskrsnice u samoj petlji (jedna oblika kaplje) i jednom

kružnom raskrsnicom na državnom putu IA25 na koji se pelja povezuje. zabrano rešenje koje se povezuje jednom kružnom raskrsnicom na postojeći put na pogodnom mestu.

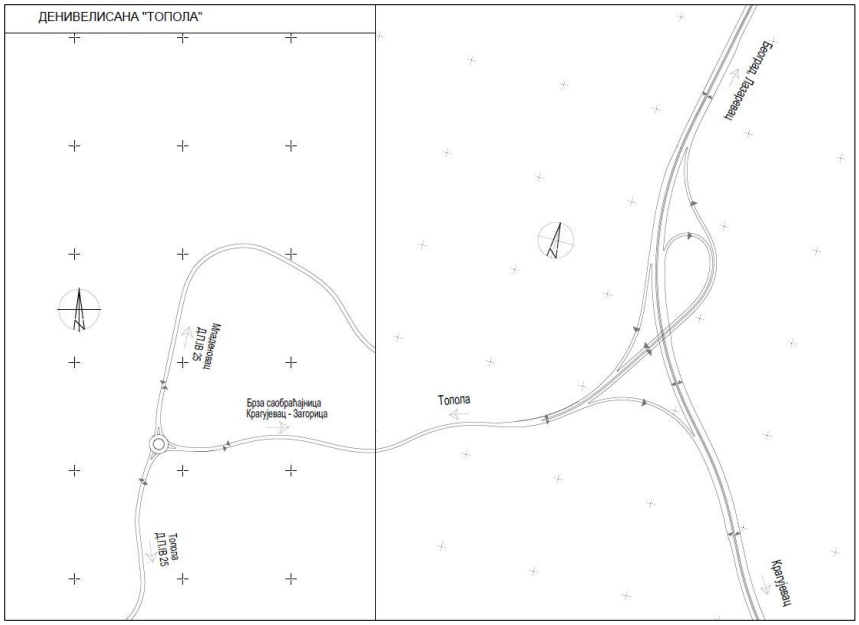


Slika 11. Denivelisana raskrsnica „Vlaška“ na Brzoj saobraćajnici Vožd Karađorđe i državnog puta Ib reda broj 25 Mali Požarevac - Mladenovac

7. RASKRSNICE ZA VEZU SA VEĆIM NASELJENIM MESTIMA

Kada je potrebno napraviti najkraću vezu sa naseljenim mestima većim od 10.000 stanovnika koja prema svom statusu zaslužuju direktnu vezu sa četvorotračnim putem (opštinski, gradski centri i sl.), a ne mogu na odgovarajući način da budu povezana kroz sekundarnu mrežu, projektuju se posebne vezne saobraćajnice do odgovarajućeg priključka na deo gradske mreže koja može po kapacitetu da prihvati saobraćaj sa petlje.

Denivelisana raskrsnica „Topola“ projektovana je za vezu Brze saobraćajnice Vožd Karađorđe i Topole .v Projektovana raskrsnica je tipa „truba“ sa veznom saobraćajnicom dužine 1200m do veze na državni put Ib 25 u zoni naseljenog mesta Topola. Primenjeni su izlivi i ulivi sa direktnim rampama za brzinu 50km/h i indirektnim za 30km/h što je u skladu sa funkcionalnim nivoom raskrsnice i rangom puta kome pripada raskrsnica. Truba se nameće kao logičan izbor jer na mestu ukrštaja ne postoji izgrađena saobraćajnica odgovarajućeg kapaciteta. Postojeći atarski put se ostavlja za saobraćaj poljoprivrednih vozila čime se postiže separacija saobraćaja i povećava bezbednost i kapacitet veze petlja-grad.



Slika 12. *Denivelisana raskrsnica „Topola“ za vezu Brze saobraćajnice Vožd Karađorđe i Topole*

8. ZAKLJUČAK

Obzirom na značajnu ekspanziju četvorotračnih moto puteva u Republici Srbiji, potrebno je da se reviduju zakoni i propisi, a pre svega Zakon o putevima[3] i Pravilnik o uslovima koje sa aspekta bezbednosti saobraćaja moraju da ispunjavaju putni objekti i drugi elementi javnog puta[2], kako bi se ovi putevi standardizovali. Zakonom o putevima treba definisati posebnu kategoriju motoputeva pored postojećih autoputeva i ostalih puteva, jer ovi putevi prema svojim specifičnostima zahtevaju poseban tretman u zakonu. Pravilnik[2] treba da definiše uslove projektovanja motoputeva posebno za dvotračne, a posebno za četvorotračne motoputeve.
Kod četvorotračnih motoputeva preporučuje se korišćenje denivelisanih raskrsnica za ukrštaje sa drugim putevima.
Rastojanje raskrsnica treba da bude približno jednako, ali mora da prati uslove lokacija (preseci sa važnim putevima, raspored naseljenih mesta i sl.).
Pri izboru tipa raskrsnice i njenih projektnih elemenata treba uzeti u obzir specifičnosti motoputa u odnosu na autoput i dvotračne puteve. Izbor tipa raskrsnice vršiti u zavisnosti od puteva sa kojim se četvorotračni put ukršta na osnovu saobraćajnih, prostornih i ekonomskih kriterijuma.
Na četvorotračnim motoputevima moguće je koristiti kompaktnija rešenja od autoputeva, pa su standardna rešenja za raskrsnice u zavisnosti od uslova lokacije romb, pola deteline, i slična rešenja sa korišćenjem ukrsne saobraćajnice kao dela denivelisane raskrsnice, a u specifičnim slučajevima mogu se koristiti i kompaktnija rešenja raskrsnice tipa „truba“.
Kod ukrštaja sa autoputevima sa komercijalnom naplatom rešenja tipa „truba“ i „dupla truba“ omogućavaju efikasnu naplatu putarine uz odgovarajući nivo usluge.
Za ukrštaje sa drugim četvorotračnim putevima nameće se primena „deteline“ kao odgovarajuće rešenje za ukrštaj dve visokokapacitivne saobraćajnice istog ranga.

Literatura

[1] Katanić J.; Anđus V.; Maletin M. 1983. Projektovanje Puteva
[2] Pravilnik o uslovima koje sa aspekta bezbednosti saobraćaja moraju da ispunjavaju puteni objekti i drugi elementi javnog puta, Sl. Glasnik RS br.50/11
[3] Zakon o putevima, "Sl. glasnik RS", br. 41/2018, 95/2018 i 92/2023
[4] Zakon o bezbednosti saobraćaja; "Sl. glasnik RS", br. 41/2009, 53/2010, 101/2011, 32/2013 - odluka US, 55/2014, 96/2015 - dr. zakon, 9/2016 - odluka US, 24/2018, 41/2018, 41/2018 - dr. zakon, 87/2018, 23/2019, 128/2020 - dr. zakon i 76/2023
[5] Uredba o kategorizaciji državnih puteva, "Sl. glasnik RS", br. 87/2023 i 24/2024
[6] Uredba o kriterijumima za kategorizaciju javnih puteva "Sl. glasnik RS", br. 38/2019 i 97/2023

PRIMENA SAVREMENIH METODA ISPITIVANJA REOLOŠKIH KARAKTERISTIKA BITUMENSKOG VEZIVA

Đorđe Tošković, mast.inž.građ. – Rukovodilac laboratorije za bitumen, bitumenske emulzije i hidroizolacije – *Građevinski institut CPL – Novi Sad –* djordje.toskovic@cpl.rs
Goran Mišanović, dipl.inž.građ. – Rukovodilac laboratorije za asfalt – *Građevinski institut CPL – Novi Sad –* goran.misanovic@cpl.rs
Želimir Perić dipl.inž.građ. – Izvršni direktor za projekte i razvoj – *Građevinski institut CPL – Novi Sad –* zelimir.peric@cpl.rs
Dr Radomir Jakovljević, dipl.građ.inž. – Generalni direktor – *Građevinski institut CPL – Novi Sad –* radomir.jakovljevic@cpl.rs

Rezime: Jedan on najvažnijih faktora koji utiču na karakteristike asfalte mešavine je bitumensko vezivo. Pored masenog učešća veziva koje se određuje prethodnim sastavom asfaltne mešavine, na njene performanse dominantno utiču karakteristike samog veziva. Kako bi se odgovorilo na klimatske promene koje se ogledaju kroz povišenu prosečnu temperaturu tokom leta, kao i sve učestalijim ekstremnim klimatskim pojavama, potreba za boljim razumevanjem ponašanja kolovozne konstrukcije je sve veća. Pored temperature, uočljiv je i porast saobraćajnog opterećenja koji negativno utiče na asfaltne slojeve kolovozne konstrukcije. Karakterizacija i poređenja veziva vrši se primenom različitih metoda ispitivanja primenom savremenih uređaja. Upotrebom Dinamičkog reometra za smicanje DSR, Reometra za savijanje gredica BBR i Rotacionog viskozimetra, moguće je ustanoviti reološke karakteristike pri visokim, srednjim i niskim temperaturama. Vrši se merenje otpornosti na plastičnu deformaciju veziva, otpornost na zamor, pucanje pri niskim temperaturama kao i viskoznost veziva. Drugim rečima, bolje razumevanje ponašanje asfaltne mešavine tokom ugradnje i eksploatacije. Ispitivanja su vršena na različitim tipovima i klasama veziva.

Ključne reči: Bitumen, asfalt, reologija, reometar, kolovozna konstrukcija

APPLICATION OF MODERN METHODS OF TESTING RHEOLOGY CHARACTERISTICS OF BITUMEN BINDER

Đorđe Tošković, mast.inž.građ. – Head of the laboratory for bitumen, bitumen emulsion and waterproofing – *Civil Engineering Institute CPL – Novi Sad –* djordje.toskovic@cpl.rs
Goran Mišanović, dipl.inž.građ. – Head of Laboratory for asphalt – *Civil Engineering Institute CPL – Novi Sad –* goran.misanovic@cpl.rs
Želimir Perić dipl.inž.građ. – Executive Director for Development – *Civil Engineering Institute CPL – Novi Sad – Novi Sad –* zelimir.peric@cpl.rs
Dr Radomir Jakovljević, dipl.građ.inž. – General director – *Civil Engineering Institute CPL – Novi Sad –* radomir.jakovljevic@cpl.rs

Abstract: One of the most important factors affecting the characteristics of asphalt mixtures is the bituminous binder. In addition to the mass participation of the binder, which is determined by the preliminary composition of the asphalt mixture, the performance is dominantly influenced by the characteristics of the binder itself. In order to respond to climate changes, which are reflected in the increased average temperature during the summer, as well as more and more frequent extreme weather events, the need for a better understanding of the behavior of pavement construction is necessary. In addition to the temperature, an increase in traffic load is also noticeable, which has a negative effect on the asphalt layers of the roadway structure. Characterization and comparison of binders is carried out using different test methods using modern devices. Using the Dynamic Shear Rheometer DSR, the Bending Beam Rheometer BBR and the Rotary Viscometer, it is possible to determine the rheological characteristics at high, medium and low temperatures. Resistance to plastic deformation of the binder, resistance to fatigue, cracking at low temperatures, as well as viscosity of the binder are measured. In other words, a better understanding of the behavior of asphalt mixtures during installation and exploitation. Tests were performed on different types and classes of binders.

Keywords: Bitumen, asphalt, rheology, rheometer, pavement construction

1. UVOD

Na osnovu klimatoloških podataka dostupnih na sajtu Republičkog Hidrometereloškog Zavoda (http://www.hidmet.gov.rs/latin/meteorologija/klimatologija_godisnjaci) za period od 1949. do 2020. godine, uočen je trend porasta srednjih mesečnih temperatura vazduha u poslednjih 10-20 godina, što za rezultat ima povišenu vrednost merodavne temperature asfaltnih slojeva, pa samim tim i smanjenje viskoziteta asfaltnih mešavina u veznom i habajućem sloju. Na osnovu podataka Republičkog meteorološkog zavoda sa 29 lokacija mernih stanica za period od 30 godina i sa nivoom pouzdanosti od 98 %, došlo se do zaključka da na teritoriji Srbije, maksimalna sedmodnevna temperatura asfaltnog sloja iznosi 58 °C. Kako su analize rađene 2008 godine [1], a uslovljeno klimatskim promenama, možemo slobodno zaključiti da je nova merodavna temperatura 64 °C. Inkrement od 6 °C je iz razloga PG gradacije koja definiše veziva na tim stepenima celzijusa (52, 58, 64 °C…). Treba napomenuti da su prema evropskim standardima temperaturni inkrementi merodavne temperature ispitivanja (50, 60, 70 °C…). Najniža merodavna temperatura za većinu teritorije Srbije iznosi - 22 °C, i ova temperatura je pod uticajem klimatskih promena u blagom porastu [2]. Sa porastom temperatura neophodno je prilagoditi pristup pri projektovanju i održavanju puteva, kako bi se produžio životni vek i smanjili troškovi održavanja puta. Razumevanje reoloških svojstava bitumena je kritičan zadatak u izboru odgovarajućih materijala za izgradnju asfaltnih slojeva [3,4,5]. Za bolji uvid potrebno je ispitati svojstva veziva, pri visokim, srednjim i niskim temperaturama, kako bi se zadovoljili zahtevi klimatskih uslova gde se koristi vezivo. Reometar dinamičkog smicanja (DSR) koristi se za karakterizaciju viskoznog i elastičnog ponašanja bitumena, pri kontrolisanoj temperaturi, frekvenciji, naponu i deformaciji. Do sada je razvijeno nekoliko metoda ispitivanja bitumenskih veziva ovim uređajem. U radu se bavimo ispitivanjem prema dve metode i analiziranjem dobijenih rezultata:

1. Određivanje kompleksnog modula **G*** i faznog ugla **δ** [6, 7, 17],
2. MSCR (Multiple stress creep recovery) metoda [8, 9],

Reometrom za savijanje gredica BBR (Bending Beam Rheometer), ispituje se otpornost veziva pri niskim temperaturama [10, 11]. Rotacionim viskozimetrom određuje se dinamička viskoznost veziva [12, 13], što za rezultat daje ugradljivost i obradljivost asfaltne mešavine.

2. METODE ISPITIVANJA

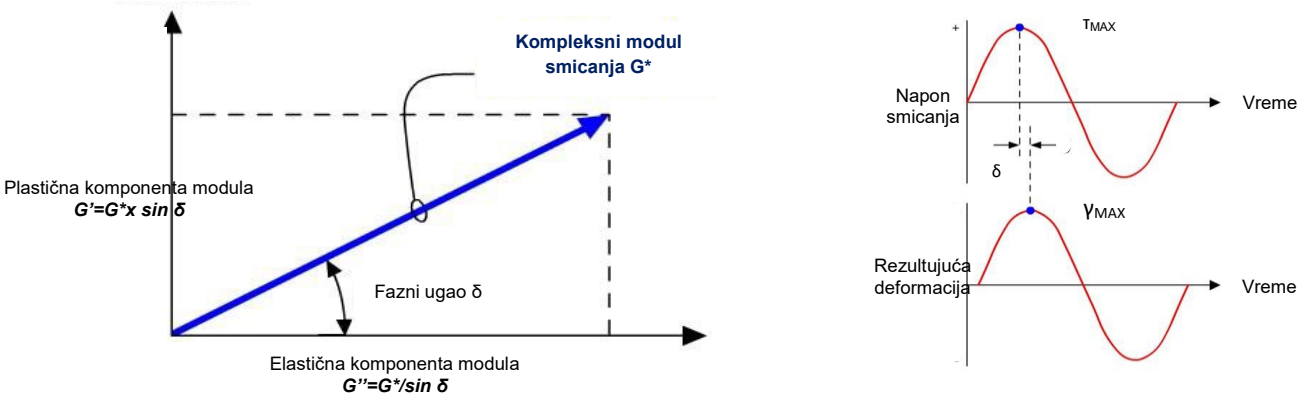
Postojeća regulativa ispitivanja bitumenskih veziva, najčešće se bazira na osnovnim ispitivanjima kao što su određivanje penetracije [14] i tačke razmekšanja veziva [15]. Prednost ovih metoda ispitivanja je u jednostavnosti, međutim imaju nedostatke naročito u pogledu evaulacije karakteristika polimer modifikovanog bitumen (PmB) i boljeg predviđanja pojave kolotraga. U sklopu SUPERPAVE metodologije razvijen je Performance Grade (PG grading) [16] metodologija klasifikacije bitumena. Zahtevi za kvalitet veziva se vezuju za temperaturne parametre područija na kome se izvode radovi, samim tim i u kojima će se nalaziti kolovozna konstrukcija tokom eksploatacije. Klasifikacija se vrši na osnovu rezultata određivanja kompleksnog modula smicanja, savojne krutosti pri savijanju gredica BBR, dinamičke viskoznosti primenom rotacionog viskozimetra. Na ovaj način evaluiraju se karakteristike bitumena na visokim, srednjim [18] i niskim temperturama kao i ugradljivost. Pojavom PmB veziva javio se nedostatak PG gradacije jer se ispitivanja uz pomoć DSR uređaja vrše u elastičnoj zoni deformacija bitumena, koja nije dovoljna za aktivaciju polimerne mreže u PmB vezivu. Na taj način se ne uzima u obzir povratna elastičnost PmB veziva. Kako bi se što bolje pokazao uticaj PmB razvijena je MSCR (Multiple stress creep recovery) metoda u sklopu PG+ metodologije. Na ovaj način moguće je uočiti prisustvo polimera u bitumenu i na merodavan način pokazati pozitivan uticaj polimera pri visokim temperaturama [17]. U sklopu rada vršeno je ispitivanje na DSR uređaju sa originalnim, kratkotrajno (RTFOT) i dugotrajno ostarelom vezivu (RTFOT+PAV) [23]. Na taj način analiziran je uticaj starenja na karakteristike veziva. Analizirana bitumenska veziva data su u Tabeli 1.

Tabela 1. *Vrste i tipovi bitumenskog veziva*

Tip veziva	Klasa	Proizvođač	I.D.
Putni bitumen	35/50	A	35/50 A
	50/70	A	50/70 A
	50/70	B	50/70 B
	50/70	C	50/70 C
	70/100	A	70/100 A
Polimer modifikovani bitumen	25/55-65	A	25/55-65 A
	45/80-65	A	45/80-65 A
	45/80-65	B	45/80-65 B

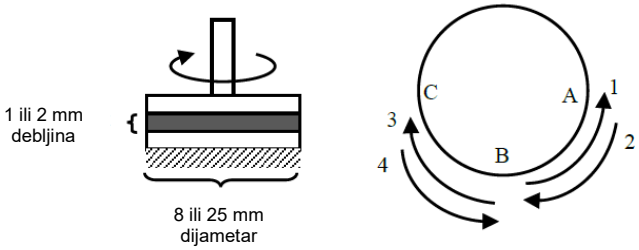
2.1. SRPS EN 14770 - Određivanje kompleksnog modula smicanja G* i faznog ugla δ

Kompleksni modul smicanja (G*) može se smatrati ukupnom otpornošću uzorka na deformaciju. Bitumen je visko-elastičan materijal samim tim javlja se vremensko kašnjenje između primenjenog opterećenja i početka deformacije. Fazni ugao (δ) prestavlja kašenjenje primenjenog smičićeg napona i rezultujuće smičuće deformacije. Što je veći fazni ugao (δ), to je materijal viskozniji. Kompleksni modul (G*) sastoji se iz plastične komponente kompleksnog modula G' i elastične komponente G'', Slika 1.



Slika 1. *Kompleksni modul smicanja (G*) i fazni ugao δ*

Primenom DSR uređaja u ispitivanju bitumenskog veziva određuje se pad elastične komponente modula krutosti G*/sinδ u funkciji porasta temperature. Deformacije tokom ispitivanja zadržavaju se u elastičnoj zoni deformacija. Ispitivanje se vrši pri brzini rotacije 10 rad/s (1,59 Hz) a prema šemi sa Slike 2. Kako se ispitivanja nalaze u visko-elastičnoj zoni deformacije veziva, vrši se povećanje temperature ispitivanja u inkrementima od 6 °C. Razlog za ovim temperaturnim koracima leže u PG klasifikaciji. U sklopu PG klasifikacije, bitumeni se označavaju sa PG X-Y, gde je X najviša projektovana sedmodnevna temperatura kolovoza na 2 cm dubine od površine sloja, dok Y prestavlja najnižu projektnu temperaturu kolovoza. PG klasifikacija se vrši na osnovu standarda AASHTO M 320-10 "Performance-Graded Asphalt Binder", dok su metode ispitivanja u skladu sa SRPS EN 14470:2023 "Određivanje kompleksnog modula smicanja i faznog ugla" i AASHTO T 315 "Standardna metoda ispitivanja za određivanje reoloških svojstava asfaltnog veziva pomoću dinamičkog reometra smicanja (DSR)". Ispitivanja se vrše na uzorcima oblika novčića, radijusa 25 mm i 8 mm, debljine 1 i 2 mm. Rezultat ispitivanja prema evropskom standardu je Kompleksni modul smicanja G* i fazni ugao δ pri određenoj temperaturi, dok kod standarda AASHTO, temperatura T (°C) pri određenoj vrednost G*/sinδ.



Slika 2. *Šema rada Reometra DSR*

Što je potrebnija viša temperatura da se dostigne vrednost G*/sinδ = 1,0 kPa za neostareli bitumen, odnosno G*/sinδ = 2,2 kPa za kratkotrajno ostareli bitumen na 163 °C u skladu sa SRPS EN 12607-1, to je vezivo otpornije na visoke temperature odnosno kolotrage. Kako su deformacije uzorka male i nalaze se u elastičnoj zoni, metoda ispitivanja je pogodna za putne-bitumene ali ne pokazuje pravi karakter polimer modifikovanih veziva. Kako bi vezivo zadovoljilo kriterijume neophodno je da vrednost temperature pri kojoj je G*/sinδ = 1,0; odnosno G*/sinδ = 2,2 kPa za kratkotrajno ostareli bitumen, bude veća od zahtevane za geografsko područje gde se primenjuje, sem ukoliko se radi o vrlo teškom saobraćajnom opterećenju ECO ≥ $3*10^6$ ili sporom saobraćaju V ≤ 20 km/h, tada se povećava merodavna temperatura za jedan inkrement ili dva, ukoliko su oba slučaja ostvarena. Ispitivanja na DSR uređaju pri srednjim temperaturama vrši se na uzorcima debljine 2mm i dijametra 8mm. Uzorci su nakon RTFOT starenja stavljeni na dugotrajno PAV starenje. Ispitivanje se obavlja od više ka nižim temperaturama a kriterijum prema ASSHTO iznosi G* x sinδ=5000 kPa. Što je temperatura manja pri kojoj se ovaj uslov ostvaruje to je otpornost na pojavu pukotina usled zamora veziva veća.

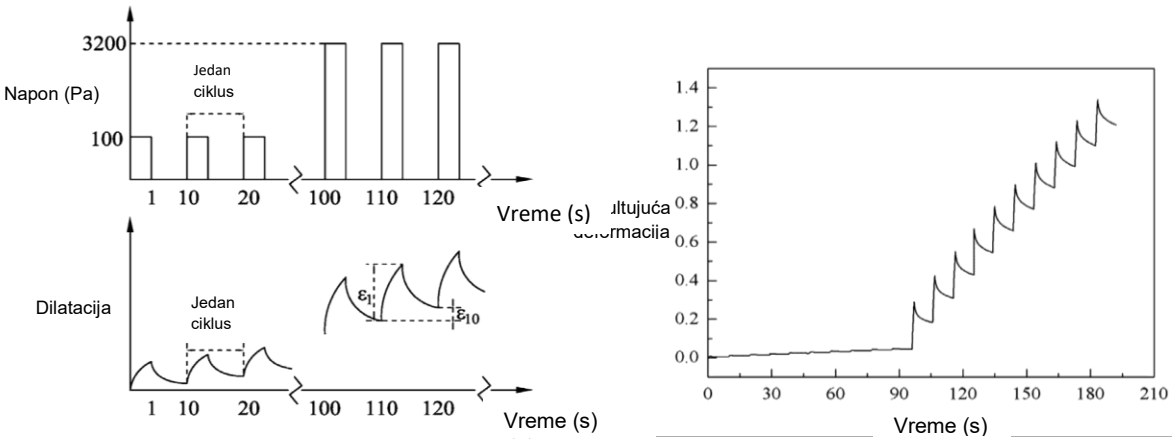
2.2. SRPS EN 16659 - Ispitivanje oporavka veziva pri tečenju usled višestrukog opterećenja i rasterećenja (MSCR)

Primenom MSCR metode određuje se ne samo krutost već i naknadna elsatičina povrat koju karakteriše polimer modifikovani bitumen (PmB) [21]. Tečenje veziva sa dodatkom polimera nije linearno, zavisi od nivoa opterećenja, stoga klasifikacija po PG metodologiji nije merodavna za ispitivanje PmB veziva. Za potrebe boljeg analiziranja PmB veziva razvijena je metoda MSCR (Multiple Stress Creep Recovery). Ispitivanje se vrši pri cikličnom konstantnom smičućem naponu, dok se beleži pojedinačna i akumulirana plastična deformacija. Metoda je razvijena za proveru prisustva polimera u bitumenu i ispitivanje putnih bitumena kod kojih je razlika u temperaturi po PG klasifikaciji veća od 92 °C. Ispitivanja se obavljaju na temperaturi od 64 °C, iako je za područje Republike Srbije merodavna temperatura po PG klasifikaciji 58 °C iz 2008 god, ali se zbog uticaja klimatskih promena i saobraćajnog opterećenja odlučeno da se ispitivanje obavi na 64 °C. Metodom MSCR ne vrši se povećanje merodavne temperature ukoliko se radi o sabraćajnicama sa vrlo teškim saobraćajnim opterećenjem ECO ≥ $3*10^6$ ili ukoliko se radi o sporom saobraćaju V ≤ 20 km/h, već se vrši korekcija zahteva za J_{nr} faktor koji zavisi od nepovratnog dela dilatacije i smičućeg napona. Opterećenje je blokovskog oblika i konstantne veličine u trajanju od 1 sec, dok je vreme za relaksaciju 9 sec. Vrši se 10 ciklusa sa naponom smicanja od 0,1 kPa i 10 ciklusa od 3,2 kPa. Prema AASHTO standardu ispitivanje se obavlja na kratkotrajno ostarelom vezivu dok se prema SRPS EN 16659 standardu daje mogućnost izbora. Metoda MSCR ima puno bolju korelaciju kolotraga i karakteristika veziva u odnosu na standardnu PG klasifikaciju, naročito kada se radi o PmB vezivu. Rezultati istraživanja su pokazali da J_{nr} može da identifikuje performanse kolotraga modifikovanih kao i nemodifikovanih veziva u odnosu na PG klasifikaciju [16]. Oblik matrice opterećenja i kulmulativne dilatacije prestavljen je na Slici 3.

$$R = SUM\left(\frac{(\varepsilon_1 - \varepsilon_{10})}{\frac{\varepsilon_1}{10}}\right); \qquad J_{nr} = SUM\left(\frac{\frac{\varepsilon_{10}}{\tau}}{10}\right)$$

Gde je:

R	prosečan stepen oporavka
J_{nr}	nepovratna komponenta tečenja
ε_1	dilatacija prve sekunde svakog ciklusa
ε_{10}	dilatacija desete sekunde svakog ciklusa
τ	primenjen napon smicanja



Slika 3. *Matrica opterećenja opita MSCR*

2.3. SRPS EN 13302 - Određivanje dinamičkog viskoziteta bitumenskog veziva korišćenjem rotacionog viskozimetra

Merenje viskoziteta bitumena je suštinski deo kategorizacije bitumena i predviđanja svojstava asfalta od početak tehnologije asfaltiranja. Viskozitet bitumenskog veziva određena je njegovom strukturom i hemijskim sastavom. Postojeće metode merenja viskoziteta bitumenskog veziva, kinematička (SRPS EN 12595) i dinamička metoda (SRPS EN 12596) primenom kapilarnih sudova iziskuje puno vreme za ispitivanje, kao i potreba za primenom rastvarača za čišćenje sudova nakon ispitivanja. Alternativa ovim metodatama je ispitivanje dinamičke viskoznosti primenom rotacionog viskozimetra. Rotacioni viskozimetar je usvojen za

ispitivanje asfalta kao rezultat Strateškog programa istraživanja autoputeva (SHRP) 1992. godine. Rotacioni viskozimetar se koristi za merenje viskoziteta asfaltnog veziva prema stadardu SRPS EN 13302 i AASHTO T 316, smicanjem materijala pri konstantnoj brzini smicanja i na konstantnoj temperaturi. Uvidom u promenu viskoznosti u funkciji promene temperature omogućava dobavljačima i kupcima da odrede minimalne temperature neophodne za transport asfaltnog veziva uz održavanje fluidnosti za pumpanje veziva iz cisterne. Rotacioni viskozimetar se takođe koristi za odabir temperature mešanja i zbijanja za projektovanje mešavina.

2.4. SRPS EN 14771 - Određivanje krutosti pri savijanju – Reometar za savijanje gredica (BBR)

Primenom Reometra za savijanje gradica BBR ispituje se otpornost nastanka termičkih pukotina u asfaltnim slojevima. Kako se temperatura asfaltnih slojeva pada, dolazi do akumuliranja napona. Ukoliko do ovoga dolazi brzo može doći do pojave pukotine jer nema dovoljno vremena do dođe do relaksacije napona. Ovakve pukotine se nazivaju termičke ili transverzalne pukotine. Termičke pukotine najčešće se pojavljuju nastankom dva mehanizma, nagli pad temperature pri kojoj dolazi do prekoračenja napona u vezivu ili cikličnim padom i porastom temperature što vremenom dolazi do nastanka pukotine [24]. Ispitni uzorci su profilisane grede u obliku prizme od bitumenskog veziva. Greda je jednostavno poduprta i podvrgnuta konstantnom opterećenju na sredini. Krutost grede se izračunava deljenjem maksimalnog naprezanja sa maksimalnom deformacijom. Bitumenski uzorci koji se koriste u ispitivanju su dugotrajno ostareli metodom PAV. Rezultat ispitivanja BBR metodom je Izračunata savojana krutost S_c i m - vrednost koja prestavlja nagib krive koja definiše pad krutosti u funkciji od trajanja opterećenja

$$S_{c(t)} = \frac{P * L^3}{4 * b * h^3 * \delta(t)}$$

Gde je:

S(t) Izračunata savojana krutost MPa
P konstantna primenjena sila 980 mN
b širina gredice 12,5 mm
h debljina gredice 6,25 mm
L raspon između oslonaca 102 mm
δ(t) dilatacija u funkciji vremena

Potrebna je maksimalna krutost od 300 MPa i minimalna m-vrednost od 0,300 da bi se minimiziralo pucanje veziva pri niskoj temperaturi. Ispitivanje se vrši u skladu sa standardom SRPS EN 14771 i AASHTO T 313. Prema evropskom standardu rezultat ispitivanja je Izračunata savojna krutosti Sc i m – vrednost pri tri temperature sa inkrementom od 6 °C i pri vremenima operećenja od 8, 15, 30, 60, 120 i 240 s. Merodavno vreme opterećenja za koje se radi analiza je 60 s. Prema AASHTO M 320 metodi klasifikacije bitumenskih veziva, rezultat ispitivanja je temperatura pri kojoj vrednost Sc ≤ 300 MPa i m ≤ 0,300.

3. REZULTATI ISPITIVANJA

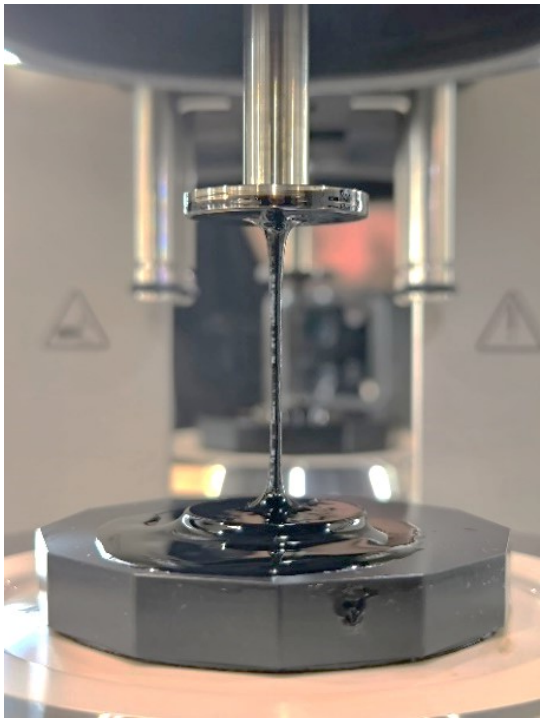
Svi uzorci su uzorkovani u skladu sa standardom SRPS EN 58 i pripremljeni za ispitivanje u skladu sa SRPS EN 12594 i instrukcijama proizvođača veziva. Kratkotrajno starenje RTFOT je obavljeno u skladu sa standarodm SRPS EN 12607-1, pri temperaturi od 163 °C u trajanju od 75 minuta. Dugotrajno starenje bitumenskog veziva primenom PAV (Pressure Aging Vessel) uređaja u skladu sa SRPS EN 14769 i vršeno je nakon RTFOT starenja na temperaturi od 100 °C, pritisku od 2,1 MPa u trajanju od 20 h. Pre početka ispitivanja reoloških izvršena su osnovna ispitivanja, rezultati ispitivanja dati su u Tabeli 2.

Tabela 2. *Osnovna ispitivanja bitumenskih veziva*

Svojstvo	J.M.	Standard	Bitumensko vezivo							
			35/50 A	50/70 A	50/70 B	50/70 C	70/100 A	25/55-65 A	45/80-65 A	45/80-65 B
Penetracija na 25 °C	0,1 mm	SRPS EN 1426	41	58	57	47	85	34	55	59
Tačka razmekšanja	°C	SRPS EN 1427	53,8	49,2	48,2	52,2	44,2	74,8	87,5	56,2
Indeks penetracije	–	SRPS EN 12591 Dodatak A	-0,7	-1,1	-1,4	-0,8	-1,8	-	-	-
Gustina	kg/m^3	SRPS EN 15326	1026	1040	1038	1031	1034	1026	1021	1028
Povratna elastičnost na 25 °C	%	SRPS EN 13398	-	-	-	-	-	90	92	80

3.1. Određivanje kompleksnog modula G* i faznog ugao δ pri visokim temperaturama

Ispitivanja su vršena uz pomoć Dynamic shear rheomtera DSR Slika 4 (levo), na različitim temperaturama i frekvencijama. Biće prestavljen rezultat G* i δ na 64 °C i temperatura pri kojoj se zadovoljava kriterijum G*/sinδ = 1,0 kPa za neostareli bitumen, odnosno G*/sinδ = 2,2 kPa za kratkotrajno ostareli bitumen. Frekvencija ispitivanja je 1,592 Hz. Uzorak je oblika novčića, prečnika 25mm i debljine 1mm. Ispitivanje je obavljeno na neostarelom vezivu i RTFOT kratkotrajno ostarelom. Rezultati ispitivanja dati su u Tabeli 3. i Tebeli 4.



Slika 4. *Dinamički reometar za smicanje DSR (levo), uzorak nakon ispitivanja (desno)*

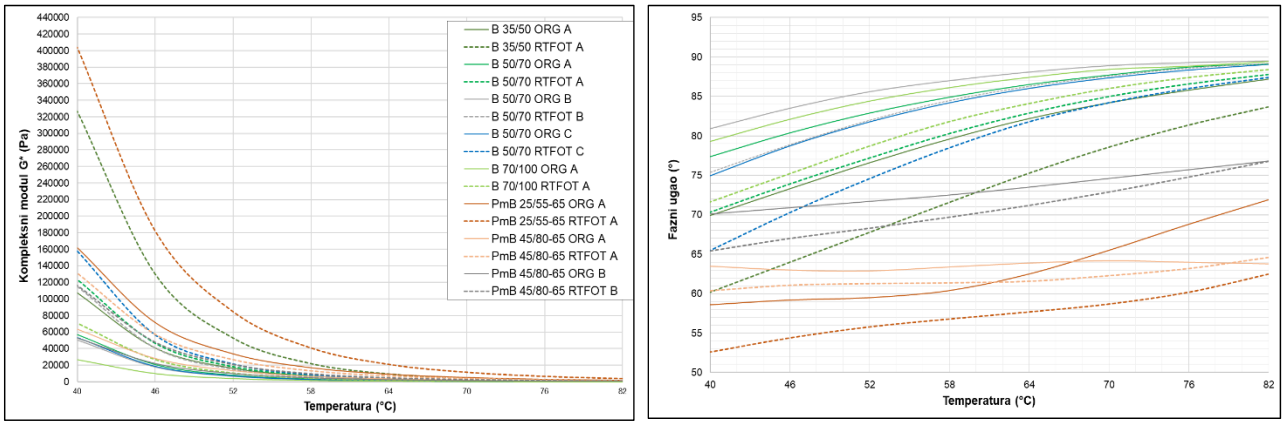
Tabela 3. *Kompleksni modul smicanja G* i fazni ugao δ putnog bitumena na 64 °C*

Svojstvo	Standard	Bitumensko vezivo									
		35/50 A		**50/70 A**		**50/70 B**		**50/70 C**		**70/100 A**	
Originalno / RTFOT		Org.	RTFOT	Org.	RTFOT	Org.	RTFOT	Org.	RTFOT	Org.	RTFOT
Kompleksni modul G* na 64 °C	SRPS EN 14770	2985	9568	1595	3406	1235	2545	1230	3427	817	1950
Fazni ugao δ na 64 °C		82,2	75,3	86,5	82,9	88,2	86,3	86,0	81,8	87,4	84,1
T °C (Originalno vezivo G*/sinδ=1,0; RTFOT ostrelo G*/sinδ=2,2 kPa)		73,0	75,5	68,0	67,4	65,9	65,0	65,8	65,2	62,2	63,0

Tabela 4. *Kompleksni modul smicanja G* i fazni ugao δ polimer modifikovanog bitumena*

Svojstvo	Standard	Bitumensko vezivo					
		25/55-65 A		**45/80-65 A**		**45/80-65 B**	
Originalno / RTFOT		Org.	RTFOT	Org.	RTFOT	Org.	RTFOT
Kompleksni modul G* na 64 °C	SRPS EN 14770	8845	20802	3841	7017	2391	4672
Fazni ugao δ na 64 °C		62,6	57,7	63,9	61,6	73,5	71,2
T °C (Originalno vezivo G*/sinδ=1,0; RTFOT ostrelo G*/sinδ=2,2 kPa)		86,6	87,1	81,0	78,1	73,0	71,7

Na Slici 5. prikazane su krive promene kompleksnog modula smicanja G* (levo) i faznog ugla δ (desno) u funkciji promene temperature pri frekvenciji od 1,592 Hz.



Slika 5. *Kompleksni modul krutosti G* i fazni ugao u funkciji promene temperature*

Kako bi se odredio utcaj RTFOT starenja na karakteristike veziva, upoređeni su rezultati parametra pre i posle kratkotrajnog starenja Tabela 5. Ocena je vršena kroz procentualnu promenu karakteristika nakon starenja.

Tabela 5. *Promena kompleksnog modul smicanja G* i faznog ugla δ nakon RTFOT na 163 °C, 75 min*

Svojstvo	Standard	Bitumensko vezivo							
		35/50 A	50/70 A	50/70 B	50/70 C	70/100 A	25/55-65 A	45/80-65 A	45/80-65 B
Procentualna promena kompleksnog modula nakon RTFOT na 64 °C	SRPS EN 14770	220	113	106,1	177	139	135,2	83,0	95,4
Apsolutna promena faznog ugla δ nakon RTFOT na 64 °C		6,9	3,6	1,9	4,2	3,3	4,9	2,3	2,3

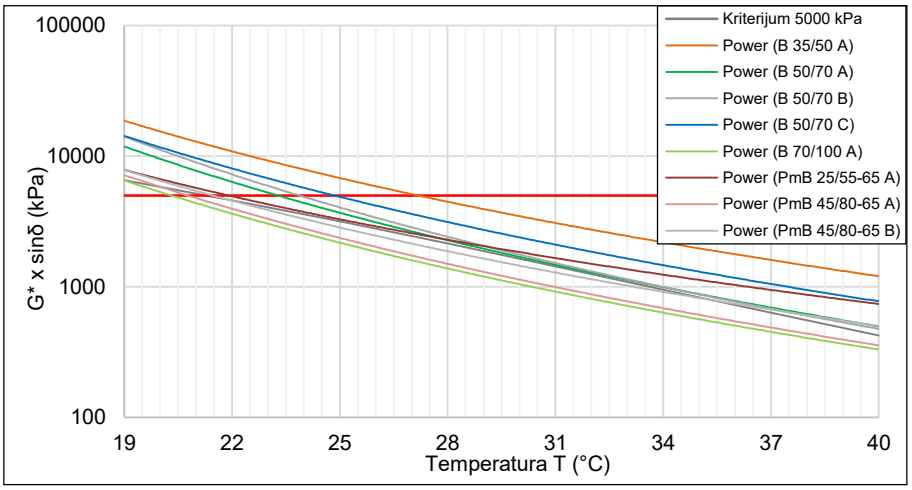
3.2. Određivanje kompleksnog modula G* i faznog ugao δ pri srednjim temperaturama

Kako bi se odredile performanse bitumenskog veziva pri srednjim temperaturama vršena su ispitivanja na DSR uređaju primenom metode SRPS EN 14770. Uzorci su ispitivani nakon kratkotrajnog RTFOT i dugotrajnog starenja PAV. Korišćena geometrija ispitivanja je 8mm i debljina uzorka je 2mm. Rezultati ispitivanja je temperatura pri kojoj je faktor G* x sinδ = 5000 kPa. Kriterijum je preuzet iz standarda AASHTO M 320. Temperaturni inkrementi iznose 6 °C. U Tabeli 6. dati su rezultati ispitivanja.

Tabela 6. *Temperatura ispitivanja pri kojoj je G* x sinδ = 5000 kPa*

Svojstvo	J.M.	Standard	Bitumensko vezivo							
			35/50 A	50/70 A	50/70 B	50/70 C	70/100 A	25/55-65 A	45/80-65 A	45/80-65 B
Temperatura **T** pri G* x sinδ = 5000 kPa	°C	SRPS EN 14770	26,8	23,5	24,0	24,7	20,3	23,6	21,3	22,2
Fazni ugao **δ** pri G* x sinδ = 5000 kPa	°		40,0	46,1	49,9	40,1	46,9	38,5	44,7	43,6

U dijagramu na Slici 6. prikazane su krive promene faktora G* x sinδ u funkciji promene temperature.



Slika 6. *Faktor G* x sinδ u funkciji promene temperature*

3.3. Dinamička viskoznost bitumenskog veziva primenom Rotacionog viskozimetra

Ispitivanje dinamičke viskoznosti bitumenskog veziva određena je primenom rotacionog viskozimetra, prema standardu SRPS EN 13302. Kriterijumi su preuzeti iz ASSHTO M 320. Kako bi se stekao bolji uvidi u reologiju bitumena, vršena su ispitivanja na različitim temperaturama iako standard daje uslov samo na 135 °C. Brzina rotacije iznosi 20 rotacija po minuti, viskoznost se beleži nakon 60 sekundi rotiranja spindle. U zavisnosti od vrednosti viskoznosti korišćene su spindle tipa SC4-29, CC12-D18 i SC4-21, Slika 7. (desno). Upotrebljen je viskozimetar proizvođača Anton Paar ViscoQC 300 Slika 7. (levo). Ispitivanjem se dobija uvid u potrebne temperature proizvodnje i ugradnje asfaltne mešavine.

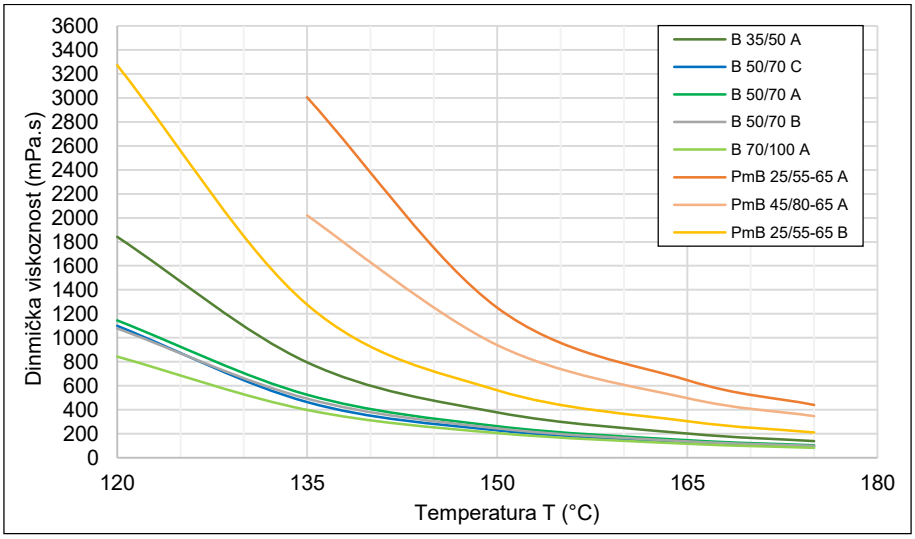
Slika 7. *Viskozimetar AntonPaar ViscoQC 300 (levo); spindle (desno)*

Kako bi rezultat bio zadovoljavajuće preciznosti, neophodno je da tokom ispitivanja imamo zadovoljavajući obrtni moment uređaja. Prema standardu SRPS EN 13302, ispitivanje se mora nalaziti u rasponu obrtnog momenta od 10 – 90% iskorišćenosti uređaja. Polimer modifikovana veziva ispitivana su spindlom SC4-29 dok su ostala veziva spindlom CC12/D18. U Tabeli 7. dati su rezultati ispitivanja bitumenskih veziva.

Tabela 7. *Dinamička viskoznosti bitumenskog veziva primenom rotacionog viskozimetra na 135 °C*

Svojstvo	J.M.	Standard	Bitumensko vezivo							
			35/50 A	50/70 A	50/70 B	50/70 C	70/100 A	25/55-65 A	45/80-65 A	45/80-65 B
Dinamička viskoznost	mPa.s	SRPS EN 13302	795	524	493	465	400	3004	2019	1280
Obrtni moment	%		37,6	22,0	24,8	23,3	18,9	64,5	63.5	60,2

Na Slici 8. predstavljen je dijagram promene viskoznosti u funkciji promene temperature ispitivanja bitumenskog veziva.



Slika 8. *Promena dinamičke viskoznosti u funkciji temperature*

3.4. Ispitivanje oporavka veziva pri tečenju usled višestrukog opterećenja i rasterećenja (MSCR)

Ispitivanje se vrši na DSR uređaju primenom geometrije 25mm na kratkotrajno RTFOT ostarelom vezivu. Debljina uzorka je 1mm. Standard AASHTO M 320-10. daje kriterijumi za faktore $J_{n,3,2}$, preko kojih je moguće definisati za koje saobraćajno opterećenje je moguće upotrebiti bitumensko vezivo. Kriterijumi su dati u Tabeli 8. Ispitivanje je obavljeno prema evropskom standardu SRPS EN 16659, koji se razlikuje u odnosu na AASHTO standard po tome što daje mogućnost upotrebe neostarelog veziva, kao i razlika u temperaturnim inkrementima. Ispitivanja su obavljena na temperaturi od 64 °C što prestavlja merodavnu temperaturu za teritoriju Republike Srbije.

Tabela 8. *Kriterijumi za ocenu bitumenskog veziva prema AASHTO Designation: M 320-10*

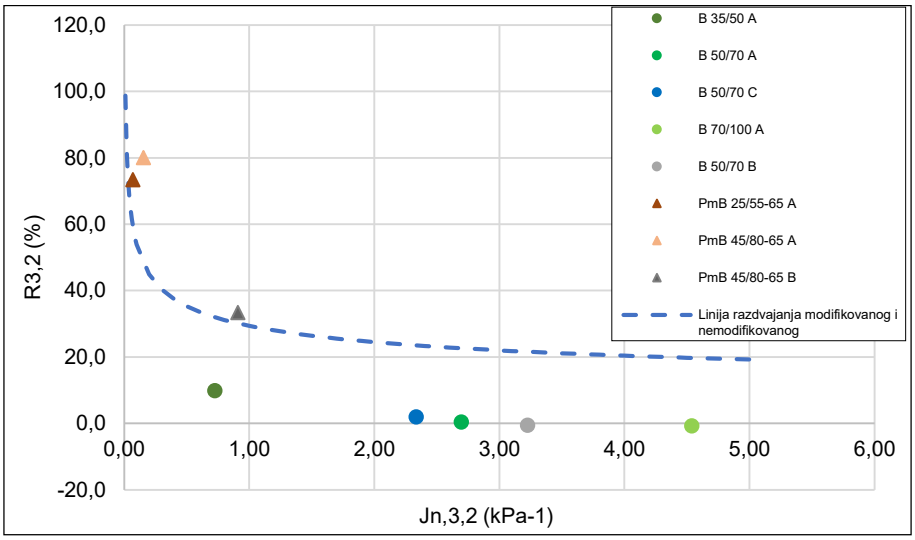
Performance-Graded Asphalt Binder AASHTO Designation: M 320-10		
Saobraćajno opterećenje	Oznaka bitumena	Maksimalna vrednost Jn,3.2
Standardno saobraćajno opterećenje < 10 miliona SO od 80 kN	S	4.5 kPa-1
Teško saobraćajno opterećenje 10 - 30 miliona SO od 80 kN	H	2.0 kPa-1
Veoma teško saobraćajno opterećenje ≥ 30 miliona SO od 80 kN	V	1.0 kPa-1
Ekstremno teško saobraćajno opterećenje ≥ 30 miliona SO od 80 kN i mirujući saobraćaj	E	0.5 kPa-1

U Tabeli 9. dati su rezultati ispitivanja bitumenskog veziva primenom MSCR metode.

Tabela 9. *Ispitivanje metodom MSCR na kratkotrajno ostarelom RTFOT vezivu na 64 °C*

Svojstvo	J.M.	Standard	Bitumensko vezivo							
			35/50 A	50/70 A	50/70 B	50/70 C	70/100 A	25/55-65 A	45/80-65 A	45/80-65 B
Jn,3.2	mPa.s	SRPS EN 14770	0,73	2,70	3,23	2,34	4,54	0,07	0,15	0.91
R3,2 kPa	%		9,9	0,4	-	1,9	-	73,4	80,1	33.4
Oznaka bit.	-		**V**	**S**	**S**	**S**	**-**	**E**	**E**	**V**

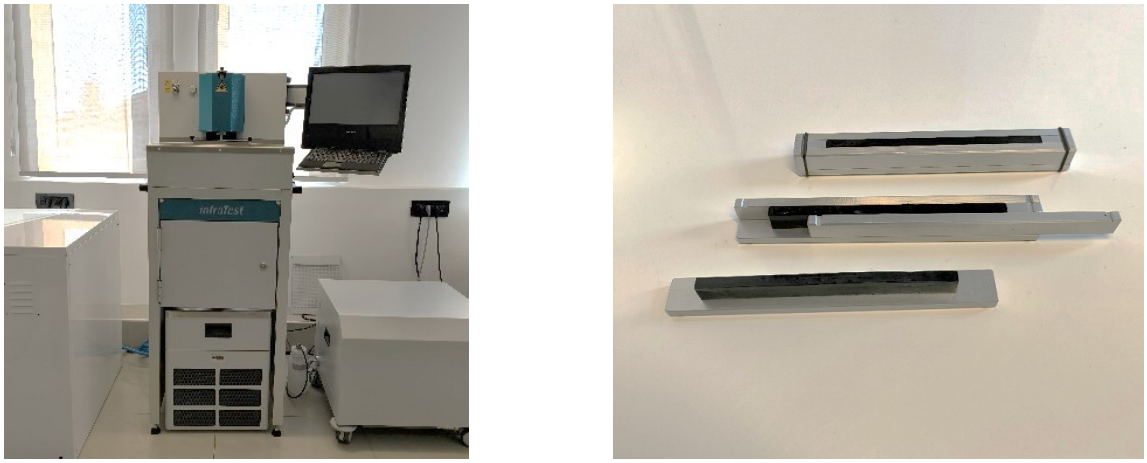
Na Slici 9. prestavljen je dijagram vrednosti $R_{3,2}$ u funkciji promene $J_{n,3,2}$. Isprekidanom linijom prestavljeno je razdvajanje modifikovanih i nemodifikovanih veziva. Sa gornje strane isprekidane linije je površina namenjena polimer modifikovanom vezivu, dok sa donje strane je površina za putne bitumene.



Slika 9. *Rezultati ispitivanja metodom MSCR prestavljeni preko faktora $R_{3,2}$ i $Jn_{3,2}$*

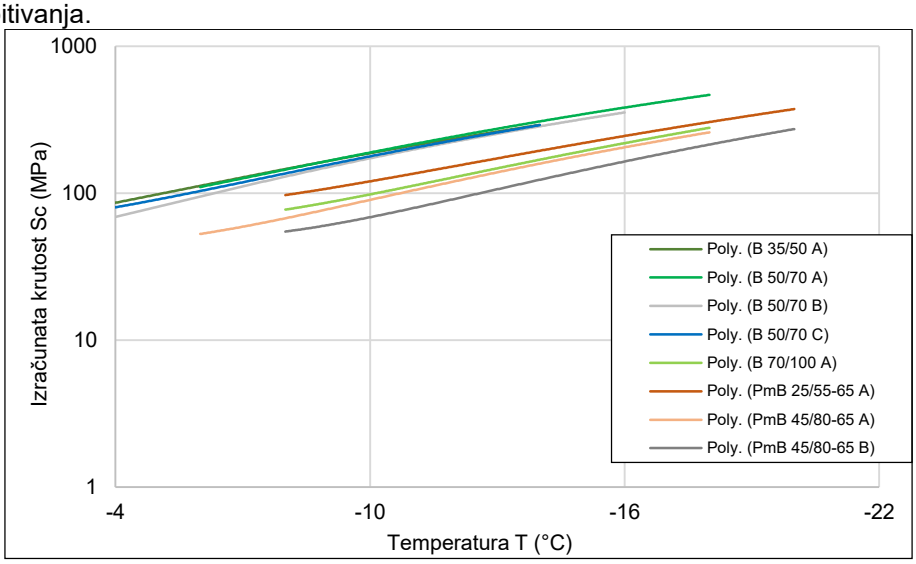
3.5. Ispitivanje bitumenskog veziva primenom Reometra za savijanje gredica BBR

Ispitivanje rometrom za savijanje gredica BBR (Bending Beam Rheometer) Slika 10, (levo), određuje se otpornost bitumenskog veziva pri niskim temperaturama. Uzorci su dimenzija 12,7 x 6,4 x 130 mm, Slika 10 (desno), a vezivo je dugotrajno ostarelo (RTFOT + PAV) metodom.



Slika 10. *Reometar BBR (levo), kalupi za pripremu uzoraka bitumenskog veziva (desno)*

Ispitivanje je obavljeno standardom SRPS EN 14771, dok su kriterijumi za ocenu bitumenskog veziva prema AASHTO M 320. Gde se za ocenu uzima vrednost temperature pri kojoj Savojna krutost Sc iznosi 300 MPa i m – vrednost 0,300. Na Slici 11. (levo), predstavljen je dijagram promene savojne krutosti u funkciji temperature ispitivanja.



Slika 11. *Savojna krutost Sc u funkciji temperature*

Kako bi se zadovoljili zahtevi evropskog standarda SRPS EN 14771, data je vrednost Izračunate savojne krutosti Sc pri temperaturi od -18 °C koja je preporučena od strane standarda. Data je vrednost faktora ΔTc koji je dat standardom SRPS EN 14771 Aneks B, i preporučen je kao relativno jednostavan parametar za merenje gubitka relaksacionih karakteristika bitumenskog veziva. Veći negativni broj ima tendenciju smanjenja otpornosti na zamor i termičko pucanje. U Tabeli 10. date su vrednosti ispitivanja Izračunate savojne krutosti Sc i m – vrednosti u 60-oj sekundi ispitivanja.

Tabela 10. *Određivanje krutosti pri savijanju – Reometar za savijanje gredica (BBR)*

Svojstvo	J.M.	Standard	Bitumensko vezivo							
			35/50 A	50/70 A	50/70 B	50/70 C	70/100 A	25/55-65 A	45/80-65 A	45/80-65 B
T (Sc=300 Mpa)	°C	ASSHTO T 313 SRPS EN 14771 Aneks A	-14,2	-13,5	-14,2	-14,3	-18,6	-17,8	-19,3	-16,8
T (m=0,300) °C	°C		-12,2	-13,9	-18,1	-12,0	-19,1	-16,5	-19,0	-16,5
Sc (T=-18 °C)	MPa	SRPS EN 14771	426,4	479,5	432,8	441,4	279,6	305,2	260,0	341,3
ΔTc	-	SRPS EN 14771 Aneks B	-2,0	0,4	3,9	-2,3	0,5	-1,3	-0,3	-0,3

4. ZAKLJUČAK – ANALIZA REZULTATA

U sklopu zaključka dati su komentari na rezultate dobijene svakim pojedinačnim ispitivanjem. Takođe data je PG analiza rezultata, gde su predmetna bitumenska veziva klasifikovana ovom metodom.

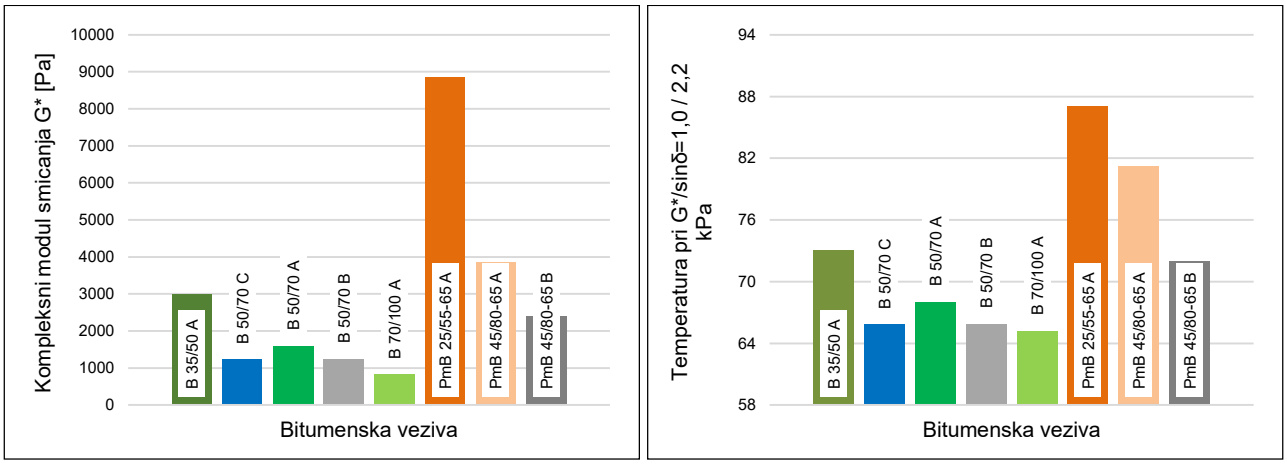
Na osnovu navedenih rezultata, zaključuje se sledeće:

- Na osnovu DSR rezultata ispitivanja, zaključuje se da putni bitumeni manje penetracije, “tvrđi“, imaju veće vrednosti kompleksnog modula G*, dok je pad faznog ugla manje izražen. Takođe, što je putni bitumen manje penetracije, tako i temperatura pri kojoj se ostvaruje vrednost faktora G*/sinδ=1,0; 2,2 kPa, veća. Kod PmB veziva isti fenomen se uočava ali uticaj polimera stvar čini manje očiglednom.
- Vrednost faznog ugla kod PmB veziva je značajno manji u odnosu na putni bitumen. Uvidom u krivu promene faznog ugla u funkciji promene temperature jasno se dolazi do zaključka da li se u bitumenskom vezivu nalazi polimer.
- Ispitivanjem otpornosti veziva na srednjim temperaturama, može se zaključiti da tvrđi bitumeni imaju manju otpornost od mekših. Takođe da PmB veziva imaju bolje vrednosti ali ne toliko očiglednu.
- Rotaciona viskoznost, pokazuje isti trend, tvrđim bitumenima je potrebna veća temperatura kako bi se dobila ista viskoznost. Veoma slične vrednosti istog tipa bitumenskog veziva a različitih proizvođača. PmB veziva imaju značajno veće vrednosti viskoznosti na istim temperaturama u poređenju sa putnim bitumenom.
- Ispitivanjem MSCR metodom, određena je primena predmetnih veziva u funkciji saobraćajnog opterećenja. Zaključuje se da veziva 50/70 A, B, C mogu koristiti na saobraćajicama sa Standardnim sobraćajnim opterećenjem (< 10 miliona SO od 80 kN), bitumenska veziva 35/50 A i 45/80-65 B na saobraćajnicama sa Veoma teškim saobraćajnim opterećenjem (≥ 30 miliona SO od 80 kN) i veziva 25/55-65 A i 45/80-65 A na saobraćajnicama sa Ekstremno teškim saobraćajnim opterećenjem (≥ 30 miliona SO od 80 kN). Dok se vezivo B 70/100 A, nije moglo kategorisati ovom metodom.
- Rezultatima ispitivanja BBR metodom, zaključuje se da tvrđi bitumeni imaju veće vrednosti Izračunate savojne krutosti Sc, kao i da je temperatura prema PG klasifikaciji manja u odnosu na mekše bitumene. Uočljiva je razlika u vrednostima kod PmB veziva u poređenju sa putnim bitumenom. PmB veziva imaju manje krutosti i manje temperature pucanja.

U Tabeli 11, date su klasifikacije bitumenskih veziva prema PG klasifikaciji. Na Slici 11. dat je pregled kompleksnih modula krutosti i PG klasifikcije svih predmetnih bitumenskih veziva.

Tabela 11. *PG klasifikacija bitumenskih veziva*

Bitumensko vezivo	PG klasifikacija	Otpornost na srednje temperature T (°C)	Dinamička viskoznost (mPa)
35/50 A	PG 70-22	28	795
50/70 A	PG 64-22	25	524
50/70 B	PG 64-22	25	493
50/70 C	PG 64-22	25	465
70/100 A	PG 58-28	22	400
25/55-65 A	PG 82-22	25	3004
45/80-65 A	PG 76-28	22	2019
45/80-65 B	PG 70-28	25	1280



Slika 11. *Kompleksni modul krutosti G* (levo); G*/sinδ (desno)*

Kao predlog za dalja ispitivanja preporučuje se nastavak istraživanja karakteristika bitumenskih veziva različitim metodama na DSR uređaju. Metode kao što BTSV (Određivanje temperature modula jednakog smicanja i faznog ugla korišćenjem reometra za dinamičko smicanje) SRPS EN 17643, Ispitivanje bitumenskog mastiksa, ispitivanje otpornosti na niske temperature upotrebom geometrije od 4 mm.

Literatura

[1] Mladenović G., Knežević I., Đukić D. i Đureković A. 2008. Primena klasifikacije bitumena prema metodologiji SUPERPAVE u Srbiji. Put i saobraćaj, LV, 2, 12-22
[2] Mladenović G., 2022. Impact of climate change on pavement structural performance. Second Macedonian road congress - Skoplje
[3] Asphalt binder PG test – Laboratory manual – Federal Highway administration
[4] Grašić A., Orešković M., Mladenović, G. 2020. Ispitivanje oporavka PmB pri tečenju usled višestrukog opterećenja i rasterećenja. Put i saobraćaj
[5] Eva R. 2016. – Study of rheological properties of bituminous binders in middle and high temperatures. Civil and Environmental Engineering 12
[6] SRPS EN 14770:2013 – Određivanje kompleksnog modula smicanja i faznog ugla — Reometar za dinamičko smicanje (DSR)
[7] AASHTO T 315:2020 – Standard Method of Test for Determining the Rheological Properties of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer (DSR)
[8] SRPS EN 16659:2017 – Bitumen i bitumenska veziva – Ispitivanje oporavka veziva pri tečenju usled višestrukog opterećenja i rasterećenja (MSCRT)
[9] AASHTO T 350:2019 – Standard Method of Test for Multiple Stress Creep Recovery (MSCR) Test of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer (DSR)
[10] SRPS EN 14771 - Određivanje krutosti pri savijanju – Reometar za savijanje gredica (BBR)
[11] AASHTO T 313 - Standard Method of Test for Determining the Flexural Creep Stiffness of Asphalt Binder Using the Bending Beam Rheometer (BBR)
[12] SRPS EN 13302:2018 – Određivanje dinamičkog viskoziteta bitumenskog veziva korišćenjem rotacionog viskozimetra
[13] AASHTO T 316 - Standard Method of Test for Viscosity Determination of Asphalt Binder Using Rotational Viscometer
[14] SRPS EN 1426 - Određivanje penetracije iglom
[15] SRPS EN 1427 - Određivanje tačke razmekšanja – Metoda sa prstenom i kuglicom
[16] AASHTO M 320:2017 – Standard Specification for Performance-Graded Asphalt Binder
[17] Laurent P., 2021 – Characterisation of complex polymer modified bitumen with rheological parameters, Road Materials and Pavement Design Volume 22
[18] Hanz, A. 2015. MSCR Implementation and Impacts on Asphalt Binder Grading. MN, USA.
[19] Eva R. 2016. – Study of rheological properties of bituminous binders in middle and high temperatures. Civil and Environmental Engineering 12
[20] The multiple stress creep recovery(MSCR) procedure, 2011, Office of Pavement Technology
[21] Bitumen handbook 2017 Krzysztof Błażejowski, Marta Wójcik-Wiśniewska ORLEN asfalt
[22] Jiqing Z., 2020. Characterization of asphalt mixtures and bitumen to minimize shear-related distresses in asphalt pavement, VTI
[23] Ayse K., 2022 – Rheological, spectroscopic and microscopic assessment of asphalt binder ageing, Road Materials and Pavement Design
[24] Claude C., 2015. Comparison of rheological parameters of asphalt binders obtained from bending beam rheometer and dynamic shear rheometer at low temperatures. Road Materials and Pavement Design 16

КАНАЛИСАЊЕ ДРЕНАЖНИХ, ПОВРШИНСКИХ И КИШНИХ ВОДА НА АУТО ПУТУ Е-75 ИЗМЕЂУ КРАЈА МОСТА МОРАВА 1 И ПОЧЕТКА МОСТА МОРАВА 2 ПОДДЕОНИЦЕ *Царичина долина - тунел“Манајле“ од км 888+600 до км 890+250*

Јован Деспотовић[1], Милоје Васиљевић[2]

[1] ИРТКУД – УНЕСКО Центар - Грађевински факултет Универзитета у Београду (IRTCUD UNESCO), jdespotovic@grf.bg.ac.rs
[2] Предузеће Road Design, Београд, Гвозићева 6, milojetrasa@gmail.com

Резиме**:** *На комплетној деоници има 39 пропуста, хидротехничко уређење Селишког потока као и 6 мостова (Морава 1, Морава 2, Момин камен, Кучајска долина, Соколица и Козничка река). Велике природне и врло стрме површине поред ауто пута, раније обрасле вегетацијом, сада су покривене торкретом – прсканим бетоном, (за воду апсолутно непропусним), са анкерима до здравог тла у залеђу. Те површине ових засека падају врло стрмо ка Јужној Морави, и у попречном пресеку долине она је практично половина кањона реке. Изградњом ауто пута је извршена драстична промена по питању сливања воде са врло стрмих површина, и то површинских, подземних-провирних које се повремено изливају, као и кишног отицаја, управо испод ауто пута у долину Јужне Мораве. У овом раду за приказивање је изабран потез између краја моста Морава 1 и почетка моста Морава 2, због карактеристичних задатака и решења за одвођење дренажних, површинских и кишних вода***.**

Кључне речи: *Ауто пут Е-75, стрме површине засека, каналисање свих вода: површинске, подземне, кишне.*

DRAINAGE OF SUBSURFACE, SURFACE AND RAINFALL RUNOFF ON THE STRECH BETWEEN THE END OF THE MORAVA 1 BRIDGE AND BEGGINING OF THE MORAVA 2 BRIDGE AT THE SUBDIVISION CARICA VALLEY - TUNNEL MANAJLE, from km 888+600 to km 890+250

Jovan Despotovic[1], Miloje Vasiljevic[2]

[1] IRTCUD UNESCO Center, Faculty of Civil Engineering - University of Belgrade, jdespotovic@grf.bg.ac.rs
[2] Road Design, Ltd. Co., Gvoziceva str. 6, milojetrasa@gmail.com

Abstract: *At this section of the Motorway E-75 there are 39 culverts, hydraulic training of the Seliski brook and 6 bridges (Morava 1, Morava 2, Momin rock, Kucaj velley, Sokol and Koznik brooks***).** *Large natural and very steep areas next to the motorway, previously overgrown with vegetation, are now covered with absolutely impermeable sprayed concrete with anchors to the rock soil in the hinterland. The surfaces of these cuts fall very steeply towards the South Morava river, and in the cross-section of the valley these appears as practically half of the river canyon. With the construction of the motorway, a significant change was made accounting the water draining from those steep surfaces, namely surface, subterranean-seepage that occasionally overflows, and rainfall runoff below the motorway into the South Morava valley. In this paper is presented stretch between the end of the bridge Morava 1 till the beginning of the bridge Morava 2, accounting for the typical demands and solutions for dewatering of subsurface water, and surface and rainfall runoff.*

Keywords*: Motorway E-75, areas upstream motorway, steep slopes, ground water, surface and rainfall runoff, drainage.*

1. УВОД

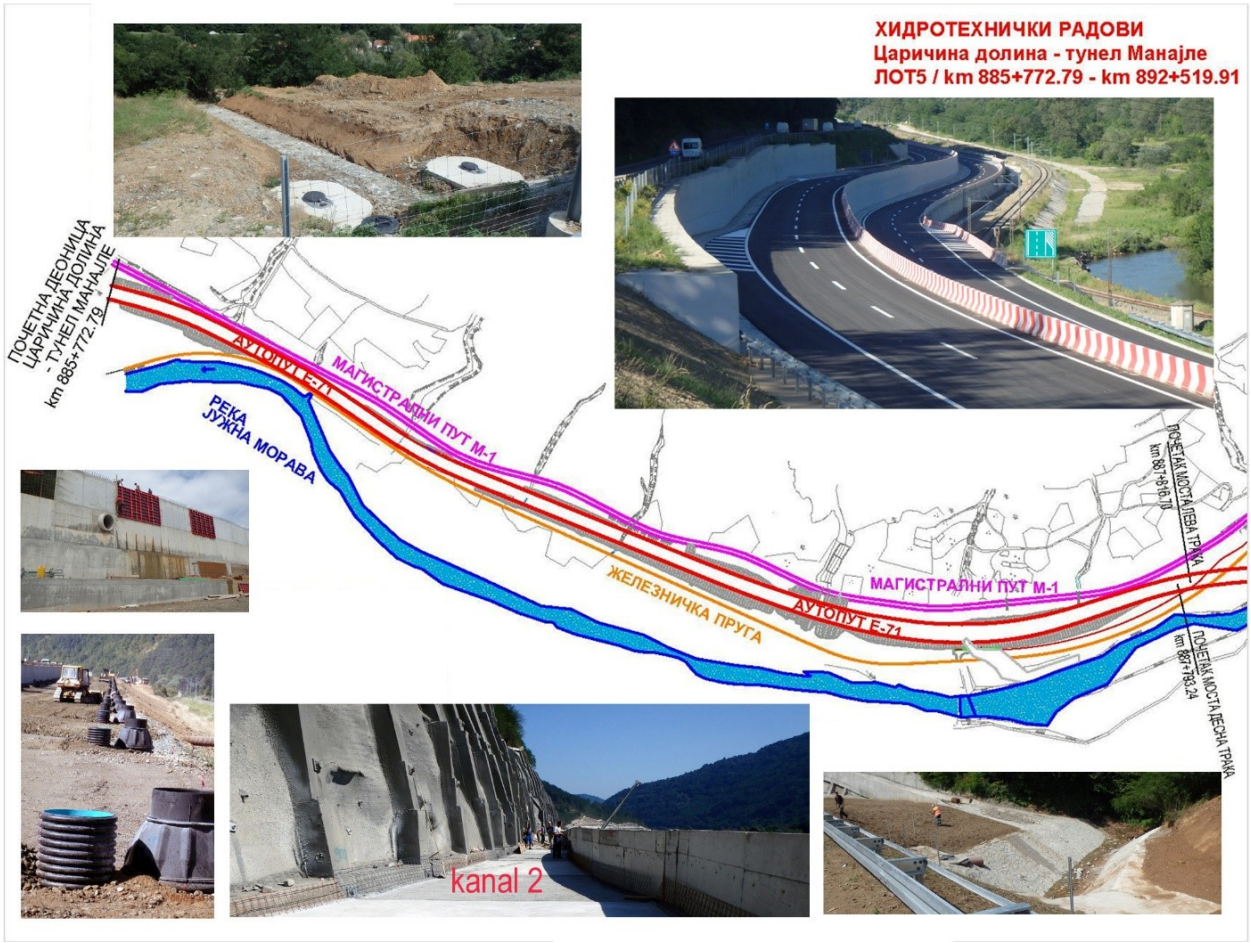
Сложени инфраструктурни подухвати, било да је реч о путној, железничкој, хидротехничкој, енергетској или другој, захтевају дугогодишње стратегијско планирање, израду просторних планова и свих пројеката, од идејних решења до пројеката за извођење, а по изградњи и пројеката изведеног објекта или система. Јасно, уз правовремене комплетне истражне радове и подлоге, као што су: катастарски, метеоролошки, геолошки и геомеханички, хидролошки, сеизмолошки, саобраћајни, географски, флоре

и фауне и други, као и детаљне анализе и интерпретације за потребе израде пројектне документације и анализе утицаја инфраструктуре на животну средину.

Путна инфраструктура је била у дугогодишњем кашњењу – заостатку у Србији из познатих разлога, који нису предмет овог рада. Последњих 20-ак година покренути су бројни пројекти путних европских коридора у Србији, што се може представити десетинама км нових ауто путева годишње, односно стотинама км путева за последњих десетак година. Најмаркантнији су грађени у последње време путеви, познати као коридори ка суседним државама: Северној Македонији, Црној Гори и Бугарској, као и изградња друге траке ауто пута ка Мађарској, укупно готово 1000 км; видети Монографију „20 година Инжењерске коморе Србије: 2003-2023“ [1].

Аутори овог рада су, поред ангажовања на другим деоницама, били ангажовани на изради пројектне документације (ПГД, ПЗИ), за изградњу хидротехничких елемената, објеката и система на аутопуту Е-75 Београд - Ниш – до границе са Северном Македонијом, на деоници Царичина долина - Владичин Хан, укупне дужине од km 885+772.79 до km 900+100.81, тј. поддеонице 1: Царичина долина-тунел “Манајле“ [2]. Раније су објављени радови који се тичу и приказују многе друге делове овог великог пројекта, па ће се у још неколико радова описати и преостали већи задаци које су пројектанти а потом и извођачи морали да реше [3]. У раду се даје пример система заштите од површинских и подземних вода, у оквиру поддеонице 1.

На слици 1. је део ауто пута на коме су инфраструктурни системи, али и конфликти: велика река Јужна Морава, бројне притоке, као што су Кучајска река, Сушица и друге, железничка пруга Београд – Солун, магистрални пут М1 и траса ауто пута Е-71. На посебним фотографијама, које су направљене током изградње и након комплетирања ове деонице, виде се поједине хидротехничке инсталације, као што су отвори за дренирање у зидовима - барбакане, канали, систем затворене канализације, све до испуста у Јужну Мораву.

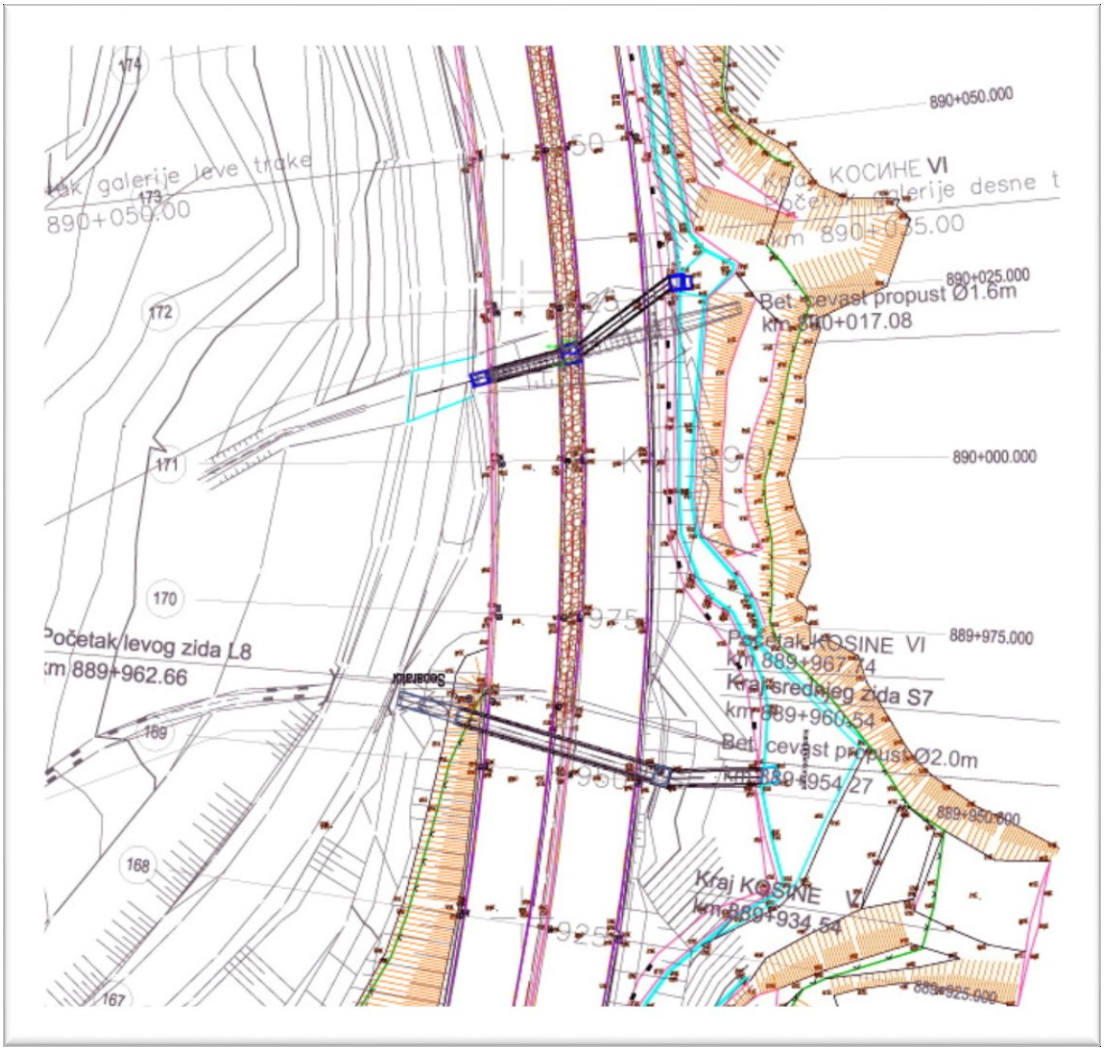


Слика 1. *Почетна деоница од Царичине долине Јужне Мораве до тунела Манајле од км 885+772.79 до км 892+892.91 Ауто пута Е – 75 од Ниша до границе са Северном Македонијом, са наглашеним Каналом 2*

2. ТЕХНИЧКО РЕШЕЊЕ СИСТЕМА ЗА ЕВАКУАЦИЈУ ВОДА НА ПРЕДМЕТНОЈ ДЕОНИЦИ

Пројектовани систем за одводњавање је предвиђен за контролисано одвођење воде које са прикупљају са стрмих слободних природних падина узводно од бетонираних косина изнад ауто пута, подземних-провирних вода и кишних вода до испуста у Јужну Мораву. Каналишу се подземне воде из залеђа покривених падина које су обрађене бетоном и утврђене анкерима, и припадајуће кишне воде које се сливају низ бетониране падине јер киша никада не пада строго вертикално, већ под неким углом што доприноси укупном отицају са подслива који се каналише (Деспотовић, 2008). Такве воде нису за пречишћавање и не прихватају се за испуштање у сепараторе и таложнике кишне канализације на ауто путу. Тај укупни протицај не утиче значајно на воду коју треба каналисати и одвести даље, па се не позивамо на познате хидролошке и хидрауличке прорачуне, већ се објекти за контролисано прихватање тих вода пројектују и изводе као хидротехнички елементи и објекти, као нпр. отвори у зидовима за дренирање воде иза зидова, проходни канали за приступ дреновима или прикључним каналима и сл.

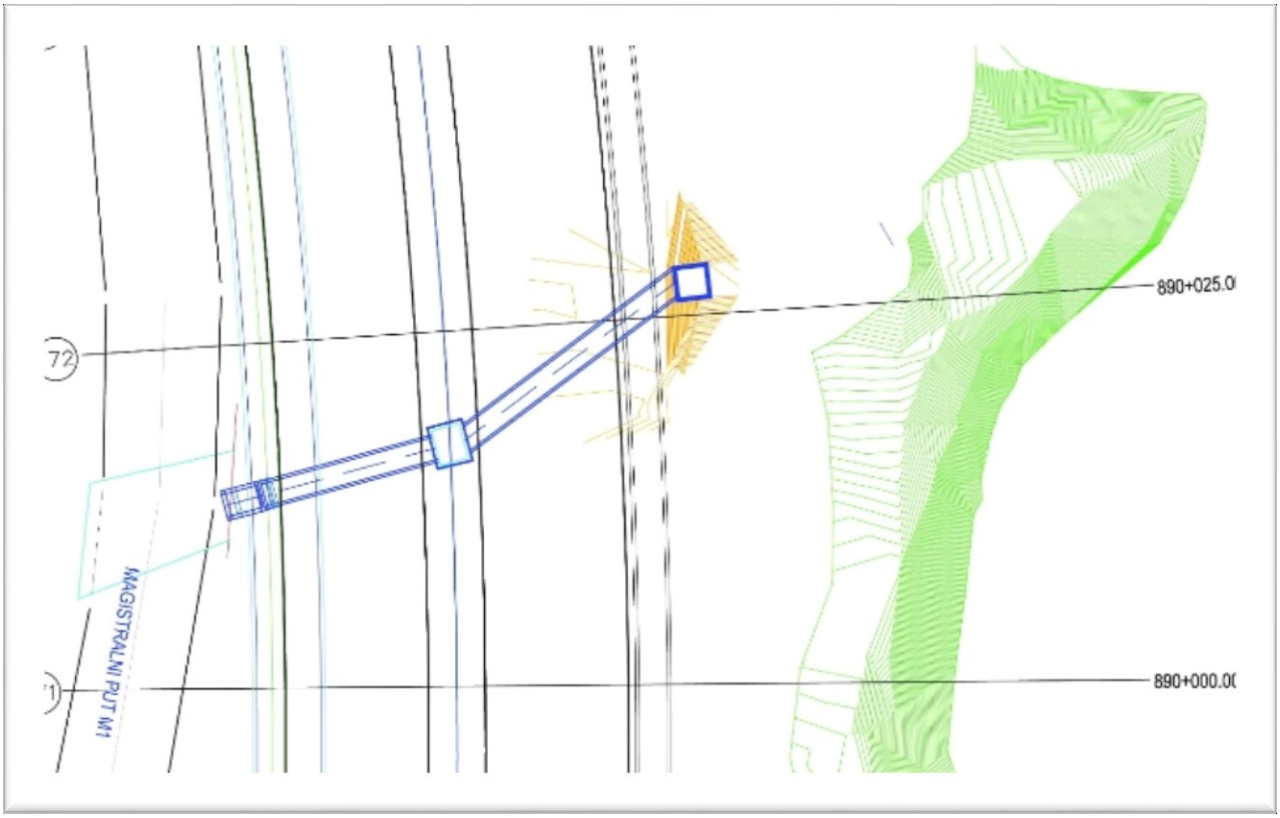
На Слици 2. је дата ситуација положаја бетонских пропуста на km 890+017.08 (Мртвица 1) и на km 889+954.27, где је спој Мртвице 1 и Мртвице 2.



Слика 2. *На ситуацији су приказани бетонски пропусти на* km 890+017.08 и на km 889+954.27

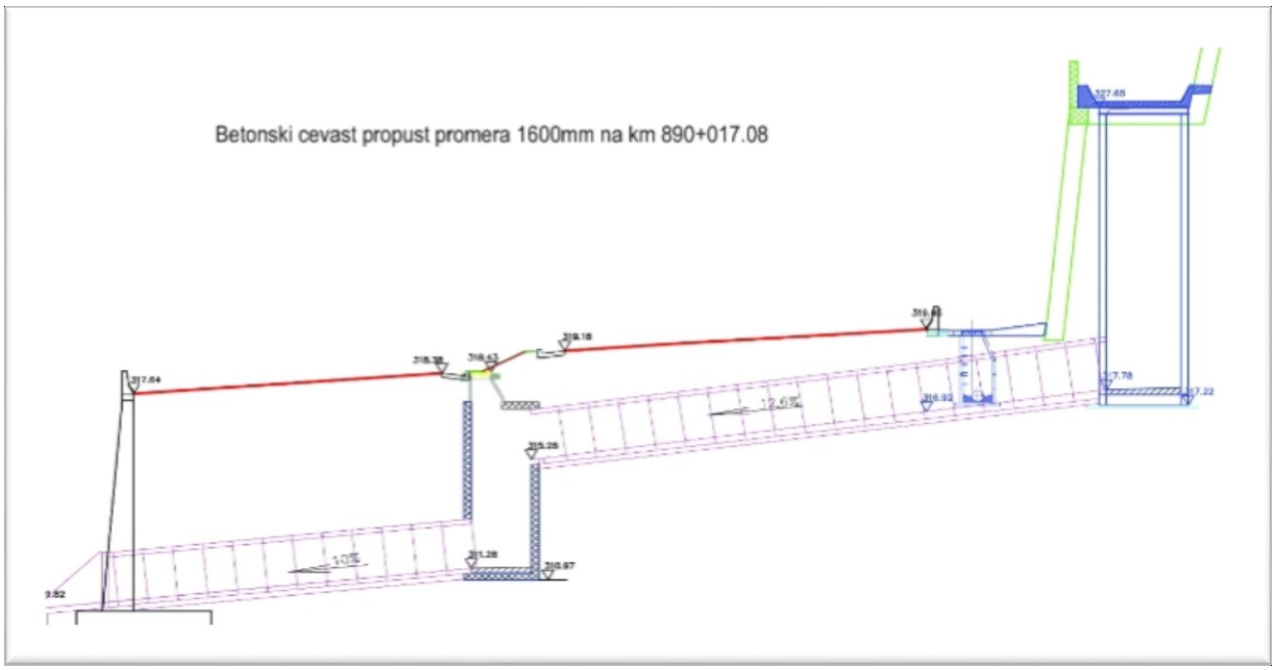
Пример који ће бити детаљније описан је приказан на сликама од 2. до 7.

На слици 3 је дат низводни део система за одводњавање са пропустима кроз обе траке ауто пута, као и изохипсе врло стрмих површина у засеку пута, о чему следе коментари.



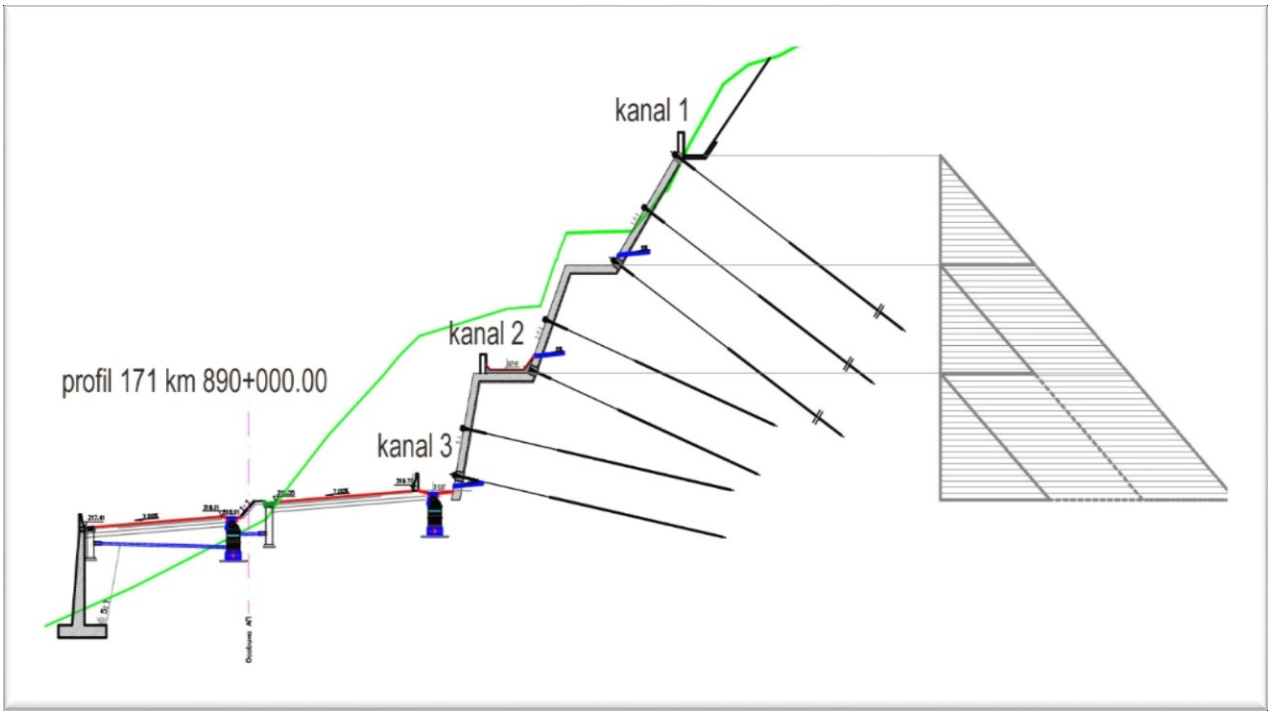
Слика 3. *Ситуациони план пропуста и врло стрмих зелених терена у залеђу ове деонице ауто пута*

На следећој Слици 4. је подужни пресек кроз цевасти пропусти Ф1600 на км 890+017.08, као најнизводнијој деоници система за одводњавање у датом профилу.



Слика 4. *Попречни пресек кроз цевасте пропуста Ф 1600 од узводног сабирног ревизионог окна до испуста у Јужну Мораву испод обе траке ауто пута*

На слици 5 је пресек кроз терен (зелено), бетонску заштиту падина, цевасти пропуст Ф 1600, канале 1, 2 и 3, анкери, као и дијаграми хидростатичког притиска на бетонску конструкцију, у зависности од функционисања отвора у конструкцији - барбакана, у каналима 1, 2 и 3, у профилу 171



Слика 5. *Попречни пресек терена, обе траке ауто пута, ревизионо окно цевне канализације и дијаграми хидростатичког притиска у залеђу ради објашњења чему служи дренирање и барбакане*

Слика 6. *Изграђене торкретиране стрме косине изнад Канала 2 (видети слику 5) који обезбеђује приступ узводним косинама ради одржавања система барбакана, као и каналу 1.*

Колико год да нас пракса и искуство из претходних пројеката и грађевина уверавају да „вода увек нађе пут“, те да је боље да од почетка израде пројектне документације имамо ту на уму, да пројектујемо отворе, пролазе, канале, сливнике, окна и сл, опет се изненадимо када видимо призор као на следећој слици 7: срећом вода је нашла добар припремљени пут- барбакане у каналу 2:

Слика 7. *Пример замрзавања воде која се излива из узводних отвора – барбакана, на местима провирања - дренирања км 890+176.00 (код Мртвице 2), где је и било пројектовано дренирање воде из залеђа у каналу 2.*

На Слици 7 се види да је улога барбакана испуњена, јер вода излази из залеђа и прелива преко конструкције, а да нема отвора вода би формирала неповољно хидростатичко оптерећење: Слика 5.

3. ЗАКЉУЧАК

Морамо се подсетити уобичајених процедура за пројектовање ауто путева, укључујући све хидротехничке објекте и системе за заштиту деонице од свих вода за коју тај систем „одговара“, чак и када нису сви кораци и утицаји воде предвиђени захтевима и мишљењима надлежних институција.

Пре свега, увек се мора обезбедити континуитет отицања свих вода, укључујући површинске, подповршинске, процедне, кишне, као и из залеђа објеката и конструкција, од узводне границе - почетка сливне површине, до низводног краја слива, што је у овом примеру река Јужна Морава, са својим хидролошким и хидрауличким карактеристикама. Овде није било дискусије и анализе меродавних протицаја и водостаја Јужне Мораве, јер на овом потезу, ни у овом профилу, река не утиче на приказано течење у целом систему заштите од вода. Међутим, морамо да подсетимо да је током изградње ауто пута Е-75, било неколико ситуација, током неколико година, када су водостаји били врло високи, па је, у начелу, увек неопходно и тај део анализе извршити пре или најкасније током пројектовања ауто пута и свих инфраструктурних објеката. У овом примеру је врло битно било анализирати и међупросторе дуж магистралног пута М1, обе траке ауто пута, локалног пута и железничке пруге, али и терена поред ових система и Јужне Мораве. Јер ако се заустави слободно кретање воде – отицање у условима свих изграђених система и објеката, вода налази друге, често неочекиване, путеве, или се скупља – акумулише у површинским ретензијама или барама, и тако повећава притисак и силу на изграђене делове објеката или системе на које нисмо рачунали, нити узели у прорачуне; подсећања ради, видети поново упрошћену схему хидростатичког оптерећења на комплексну конструкцију на слици 5.

Само свеоухватном анализом и димензионисањем могу се контролисано одводити све очекиване и каналисане воде до реципијента, а у овом примеру до Јужне Мораве на ауто путу Е-75.

4. ЛИТЕРАТУРА

[1] Монографија „20 година Инжењерске коморе Србије: 2003 – 2023“, Гл. Ур. Марица Мијајловић, Инжењерска Комора Србије, Београд, ISBN 978-86-86115-17-1.

[2] Главни пројекат аутопута Е-75 Београд - Ниш – граница са БЈРМ, *Царичина долина - Владичин Хан од km 885+772.79 до km 900+100.81 , поддеоница1: Царичина долина-тунел“Манајле“ од км 885+772.79 до км 892+519.91* , извршена је анализа хидротехничких утицаја у циљу ефикасног евакуисања вода са саобраћајнице.

[3] J. Деспотовић, М. Васиљевић (2023) Захватање и каналисање бујичних водотокова у засецима Ауто пута Е – 75 Београд – Ниш – Бугарска граница: Пример Селишког потока, 3. Регионални стручни семинар „Нискоградња и саобраћај 2023“, Београд.

[4] J. Деспотовић (2008) *Каналисање кишних вода*, Грађевински факултет Универзитета у Београду, ISBN 978-86-7518-075-3

МОДЕЛ ИЗРАДЕ ПОДЛОГА ЗА ПЛАНИРАЊЕ И ПРОЈЕКТОВАЊЕ ПУТЕВА ДАЉИНСКОМ ДЕТЕКЦИЈОМ

мр Драган Мићановић[1]
[1] Саобраћајни факултет, Добој, РС-БиХ, micanovic.dragan@gmail.com

Резиме: *Даљинском детекцијом се обједињавају савремена техничка достигнућа и знања геодезије, фотограметрије, картографије, географско-информационих система (ГИС) те других научних дисциплина. Са циљем добијања одговарајуће подлоге за планирање и пројектовање поштујући принципе брзине, свеобухватности територије, одговарајуће геометријске и просторне тачности, економичности, периодичности.*
У раду је дат модел израде подлоге за планирање и пројектовање примјеном даљинске детекције.

Кључне речи: *Даљинска детекција, подлоге, путеви, планирање и пројектовање.*

MODEL OF CREATION OF THE SUBSTRATE FOR ROAD PLANNING AND DESIGN BY REMOTE SENSING

mr Dragan Mićanović[1]
[1]Faculty of Transport and Traffic engineering, Doboj, RS-BiH, micanovic.dragan@gmail.com

Abstract: *Remote sensing combines modern technical achievements and knowledge of geodesy, photogrammetry, cartography, geographic information systems (GIS) and other scientific disciplines. With the aim of obtaining an appropriate basis for planning and designing, respecting the principles of speed, comprehensiveness of the territory, appropriate geometric and spatial accuracy, economy, periodicity.*
The paper presents a model for creating a basis for planning and designing using remote sensing.

Keywords: *Remote sensing, surfaces, roads, planning and design.*

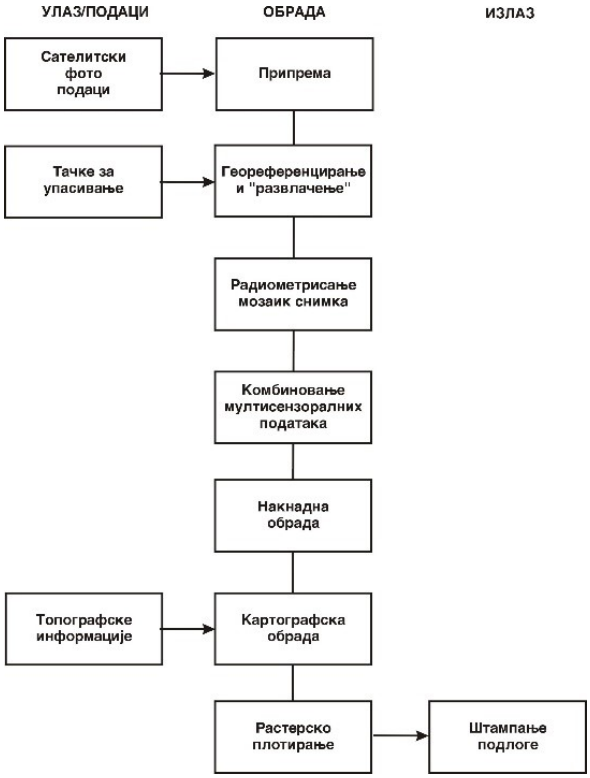
1. УВОД

Различите методе, поступци и технике омогућавају да се информације о простору и појаве у њему прикупе, обраде и визуелно представе циљаном кругу корисника. Тиме настаје својеврсни информациони канал којег треба да карактерише актуелност, вјеродостојност, аутентичност, економски оправдан, брз и квалитетан процес израде крајњег производа (плана, карте, ортофотоа и др.) Ако би смо поставили питање, да ли је старије мапирање-картографисање (просторно евидентирање појава) или планирање у простору, тешко би дали прецизан одговор на такво питање, јер дубоко сам убијеђен да је то један јединствен циклични процес, дијалектички повезан. Уједно, и неодвојив процес друштвеног развоја и као такав важан докуменат (мисли се на карте, планове, подлоге за планирање и пројектовање) тренутног самопотврђивања и одређивања праваца будућег развоја друштва. У члану 78. Закона о путевима Републике Србије каже се:“ Јавни путеви се планирају, пројектују и граде тако да се планска и техничка решења ускладе са најновијим знањем технике пројектовања и изградње јавних путева, са захтевима безбедности саобраћаја, демографским и привредним потребама, економским начелима и мерилима за оцену оправданости њихове изградње, прописима о заштити животне средине и прописима којима се уређује пољопривредно земљиште.“ Напредак технике и технологије као и све већа доступност сателитских снимака високе резолуције даје већи значај даљинској детекцији за рјешавање низа задатака из различитих области људског дјеловања. Примјена различитих комерцијално доступних сензора (сателита) и инерпретација радарских, термалних и сателитских снимака различите резолуције омогућава планирање и пројектовање путева.
Циљ рада је истаћи примјере коришћења у области планирања и пројектовања са циљем добијања подлоге за пројектовање путева, тематских и других карта односно очигледних докумената за доношење одлука.

[1] мр Драган Мићановић: micanovic.dragan@gmail.com

2. ДАЉИНСКА ДЕТЕКЦИЈА

Даљинска детекција је метода прикупљања и представљања информација о удаљеним објектима без физичког контаката са објектом снимања. Прикупљање информација се врши сензором, помоћу авиона, сателита или свемирских сонди. Сензор региструје електромагнетни енергетски спектар за откривање и мјерење објекта снимања. Резултат су радарски, термални, фотограметријски и сателитски снимци.
Сирови дигитални снимци се даље софтверски обрађују и картографски представљају те претварају у жељену форму и производ. Информације које садрже поменути снимци могу се користити на више начина и тиме се могу постићи различити циљеви. Почев од једноставне констатације стања ствари и објеката па до интерпретацији аерофото и сателитских снимака са комплексном анализом геопростора, урбаних површина, као и примјену у навигацији, пољопривреди, геодезији, геологији, метерологији, климатологији, океанологоји и телекомуникацијама. Области примјене често су противрјечне, али их је и често тешко разграничити. Интерпретација и фотограметријска обрада аерофото снимка већ је неколико деценија најчешће коришћени поступак-метод топографског снимања простора. Упркос великој усавршености тих метода, не могу бити задовољене широке потребе за топографским тематским или неким другим врстама подлога на традиционалан начин. Због тога се више него икад тежи ка коришћењу сателитских снимака за картографске или неке друге циљеве. Код примјене аерофото и сателитских снимака постоје циљне поставке: њихова израда, коришћење и даља дорада топографских, ортофото и тематских подлога односно карата.



Слика 1. *Алгоритам обраде сателитских фото података*
Извор: (аутор)

Даљинска детекција обухвата снимање, обрада снимка, њихову анализу са стањем у одређеном временском тренутку. Даљинску детекцију карактерише брзо, економично прикупљање и добијање информација, са велике удаљености, о великим земљишним комплексима ради периодичног праћења стања и промјена. А поступак анализе снимака може бити визуелни (логички) и инструментални (формални).Сателитска картографија је у ранијим фазама због техничких ограничења користила сателитске снимке ниске резолуције (до 80 метара) само за израду ситно размјерних карата, али касније када се резолуција побољшала: 1-4 метра, даљинском детекцином се могу израђивати топографске карте и друге подлоге. Нарочито је погодна за ажурирање карата. Код просторног планирања обрађени сателитски снимци користе се за урбано планирање, планирање инфра структуре, заштите животне средине, мониторинг. Па тако је и атмосфера предмет сателитског

снимања, из којег се добијају подаци о хемијском саставу и физичким особинама важним за екологију (мјерење озона, сагорјевање плина) и метеорологију. Добијени подаци у дигиталној форми омогућавају идеалну платформу за израду ГИС-а, односно за повезивање са расположивим статистичким и другим подацима.

3. ПОДЛОГЕ ЗА ПЛАНИРАЊЕ И ПРОЈЕКТОВАЊЕ ПУТЕВА

Методологија пројектовања путева је фазни и хијерариjски процес који треба да буде усклађен са планирањем простора и састоји се од неколико корака: студије мреже, генералног пројеката, идејног пројеката, главног (извођачког) пројекат и архивског пројеката. За сваку наведену фазу користе се одговарајуће подлоге за планирање и пројектовање одговарајуће размјере (табела 1.).

Табела 1. *Однос размјера подлоге и корака у пројектовању односно просторних планова*

Размјера подлоге (карте, плана)	Кораци у пројектовању	Врста простпрног плана
1: 300 000	Студија мреже	Просторни план државе
1: 200 000		
1: 100 000		
1: 50 000		
1: 25 000	Генерални пројекат	Регионални просторни план Просторни план инфраструктуре
1: 10 000		
1: 5 000	Идејни пројекат	Регулациони план
1: 2 500		
1: 1 000	Главни пројекат	Урбанистички пројекат
1: 500		

Извор: (Анђус, В., Малетин, М.)

Како служе за различите планерске и пројектантске задатаке подлоге морају да задовоље одређену тачност. Треба напоменути да су подлоге које најчешће користимо рађене у различитим временским епохама и различитим метода, раније у аналогном а данас и у дигиталном облику. Тешко је дефинисати тачност подлога за комплетан размјерни низ. Геодезија је тај проблем дефинисала као претходна оцјена тачности, која се конкретно састоји од суме грешека у процесу израде подлоге. Поред ње о употребљивости говори и оцјена положајне тачности (хоризонтална и висинска), она се може одредити за сваки лист подлоге, преко средње квадратне грешке израчунате за одређен скуп парова координата на терену и на конкретној подлози.
У пракси је устаљено да се графичка тачност представљања просторно дефинисаних елемената листа карте односно плана дефинише станадардом:

$$m = m_x = m_y = 0{,}2 \text{ мм} \times M,$$ при чему је М именилац размјере.

У неким изворима (*Божић, Б., Радојчић, С.*) се наводи да је претходна оцјена тачности ДТК 50 износи 0,35 мм. Мада се она због старости планова и карата објективно креће у границама од 0,3 до 0,4 мм x М, односно када упоредимо дужине између истих тачака на терену и плану разлика би требала мања од вриједности добијене по (0,3 до 0,4) $\sqrt{2}$ мм x М (*Бајат, Б., Ашанин, С*). Из тога слиједи да је претходна тачност представљеног картографског садржаја за наведени размјерни низ износи:

Табела 2. *Претходна и положајна тачност садржаја плана односно карте*

Размјера подлоге (карте, плана)	Дуж		Претходна оцјена тачности 0,35 мм x М	Положајна тачност $0{,}3\sqrt{2}$ мм x М
	измјерена на карти/плану	и њена вриједност у природи		
1: 300 000	1 мм	300 м	105 м	127,3 м
1: 200 000		200 м	70 м	84,8 м
1: 100 000		100 м	35 м	42,4 м
1: 50 000		50 м	17,5 м	21,2 м
1: 25 000		25 м	8,75 м	10,6 м
1: 10 000		10 м	3,5 м	4,24 м
1: 5 000		5 м	1,75 м	2,12 м
1: 2 500		2,5 м	87,5 цм	1,06 м
1: 1 000		1 м	35 цм	42,4 цм
1: 500		0,5 м	17,5 цм	21,2 цм

Извор: (аутор)

Као почетак планирања одређеног пута поред осталих информација неопходна је анализа тренутне намјене површина будућег пута затим простор око пута (путни појас) али и других садржаја и објеката који се налазе у непосредној близини путног појаса. Дефинисањем путног појаса добијамо и граничне тачке појаса експропријације.
На основу прикупљених података о простору, потребама становништва, економским активностима, постојећег саобраћајног система израђују се синтезне карте ради разматрања варијанти и доношења коначне одлуке. Затим се врше припреме за поступак експропријације земљишта ради припремних радовима на траси. Ови и сви други радови до потпуне употребе планираног, пројективаног и изграђеног пута треба да буду у складу са одређеним стандардима (дозвољеним грађевинским толеранцијама). Уколико они прописни, дозвољена одступања се дефинишу пројектним задатком.
„Грађевинске толеранције, које служе као основа за прорачунавање тачности геодетских мерења (а самим тим и дозвољених стандардних одступања тих мерења), код узградње саобраћајница, дефинише се као максимална дозвољена одступања реализованих величина од пројектованих, и то:

- дужина између две суседне карктеристичне тачке на путу, које се налазе на растојању до 25 м, не сме одступати од пројектоване више од 30 мм;
- разлика висина између две суседне карактеристичне тачке на путу, које се налазе на растојању до 25 м, не сме одступити од пројектоване више од 15 мм;
- коте нивелете од пројектованих кота не смеју да одступају више од -5 мм до +5 мм.“ (*Бајат, Б., Ашанин, С*)

Табела 3. *Толеранције за слојеве ауто-пута*

Слој ауто-пута	Толеранција
Постељица	30 мм
Механички стабилизован носиви слој-МНС	15 мм
Цементом стабилизован носиви слој-ЦНС	15 мм
Битуменизирани носиви слој	10 мм
Хабајући слој асфалта	5 мм

Извор: (Коридор V-c, Пројектни задатак, Геодетски радови)

Неке од толеранција за слојеве ауто-пута дате су табели 3.
Као крајњи резултат градње је дионица пута која се може ставити у употребу, уз обављен технички преглед, уз урађен снимак изведеног стања у дигиталном облику који служи за уплањење пута. Уједно као и основа у за даља планирање и пројектовање простора. Овим поступком се завршавају сви планирани грађевински и геодетски радови, евидентирају све настале промјене, врши завршна контрола свих изведених радова, испуњење законских услова са циљем што безбједнијих услова вожње на одређеном путу.

2.1. Подлога за главни пројекат пута (план размера 1:1 000)

Проблем свих подлога је ажурност односно њихова неажурност из разно разних разлога. Под тим се сматра усаглашеност садржаја планова и карата са тренутним стањем на терену. Ово су послови из области одржавања премјера и катастра који зависи и од планираних и обезбјеђених финасијских средстава као и наслијеђеног стања и односа физичких и правних лица према овим пословима. Као подлоге најпогоднији су катастарско-топографски планови који поред уобичајених података садрже изохипсе и гушћу мрежу висинских тачака. Неопходни су планови подземних водова и објеката. У новије вријеме са развојем дигиталне фотограметрије као подлоге користе се ортофото карте и планови. Дигитални ортофото (ДОФ) је дигитална георефернцирана слика жељеног дијела Земљине површи добијена поступком орторектификације дигиталног аерофотограметријског или сателитског снимка односно снимка добијеног другим методама даљинске детекције. Најважнија карактеристика ДОФ-а је поступак орторектфикације и превођење дигиталног садржаја из перспективне у ортогоналну пројекцију. Детаљност и тачност ДОФ-а постиже се избором његове резолуције (величином пиксела на терену).

Табела 4. *Службена размјера 1:1 000 и производи*

Назив призвода	Размјера	Ознака размјере	Ознака производа
Катастарски план	1:1 000	1k	КП1
Топографски план	1:1 000	1k	ТП1
План водова	1:1 000	1k	ПВ1
Дигитални ортофото	1:1 000	1k	ДОФ1

Извор: (Правилник о подели на листове карата и планова у државној пројекцији)

Наведени производи размера 1:1 000, катастарски планови, топографски планови, планови водова и дигитални ортофото, представљају службену евиденцију и користе се у пројектовању путева а њихов садржај се ажурира пројектом изведеног стања новоизграђених објеката тиме обезбјеђујемо ажурност подлоге.
Пут представља јединствену цјелину и простире дуж неколико катастарских општина из разлога избјегавања грешака геодетске мреже, приступа се изради јединствене геодетске мреже (оперативног полигона) односно програмом геодетских радова се обухва:

- пројекат геодетске мреже (ГМА),
- пројекат регистровања просторне структуре (РПС) и израда геодетске подлоге за пројектовање (ГПП) и
- пројекат експропријације (ЕКСПРО).

Тачке геодетска мрежа ради квалитетних радова нпр. на ауто-путу треба да буду стабилизоване на међусобном растојању око 300 м, да се догледају, њихова геометрија да обезбједи наношење осовине пута, снимање детаља и праћење изградње објекта. Тачност геодетске мреже треба бити 8 мм у хоризонталној равни (Y,X координата) и 2 мм у вертикалној равни (H). Осовина трасе се обиљежава на растојању 25 м, а снимање детаља односно терена по профилима. Положајна тачност снимљених детаљних тачака треба да буде 5 цм и боља, а на дионици полуаутопутског профила треба да буде 20 мм (Y,X) и 5 мм (H).
За дигитални ортофото размјера 1:1 000 добијен аерофотограметријском методом резолуција снимања требала би бити 7-8 цм а након обраде и израде ДМТ величина пиксела (најмањи дискретни елеменат дигиталне слике за који се води дигитална карактеристика) на терену би требала бити 10x10 цм.
На избор сензора за прикупљање сателитских снимака за израду картографско-топографских производа утичу карактеристике сензора и снимака:

- просторна резолуција (резолуција снимка),
- спектрална резолуција,
- радиметријска резолуција,
- временска резолуција и
- положајна тачност снимка.

Просторна резолуција представља димензије пиксела сателитског снимка на терену. Радиометријска резолуција (дубина слике) дефинише се могућношћу сензора да детектује различите нивое свјетлости (нпр. на снимку од 8 бита вриједност снимљене енергије може бити у интервалу 0 до 255).

Табела 5. *Вриједност просторне резолуције сателитског снимка*

Службена размјера производа	Просторна резолуција (м)
1:5 000	0,5
1:10 000	1
1:25 000	2,5
1:50 000	5
1:100 000	10
1:250 000	25

Извор: (Правилник о топографском премеру и топографско- картографским производима)

Спектрална резолуција се дефинише фреквентним распоном електомагнетне енергије коју региструје сензор, односно близином интервала и бројем спектралних канала. На основу тога снимци могу бити панхроматски, мултиспектрални и хиперспектрални.
Положајна тачност представља тачност позиционирања снимка у просторно референтном систему. То се постиже дефинисањем модела за одређивање параметара оријентације између сликовних координата и просторног референтног система. Модели који се користе су: модел рационалних функција (RFM), коефицијенти рационалних полинома (RPC) и модел геометрије снимка (IGM). Положајну тачност можемо побољшати поступком апсолутене оријентације коришћењем оријентационих тачака. По потреби и коришћењем стереопара сателитских снимака.

4. МОДЕЛ

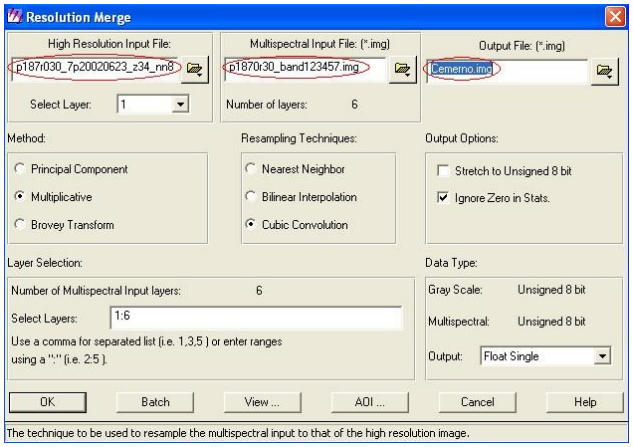
На конкретном примјеру, превоју и клизишту Чемерно у јужном дијелу Републике Српске, описан је начин обраде сателитског снимка *Ландсат-7* резолуције 30 метара, *Leica*-ном технологијом и софтверима.
Кроз овај примјер биће описани следећи поступци:

- побољшање резолуције улазног снимка,

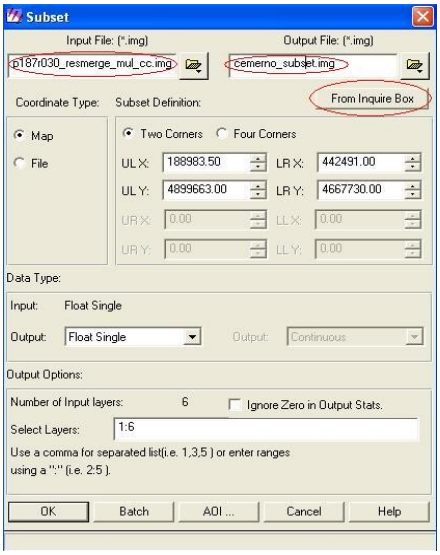
- исјецање жељеног дијела снимка,
- репројекција,
- георефернцирање,
- прављење ДМТ-а,
- *Supervised* класификација,
- дигитализација објекта и
- *Expert* класификација

4.1. Побољшање резолуције улазног снимка (*Resolution Merge*) и исјецање жељеног дијела снимка

Улазни Ландсат мултиспректални снимак резолуције 30 метара побољшаћемо са панхроматским снимаком резолуције 15 метара (8 канала). Ово погодује екстракцији мањих односно уских површина нпр. ријека и путева (путних појасева). Опција за пољшање резолуције налази се у: *Image Interpreter* | *Spatial Enhancement* | *Resolution Merge* (слика 2а.)



Слика 2а. *Спајање снимака*
Извор: (аутор)

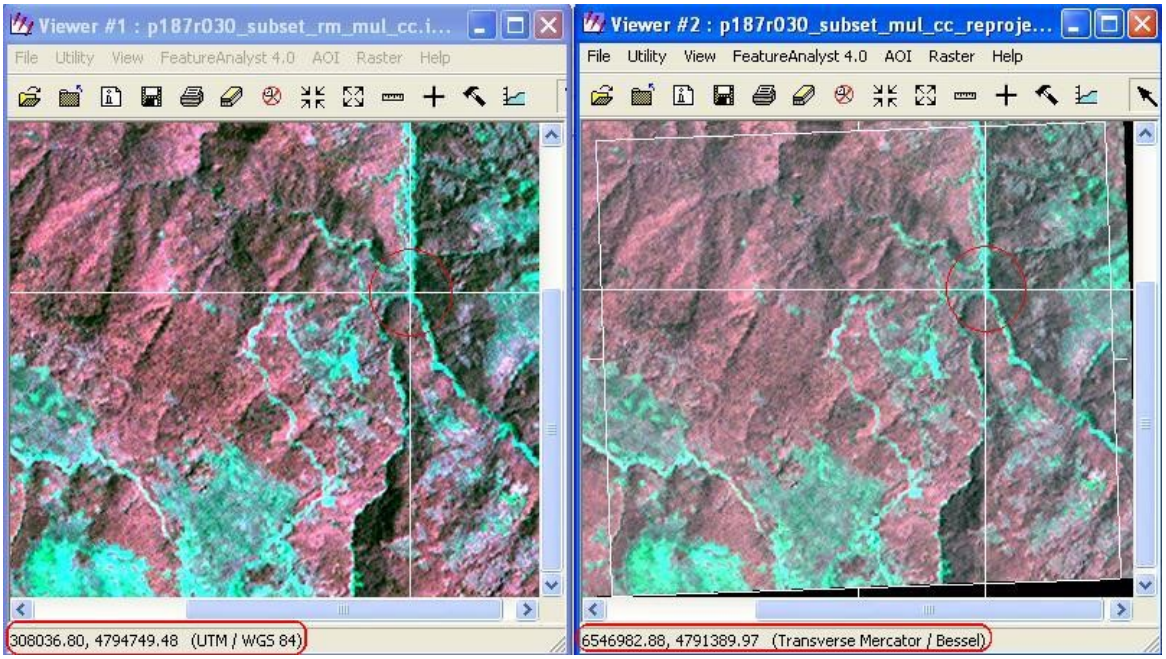


Слика 2б. *Исјецање снимка*
Извор: (аутор)

У овом прозору треба подесити улазни 15-метарски панхроматски и улазни мултиспректални снимак резолуције 30 м, излазни фајл, а може се подесити жељени метод и *resampling* технику за функцију *Resolution Merge*.
У принципу снимак обухвата већу територију, зато вршимо исјецање односно издавајање жељеног подручја на команду: *Image Interpreter* | *Utilities* | *Subset*, што касније олакшава рад (слика 2б.). Област можемо дефинисати координатама горњег лијевог и доњег десног тјемена правоугаоника или преко опције *From Inquire Box*.

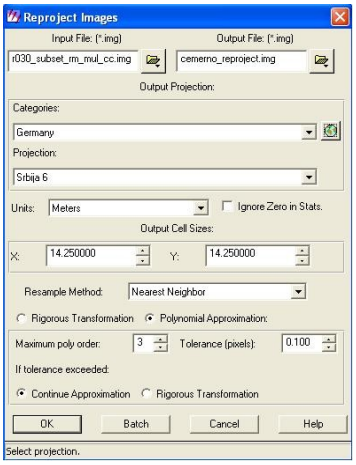
4.2. Репројекција снимка

Стелитском снимаку *Landsat 7 TM* поступком репројекције додјељује се жељени координатни систем. У директорију *C:\Program Files\Leica Geosystems\IMAGINE and LPS 9.0\etc* постоји фајл *spheroid.tab* у коме се налазе параметри трансформације за разне координатне системе, па и за наше подручје. На наредним сликама се налазе координате исте тачке у полазном и жељеном координатном систему.



Слика 3. *Репројекција сателитског снимка*
Извор: (аутор)

Опције за репројекцију снимка налазе се: *Data Preparation* | *Reproject Images*. Након тога отвара се дијалог као на слици 4. гдје се подешава *Input File* односно *Output File* и жељено име и пројекцију излазног фајла.

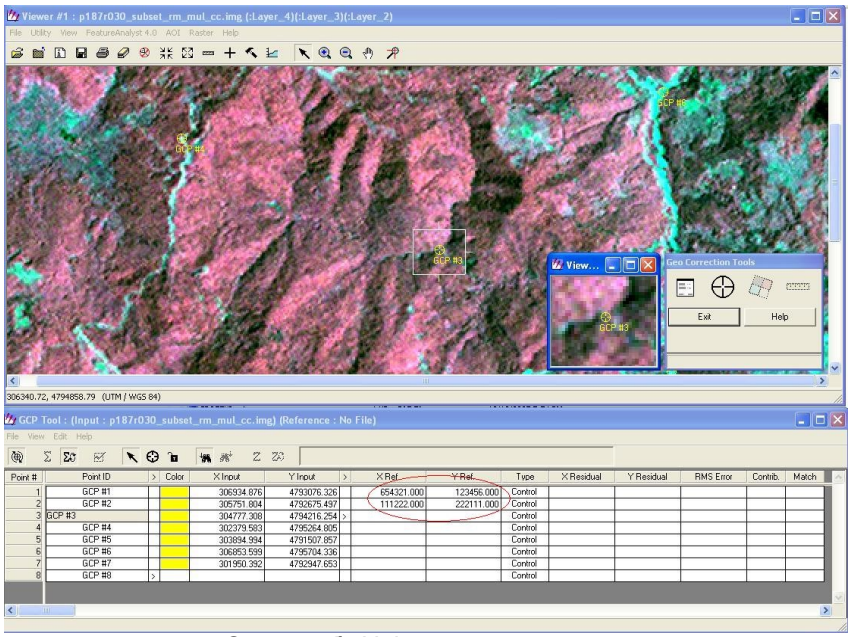


Слика 4. *Подешавање излазног фајла*
Извор: (аутор)

4.4. Георефернцирање

Георефернцирање је изведено опцином: *Raster* | *Geometric Correction*. У отвореном дијалогу бирамо *Polznomial*, па отићи на таб *Projection* и ту изабрати *Set Projection from GCP Tool*, након тога се бира начин уноса референтних тачака. Ако смо већ одредили координате тачака бирамо опцију *Keyboard Only*, затим на снимку проналазимо те тачке и уносимо апсолутне координате. Пожељно било да су те тачке раније фотосигналисане. На слици 5б. жути кружићи представљају референтне тачке за које су унесени *X Input* и *Y Input* са улазног снимка. Уоквиреном црвеном елипсом је назначено мјесто уноса координата тих референтних тачака.

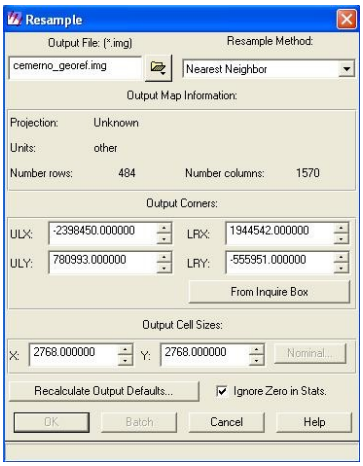
Слика 5а. *Начин избора GPC*
Извор: (аутор)



Слика 5б. *Исјецање снимка*
Извор: (аутор)

Након што смо задали референтне координате одабрађемо опцију на *Display Resample Image Dialog* и *Geo Correction Tools*.

Слика 6а. *Начин избора GPC*
Извор: (аутор)

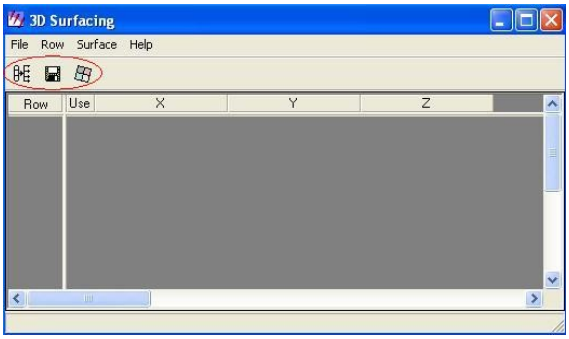


Слика 6б. *Исјецање снимка*
Извор: (аутор)

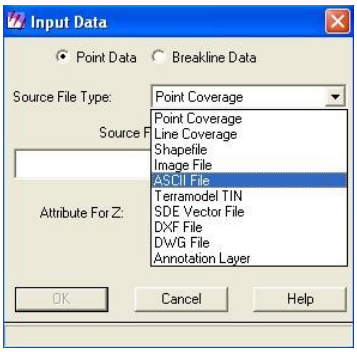
Послије тога се отвара дијалог као на слици 6б. у коме се уноси жељени назив излазног фајла, изабере се *resampling* и означи *Ignore Zero in Stats* и потврди избор за георефернцирани снимак.

4.5. Прављење ДМТ-а (дигитални модел терена)

За поступак 3Д визуелизације и *Expert* класификације неопходан нам је дигитални модел терена, предуслов је да за дато подручје имамо координате тачака са висинама. Активирањем команде *Data Preparation | 3D Surfacing*, отвориће се дијалог као на слици 7а. Покренућемо прву опцију у назначеној елипси *Read New Data,* отвара се прозор на слици 7б. У њему треба да назначимо извор података из којег желимо да правимо ДМТ, у овом случају то је *ASCII file* који садржи правоугле Y и X координате и висине већег броја тачака. Након учитавања тачака са *Perform Surfacing* (трећа иконица у црвеној елипси). У овом прозору подешава се излазни фајл и *surfacing* метод.



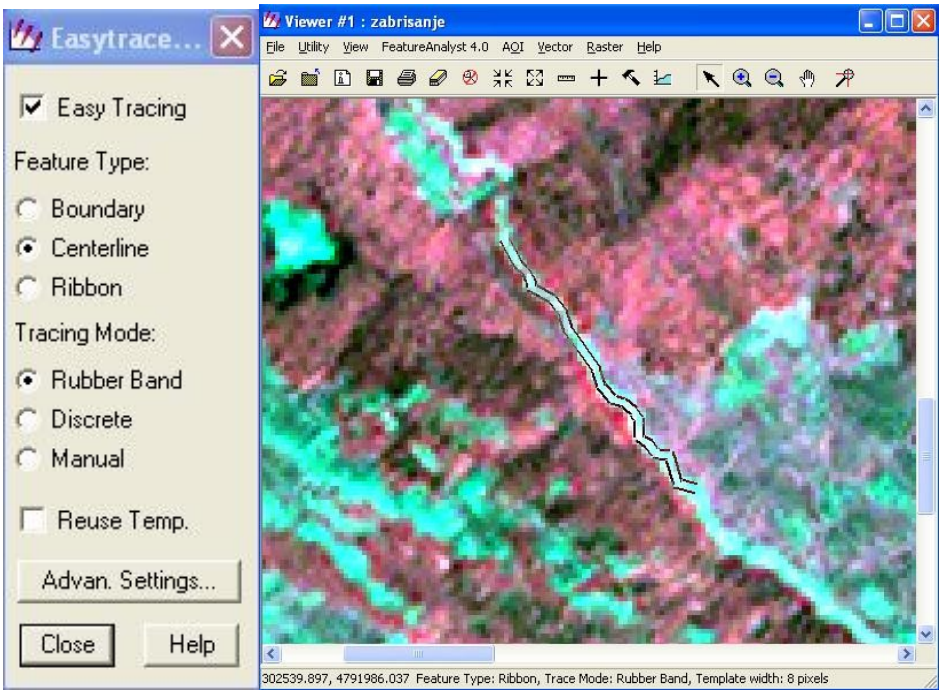
Слика 7а. *Алати за прављење ДМТ-а*
Извор: (аутор)



Слика 7б. *Координате за ДМТ*
Извор: (аутор)

4.6. Дигитализација објекта

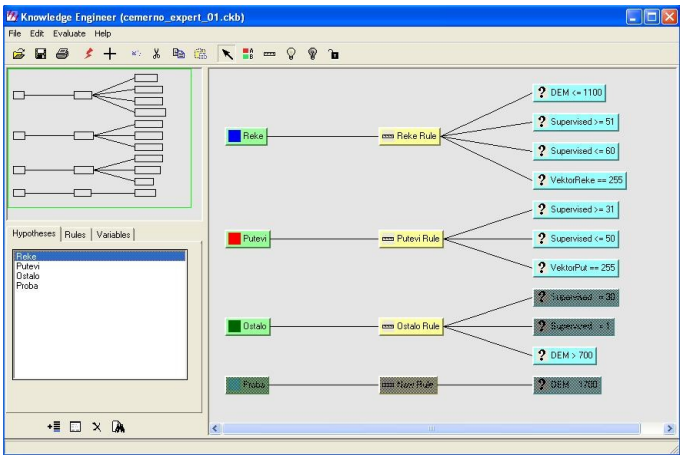
Додатним модулом *Imagine Easytrace* дигитализовани су путеви од интереса и ријеке. Садржаји који ће се касније користити у поступку класификације. Овај модул убрзава векторизацију објеката, у зависности од изабраног начина рада, сам проналази жељену трасу. Опцијом *Boundary* векторизујемо границу између два подручја. *Centerline* користимо када вектор повлачимо дуж средине пута. Опција *Ribbon* омогућава нам да извлачимо дуплу линију као на следећој слици.



Слика 8. *Поступак дигитализације*
Извор: (аутор)

4.7. Expert класификација

Ekspert класификација је најнапреднији тип класификације, из различитих извора података издвајају се жељене карактеристике са одређеном вјероватноћом. Постављају се хипотезе за одређене објекте као и правила која морају бити задовољена да би се одређеном објекту додјелила одређена односно жељена класа. Како би то било успјешно дефинишу се промјењиве а користе се сви наведени производи и извори података: ДМТ, резултати *supervised* класифилације, векторизовани објекти првенствено саобраћајнице.



Слика 9. *Поступак класификације*
Извор: (аутор)

Свакој промјењивој задаје се вриједност између 0 и 1, којима се описује поузданост што нарочито долази до изражаја касније када се сваки пиксел придружује одређеној класи или остаје некласификован.
Као крајњи резултат ових поступака је добијање тродимензионалног ДМТ-а, векторизоване саобраћајнице и интересантног просторног садржаја. Потреба за прецизнијим подлогама намеће и коришћење прецизнијих снимака, већа улагања у програмска рјешења за даљинску детекцију и кадрове. Не мора се напомињати да сателитски снимци нису лако доступни и у нашим условима имају значајну цијену коштања, па самим тиме су ограничене могућности различитих анализа.

4.8. Други примјери

У наставку рада ће бити истакнута још два примјера коришћења сателитских снимака високе просторне резолуције са крајњим резултатима. Ради се о снимку сензора IKONOS2 следећих карактеристика:

Табела 6. *Карактеристике сателитског снимка*

Назив сензора	**IKONOS2**
Просторна резолуција	1 м
Ниво производа	Geo Ortho Kit
Тип снимка	Панхроматски
Битни запис	11- бита
Картографска пројекција	UTM
Висина орбите	450 км
Нагиб оптичке осе сензора	73,0927º
Вријеме снимања	2003-04-29 09:58 GMT
Правац скенирања	Назад
Азимут скенирања	254,2177º

Извор: (Пејић М.)

Посебна пажња посвећена је поправкама модела коефицијената рационалних полинома (RPC) са додатним контролним тачакама (GPC), тачности мјерења (GPC) на снимку и тачности ДМТ тако да је очекивана тачност са 7 метара порасла на 1 м те се подлога са овом просторном резолуцином може користити за израду подлога размјера 1:10 000 и за допуне садржаја подлога 1:5 000.
У другом примјеру снимак је сензора WorldView-2 декларисане просторне резолуције 0.5 м ако се ректификацију са додатним (GPC) могу добити подлоге тачности 0,5 м и боље, што одговара изради подлоге размјере 1:5 000 и за допуну садржаја подлоге 1:2 500. (*Пејић М*)

5. ЗАКЉУЧАК

Наведени комерцијални сателитски снимци уз адекватну обраду, припрему и извођење прецизних геодетских радова на терену могу се користити за израду подлога за планирање и пројектовање путева, уз још увијек изузетак за израду подлога размера 1:1 000 и 1:500. Обзиром да већ постоје комеријални сензори WorldView-3 просторне резолуције 31 цм, представљаће озбиљну конкуренцији аерофото снимцима.

Захвале

Захвалност дугујем романијском платоу ради добијања инспирације, а ради добијања професионалних смјерница, професорима: Др Мири Говедарици, Др Бранку Миловановићу, Др Марку Пејићу и посебно стрицу Лази Сикимићу.

Литература:

[1] Бајат, Б., Ашанин, С. (2015). *Примена геодезије у саобраћајницама.* Академска мисао, Београд.
[2] Анђус, В., Малетин, М. (1993). *Методологија пројектовања путева*. Грађевински факултет Универзитета у Београду, Београд.
[3] Sabbins F.F, W.H, Freeman and Co. (1999). *Remote sensing: Principles and interpretation*, New York.
[4] Пејић, М. (2007) *Оцена геометријске тачности прикупљених података са сателитских снимака високе просторне резолуције,* магистарски рад, Београд.
[5] Енергопројект-хидроинжењеринг а.д. (2001). *Студија примене сателитских снимака високе резолуције у формирању база просторних података ЕПС-а, у функцији детекције стања радова и простора ЕПС-а*. Београд
[6] Божић, Б.; Радојчић, С. (2009). Анализа хоризонтлне тачности дигиталне топографске карте 1: 50 000 издање Војногеографског института, Техника 63: 1–7.
[7] Мићановић, Д., Говедарица, М. (2007). Израда подлога за пројектовање саобраћајница примјеном даљинске детекције. 1. Међународна конференција „Нови хоризонти саобраћаја и комуникација“. Теслић, 29-35.
[8] Републички геодетски завод (2012). Правилник о подели на листова карата и планова у државној пројекцији. (on-line) available at: https://www.rgz.gov.rs/dokumenta-pravilnici
[9] Републички геодетски завод (2015). Правилник о топографском премеру и топографско-картографским производима. (on-line) available at: https://www.rgz.gov.rs/dokumenta-pravilnici
[10] *ERDAS IMAGINE Tour Guide*, 09 December (2005). Geospatial Imaging, LLC, Norcross, Georgia (on-line) available at: https://web.pdx.edu/~nauna/TourGuide9_1.pdf
[11] Asian Institute of Technology (AIT) (2009). Digital Classification of LANDAST TM for Land Cover Mapping of the Pa Wang Phloeng-Khom-Lam Narai National Forest Reserve, Lop Buri Province, Thailand, , Bangkok Thailand. (on-line) available at: https://www.geospatialworld.net/article/digital-classification-of-landast-tm-for-land-cover-mapping-of-the-pa-wang-phloeng-khom-lam-narai-national-forest-reserve-lop-buri-province-thailand

INŽENJERSKOGEOLOŠKI IZAZOVI PRI PROJEKTOVANJU I IZVOĐENJU TUNELA "MUNJINO BRDO" SA OSVRTOM NA BENEFITE PRIMENE DFN METODOLOŠKOG PRISTUPA U BUDUĆNOSTI

Dragana Slavković[1], Toplica Novaković[2], Darko Lisinac[3], Vladimir Filipović[4]
[1,2,3,4] *Saobraćajni Institut CIP d.o.o. Nemanjina 6/IV, 11000 Beograd; email: dragana.slavkovic@sicip.co.rs*

Rezime: Na auto-putu E-763 „Miloš Veliki" u okviru deonice Preljina-Požega se trenutno izvodi tunel „Munjino brdo" koji je okarakterisan kao jedan od najzahtevnijih građevinskih poduhvata u Srbiji. Neretko se kao glavni uzrok otežanog izvođenja radova u ovom tunelu pominju upravo „nepredvidivi" ili „loši" geološki uslovi. Šta znači „loša" ili „nepredvidiva" geologija i koliki uticaj geologija može imati na izgradnju jednog objekata? Kako se definišu geološki uslovi u terenu i u kojoj meri oni mogu imati uticaj na ukupnu vrednost objekta? U radu će biti dati odgovori na ova ali i mnogo druga pitanja sa ciljem sticanja jasnijeg uvida u značaj izrade elaborata o geotehničkim uslovima izgradnje nekog objekta. Posebna pažnja će biti usmerena na prikaz benefita implementacije inovativnog DFN (Discrete Fracture Network) metodološkog pristupa u budućnosti, pre svega pri projektovanju i izvođenju objekata u terenima iste ili slične geološke složenosti.

Ključne reči: *DFN (Discrete Fracture Network), tunel „Munjino brdo", složeni geološki uslovi*

ENGINEERING - GEOLOGICAL CHALLENGES IN THE DESIGN AND CONSTRUCTION OF THE „MUNJINO BRDO" TUNNEL WITH A REVIEW TO THE BENEFITS OF THE DFN METHODOLOGICAL APPROACH APPLICATION IN THE FUTURE

Dragana Slavković[1], Toplica Novaković[2], Darko Lisinac[3], Vladimir Filipović[4]
[1,2,3,4] *Institute of Transportation CIP, Nemanjina 6/IV, 11000 Belgrade; email: dragana.slavkovic@sicip.co.rs*

Abstract: *On the highway E-763 "Miloš Veliki" within the Preljina-Požega section, the "Munjino brdo" tunnel is currently being constructed and it was characterized as one of the most demanding construction projects in Serbia. "Unpredictable" or "bad" geological conditions were quite often mentioned in public as the main reason for the difficulty of carrying out works in this tunnel. What does "bad" or "unpredictable" geology mean and how much influence can geology have on the construction of a facility? How are geological conditions of the terrain defined and to what extent can they impact the overall cost of the object? The paper will provide answers to these and many other questions to gain a clearer insight into the importance of making a report or study on the geotechnical conditions for construction of structures. Special attention will be directed on the presentation of innovative DFN (Discrete Fracture Network) methodological approach implementation benefits in the future, primarily during designing and execution of works of facilities on terrains of the same or similar geological complexity.*

Keywords: *DFN (Discrete Fracture Network), „Munjino brdo" tunnel, complex geological conditions*

1. UVOD

Na deonici auto-puta E-763 Preljina – Požega, u okviru sekcije 2 na delu od doline reke Bjelice kod Lučana ka dolini reke Moravice kod sela Prilipac, projektovan je tunel „Munjino brdo" sa dve odvojene tunelske cevi približno iste dužine od oko 2750 m. Nakon izgradnje tunela „Iriški venac" u okviru Fruškogorskog koridora (približne dužine 3500 m) i tunela „Laz" u okviru auto-puta E-763 na deonici Preljina – Požega (približne dužine 2800 m), tunel „Munjino brdo" će biti treći najduži tunel izgrađen u Srbiji. Iako ne najduži, tunel „Munjino brdo" je poslednjih meseci stekao epitete poput „najkompleksniji tunel u Srbiji", „jedan od najvećih izazova za izvođače radova", „najsloženiji tunel na drumskim saobraćajnicama koji je u novije doba izvođen u Srbiji" i sl. Kao glavni „problemi" otežanog izvođenja radova pominju se geološki složeni uslovi u terenu iliti „nepredvidiva" i „loša" geologija. Rad zato ima za cilj da predstavi geološke uslove koji vladaju na predmetnoj lokaciji, da objasni zašto su ti uslovi složeni i otežavaju izvođenje radova, ali i da predstavi DFN (Discrete Fracture Network) metodologiju čija primena u budućnosti u velikoj meri može olakšati i ubrzati kako projektovanje tako i izvođenje radova različitih objekata koji se grade u terenima iste ili slične geološke složenosti. Između ostalog, u radu će biti predstavljeni istražni radovi koji su izvedeni za potrebe projektovanja tunela, a potom i istražni radovi koji i dalje traju u toku izvođenja u svojstvu permanentnog kontinaulnog monitoringa.

[1] Dragana Slavković: dragana.slavkovic@sicip.co.rs

2. OPŠTE KARAKTERISTIKE TUNELA

Tunel "Munjino brdo" je projektovan sa dve tunelske cevi gde svaka od njih ima dužinu od oko L=2750 m, širinu oko 12 m i koje su na osovinskom rastojanju od 30 do 50 m (Slika 1). Tunel ima blago povijenu trasu generalnog pravca pružanja severoistok - jugozapad. Relativno upravno ulazi u padinu i sa jednostranim opadajućim nagibom izlazi skoro upravno na levu padinu bezimenog potoka u Prilipcu. Prostor ulaznog portala iznad tunelske cevi i u zoni izlaznog portala je u nenaseljenom pošumljenom zemljištu. Tuneli u prvih 270 m i poslednjih 250 m imaju mali nadsloj do 30 m, dok je u preostalim intervalima tunel opterećen većim nadslojem čija visina dostiže maksimalnih 215 m. Tunel prolazi kroz relativno jednoličan stenski masiv sačinjen od višestruko ubrane stene veoma promenljivih strukturno - tektonskih karakteristika, koji je ispresecan rasedima i drugim mehaničkim diskontinuitetima (Slika 2). Sve ove karakteristike upućuju na teren izrazite složenosti sa znatnim ograničenjima. Sa aspekta tunelogradnje, kao posledica prethodno navedenog, moguće su pojave veoma nepovoljnih deonica sa raznovrsnim nepredvidivim pojavama koje u velikoj meri mogu uticati na predviđenu dinamiku izvođenja radova.

Slika 1. *Ulazni portal tunela "Munjino brdo"* *(foto: https://www.gradnja.rs)*

3. GEOLOŠKI USLOVI U ZONI TUNELA

3.1. Istraživanje terena pre početka izvođenja radova

Tokom svih faza projektovanja, uže područje projektovanog tunela "Munjino brdo" bilo je predmet opštih geoloških ali i detaljnih inženjerskogeoloških istraživanja. Pre početka izvođenja radova a u fazi projektovanja, izveden je širok spektar raznovrsnih terenskih istražnih radova i laboratorijskih geomehaničkih ispitivanja sa ciljem sticanja jasnijeg uvida u geološki sastav, starost i strukturu litoloških članova zastupljenih na predmetnoj lokaciji na kojoj je predviđena izgradnja tunela. Terenski istražni radovi obuhvatili su izvođenje:

- Istražnog bušenja sa kartiranjem jezgara iz bušotina,
- SPT opita (opiti standardne penetracije - definisanje primarno deformabilnih svojstava litoloških sredina),
- Presiometarskih opita (za potrebe definisanja deformabilnih svojstava stena i tla),
- Ugradnja pijezometarskih konstrukcija i merenje stalnog nivoa podzemne vode,
- Opita nalivanja (definisanje parametara vodopropustljivosti stenske mase tj. koeficijenta filtracije)
- Geofizička seizmička ispitivanja - seizmička refrakcija
- Geofizička seizmička ispitivanja - seizmički karotaž u bušotinama
- Geoelektrična ispitivanja (metodom specifične električne otpornosti / geoelektrično sondiranje)

Laboratorijska geomehanička ispitivanja su se sastojala od serije opita na odabranim reprezentativnim poremećenim i neporemećenim uzorcima uzetim iz istražnih bušotina.

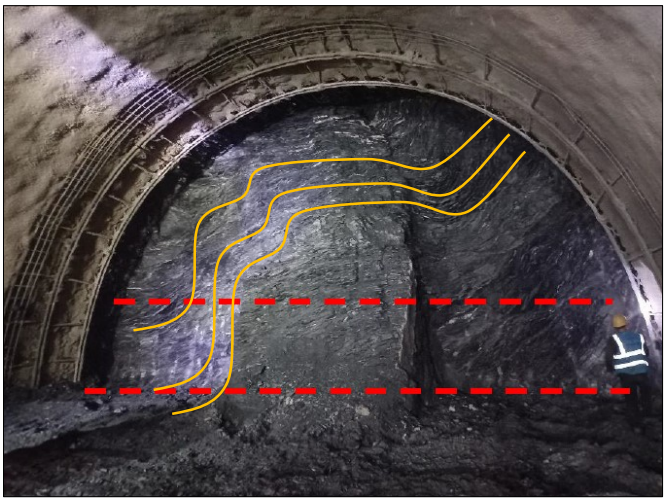
Tokom izvođenja terenskih istražnih radova, izvedeno je i detaljno inženjerskogeološko kartiranje terena u zoni tunela. Kao prvi ograničavajući faktor ističe se pokrivenost terena. Velika visina nadsloja od preko 200 m kao i velika pošumljenost koja uslovljava slabu vidljivost izdanaka stenske mase preko tunela, u velikoj meri su ograničile mogućnosti istraživanja tokom terenskih istražnih radova. Iz tog razloga je kartiranje u široj zoni tunela izvedeno kombinovanom metodom praćenja otkrivenih granica i izdanaka uglavnom po lokalnim jaružnim pravcima i šumskim putevima. Ovim načinom kartiranja stečena su saznanja o strukturno - tektonskim svojstvima terena, merena je prostorna orijentacija strukturno - tektonskih elemenata tj. mehaničkih diskontinuiteta kao i stepen ispucalosti tj. izdeljenost stenske mase (RQD). U cilju definisanja stratigrafskih odnosa neogenih sedimenata, kao i mineraloško - petroloških karakteristika stenskih masa, izvedena su i detaljna stratigrafska i mineraloško - petrografska ispitivanja.

Slika 2. *Uzorak jezgra sa prikazom nabornih strukturnih elemenata (foto: Novaković T. 2018.)*

Nakon završetka pojedinačnih terenskih istražnih radova, izvršeno je geodetsko snimanje kota i koordinata svakog od pomenutih istražnih radova.

3.2. Istraživanje terena u toku izvođenja radova u tunelu

U toku izvođenja tunela, za potrebe jasnijeg definisanja geološke građe na pojedinim mestima duž tunela, izvedene su dodatne istražne bušotine. U cilju kontrole ponašanja tunelske podgrade i okolne stenske mase tokom i nakon njene izrade, na odabranim profilima se meri konvergencija geodetskim reperima, potom deformacija oko tunela (divergencija) ekstenziometrima, skeniranje tunelskog iskopa georadarom (Slika 3) i ispituje se nosivost ugrađenih ankera na silu čupanja. Pored pomenutog, u toku izvođenja radova ugrađene su inklinometarske konstrukcije za potrebe kontinualnog praćenja potencijalnih pomeranja u portalnim zonama tunela i/ili njegovim obodnim zonama (Slika 4).



Slika 3. *Primer čela iskopa sa položajem profila georadara u levoj tunelskoj cevi "Munjinog brda" na km 143+117 (foto: Jovanović S. 2022.)*

Slika 4. *Ugrađena inklinometarska konstrukcija na izlaznom portalu tunela (foto: Lisinac D. 2021.)*

3.3. Geološka i inženjerskogeološka svojstva terena

Posmatrano sa geološkog aspekta, teren u široj zoni tunela izgrađuju litološki heterogene jedinice u okviru kompleksa metamorfnih, sitnozrnih, škriljavih stena paleozojske starosti, i to: sericitski škriljci (Sse) sa dominantnim udelom, a u manjoj meri filiti (F), kalkšisti (M) i sericitski kvarciti (Q’). Za sve litološke varijatete je karakteristično da su škriljave, plisirani, različito ispucali i sa lokalnim prelaznim varijatetima sličnih mineralnih asocijacija. Prema genezi, kartirane jedinice su svrstane u metamorfite alevrolite i pelite sa mm-cm-dm debljinom slojeva, sa cm folijacijom i izraženom lineacijom. Izvedenim mineraloško – petrografskim ispitivanjima, utvrđeno je da teren uglavnom izgrađuju filiti sa varijetetima koji se zbog povećanog sadržaja kvarca mogu svrstati u metamorfisane alevrolite (metaalevrolite). Ovi metamorfiti su značajno izuvijani, ubrani i plisirani što je potvrđeno kartiranjem otkrivenih izdanaka i kartiranjem jezgra istražnih bušotina gde su registrovani naborni oblici centimetarskih do dekametarskih razmera (Slika 5).

Slika 5. *Prevrnuti nabori metarskih dimenzija u zaseku šumskog puta (foto. Novaković T. 2018.)*

Nagibi „slojevitosti“ registrovani na izdancima i u jezgru istražnih bušotina veoma variraju, od subhorizontalnih do subvertikalnih, sa čestim promenama koje se nepravilno javljaju. Kartiranjem otvorenih izdanaka utvrđeni su prevrnuti nabori čije aksijalne površi generalno imaju strm do subvertikalan pad ka juzozapadu.

U zoni izlaznog portala, diskordantno preko paleozojskih škriljaca istaloženi su sedimenti donje miocenske starosti (M1). Na osnovu jezgra istražnih bušotina može se zaključiti da je sedimentacija vršena tokom prve faze razvoja neogenog basena u njegovim priobalnim delovima. Ovi sedimenti su predstavljeni prašinasto – glinovitim sedimentima sa različitim udelom sitne i krupne drobine osnovne stene (Sse), lokalno sa povećanim sadržajem karbonata. Površinske delove terena prekrivaju kvartarne deluvijalno-eluvijalne naslage. To su uglavnom prašine peskovite, lokalno zaglinjene i sa različitim učešćem tj. masenim udelom uglaste do poluzaobljene drobine osnovne stene iz podine.

Iz svega navedenog se zaključuje da su litološke, genetske i strukturno – tektonske karakteristike u terenu veoma promenljive, što uslovljava izdvajanje različitih inženjerskogeoloških i fizičko-mehaničkih karakteristika stenske mase. Zbog svoje karakteristične škriljave teksture, svi paleozojski metamorfiti registrovani na terenu, nevezano da li su nastali metamorfizmom alevrolita, peščara, filita i dr., tretiranii su kao škriljci sa velikim sadržajem sericita.

Na površini terena izdvojen je nasip i to uglavnom u zoni lokalnih saobraćajnica i nivelacije terena u sklopu domaćinstava. Nasip je heterogenog sastava, pretežno izgrađen od lokalno glinovito – drobinskog materijala.

U podini nasipa su izdvojeni deluvijalno – eluvijalni sedimenti predstavljeni peskovitim prašinama lokalno zaglinjenim sa uglastom do poluzaobljenom drobinom. Sredina je srednje stišljiva i zbijena, a debljina ovih sedimenata na terenu iznad tunela iznosi najčešće od 1.5 do 5.0 m.

U podini deluvijalno – eluvijalnih sedimenata izdvojena je zona eluvijalne raspadine škriljaca (Slika 6) koja se javlja ispod kvartarnog pokrivača i miocenskih sedimenata. Ova zona je nastala raspadanjem paleozojskih metamorfita iz podine usled dejstva fizičko – mehaničkih procesa. U ovoj sredini se uglavnom javlja prašinasta drobina koja lokalno može biti zaglinjena, promenljivih je otporno – deformabilnih karakteristika ali generalno tvrda, zbijena i slabo stišljiva.

Slika 6. *Zona površinske ismene škriljaca u bušotini (foto: Novaković T. 2018.)*

Kompleks miocenskih sedimenata predstavlja jezerske sedimente starijeg miocena koji su verovatno nastali pretaložavanjem materijala u priobalnim delovima neogenog basena. U sklopu ovih sedimenata javljaju se prašine peskovite sa drobinom i gline prašinasto – peskovite sa promenljivim učešćem drobine (Slika 7).

Slika 7. *Kompleks miocenskih sedimenata: Peskovita prašina sa drobinom osnovne stene (levo) i crvenkasta prašinasta glina (desno) (foto: Novaković T. 2018.)*

Kompleks škriljavih metamorfnih stena predstavlja jednu vrlo heterogenu sredinu u pogledu litoloških i inženjerskogeoloških karakteristika. U okviru ovih metamorfita nepravilno se smenjuju varijeteti sericitskih škriljaca, filita, sericitskih kvarcita, argilošista i kalkšista. Kao što je ranije pomenuto, svi pomenuti paleozojski metamorfiti su označeni kao škriljci sa različitim mineraloškim varijetetima pri čemu je veći značaj stavljen na njihove međusobne razlike u strukturi i fizičko – mehaničkim svojstvima. Paleozojski škriljci su višestruko ubrane, izuvijane i ispucale stene, veoma različitih i promenljivih fizičko – mehaničkih karakteristika. Ovaj kompleks je uslovno povoljnih otporno – deformabilnih karakteristika u kome se bez jasnog reda javljaju izrazito oslabljene zone. Kompleks je stabilan do uslovno stabilan u prirodnim uslovima. U uslovima tehnogene aktivnosti (iskopa) je uslovno stabilan do nestabilan zbog lokalnih osipanja, odronjavanja i kliženja koji prvenstveno zavise od orijentacije ravni škriljavosti kao dominantnog sistema mehaničkih diskontinuiteta.

Škriljci sa manjim udelom filita predstavljaju kompaktnije i čvršće slojeve stenske mase tj. zone u kojima su dominantne stene sa većim sadržajem kvarca i sa proslojcima filita i grafitičnih filita. Ovi škriljci su manje izdeljeni, slabo ispucali i uglavnom kompaktni. Dominantan sistem diskontinuiteta predstavljen je ravnima škriljavosti duž kojih se javljaju istaloženja kvarca u vidu žica (Slika 8 - levo). Pored ravni škriljavosti, registrovana su još dva sistema pukotina upravnih na ravni škriljavosti i međusobno upravnih. Ove pukotine su uglavnom talasaste do hrapave, stisnute ili sa kvarcnom ispunom (Slika 8 – desno).

Slika 8. *Kompaktni škriljci sa manjim udelom filita (levo) i sistemi upravnih pukotina na izdanku (desno) (foto: Novaković T. 2018.)*

Škriljci – metaalevroliti i filiti (Slika 9), predstavljaju manje kompaktne zone unutar paleozojskog kompleksa u kojima dominantni udeo imaju filiti i metaalevroliti sa manje sadržaja silicije. Stena je više izdeljena, lako se cepa i odvaja po ravnima škriljavosti koje su glatke, ravne i mestimično grafitične. Registrovana su barem još dva sistema pukotina koje su upravne na ravni škriljavosti i po kojima se stena deli na blokove do dm veličine.

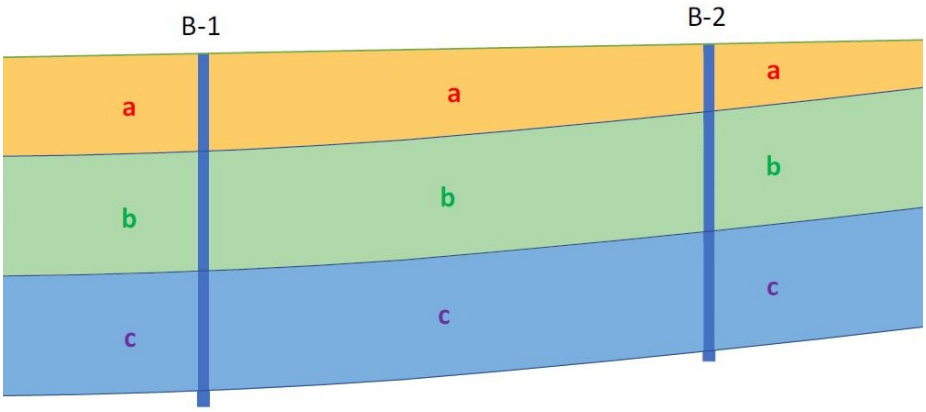
Slika 9. *Više izdeljeni filitični škriljci (foto: Novaković T. 2018.)*

Veoma izdeljeni škriljci, filiti i grafitični škriljci, javljaju se samostalno u vidu proslojaka i slojeva debljine do 10 m ali u vidu zdrobljenih, plisiranih i oslabljenih zona unutar paleozojskih škriljaca. Pretpostavlja se da su nastali tokom procesa ubiranja, ali nije isključeno i da su nastali mlađim tektonskim procesima duž formiranja mlađih rasednih ruptura. U masi sadrže manje silicije, a česta je pojava pirita i povećan sadržaj grafita (Slika 10). Strukture su plisirane do škriljave. Svi mehanički diskontinuiteti (škriljavost, pukotine i prsline) su glatkih površina, masnog opipa, prevučeni grafitnim filmom. Veoma su osetljivi na dejstvo fizičko – mehaničkih uticaja i atmosferilija, prilikom čega se raspadaju do prašine peskovite sa drobinom kvarca i čvršćih škriljaca.

Slika 10. *Plisirani grafitični filiti (sa piritom – levo) (foto: Novaković T. 2018.)*

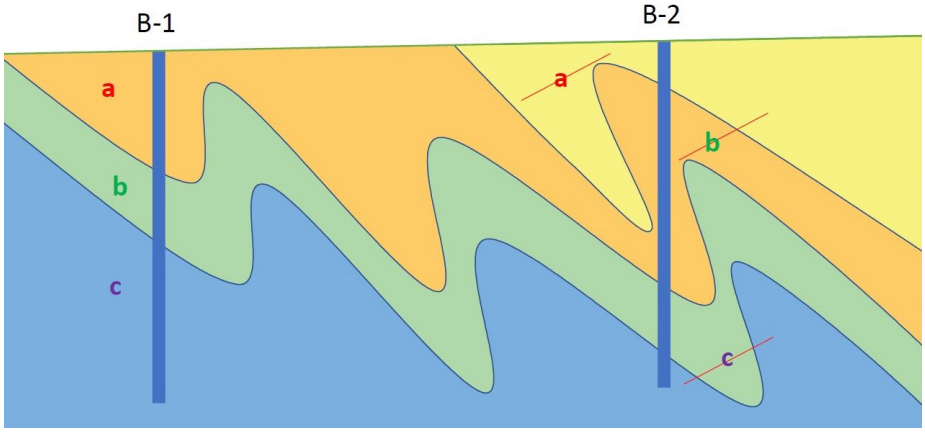
3.4. Zašto su geološki uslovi na ovom lokalitetu složeni?

Složenost geoloških uslova na nekom lokalitetu zavisi od niza različitih faktora poput: litologije terena, strukturno - tektonskog sklopa u terenu (stepena ispucalosti i orijentacije mehaničkih diskontinuiteta), stepena istraženosti terena i sl. U praksi se neretko javljaju primeri pri projektovanju nekog objekta u terenima sa velikim stepenom istraženosti gde se i dalje geološki uslovi definišu kao izuzetno složeni, upravo zbog složene litologije i složenog strukturno – tektonskog sklopa. Krajnji rezultat definisanja geoloških i inženjerskogeoloških uslova u terenu predstavlja se presekom terena. Složeni geološki uslovi u velikoj meri otežavaju izradu geološkog ili inženjerskogeološkog preseka terena smanjivanjem mogućnosti precizne predikcije tj. interpolacije podataka između dva istražna rada. U slučajevima kada određeni podaci nedostaju, moguće je izvesti dodatne istražne radove, s tim da treba voditi računa o tome da obim i vrsta istražnih radova budu optimalni u pogledu racionalne realizacije ekonomski isplativog projekta. Na slici 11 i 12 grafički su prikazani uprošćeni primeri jednostavne i složene interpretacije geoloških sredina prostorno zastupljenih između dve bušotine.Skice slikovito prikazuju primer „jednostavnih“ i složenih geoloških uslova u nekom terenu.



Slika 11. *Uprošćen primer jednostavne interpolacije podataka - jednostavnih geoloških uslova u terenu*

Ispod slike 11 se vidi da prvi sloj (*a)* iz bušotine B-1 u litološkom pogledu odgovara prvom sloju bušotine B-2. Isti princip važi i za drugi (*b)* i treći (*c*) sloj. Na ovom primeru vidimo sublinearnu interpolaciju podataka između dve bušotine koji upućuju na relativno jednostavno geološke uslove u terenu (subhorizontalni slojevi koji nisu tektonski ubrani) i relativno jednostavan proces izrade geološkog i inženjerskogeološkog preseka terena.

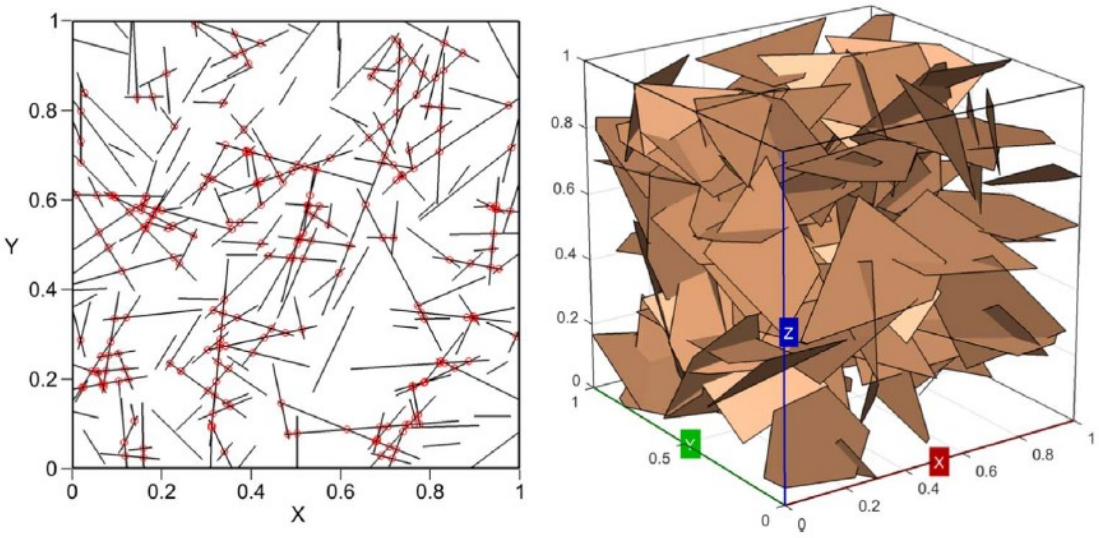


Slika 12. *Uprošćen primer složene interpolacije podataka – složenih geoloških uslova u terenu*

Ispod slike 12 se vidi da prvi sloj (*a*) iz bušotine B-1 u litološkom pogledu ne odgovara prvom izbušenom sloju u bušotini B-2. Tom analogijom se zaključe da ni drugi (b) ni treći (*c*) sloj bušotine B-1, nisu sa litološkog aspekta ekvivalentni sa drugim i trećim slojem u bušotini B-2. Upravo ovaj primer složenih geoloških uslova u terenu (iako uprošćen) i otežane interpolacije podataka između dva istražna rada, delimično odgovara uslovima u terenu u kom se izvodi tunel „Munjino brdo“. Zaključuje se da litološki heterogeni i tektonski ubrani slojevi u velikoj meri otežavaju precizno defininisanje geoloških uslova, naročito u zonama terena koje nisu pokrivene istražnim radovima.

3. DFN (DISCRETE FRACTURE NETWORK) METODOLOGIJA

Discrete Fracture Network (DFN) iliti DFN modelovanje, predstavlja metodološki pristup koji je fokusiran na opis ispucalih stenskih masa na determinističko – stohastički način. To je proces kreiranja virtuelnog kompleksnog sistema pukotina u stenama korišćenjem računarskih metoda. DFN modelovanje se sastoji od nekoliko koraka, uključujući prikupljanje podataka o pukotinama, njihovoj geometriji i orijentaciji, kreiranje virtualne mreže pukotina, dodeljivanje mehaničkih svojstava pukotinama i stenskoj masi, kao i simulaciju ponašanja stenske mase u različitim uslovima. DFN modelovanje se, iako je primarno nastalo za potrebe simuliranja hidrauličkih lomova, koristi u različitim oblastima uključujući geologiju, hidrogeologiju, naftnu i gasnu industriju, rudarstvo, geotehniku i druge oblasti, a izuzetno je korisno za razumevanje i predikciju ponašanja stenske mase u realnim geološkim uslovima. Dakle, DFN predstavlja matematički model koji se koristi za opisivanje složenog sistema pukotina u stenama i koji se sastoji od geometrijskih informacija o rasporedu i orijentaciji pukotina, kao i mehaničkih svojstava tih pukotina i same stenske mase. DFN modeli omogućavaju i deterministički i stohastički prikaz pukotina, kao i proračun anizotropnih i prostorno varijabilnih / promenljivih mehaničkih svojstava stenske mase (Slika 13).



Slika 13. *2D (levo) i 3D (desno) Discrete Fracture Network (DFN) model (Alghalandis Y.F. 2017.)*

Kako primena DFN metodološkog pristupa može pomoći i unaprediti definisanje geoloških uslova u terenima iste ili slične geološke složenosti poput Munjinog brda? Važno je na početku napomenuti da generisanje preciznog DFN modela podrazumeva korišćenje ulaznih parametara dobijenih iz svih onih terenskih istražnih radova i geomehaničkih laboratorijskih ispitivanja koji su izvedeni upravo za potrebe projektovanja tunela “Munjino brdo”. Dakle, kvalitet i preciznost generisanja 2D ili 3D DFN modela nesumnjivo zavisi od kvaliteta ali i kvantiteta ulaznih podataka.

Krenimo od toga da je poznavanje mehaničkih svojstava i stepena ispucalosti prirodno ispucale stenske mase, od izuzetne važnosti za predikciju ponašanja iste, kako pod dejstvom spoljašnjih sila tako i pod dejstvom unutrašnjih naprezanja. Precizno i tačno definisana mehanička svojstva stenske mase su od suštinskog značaja za određivanje njene stabilnosti. Diskontinuiteti u stenskoj masi, u velikoj meri mogu uticati na njena primarna mehanička svojstava, odnosno mogu smanjiti ukupnu čvrstoću i stabilnost stenske mase i time povećati verovatnoću da dođe do loma. Orijentacija, razmak ili raspodela pukotina, mogu imati dodatni uticaj na mehanička svojstva stenske mase. U praksi se često ispucala stenska masa kvazihomogenizuje, što dovodi do pojednostavljenja realnog stanja u prirodi sa ciljem lakšeg manevrisanja prikupljenih podataka i njihove analize. Međutim, proces kvazihomegenizacije interpretatora udaljava od realnog stanja u terenu dobijanjem mehaničkih parametara koji su na strani sigurnosti i time povećava ukupne troškove inženjerskih zahvata. Kako bi se stenska masa što približnije kvazihomogenizovala važno je uzeti u obzir detaljne karakteristike pukotina prilikom procene njenih mehaničkih svojstava. Mehanički parametri ispucale stenske mase se mogu odrediti na sledeća tri načina:

- In-situ opitima;
- Empirijskim jednačinama/relacijama zasnovanim na klasifikacionim sistemima stenske mase i
- Numeričkim simulacijama u kombinaciji sa laboratorijskim ispitivanjima i terenskim istraživanjima (DFN)

Upotreba in-situ opita često zahteva visoke troškove koje prati potencijalna poteškoća u realizaciji, što je rezultat ograničene primene opita na relativno malu zapreminu stenske mase (reda veličine, manje od m3). Pored toga, primena pomenutih opita zna dati dvosmislene i kontradiktorne rezultate usled nedovoljne obučenosti lica koje izvodi opit ili interpretatora dobijenih rezultata. S druge strane, pojedine empirijske relacije zasnovane na klasifikacionim sistemima stenske mase su se iskustveno pokazale kao pogodne za procenu njenih svojstava. Stoga je od izuzetne važnosti odabrati adekvatne empirijske relacije koje mogu na odgovarajući način opisati svojstva i varijacije u svojstvima za, po pravilu, anizotropne stenske mase. Na posletku se kao najprecizniji vid definisanja mehaničkih karakteristika anizotropne stenske mase, izdvajaju numeričke simulacije. One u osnovi mogu da inkorporiraju složenu geometriju mreža pukotina i time omoguće analizu ponašanja intaktne i ispucale stenske mase.

Postupno posmatrano, proces primene DFN metodologije bi u budućnosti izgledao ovako:

- Kabinetske metode bi obuhvatile prikupljanje i analizu studija i elaborata iz prethodnih faza projektovanja, osnovnih geoloških karata, ali i sveobuhvatna sintezu dokumentacije koja je dostupna za područje od interesa.

- Terenske metode bi primarno obuhvatile geodetsko lasersko skeniranje (npr. LiDAR), kao i prateće konvencionalne terenske metode na odabranim lokacijama (geološke, inženjerskogeološke, hidrogeološke, geotehničke, geofizičke), čime će se prikupiti neophodne informacije o pukotinama i stenskoj masi u celini. Tradicionalno prikupljanje podataka o ispucalosti na terenu zahteva puno vremena i fizičkog truda, pri čemu se može prikupiti relativno mali broj podataka, često nedovoljan za dalje analize ili projektovanje. Laserskim skeniranjem se trodimenzionalni podaci geometrije objekta u digitalnoj formi mogu dobiti relativno brzo i sa velikom detaljnošću. Dakle, zadatak skenera bi bio da obezbedi dovoljno kvalitetan ulazni podatak odnosno model površine terena na bazi „oblaka tačaka“, dok je na mehanici stena da na osnovu ulaznih podataka i modela, analizom dođe do novog saznanja o stenskoj masi. Cilj instrumenta je da snimi hiljade pa i milione tačaka u sekundi, da prekrije relativno veliku površinu terena i predstavi ih tačkastim prostornim modelom iliti oblakom tačaka, u kojem svaka tačka ima poznate 3D koordinate. Softveri za obradu podataka dobijenih sa skeniranih površina, omogućavaju filtriranje, segmentaciju i klasifikaciju oblaka tačaka, kao i izdvajanje površina i kreiranje digitalnog modela terena (DTM) koji se dalje može koristiti za DFN modelovanje.

- Laboratorijske metode bi kao i do sada, obuhvatile određivanje elementarnih parametara korišćenjem standardnih laboratorijskih opita (sa fokusom na opite za određivanje tačkaste i pritisne čvrstoće, dinamičkih i statičkih modula elastičnosti i sl.) na uzorcima koji će biti prikupljeni prilikom terenskih istraživanja.

- Numeričke metode / numeričko simuliranje korišćenjem DFN metodološkog pristupa bi podrazumevalo sveukupni proces modelovanja, od prikupljanja i analize podataka pa sve do dobijanja krajnjih rezultata. Glavna etapa predstavlja kreiranje konceptualnog modela, motom njegovo generisanje i na kraju validaciju DFN modela. U zavisnosti od količine i kvaliteta prikupljenih podataka na terenu, za potrebe numeričkog modelvanja bi bio primenjen neki od specijalizovanih softvera za rešavanje pomenute problematike. Većina do sada poznatih sofvera za DFN modelovanje podrazumeva poznavanje nekog od sledeća tri programska jezika: C++, *Python* ili *MatLab.*

Neke od hipoteza na koje se oslanja primena DFN metodologije:

A.Vrednosti mehaničkih parametara ispucale stenske mase dobijene DFN metodom, mogle bi biti približnije realnom stanju u terenu od vrednosti koje su dobijene konvencionalnim postupcima.

B.Vrednosti mehaničkih parametara ispucale stenske mase dobijene iz empirijskih jednačina (baziranih na RMR, GSI i sličnim klasifikacionim sistemima) mogle bi biti bitno drugačije u odnosu na one dobijene primenom DFN metodološkog pristupa.

C.Trodimenzionalni modeli pukotina bi se mogli pokazati kao efikasnije i ekonomičnije rešenje za potrebe utvrđivanja mehaničkih karakteristika ispucale stenske mase, kao i za potrebe predikcije ponašanja iste (u uslovima sekundarnih naponskih stanja, izmenjenih pornih pritisaka itd.), pa i same klasifikacije stene.

3. DISKUSIJA I ZAKLJUČAK

S obzirom da je u radu na praktičnom primeru projektovanja i izgradnje tunela "Munjino brdo" prikazano kako tektonski izmenjena i strukturno ubrana stenska masa može biti izuzetno složena za predikciju geoloških uslova u terenu ali i interpretaciju dobijenih rezultata i pored obimnih terenskih istraživanja i laboratorijskih ispitivanja, nameće se pitanje da li je moguće na bilo koji način olakšati izvođenje radova u terenima iste ili slične geološke složenosti. Discrete Fracture Network (DFN) predstavlja moderniji, izazovniji ali i precizniji "alat" kojim se prevazilaze poteškoće ispitivanja mehaničkog ponašanja ispucale stenske mase, do danas većinski rešavane primenom klasifikacionih sistema poput RMR-a. Ukoliko bi se primena numeričkih simulacija u formi kreiranja DFN modela u budućnosti kombinovala sa već pomenutim i izvedenim terenskim istražnim radovima i geomehaničkim laboratorijskim ispitivanjima, benefiti ovakvog hibridnog pristupa bi zasigurno bili enormni kako u pogledu uštede vremena, tako i u pogledu uštede građevinskog materijala i uštede novca. Počevši od nivoa idejnog projekta na čijem se kraju izrade definiše investiciona vrednog ugovorenog posla, upotreba DFN metodološkog pristupa bi dala realnije procene i jasniji uvid u ukupnu cenu celokupnog projekta. Pored toga, kombinacija DFN-a sa geotehničkim, hidrogeološkim, inženjerskogeološkim, geodetskim i geofizičkim istražnim radovima bi rezultovala preciznijom slikom geološke građe istraživanog područja. Ključna razlika u dosadašnjem tradicionalnom načinu istraživanja terena je što bi se dodavanjem DFN modela postigla, pored analize rezultata po dubini, prostorna interpretacija podataka između dve bušotine ili bilo koja dva istražna rada. Na samom kraju se kao važna prednost primena DFN modelovanja ističe i analiza teško pristupačnih terena koji u prostornom smislu nisu u dovoljnoj meri pokriveni istražnim radovima.

Literatura

[1] Novaković T. (2019). Elaborat o rezultatima geotehničkih istraživanja i ispitivanja terena – tunel „Munjino brdo“ - Projekat za građevinsku dozvolu; Saobraćajni Institut CIP d.o.o. Beograd

[2] Alghalandis, Y.F. (2017). ADFNE: Open-source software for discrete fracture network engineering, two- and three-dimensional applications. *Comput. Geosci., 102*, 1-11.

[3] Bar, N., & Barton, N. (2017). The Q-slope method for rock slope engineering. Rock Mechanics and Rock Engineering, 50, 3307-3322.

[4] Bieniawski, Z. T. (1989). Engineering rock mass classifications: a complete manual for engineers and geologists in mining, civil, and petroleum engineering. John Wiley & Sons

[5] Hoek, E., & Bray, J. D. (1981). Rock slope engineering. CRC press, London, UK. 358.

[6] Jaboyedoff, M., Metzger, R., Oppikofer, T., Couture, R., Derron, M. H., Locat, J., & Turmel, D. (2007, May). New insight techniques to analyze rock-slope relief using DEM and 3Dimaging cloud points: COLTOP-3D software. In 1st Canada-US Rock Mechanics Symposium. OnePetro.

[7] Marjanović, M., Abolmasov, B., Berisavljević, Z., Pejić, M., & Vranić, P. (2021, August). Pre-failure deformation monitoring as rockfall prediction tool. In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science (Vol. 833, No. 1, p. 012197). IOP Publishing.

[8] Marjanović, M., Abolmasov, B., Đurić, U., Krušić, J., & Bogdanović, S. (2022). Regional rockfall exposure assessment, experiences from Serbia. In Proceedings of the 5th Regional Symposium on Landslides in the Adriatic-Balkan Region (pp. 145-150). Faculty of Civil Engineering, University of Rijeka.

[9] Romana, M. (1985, September). New adjustment ratings for application of Bieniawski classification to slopes. In Proceedings of the international symposium on role of rock mechanics, Zacatecas, Mexico (pp. 49-53).

PASIVNI IN-SITU TRETMAN OCEDNE VODE POMOĆU AKTIVNIH GEOKOMPOZITA

Marija Bakrač[1]
[1] *Geoestetika d.o.o., mbakrac@geoestetika.rs*
Thomas Hasslacher[2]
[2] *Huesker Synthetic GmbH., hasslacher@huesker.com*
Stefan Niewerth[3]
[3] *Huesker Synthetic GmbH., niewerth@huesker.de*

Rezime: *U današnje vreme, površine potencijalno kontaminirane u značajnoj meri, pokrivaju se vodonepropusnim betonom ili asfaltnim slojevima u cilju prikupljanja zagadjene ocedne vode. U ovom radu, autori žele da predstave koncept "pasivnog in-situ tretmana" pomoću barijera za zagadjujuće materije načinjenih od geotekstilnih materijala velike površine, umesto koncepta odvodjenja ocedne vode i njenog centralizovanog tretmana na postrojenjima za prečišćavanje. Glavna komponenta pasivnog in-situ tretmana, na način definisan ovde, je troslojni geokompozit sa jezgrom od absorbenta za naftu. Geotekstili mehanički stabilizuju sorbente kao što su aktivni ugalj ili sredstva koja vezuju naftu koji se nalaze u sendviču izmedju njih. U radu će biti predstavljeni rezultati istraživačkog projekta osmišljenog i implementiranog u saradnji Univerziteta primenjenih nauka u Munsteru, grada Munstera i kompanije Huesker Synthetic GmbH, sa različitim tzv. aktivnim geokompozitima za koje je ispitivana je sposobnost da zadrže ukupne suspendovane čestice (TSS) i ostale polutante prisutne u ocednoj vodi sa puteva.*

Uz to u radu će biti predstavljene dve studije slučaja u velikoj razmeri:

- *izgradnja filtracionog bazena za ocednu vodu u Finskoj i*
- *konstrukcija od kontaminiranog tla – vrednog gradjevinskog materijala, a ne otpada.*

Ključne reči: *aktivni geokompoziti, zaštita podzemnih voda, infrastruktura, nove tehnologije*

PASSIVE IN-SITU TREATMENT FOR RUNOFF WATER WITH ACTIVE GEOCOMPOSITES

Marija Bakrač[4]
[1] *Geoestetika d.o.o., mbakrac@geoestetika.rs*
Thomas Hasslacher[5]
[2] *Huesker Synthetic GmbH., hasslacher@huesker.com*
Stefan Niewerth[6]
[3] *Huesker Synthetic GmbH., niewerth@huesker.de*

Abstract: *Nowadays, surfaces with potentially significant contamination are sealed with impermeable concrete or asphalt layers to collect the carrier medium of the substances of concern – the runoff. In this paper authors want to introduce concept of "passive in-situ treatment" using large-area, permeable contaminant barriers made of geotextiles to overcome the concept of piping runoff water and centralized treatment in wastewater treatment plants. The main component of the passive in-situ treatment system as defined here, is a three-layer geocomposite with oil absorbent core. Geotextiles mechanically stabilize sorbents such as activated carbon or oil binders in a sandwich fabric. The paper will present results of a research project designed and implemented by Münster University of Applied Sciences, the City of Münster and*

HUESKER Synthetic GmbH, with various so-called active geocomposites tested for their retention capacity against total suspended soil (TSS) and other pollutants present in stormwater runoff from roads.

In addition to this the paper will present 2 large-scale case studies:

- *Construction of a filtration basin for road runoff in Finland and*
- *Earth structures with contaminated soils – valuable construction material instead of waste.*

Keywords: *active geocomposites, groundwater protection, infrastructure, new technologies*

1. UVOD

U cilju zaštite okoline od kontaminirane ocedne vode sa saobraćajnih površina, one se asfaltiraju ili betoniraju a ocedna voda se kontrolisano prikuplja i pravilno izvedenim sistemima kanala odvodi na dalji tretman pre ispuštanja u recipijent.
Ovakav način zaštite terena i podzemnih voda od kontaminacije, osim visokih troškova i na nekim lokacijama nedostatka uslova za prečišćavanje prikupljene ocedne vode, smanjuje zelene površine i povećava temperaturu vazduha naročito u gradovima. Imajući u vidu nedostatke opisanog standardnog postupka jasno se nameće potreba za iznalaženjem alternativnih rešenja zaštite okoline od kontaminiranih ocednih voda. Novi materijali pružaju mogućnost da se ovaj problem reši na način kojim se zaštita terena i podzemnih voda postiže na pametan način i sa smanjenim troškovima. U ovom radu autori će predstaviti geokompozitni material velike površine koji na licu mesta vrši filtraciju ocedne vode uz istovremeno zadržavanje zagadjujućih materija u svom jezgru. Ovakvi **aktivni geokompoziti** predstavljaju fabrički proizveden sendvič iz tri sloja od kojih srednji sloj predstavlja aktivno jezgro dok su gornji i donji sloj od geotekstila. Aktivno jezgro izradjuje se od materijala koji upijaju naftu i naftne derivate, aktivnog uglja ili materijala koji za sebe vezuju teške metale i radioaktivne elemente. Kombinovanjem vrsta aktivnog jezgra moguće je proizvesti aktivni geokompozit prilagodjen tipu zagadjenja na specifičnoj lokaciji. Kako će aktivno jezgro ovog kompozitnog materijala propustiti vodu a istovremeno zadržati suspendovane čestice koje su nosioci kontaminacije, uticaj na prirodne tokove vode je minimalan. Uz to ovakvi geokompoziti velike površine, jednostavno se polažu i lako uklapaju u novu ili postojeću infrastrukturu. Mogućnosti primene aktivnih geokompozita su brojne, ali će tema ovog rada biti prventsveno njihova primena u kanalima i retenzionim bazenima pored saobraćajnica.

2. AKTIVNI GEOKOMPOZITI

Geokompoziti proizvedeni od dva sloja geotekstila izmedju kojih se fabrički ugradjuje jezgro od aktivne supstance u granulama ili prahu sa ciljem sprečavanja širenja kontaminacije nazivaju se aktivni geokompoziti. Radi se o materijalima u rolnama koje se lako transportuju, ugradjuju, seku ili nastavljaju, ali i po potrebi uklanjaju i odlažu bez opasnosti od naknadnog ispuštanja ili širenja zagadjenja. Dok geotekstil služi kao nosač i zaštita, aktivna komponenta u jezgru trajno vezuje zagadjujuće materije onemogućavajući širenje kontaminacije putem vode ili vazduha.
Geotekstili mogu biti tkani ili netkani, a njihove tehničke karakteristike kao npr. nosivost na zatezanje, izduženje, propustljivost, otpornost na probijanje i masa biraju se u skladu sa potrebama specifičnog projekta. Tako aktivni geokompoziti mogu biti proizvedeni kao plutajući za uklanjanje zagadjenja sa vodene površine, ili takvi da tonu i sprečavaju širenje zagadjenja sa dna ili obale, kao i obrnuto. Uobičajena trajnost geotekstila je 100 god. u normalnim uslovima tj. pri pH vrednosti tla 4-9 i temperaturi do 25^{o}C. Za razliku od bentonitskih membrana koje su takodje troslojni materijali sa bentonitskim prahom ili granulama izmedju dva sloja geotekstila i koje imaju koeficijent vodopropusnosti od $3x10^{-11}$ m/s što ih čini materijalom pogodnim za zaptivanje, propustljivost aktivnih geokompozita je daleko veća i iznosi više od 10^{-5} m/s tako da prirodni tok vode u njihovom prisustvu ostaje neporemećen.

Aktivno jezgro

Kontaminacija vazduha, vode ili zemljišta može poticati od organskih ili neorganskih materija, a najčešće od kombinacije nekoliko različitih tipova zagadjivača.
Imajući u vidu organsko odnosno neorgansko poreklo kao i molekularnu strukturu supstanci rizičnih po zdravlje, biraju se najefikasnije vrste aktivnog jezgra. Za organske zagadjivače najčešće prisutne na infrastrukturnim projektima poput nafte i naftnih derivata (TPH) ili policikličnih aromatičnih ugljovodonika (PAH) idealna aktivna supstanca je aktivni ugalj. Aktivni ugalj u granulama ima vrlo poroznu strukturu i izuzetno veliku površinu na kojoj vezuje zagadjujuće supstance.

Teški metali poput olova ili hroma su neorganski zagadjivači koji i u malim koncentracijama predstavljaju veliku opasnost za zdravlje ljudi. Umesto aktivnog uglja za njihovo vezivanje koristi se npr. prirodni mineral zeolit. Na sličan način mala količina nafte, benzina ili ulja dovoljna je za kontaminaciju velikih količina vode. Za njihovo vezivanje uz istovremeno neometano filtriranje vode koriste se jezgra od hidrofobnih ali oleofilnih netkanih geotekstila, ponovo u sendviču izmedju dva sloja geotekstila za nosivost i zaštitu. Jedan takav geokompozit prkazan je na slici 1.

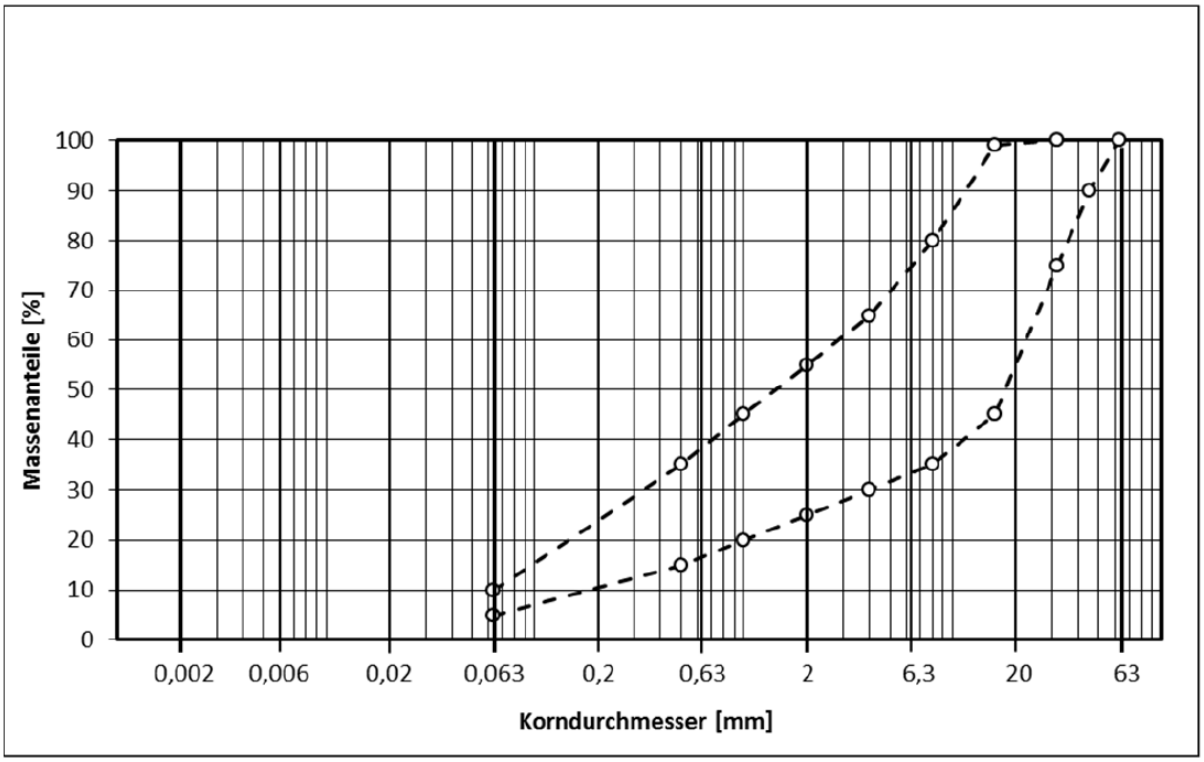
Slika 1. *Aktivni geokompozit za upijanje goriva i maziva*
Izvor; HUESKER Synthetic GmbH

3. REZULTATI TERENSKIH ISPITIVANJA – ulica BUSSO-PEUS u MÜNSTER-u

Kao deo istraživačkog projekta koji je i dalje u toku, a koji je organizovan u saradnji Univerziteta primenjenih nauka u Münsteru, grada Münstera i kompanije HUESKER Synthetic GmbH, ispitivana je sposobnost različitih aktivnih geokompozita da zadrže ukupne suspendovane čestice (TSS) i ostale zagadjivače prisutne u ocednoj vodi sa saobraćajnica. Prvo su radjena laboratorijska ispitivanja sposobnosti materijala da zadrže čestice Millisil W4. Usledila su ispitivanja na terenu organizovana u ulici Busso Peus u gradu Münsteru kako bi se odredio kapacitet zadržavanja kontaminiranih čestica. Terenska ispitivanja koja su započeta u martu 2021. i dalje traju, rezultati se proveravaju na svaka 3 meseca, a planirano je da ispitivanja traju i tokom naredne 3 godine. Rezultati dobijeni laboratorijskim i terenskim ispitivanjima se u velikoj meri poklapaju i u potpunosti su zadovoljavajući. Prosečan stepen zadržavanja ukupnih suspendovanih čestica (TSS) izmeren u laboratorjskim uslovima je 95,41% dok je onaj izmeren na terenu 95,53%. Obzirom da je minimalan stepen zadržavanja TSS-a zahtevan za decentralizovane tretmane ocednih voda, prema Nemačkom institutu za gradjevinarstvo - Deutsches Institut für Bautechnik (DIBt) 92%, moguće je podneti zahtev za odobravanje testiranog sistema koji se sastoji od aktivnog geokompozita i sloja tla koji ga pokriva.

Aktivni geokompozit koji je primenjen i koji je dao navedene rezultate sastoji se od dva sloja crnog netkanog PP geotekstila mase 300g/m2 izmedju kojih je beli netkani PP geotekstil mase 200g/m2 koji sadrži i absorbent za naftu i naftne derivate. Slojevi geokompozita su fabrički vezani jedan za drugi na način koji ne dozvoljava smicanje izmedju slojeva što ga čini stabilnim i prilikom ugradnje pod nagibom. Ovaj proizvod je sertifikovan od strane GÖC eV list (Association of Manufacturers of Tested Oil & Chemical Binding Agents).

Za zaštitu aktivnog geokompozita od mehaničkih oštećenja i UV zračenja korišćen je material pogodan za sadnju, čija granulometrijska kriva je prikazana na slici 2.



Slika 2: *Granulometrijska kriva tla za zaštitu aktivnog geokompozita i ozelenjavanje*
Izvor: Huesker Synthetic GmbH

Primenjeni sistem daje vrlo dobre rezultate u pogledu zadržavanja olova, bakra i hroma obzirom na činjenicu da se oni vezuju za suspendovane čestice.

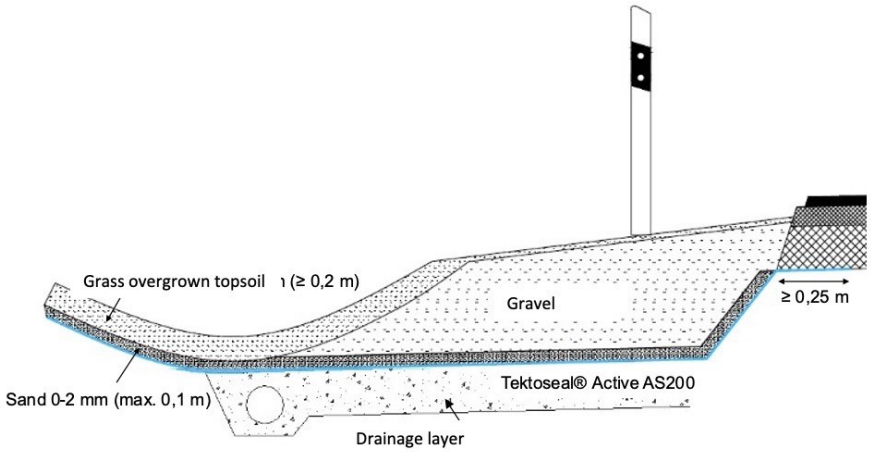
Prosečan procenat zadržavanja metala prikazan je u Tabeli 1. Radi se o tekućim rezultatima obzirom da ovaj pilot projekat i dalje traje.

Tabela 1: *prosečan % zadržavanja metala*

Metali prisutni na putevima	Prosečan stepen zadržavanja pomoću pokrivnog tla i aktivnog geokompozita kompanije HUESKER
Lead (Pb)	**92 %**
Copper (Cu)	**88 %**
Zinc (Zn)	**84 %**

Izvor: Huesker Synthetic GmbH

Poprečni presek opisanog načina pasivnog in-situ prečišćavanja ocednih voda sa saobraćajnica koji se sastoji od aktivnog troslojnog geokompozita od netkanog geotekstila i odgovarajućeg sorbenta prikazan je na slici 3.



Slika 3: *način polaganja aktivnog geokompozita za pasivno in-situ prečišćavanje ocedne vode*
Izvor: HUESKER Synthetic GmbH

4. AKTIVNI GEOKOMPOZITI U RETENZIJI U FINSKOJ

Zaštitu podzemnih voda od zagadjenja prisutnog u ocednoj vodi sa saobraćajnica moguće je postići i njenim prikupljanjem u retenzionim bazenima. I pored postojanja retenzionog bazena na jednoj ruralnoj lokaciji u Finskoj, koji je prikupljao otpadnu vodu sa okolnih saobraćajnica, detektovano je povećano prisustvo derivata nafte i policikličnih aromatičnih ugljovodonika (PAH) u podzemnoj vodi. Prva ideja za rešavanje ovog problema bila je filtriranje ocedne vode pre upuštanja u retenziju, medjutim nije bilo moguće odrediti koja saobraćajnica je glavni izvor zagadjenja. Izabrano rešenje sastojalo se od polaganja dva tipa aktivnih geokompozita po dnu retenzije. Prvo je položen aktivni geokompozit sa jezgrom od aktivnog uglja koji za sebe vezuje PAH zagadjenje. Preko njega postavljen je sloj aktivnog geokompozita sa jezgrom koje zadrži polimer koji vezuje naftu i naftne derivate. U cilju zaštite geokompozita od mehaničkih oštećenja i UV zračenja ugradjen je i drenažni peskovito šljunkoviti sloj.

Na ovaj način postignut je visok stepen zaštite podzemnih voda od zagadjenja, čija trajnost se procenjuje na 30 godina.

5. UPOTREBA KONTAMINIRANOG TLA

U nekim zemljama dozvoljeno je, uz ograničenja u pogledu udaljenosti od podzemnih voda ili uz upotrebu dodatnih zaštitnih hidroizolacionih mera, korišćenje gradjevinskog otpada, šljake, letećeg pepela ili kontaminiranog tla za gradnju npr. nasipa ili zidova za zaštitu od buke.
Ukoliko je nivo kontaminacije veći zahteva se pokrivanje dela konstrukcije izvedenog od kontaminiranog materijala slojem geomembrane koji će sprečiti da zajedno sa padavinama zagadjenje dospe u podzemnu vodu. Primena geomembrane u ovakvim konstrukcijama nosi dodatne probleme poput formiranja klizne ravni i prikupljanja i daljeg tretmana zagadjene ocedne vode.
Ukoliko se umesto geomembrane koja pokriva kontaminirani zemljani materijal, na postojeći nekontaminirani teren položi aktivni geokompozit, on će omogućiti normalnu filtraciju vode u tlo dok će njegovo aktivno jezgro za sebe vezati zagadjenje, u prvom redu katjone metala prisutnih u ocednoj vodi. Aktivne geokompozite moguće je dizajnirati tako da njihova efikasnost bude nesumnjiva tokom upotrebnog veka konstrukcije pa i tako da budu sposobni da za sebe vežu celokupan sadržaj zagadjenja (katjona metala ili drugih supstanci) prisutnih u tlu upotrebljenom za gradnju. Ovako se obezbedjuje zaštita podzemnih voda i nema potrebe za primenom geomembrane ili održavanjem minimalnog rastojanja konstrukcije od podzemne vode.

6. ZAKLJUČAK

Na bazi istraživanja pilot projekta koji i dalje traje, kao i na osnovu rezultata do sada izvedenih projekata, jasno je da aktivni geokompoziti opisani u ovom radu pružaju mogućnost za sprečavanje širenja zagadjenja prisutnog u vazduhu, vodi ili zemljištu na potpuno nov način. Prelazak sa upotrebe betona, asfalta ili geomebrana za sprečavanje širenja zagadjenja, na aktivne geokompozite koji su propusni i za tečnosti i za gasove ali nepropusni za ciljanu vrstu zagadjenja, značio bi i smanjenje negativnog uticaja vodonepropusnih površina u gradovima posebno u slučajevima intenzivnih padavina i poplava što postaje od sve veće važnosti u vreme prilagodjavanja posledicama klimatskih promena. Evidentan je nedostatak regulative koji bi omogućio bržu primenu ovakvih i sličnih inovativnih rešenja na mestima gde su ona moguća i tehnički sigurna, a ekološki i ekonomski povoljnija od klasičnih.

Literatura

[1] Niewerth,S., Wilke, M.: Remediation of contaminated sediments in surface water using active geocomposites, GeoResources, 3 (2021), pp. 7-13.

[2] Niewerth, S.: Permeable Schadstoffbarrieren für Boden- und Gewässerschutz sowie Altlastsicherung [Permeable contaminant barrier for soil and groundwater protection as well as site remediation], Bauingenieur, 11 (2021), pp. 3-4.

[3] Decentralised percipitation treatment with active geocomposites, HUESKER Australia Pty Ltd

THE LADISER LANDSLIDE MITIGATION PROJECT WITH A FLEXIBLE HIGH TENSILE STEEL MESH PROTECTION SYSTEM

Vjekoslav Budimir[1*], Helene Lanter[2], Armin Roduner[3]

[1] Representative office in the Republic of Croatia, Geobrugg AG, Zagreb, Croatia; [*]corresponding author
[2] R&D Department, Geobrugg AG, Romanshorn, Switzerland
[3] R&D Department, Geobrugg AG, Romanshorn, Switzerland

Abstract: *Slope stabilization systems, with meshes made of high-tensile steel wire, have been in use for 20 years and have proven to be reliable systems on loose rock and soil slopes. The optimization of the nailing pattern, thanks to the high load bearing capacity of the system, permits a reduction of the overall costs and represents an economical solution compared to conventional systems such as shotcrete and mild steel wire mesh. Dimensioning can be carried out for each specific geotechnical setting of a slope with a freely available software called Ruvolum. Additionally, this type of protection measure represents an ecological solution compared to classical slope stabilisation works. Indeed, light steel mesh is used instead of concrete for example and an optimised nail pattern can be implemented, which requires less anchor bars and less drilling. The flexible high tensile steel mesh can also be used for landslide site stabilisation in combination with a previously dimensioned anchor grid by a global stability analysis software. This paper presents a landslide case study, in Austria, where flexible high tensile steel wire meshes for slope stabilization were successfully applied.*

Keywords: *Landslide mitigation, high-tensile steel mesh, flexible protection system, Tecco*

1. INTRODUCTION

Slope stabilization systems, with meshes made of high-tensile steel wire, have been in use for 20 years and have proven to be reliable systems on loose rock and soil slopes. The optimization of the nailing pattern, thanks to the high load-bearing capacity of the system, permits a reduction of the overall costs and represents an economical solution compared to conventional systems such as shotcrete and mild steel wire mesh. Dimensioning can be carried out for each specific geotechnical setting of a slope with a freely available software called Ruvolum. Additionally, this type of protection measure represents an ecological solution, when compared to classical slope stabilisation works, as much less material is used on site. Indeed, light steel mesh is used instead of concrete for example and an optimised nail pattern can be implemented, which requires fewer anchor bars and less drilling. The flexible high tensile steel mesh can also be used for landslide site stabilisation in combination with a previously dimensioned anchor grid by a global stability analysis software. This paper presents a landslide case study, in Austria, where flexible high tensile steel wire meshes for slope stabilization were successfully applied, while previously installed concrete rib works failed.
Two sites termed Ladiserstrasse and Serfauserstrasse in close proximity geographically and at the same timescale were affected, following an exceptional series of events in the region of Tyrol. After an explanation of the geology and the trigger factors of the events, the mitigation solution will be presented in detail. To conclude an outlook will be given on the state of the measures four years later, in terms of slope stability and revegetation of the slope.

2. OVERVIEW OF THE REGION

2.1. Geographical setting

The two sites are situated in the Oberinnvalley, south of Landeck, in the region of Tyrol in Austria. The site further north is termed Ladiserstrasse and the site further south corresponds to the Serfauserstrasse (see red rings on Fig. 1).

Vjekoslav Budimir [1] vjekoslav.budimir@geobrugg.com

Figure 1. *The two sites Ladiserstrasse (red ring further North) and the Sefauserstrasse (red ring further South) in the Oberinnvalley, 20 cm resolution*
Source: (tirisMaps, 2018)

2.2. Geology

The Geology of the Oberinnvalley, and particular the two sites in question are dominated by the greyish calcareous Bündnerschiefer formation [4] from the Mesozoic, surrounded by the older Silvrettagneiss formation. The greyish Bündnerschiefer consist of more or less metamorphosed calcareous formations and clayey shists as well as breccias and conglomerates.
The digital terrain model (see Fig. 2), from 2014, when studied in detail, shows disturbances at both sites, which might be indicators of previous movement on the slope. This would then also explain the presence at both sides of mitigation systems, such as concrete ribs, holding the slope in place.

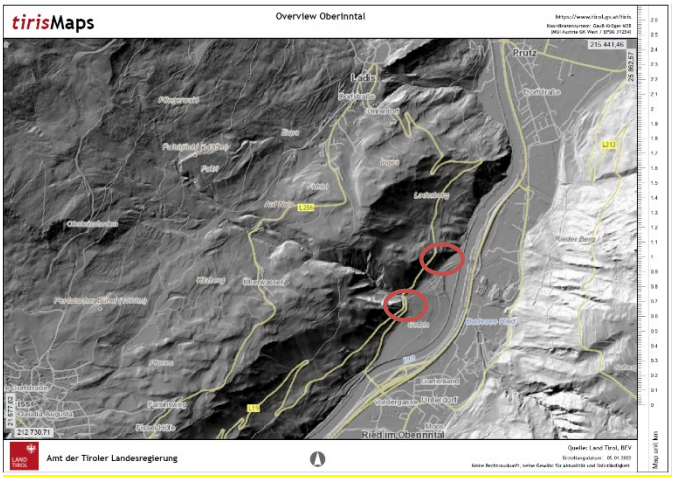


Figure 2. *Digital Terrain Model, 1m resolution*
Source: (tirisMaps, 2014)

3. THE LANDSLIDE EVENTS IN 2018: LADISER AND SERFAUSERSTRASSE

3.1. Weather and circumstances

An exceptional series of natural hazards events marked the end of January 2018 in the region of Tyrol, affecting sites such as the Pillerstrasse, the Vals landslide, the old Reschenstrasse etc …. This series of events was due to a particular set of weather patterns, which took place during end of January and beginning of February. It included a first spell of heavy rain, followed by heavy snowfall. This was then followed by a rise of temperature leading to the thawing of the snow and finally a freeze-thaw cycle set in [6]. A rockfall had already occurred on the Ladiserstrasse between Ried im Oberinntal and Ladis in the last week of January. The road was then buried several meters high by a second event, a major landslip this time, and was closed for several weeks. The rockslide was triggered by extensive creep movements on the slope, which were underway and concerned a large wooded steep slope above and below the state road. The

consensus among experts is that the cause of the rockfall and the slide most certainly lies in these particularly unfavourable combination of weather conditions at the time [7].

3.2. Ladiserstrasse

A few pictures show the extent of the damage, and the digital terrain model highlights the landslide feature.
Part of the slope, from the Bündnerschiefer formation, used to be secured with concrete ribs, which were carried away spectacularly during the slip and caught on video. A larger section of the slope, than previously identified, failed, leading to road closures and the necessity to prepare for mitigation right away.

Figure 3. *Close up of the digital terrain model, where the red ring indicates the area of the landslip in 2018 Source: (tirisMaps, 2014)*

Figure 4. *View from the blocked Ladiserroad, where a large portion of the slope failed after the extreme weather circumstances in January 2018.*

Figure 5. *View from the top of the landslip along Ladiserstrasse*

3.3. Serfauserstrasse

The Serfauserstrasse landslip presents a similar slope failure than along the Ladiserstrasse. Equally concrete ribs existed beforehand and were meant to stabilise the slope.

Figure 6. *Detail of the digital terrain map with unstable slope features, where both rings indicate the slope failure which happened in Winter 2018*
Source: (tirisMaps, 2014)

Figure 7. *View from top of the landslip along the Serfauserstrasse, approximately a month after the event*

Figure 8. *View of the beginning of the works, to clear the road from the landslip mass*

4. MITIGATION SOLUTIONS

Slope failures occur when the shear stress across a plane exceeds the strength of the substrate, which is quite a similar process to a fault rupture [2]. Increase of the shear stress in the ground depends on multiple factors starting with the type of rock, type of underlying rock, stratigraphy, state of weathering to the surrounding hydrogeology. The variation of temperature and precipitation, especially the alternation between extremes can then act as a trigger for ground motion [2].

5. LANDSLIDE MITIGATION WITH HIGH TENSILE STEEL FACING AND NAILING

According to the European Norm EN 14490 (2010), three different types of facings exist for slope stabilisation purposes, divided into hard, soft, and flexible.
Hard facing corresponds generally to shotcrete or concrete structures. These systems generally don't fare well during an earthquake as the stiffer a structure is, the more it gets accelerated and risks damage. Once damaged the protection measure loses its retention capacity.
Soft facings consist of different geogrids, geomembranes, or geotextiles. This type is generally applied for temporary slope coverage but wouldn't work during an earthquake. Although it is anything but stiff, the material presents a very low shear resistance and will tear with strong ground motion.
Also defined as active slope stabilization systems, flexible facings are a combination of steel wire mesh with soil nailing. As the following case studies will show, a type of flexible facing, the TECCO system (high tensile steel wire mesh transmitting the forces of the slope acting on the mesh back into the ground via soil nails), is suited for this type of site.

5.1. Dimensioning of high-tensile steel mesh

Slope stabilisation always starts with the dimensioning of the slope through classical geotechnical calculations. This allows getting a nail grid spacing. Subsequently, the flexible facing can be dimensioned with RUVOLUM®, freely available software, to verify for shallow slope stability (<= 2m) and stability in between the nail grid. Both load cases are termed "sliding off parallel to the slope" and "local wedge-shaped rupture bodies". Detailed explanations can be found in [1].

5.2. Works

The necessary protection measures were planned and executed shortly after the events and were completed by Summer 2018 (see Fig. 9 to 15). First, scaling and profiling of the slope was carried out with walking excavators and a concrete anchor wall of 2'200 m^2 was constructed at the bottom of both slopes. The equipment used over the total construction time were up to 3 walking excavators and two drilling trucks with a reach of 32 m each, and up to 15 people [4].
The chosen solution for the landslide stabilisation became an anchored solution with a high tensile flexible steel mesh cover. An area of approximately 10'000 m^2 was stabilised with an optimised nail grid of 2.5 x 2.5 m. 15'000 meters of IBO anchors, with a diameter of 32, 38 and 51 mm, were drilled, with the length ranging from 3 to 15 m for single anchors [4].
Additionally, 35 m^3 in-situ concrete anchor beams in rock face were installed, partly to secure the concrete ribs still in place. Finally, in Serfaus a rockfall protection fence, with a capacity of 2000 kJ, 4 m in height and a length of 75 m was installed on top of the mesh covered slope.
In the following two sections some pictures highlight the details of the works [4].

5.3. Ladiserstrasse

Figure 9. *View from far of the unstable slope at Ladiserstrasse, where the first part of anchoring and mesh deployment is completed, allowing works underneath to be completed in security*

Figure 10. *A walking excavator in action, drilling the next row of anchors, while being already protected from the top, as the high-tensile steel mesh is already installed*

Figure 11. *Rope access work while installing the high-tensile steel mesh.*

Figure 12. *Stabilisation of the concrete ribs that survived the slope failure, with a concrete anchor beam and high-tensile steel mesh cover. Note the larger spike plates in this section, belonging to the Tecco system, which can take up higher loads*

5.4. Serfauserstrasse

Figure 13. *View from far of the unstable slopes along Serfauserstrasse*

Figure 14. *Drilling truck starting on the stabilisation works at the bottom part of the Serfauserstrasse instability*

Figure 15. *Final works underway at the Serfauserstrasse, with a highlight on the greening mat along the bottom part of the road (see Chapter: Revegetation of the slopes)*

5.5. Finished solution

The works were completed in June 2018 and the following pictures (see Fig. 16 to 20) illustrate the results.

Figure 16. *Orthophoto of the stabilised slope along the Ladiserstrasse*
Source: (tirisMaps, 2018)

Figure 17. *Orthophoto close-up from the stabilised slope along the Serfauserstrasse*
Source: (tirisMaps, 2018)

Slika 18. *Ladiserstrasse seen from the road*
Source: (Google Earth, 2018)

Figure 19. *Serfauserstrasse as seen from the road*
Source: (Google Earth, 2018)

Figure 20. *Serfauserstrasse stabilised slope, with a rockfall barrier, anchored high-tensile steel mesh and greening mats in the bottom part.*

6. REVEGETATION OF THE SLOPES

In steep slopes featuring fine-grained, non-cohesive loose rock or severely weathered rock there is a danger of erosion [1]. for example by rainwater falling directly onto the protected slope. In case of a high intensity and long duration of rain, this can lead to major erosion problems. The problem can be coped with using a full-surface vegetation face. The roots stabilize the surface layer and a substantial quantity of water is stored in the vegetation layer before it starts to flow off. However, it takes time for effective vegetation to form. No vegetation can develop in a slope subject to movements and erosion. It is often necessary, therefore, to provide erosion protection together with the mesh so that erosion and washing-out are prevented for the time being and optimal prerequisites achieved for successful greening later on.
At the site along the Ladiserstrasse a one-season solution for erosion control was chosen by the use of a coconut cover. In Serfaus a multi-season solution for erosion control was chosen, combined with a high-tensile steel mesh. This gives the vegetation a chance to come back over the course of a several seasons, instead of one or two seasons. This has an advantage as the one-season solutions generally decompose quite rapidly and the erosion problem starts from the beginning.

7. CONCLUSION AND OUTLOOK

This case study, with these two sites, highlight how well stabilisation works after a landslide can be carried out with a flexible facing and anchors. Dimensioning of the facing is possible allowing to choose the appropriate mesh for the present load cases. When greening is taken into account right at the beginning of a stabilisation project, a successful revegetation can be achieved. In Spring 2022 the state of the solution, at both sites, will be assessed again and presented.

References:

[1] Cala, M., Flum, D., Roduner, A., Rüegger, R., & Wartmann, S. (2020). *TECCO® Slope Stabilization System and RUVOLUM® Dimensioning Method* (2020th ed.) [E-book]. AGH UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY, Faculty of Mining & Geoengineering. ISBN 978-3-033-03296-5, 267 p.

[2] John.J.Clague and Douglas Stead, (2012). *Landslides types, Mechanisms and Modeling.* CAMBRIGE UNIVERSITY PRESS, ISBN 978-1-107-00206-7

[3] Google Earth Pro, (2021). Street View [Photograph]. Google Earth Pro.

[4] Hammer, W., 1914. *Das Gebiet der Bündnerschiefer im tirolischen Oberinntal.* Jahrbuch d. k. k. geol. Reichsanstalt, 54. Band, 3. Heft.

[5] Berger + Brunner (2018). Land Tirol - Sofortmaßnahme L286 Ladiser Straße und L219 Serfauserstraße. (on line) available at: https://www.bb-bau.at/de/land-tirol-sofortmassnahme-l286-ladiser-strasse-und-l219-serfauserstrasse.html (03.01.2022)

[6] ORF: Felssturz und Hangrutsch durch Schmelzwasser. (2018a). ORF. (on line) available at: https://tirol.orf.at/v2/news/stories/2891423/ (03.01.2022)

[7] ORF: Neuerlich folgenschwere Felsstürze im Oberland. (2018b). ORF. (on line) available at: https://tirol.orf.at/v2/news/stories/2893155/ (03.01.2022)

[8] tirisMaps. (2018). Orthophoto map from the Ladis area [Map]. Region of Tyrol. (on line) available at: https://maps.tirol.gv.at/synserver?user=guest&project=tmap_master (03.01.2022)

[9] tirisMaps. (2014). Digital terrain model of the Ladis area [Map]. Region of Tyrol. (on line) available at: https://maps.tirol.gv.at/synserver?user=guest&project=tmap_master (03.01.2022)

UTICAJ REFERENTNOG PERIODA MJERODAVNE TEMPERATURE NA PRORAČUN DILATACIJA U KOLOVOZNIM KONSTRUKCIJAMA

Milan Marinković[1]
[1] *Fakultet tehničkih nauka, Departman za građevinarstvo i geodeziju, Univerzitet u Novom Sadu*

Rezime: *Proračun kritičnih dilatacija u kolovoznim konstrukcijama zavisi od uticaja saobraćajnog opterećenja, klimatskih uticaja i performansi svakog materijala koji se koristi u slojevima kolovozne konstrukcije. Postoji nekoliko softvera u kojima se može izvršiti proračun dilatacija. U ovom radu je korišćen softver DAMA. Mjerodavne temperature, kao jedan od ulaznih parametara, su vrlo važne i one predstavljaju parametar koji se dobija za period od 30 godina. U ovom radu su analizirani proračuni kolovoznih konstrukcija za dva različita referentna perioda: od 1981. godine do 2010. godine i od 1991. do 2020. godine, i to za lokacije u Beogradu i Novom Sadu. Proračun je izvršen za istu fleksibilnu kolovoznu konstrukciju. Dobijeni rezultati su pokazali da se, sa povećanjem mjerodavne temperature, povećavaju i dilatacije ali za vrlo male vrijednosti. Očekivani vijek trajanja, u smislu broja prelaza standardnih osovina ESO, se isto smanjuje.*

Ključne reči: *Kolovozna konstrukcija, Dilatacije, Meteorologija, Mjerodavne temperature*

THE INFLUENCE OF THE TEMPERATURE REFERENCE PERIOD ON THE STRAINS IN PAVEMENT DESIGN

Milan Marinković[2]
[1] *University of Novi Sad, Faculty of Technical Sciences, Department for Civil Engineering and Geodesy, Novi Sad*

Abstract: *The strains design in pavement structures depends on the influence of traffic load, climatic influences and the performance of each material used in the layers of the pavement structure. There are several software for strains design. DAMA software was used in this paper. The relevant temperatures, as one of the input parameters, are very important and they represent a parameter that is obtained for a period of 30 years. In this paper, pavement design for two different reference periods were analyzed: from 1981 to 2010 and from 1991 to 2020. year, for locations in Belgrade and Novi Sad. The calculation was made for the same flexible pavement structure. The obtained results showed that, with an increase in the reference temperature, the strains also increase, but by very small values. The expected pavement life, in terms of ESAL number, also decreases.*

Keywords: *Pavement structure, Strains, Meteorology, Temperature*

1. UVOD

Kolovozne konstrukcije su tokom eksploatacije izložene saobraćajnom opterećenju kao i klimatskim uticajima. Kada govorimo o proračunu kolovozne konstrukcije onda u obzir uzimamo referentne temperature u odgovarajućem periodu. Prilikom proračuna kolovoznih konstrukcija, u zavisnosti od tipa konstrukcije kontrolišemo dilatacije u odgovarajućim slojevima i to:
- dilatacije zatezanja na dnu asfaltnih slojeva ,
- dilatacije zatezanja na dnu cementom stabilizovanih slojeva,
- dilatacije pritiska na vrhu posteljice.

Tako izračunate dilatacije moraju biti manje od graničnih dilatacija koje su definisane po odgovarajućim metodologijama i formulama koje se baziraju na višegodišnjim istraživanjima.

Proračun dilatacija se vrši putem nekog od programa. U tu svrhu se koriste programi poput Bisar-a, DAMA-e, Everstress-a itd [1]. U ovom radu je korišćen program DAMA. Izvršeno je dimenzionisanje kolovozne konstukcije prema kriterijumu nosivosti za srednje saobraćajno opterećenje. Za usvojenu kolovoznu konstrukciju su zatim izračunate dilatacije za dva različita referentna perioda. Pošto se kao ulazni podaci za

[1] Milan Marinković: milan.marinkovic@uns.ac.rs

program DAMA koriste temperature za referentni period od 30 godina, urađene su uporedne analize za referentne periode: period 1981-2010 i period 1991-2020. Poređenje dilatacija, u zavisnosti od promjene mjerodavne temperature u tridesetogodišnjem periodu, je urađeno za lokacije Novog Sada i Beograda.
Kako su temperature tokom vremena veće tako i ovaj rad ima značaj u tome da se vidi kako će se dilatacije mijenjati u skladu sa povećanjem mjerodavne temperature. Ovo je posebno važno zbog materijala koji se upotrebljavaju u slojevima kolovoznih konstrukcija a prije svega važno je za asfaltne mješavine, tj. bitumen koji je vezivo koje je osjetljivo na temperature. Upravo iz tog razloga se u novije vrijeme uvode razne metode ispitivanja bitumena i asfaltnih mješavina kako bi se dobili pouzdaniji i približniji rezultati onim koji se događaju prilikom eksploatacije.

2. MJERODAVNE TEMPERATURE ZA REFERENTNI PERIOD

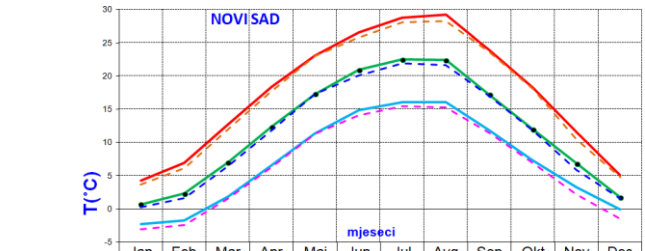
Kao što je spomenuto u uvodu, za proračun dilatacija u kolovoznim konstrukcijama se koriste razni softveri a za potrebe ovog rada je korišćen program DAMA. U program se unose referentne temperature za 12 mjeseci. Referentne temperature se proračunavaju na taj način što se prvo izračunaju srednje dnevne temperature svakog dana i to tako što se izmjere temperature u 7, 14 i 21 sat po lokalnom vremenu. Zatim se proračuna srednja dnevna temperatura po formuli:

$$Tsr = \frac{T_7 + T_{14} + 2 * T_{21}}{4}$$

Tako dobijene dnevne temperature služe da bi se dobio i prosjek za svaki mjesec u godini a zatim i prosjek za svaki mjesec u toku referentnog perioda od 30 godina. Hidrometeorološki zavod Republike Srbije mjeri temperature na 60 stanica. Od ukupno 60 stanica 30 su glavne stanice [2].
Za potrebe ovog rada urađenja je analiza za temperature sa dvije meteorološke stanice: Beograd, Novi Sad (Rimski Šančevi). Podaci o tim stanicama su dati u tabeli 1.

Tabela 1. *Podaci o meteorološkim stanicama za koje je izvršena analiza [2]*

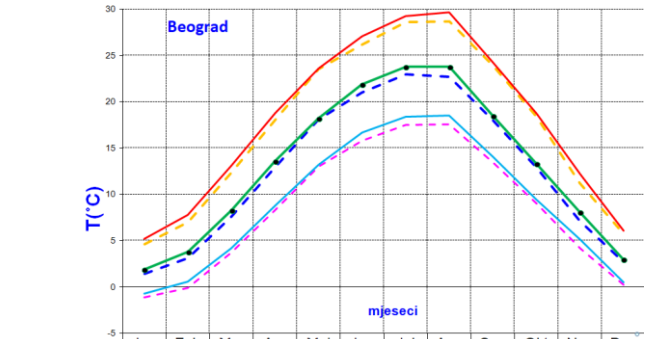
Meteorološka stanica	Nadmorska visina (m)	Geografska širina	Geografska dužina
Beograd	132	44˚ 48’ N	20˚ 28’ E
Novi Sad (Rimski Šančevi)	84	45˚ 20’ N	19˚ 51’ E



	Jan	Feb	Mar	Apr	Maj	Jun	Jul	Avg	Sep	Okt	Nov	Dec
Tmax 91-20	4,3	6,9	12,7	18,4	23,1	26,6	28,8	29,2	23,9	18,3	11,5	5,1
Tmin 91-20	-2,3	-1,7	1,9	6,6	11,4	14,9	16,1	16,1	11,8	7,3	3,2	-0,12
Tavg 91-20	0,7	2,3	7	12,4	17,3	20,9	22,5	22,4	17,2	12	6,8	1,8
Tmax 81-10	3,7	6,1	12	17,7	23	25,8	28,1	28,3	23,6	18	10,5	4,8
Tmin 81-10	-3,1	-2,4	1,5	6,2	11,3	14,1	15,5	15,3	11,4	6,9	2,2	-1,5
Tavg 81-10	0,2	1,6	6,4	11,8	17,3	20,1	21,9	21,6	16,9	11,8	5,9	1,5

Slika 1. *Mjerodavne temperature za referentne periode od 1981 do 2010 godine i od 1991 do 2020 godine za područje Novog Sada*

Na slici 1. su prikazane referentne temperature (srednja, minimalna i maksimalna) za grad Novi Sad i to za referentne periode: od 1981 do 2010 i od 1991 do 2020 godine. Primjetno je da se temperatura povećala tokom vremena i da su temperature za referentni period od 1991 do 2020 godine veće.
Sa navedene slike se može primjetiti da je najveći porast temperature u novembru i to maksimalne i srednje dok je minimalna temperatura najviše porasla u decembru. Što se tiče najmanjeg porasta temperature, vidljivo je da je u pitanju maj i to za srednju, minimalnu i za maksimalnu temperaturu.



	Jan	Feb	Mar	Apr	Maj	Jun	Jul	Avg	Sep	Okt	Nov	Dec
Tmax 81-10	4,6	7	12,4	18	23,5	26,2	28,6	28,7	23,9	18,4	11,2	5,8
Tmin 81-10	-1,1	-0,1	3,7	8,3	13	15,8	17,5	17,6	13,5	9	4,2	0,2
Tavg 81-10	1,4	3,1	7,6	12,9	18,1	21	23	22,7	18	12,9	7,1	2,7
Tavg 91-20	1,9	3,8	8,3	13,6	18,2	21,9	23,8	23,8	18,5	13,3	8,1	3
Tmin 91-20	-0,7	0,6	4,2	8,8	13,2	16,7	18,4	18,5	14,1	9,4	5,1	0,5
Tmax 91-20	5,2	7,8	13,1	18,8	23,6	27,1	29,3	29,7	24,3	18,7	12,2	6,1

Slika 2. *Mjerodavne temperature za referentne periode od 1981 do 2010 godine i od 1991 do 2020 godine za područje Beograda*

Na slici 2. su prikazane referentne temperature za Beograd i to za referentne periode: od 1981 do 2010 i od 1991 do 2020 godine. Kao i za Novi Sad vidljivo je da su mjerodavne temperature veće u referentnom periodu od 1991 do 2020 godine.
Sa navedene slike se može primjetiti da je najveći porast temperature za avgust i to za sve tri vrijednosti temperatura s tim što je maksimalna pored avgusta i u novembru isto porasla a minimalna temperatura je isto porasla i u junu, julu i novembru.

3. DIMENZIONISANJE KOLOVOZNE KONSTRUKCIJE

Kolovozna konstrukcija u ovom radu je dimenzionisana za srednje saobraćajno opterećenje a u skladu sa grupama saobraćajnog opterećenja (Tabela 2). Usvojena je srednja vrijednost u kategoriji srednjeg saobraćajnog opterećenja i to Tm = $1.35*10^6$ ESO од 82 kN.

Tabela 2. *Grupe saobraćajnog opterećenja [3]*

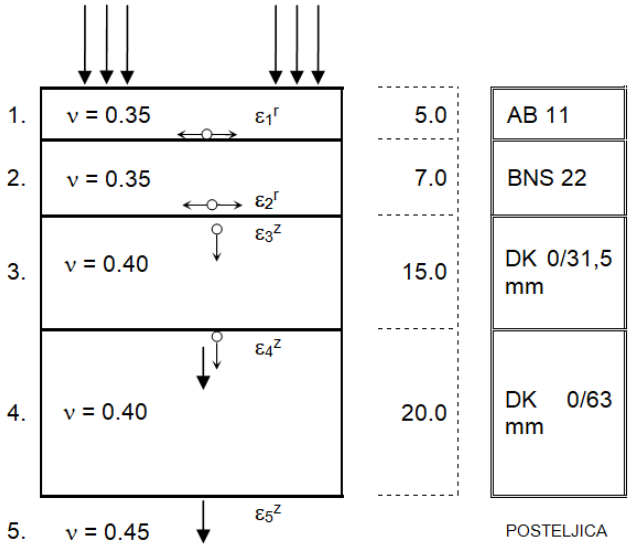
Grupa saobraćajnog opterećenja	**Ukupno mjerodavno osovinsko opterećenje od 82 kN (Tu) u projektnom periodu**		
Vrlo teško	$>7*10^6$		
Teško	$2*10^6$	-	$7*10^6$
Srednje	$7*10^5$	-	$2*10^6$
Lako	$2*10^5$	-	$7*10^5$
Vrlo lako	$<2*10^5$		

Za proračun kolovozne konstrukcije usvojena je nosivost posteljice na osnovu vrijednosti kalifornijskog indeksa nosivosti – CBR = 5%. Proračun je izvršen za fleksibilnu kolovoznu konstrukciju i to prema standardu SRPS U.C4.015.
Usvojena je fleksibilna kolovozna konstrukcija sa sljedećim slojevima:

- AB 11 5 cm
- BNS 22 7 cm
- DK 0/31,5 mm 15 cm
- DK 0/63 mm 20 cm
- Posteljica

4. MATEMATIČKI MODEL KOLOVOZNE KONSTRUKCIJE

Za potrebe programa DAMA formira se ulazni fajl koji se sastoji od raznih parametara. Prvenstveno se unose podaci o saobraćajnom opterećenju, mjerodavnim temperaturama, parametrima svakog sloja poput debljine (h), modula elastičnosti E i Poisson-ovog koeficijenta (ν). Prikaz matematičkog modela usvojene kolovozne konstrukcije je dat na slici 3.



Slika 3. *Matematički model usvojene fleksibilne kolovozne konstrukcije*

Formirani su ulazni fajlovi za usvojenu kolovoznu konstrukciju i to:

- Za lokaciju Novog Sada uz unos mjerodavnih temperatura za referentni period od 1981 do 2010 godine.
- Za lokaciju Novog Sada uz unos mjerodavnih temperatura za referentni period od 1991 do 2020 godine.
- Za lokaciju Beograda uz unos mjerodavnih temperatura za referentni period od 1981 do 2010 godine.
- Za lokaciju Beograda uz unos mjerodavnih temperatura za referentni period od 1991 do 2020 godine.

Cilj ovog rada je da prikaže kako će promjena referentnog perioda za koji se računa mjerodavna temperatura uticati na dobiijene dilatacije koje se dobijaju kroz izlazni fajl koji daje program.
Tokom vremena se dobijaju sve veće temperature i to utiče na povećanje dilatacija u kolovoznoj konstrukciji, dobijenih proračunom u programu, koje se porede sa graničnim dilatacijama. To svakako utiče i na dostizanje zamora mnogo ranije i predstavlja problem jer su materjali u slojevima kolovoznih konstrukcija, posebno bitumen i asfaltne mješavine, osjetljivi na uticaj temperature.
Za sloj drobljenog kamena 0/31,5 mm pretpostavljen je modul elastičnosti od E= 240 MPa dok je za sloj drobljenog kamena 0/63 mm usvojen modul elastičnosti E= 160 MPa. Za asfaltne slojeve program DAMA računa module krutosti prema mjesecima na osnovu zapreminske strukture upotrebljenih asfaltnih mješavina za svaki asfaltni sloj.

5. DISKUSIJA DOBIJENIH REZULTATA

Iz izlaznog fajla su očitane vrijednosti dilatacija zatezanja na dnu asfaltnih slojeva i to za januar i jul jer su tada moduli krutosti najniži i najviši. Dobijeni rezultati su prikazani u tabeli 3. Vidljivo je da su dilatacije zatezanja za pretpostavljenu kolovoznu konstrukciju približno iste u januaru, kada su u proračunu korišćene temperature za referentni period od 1991 do 2020 godine, u odnosu na januar za proračun sa temperaturama za referentni period od 1981 do 2010 godine. Za mjesec jul ta razlika je izraženija. Uglavnom, vidljiva je zakonitost da su dilatacije veće što je veća mjerodavna temperatura. Takođe, po

kriterijumu Shell-a izračunate su i granične (dozvoljene) dilatacije i sve vrijednosti za sve modele kolovoznih konstrukcija su u dozvoljenim granicama. Upoređivanjem vrijednosti dilatacija zatezanja vidljivo je da su, usljed većih mjerodavnih temperatura, dilatacije veće na dnu asfaltnih slojeva u kolovoznoj konstrukciji za lokaciju u Beogradu u odnosu na lokaciju u Novom Sadu.

Tabela 3. *Dilatacije zatezanja na dnu asfaltnih slojeva u usvojenoj konstrukciji za lokacije Novog Sada i Beograda u različitim referentnim periodima*

Lokacija i referentni period	***Mjesec***	***Dilatacije zatezanja na dnu asfaltnih slojeva***
Beograd 1981-2010	*Januar*	*74,95 * 10 $^{-6}$*
	Jul	*200,5 * 10 $^{-6}$*
Beograd 1991-2020	*Januar*	*76,36 * 10 $^{-6}$*
	Jul	*208,2 * 10 $^{-6}$*
Novi Sad 1981-2010	*Januar*	*71,73 * 10 $^{-6}$*
	Jul	*190,0 * 10 $^{-6}$*
Novi Sad 1991-2020	*Januar*	*73,10 * 10 $^{-6}$*
	Jul	*195,6 * 10 $^{-6}$*
Dozvoljene dilatacije prema kriterijumu Shell-a	*Januar*	*121* 10 $^{-6}$*
	Jul	*217* 10 $^{-6}$*

Ista analiza je napravljena za dilatacije pritiska na vrhu posteljice. Ustanovljeno je isto. Povećanjem temperature kroz različite referentne periode dobijaju se veće vrijednosti dilatacija pritiska. Takođe, za iste kolovozne konstrukcije u Beogradu i Novom Sadu dobijene su veće dilatacije pritiska za lokaciju Beograda zbog veće mjerodavne temperature. Rezultati proračuna su prikazani u tabeli 4. Dobijene dilatacije pritiska su poređene sa graničnim dilatacijama prema kriterijumu Shell-a za nivo pouzdanosti od 50%.

Tabela 4. *Dilatacije pritiska na vrhu posteljice u usvojenoj konstrukciji za lokacije Novog Sada i Beograda u različitim referentnim periodima*

Lokacija i referentni period	***Dilatacije pritiska na vrhu posteljice***
Beograd 1981-2010	*470,9 * 10 $^{-6}$*
Beograd 1991-2020	*479,8* 10 $^{-6}$*
Novi Sad 1981-2010	*458,3 * 10 $^{-6}$*
Novi Sad 1991-2020	*465,2 * 10 $^{-6}$*
Dozvoljene dilatacije prema kriterijumu Shell-a (Nivo pouzdanosti 50%)	*821,4 * 10 $^{-6}$*

Na osnovu urađenih analiza dilatacija izračunat je vijek trajanja kolovozne konstrukcije prema teoriji zamora kako bi se sagledali uticaji povećanja temperature na vijek konstrukcije. Vijek trajanja je određen u smislu broja prelaza standardne osovine od 82 kN.

U tabeli 5 je prikazana uporedna analiza za Beograd. Vidljivo je da se usljed povećanja temperature smanjuje očekivani vijek kolovozne konstrukcije. Posmatrajući bitumenom vezane slojeve očekivani vijek se smanjio za oko 110000 prelaza standardne osovine ili za 4,7 %. Ako se posmatraju kriterijumi za vrh posteljice onda je taj pad još veći i iznosi 7,68%.

Tabela 5. *Poređenje očekivanih vijekova trajanja slojeva kolovozne konstrukcije za Beograd*

Kriterijum za zamor	***Mjesec***	***Beograd 81-10***	***Beograd 91-20***	***Procentualno umanjenje***
Dilatacije zatezanja na dnu bitumenom vezanih slojeva	*Januar*	$1.65*10^7$ ESO 82 kN	$1.58*10^7$ ESO 82 kN	4,54 %
	Jul	$2.45*10^6$ ESO 82 kN	$2.34*10^6$ ESO 82 kN	4,70 %
Dilatacije pritiska na vrhu posteljice	*Jul*	$1.76*10^6$ ESO 82 kN	$1.63*10^6$ ESO 82 kN	7,68 %

Tabela 6 daje prikaz poređenja uticaja različitih mjerodavnih temperatura na očekivani vijek trajanja kolovozne konstrukcije za Novi Sad. Posmatrajući bitumenom vezane slojeve vijek se smanjio za oko 100000 prelaza standardne osovine ili za 4,17 %. Kod kriterijuma za posteljicu takođe je vidljiv pad i to 3,67%.

Tabela 6. *Poređenje očekivanih vijekova trajanja slojeva kolovozne konstrukcije za Novi Sad*

Kriterijum za zamor	***Mjesec***	***Novi Sad 81-10***	***Novi Sad 91-20***	***Procentualno umanjenje***
Dilatacije zatezanja na dnu bitumenom vezanih slojeva	*Januar*	$1.83*10^7$ ESO 82 kN	$1.75*10^7$ ESO 82 kN	4,68 %
	Jul	$2.63*10^6$ ESO 82 kN	$2.53*10^6$ ESO 82 kN	4,17 %
Dilatacije pritiska na vrhu posteljice	*Jul*	$1.96*10^6$ ESO 82 kN	$1.89*10^6$ ESO 82 kN	3,67 %

Iz prethodne dvije tabele može se zaključiti da se očekivani vijek trajanja kolovozne konstrukcije smanjuje povećanjem temperatura.

6. ZAKLJUČAK

Uticaji u slojevima kolovoznih konstrukcija se javljaju usljed dejstva saobraćajnog opterećenja i usljed dejstva klimatskih faktora. Dodatno, na dilatacije u kolovoznim konstrukcijama utiču i kvaliteti upotrebljenih materijala. U ovom radu je urađena uporedna analiza različitih referentnih perioda za proračun mjerodavnih temperatura za potrebe proračuna dilatacija u slojevima kolovoznih konstrukcija. Usvojena je ista fleksibilna kolovozna konstrukcija a zatim je napravljen i matematički model kolovozne konstrukcije koji je poslužio za formiranje ulaznog fajla za program za proračun uticaja. Za potrebe ovog rada korišćen je program DAMA. Analizirane su mjerodavne temperature za referentne periode: od 1981 do 2010 godine i od 1991 do 2020. godine. Prvo je uočeno da su temperature za noviji referentni period veće. Proračun i poređenje je rađeno za lokacije Beograda i Novog Sada. Cilj rada je bio da se uoči koliko će povećanje mjerodavne temperature uticati na povećanje dilatacija. Razlog za to je što materijali kolovozne konstrukcije zavise od uticaja temperature. Ovo se posebno odnosi na asfaltne mješavine i na bitumen. Dobijeni rezultati ukazuju da se dilatacije na dnu asfaltnih slojeva i na vrhu posteljice veoma malo povećavaju ukoliko se promjeni referentni period za proračun mjerodavne temperature. Takođe, očekivani vijek trajanja, u smislu broja prelaza standardne osovine od 82 kN, se smanjio.

Zahvale

Ovo istraživanje je podržano od strane Ministarstva nauke, tehnološkog razvoja i inovacija (br. ugovora: 451-03-65/2024-03/200156) i Fakulteta tehničkih nauka Univerziteta u Novom Sadu kroz projekat "Naučnoistraživački i umetničkoistraživački rad istraživača u nastavnim i saradničkim zvanjima Fakulteta tehničkih nauka Univerziteta u Novom Sadu" (br: 01-3394/1).

Literatura

[1] Uzelac, Đ. 2015. *Kolovozne konstrukcije.* Fakultet tehničkih nauka Novi Sad
[2] Republički hidrometeorološki zavod (RHMZ) Srbije (2021). *Meteorološki godišnjak 1*.Klimatološki podaci 2020, Beograd, Srbija, str. 178
[3] SRPS U.C4.010 (1981). Projektovanje i građenje puteva. Određivanje ukupnog ekvivalentnog saobraćajnog opterećenja za dimenzionisanje asfaltnih kolovoznih konstrukcija, Institut za standardizaciju Srbije
[4] SRPS U.C4.015 (1994). Projektovanje i građenje puteva. Dimenzionisanje novih fleksibilnih kolovoznih konstrukcija. Institut za standardizaciju Srbije

PRIMENA SAVREMENIH GEODETSKIH METODA KOD IZRADE TOPOGRAFSKIH PODLOGA ZA POTREBE PROJEKTOVANJA I ODRŽAVANJA PUTEVA

Momir Mitrović dipl.inž.geod.[1] , V.prof.dr Željko Cvijetinović dipl.inž.geod.[2,] , Igor Nedeljković dipl.inž.geod.[3]

[1] Preduzeće za geomatiku MapSoft d.o.o., Ustanička 64, Beograd, momir@mapsoft.rs
[2] Građevinski fakultet u Beogradu, Bulevar kralja Aleksandra 73, Beograd, zeljkoc@grf.bg.ac.rs
[3] Preduzeće za geomatiku MapSoft d.o.o. Ustanička 64, Beograd, igor@mapsoft.rs

Rezime: *Kvalitet i brzina izrade projekta puta i putne infrastrukture u velikoj meri zavisi od istražnih radova u koje ubrajamo i izradu topografskih podloga. Izrada ovih podloga može se značajno poboljšati ako se ima u vidu veliki napredak metoda za prostorno pozicioniranje i prikupljanje i obradu prostornih podataka. Najbolji rezultati se postižu kombinovanjem više metoda prikupljanja prostornih podataka. Optimalan izbor ovih metoda, kao i izbor optimalne tačnosti i nivoa detaljnosti (količine) podataka, predstavlja izazov kod izrade podloga za različite nivoe projektovanja. U radu je dat prikaz savremenih metoda prikupljanja podataka: aerofotogrametrija, LiDAR skeniranje iz vazduha, mobilno kartiranje otvorenih i zatvorenih prostora i terenske metode. Metode su analizirane u pogledu tačnosti, ekonomičnosti, prednosti i mana. Pored standardnih topografskih podloga, razmatrani su i produkti kao što su: oblak tačaka, 3D model i sferne fotografije, a posebno sa aspekta projektovanja korišćenjem CAD/BIM alata, praćenja radova kod izgradnje i izrade BIM/GIS ili Digital Twin modela za održavanje puteva i putne i saobraćajne infrastrukture.*

Ključne reči: *LiDAR, mobilno kartiranje, aerofotogrametrija, digitalno modeliranje terena, ortofoto, topografska podloga, geodezija*

APPLICATION OF MODERN GEODETIC METHODS IN THE PRODUCTION OF TOPOGRAPHIC PRODUCTS FOR THE ROAD DESIGN AND MAINTENANCE REQUIREMENTS

Momir Mitrović MSc in Geodesy[1] , Assoc.Prof.Dr Željko Cvijetinović MSc in Geodesy[2] , Igor Nedeljković MSc in Geodesy[3].

[1] Geomatics company MapSoft d.o.o., Ustanička 64, Belgrade, momir@mapsoft.rs
[2] Faculty of Civil engineering, Bulevar kralja Aleksandra 73, Belgrade, zeljkoc@grf.bg.ac.rs
[3] Geomatics company MapSoft d.o.o., Ustanička 64, Belgrade, igor@mapsoft.rs

Abstract: *The quality and speed of the construction of the roads and road infrastructure largely depends on the investigative works, which also include the production of topographical products. The production of these products can be significantly improved if one takes into account the great progress of methods for spatial positioning and the collection and processing of spatial data. The best results are achieved by combining several methods of spatial data collection. The optimal selection of these methods, as well as the choice of the optimal accuracy and level of detail (amount) of data, is a challenge when creating products for different levels of design. The paper presents modern methods of data collection: aerial photogrammetry, aerial LiDAR scanning, mobile mapping of exterior and interior spaces and field methods. The methods were analyzed in terms of accuracy, cost-effectiveness, advantages and disadvantages. In addition, standard topographic products such as point cloud, 3D model and spherical images were also considered, especially from the aspect of the design using CAD/BIM tools, monitoring construction works and creating BIM/GIS or Digital Twin models for the maintenance of roads and road and traffic infrastructure.*

Keywords: *LiDAR, mobile mapping, aerial photogrammetry, digital terrain modelling, orthophoto, topographic product, geodesy*

1. UVOD

Topografske podloge čine prostornu osnovu za projektovanje u svim fazama projektovanja, od izrade idejnih rešenja pa sve do izrade projekata izvedenog stanja. Kvalitet i brzina izrade projekta puteva i putne infrastrukture umnogome zavisi od kvaliteta i brzine istražnih radova u koje ubrajamo i izradu topografskih podloga. To podrazumeva detaljno ispitivanje i razumevanje pejzaža gde će put biti izgrađen. Ova analiza uključuje procenu različitih geografskih karakteristika kao što su brda, doline, reke i drugi prirodni elementi koji

[1] Autor zadužen za korespodenciju: Momir Mitrović, momir@mapsoft.rs

mogu uticati na dizajn i izgradnju puta. Informacije prikupljene tokom ove analize ključne su za određivanje najpogodnije trase puta, minimiziranje narušavanja životne sredine i osiguranje bezbednosti na putevima.

Svedoci smo eksponencijalnog rasta mogućnost tehnologije prostornog pozicioniranja, instrumenata za prikupljanje prostornih podataka i softvera i hardvera za njihovu obradu na osnovu kojih se izrađuju topografske podloge. U današnje vreme pojednostavljeno je kombinovanje metoda prikupljanja prostornih podataka, od raznih metoda daljinske detekcije, pa sve do klasičnih terenskih metoda. Upravo optimizacija izbora metoda prikupljanja prostornih podataka, sa kontrolom kvaliteta sa aspekta tačnosti i količina podataka, predstavlja izazov u obezbeđivanju topografskih podloga za sve nivoe projektovanja.

U radu su prikazane tehnike prikupljanja podataka, počevši od aerofotogrametrijskog snimanja, preko LiDAR skeniranja iz vazduha i mobilnog mapiranja otvorenih i zatvorenih prostora, pa do terenskih metoda i to sa aspekta tačnosti, ekonomičnosti, prednosti i nedostataka svake od metoda. Pored standardnih tipova topografskih podloga u vidu ortofotoa, digitalnog modela terena i digitalnih topografskih planova, kao njihova dopuna proizvode se još i sferne fotografije, oblak tačaka i 3D modeli koji su posebno optimizovani za projektovanje u CAD ili BIM alatima, praćenje gradilišta tokom izgradnje ili za izradu BIM, GIS ili Digital Twin sistema za održavanje puteva i putne i saobraćajne infrastrukture.

2. PREGLED GEODETSKIH METODA PRIKUPLJANJA PROSTORNIH PODATAKA

2.1. Polarna metoda

Polarna metoda snimanja je u Srbiji masovno primenjivana u periodu između dva svetska rata, od 1921. do 1941. godine. Budući da je polarna metoda snimanja jedna od osnovnih metoda za geodetsko snimanje geometrijskog sadržaja, ona je ostala neprekidno prisutna u geodetskoj praksi. Polarna metoda je doživela značajna unapređenja. Pre svega, osnovu merne tehnike u savremenim uslovima predstavlja totalna stanica, koja je u sebi objedinila merenje uglova i dužina, automatsko memorisanje merenih podataka i niz drugih funkcija koje olakšavaju rad na terenu [1]. Mana metode je što se snimanje radi sa poznatih geodetskih tačaka i što je neophodno da detalj koji se snima mora biti vidljiv sa stanice sa koje se snima. Ovo naročito dolazi do izražaja u jako izgrađenim terenima i terenima sa vegetacijom, jer se zahteva mnogo pomeranja instrumenta što nije tako brzo i jednostavno. Sa aspekta tačnosti, ova metoda je pretrpela ogroman napredak. Tačnost pozicioniranja koja je bila ostvarivana polarnom metodom na osnovu optičkog merenja dužina, bila je oko 10-30cm, zavisno od dužine vizure. Danas se sa savremenim totalnim stanicama pozicioniranje ostvaruje sa tačnošću od oko jednog centimetra. Visoka efikasnost rada postiže se kada se u primeni ove metode koristi GNSS tehnologija za određivanje virtuelnih tačaka za snimanje [14].

Na osnovu prethodno navedenog, može se zaključiti da polarna metoda po karakteristikama tačnosti može biti korišćena za izradu topografskih podloga u svim fazama projektovanja. Međutim, druge metode su efikasnije za premeravanje većih teritorija, tako da se polarna metoda danas najčešće koristi kao dopuna ostalim metodama i za premeravanja mikrolokacija gde je potrebna visoka relativna tačnost (razmera 1:100).

2.2. Metoda globalnog pozicioniranja (GNSS/GPS)

Globalni navigacioni satelitski sistemi (*GNSS - Global Navigation Satellite Systems*) su izazvali svojevrsnu revoluciju u geodetskim metodama prikupljanja prostornih podataka. Većina prethodnih metoda zasnivala se na relativnom merenju u odnosu na tačke sa poznatim koordinatama, dok se korišćenjem ove metode brzo i precizno određuje trenutna pozicija instrumenta u jednom globalnom koordinatnom sistemu. Prvi GNSS dostupan za civilnu upotrebu je bio američki GPS sistem od 2000. godine. Trenutno je u funkciji više sistema od kojih su, pored pomenutog GPS-a, najčešće upotrebljavani BeiDou lansiran od strane Kine, ruski GLONAS, GALILEO Evropske unije, ali i indijski IRNSS, japanski QZSS, itd. Moderni GNSS prijemnici u stanju su da istovremeno koriste signale više GNSS sistema čime se dobija na brzini rada, a što je još važnije i na tačnosti određivanja koordinata [19].

Načelno, imamo četiri metode GNSS merenja i to: *Single Point Positioning (SPP)* - Pozicioniranje u jednoj tački, *Differential Positioning (DGPS)* - Diferencijalno pozicioniranje, *Real-Time Kinematic (RTK)* i *Post-Processing Kinematic (PPK)*. RTK metodom može da se postigne centimetarska tačnost, tako da je pogodna za geodetska snimanja za potrebe projektovanja puteva. PPK metoda je slična RTK metodi, s tom razlikom da se popravke od prijemnika na baznoj stanici ne dobijaju u realnom vremenu, već se precizne koordinate merenih tačaka dobijaju naknadnom obradom.

Pored visoke preciznosti, prednosti GNSS metode su brzina rada i mobilnost, jer su savremeni instrumenti jednostavni za korišćenje, laki za nošenje i nije potrebna velika priprema da bi se počelo sa radom. Mana ove metode je to što je za precizne radove neophodno da prijemnik tokom rada ima otvoreno nebo ili deo otvorenog neba kako bi se mogao primiti signal sa više satelita i time obezbediti neophodna tačnost. Integracijom GNSS prijemnika sa drugim, dodatnim senzorima i uređajima, ova mana se može minimizirati, pa se u tu svrhu koriste ugrađene kamere na GNSS prijemnicima. One omogućavaju merenje koordinata tačaka sa stereo slika u okolini prijemnika, integraciju sa IMU senzorom za merenje sa iskošenim štapom, integraciju sa SLAM baziranim laserskim skenerima za pomoćno lokalno referenciranje od okolnih objekata, itd.

Slično polarnoj metodi snimanja, i GNSS metoda može da se koristiti za izradu topografskih podloga u svim fazama projektovanja, ali zbog toga što su druge metode efikasnije za premeravanje većih teritorija, GNSS metoda se danas najčešće koristi kao dopuna ostalim metodama, kao i za premeravanje manjih lokacija.

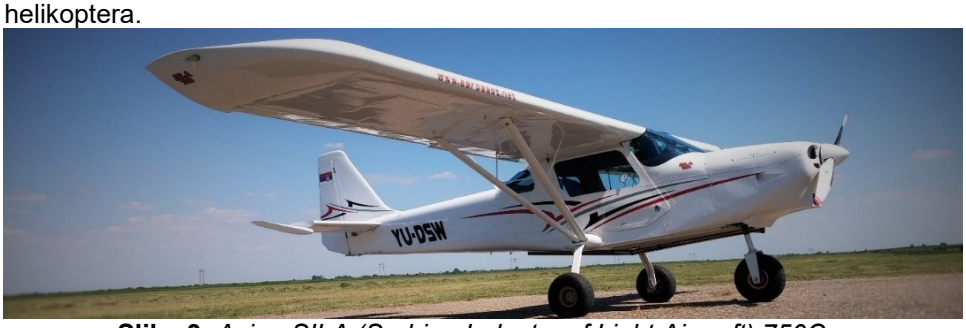
2.3. Digitalna fotogrametrija

Rezultat aerofotogrametrijskog snimanja i georeferenciranja snimaka su parametri pozicije i rotacije svakog snimka iz velikog skupa snimaka u 3D prostoru (terenski koordinatni sistem). Na osnovu ovih snimaka u daljem postupku se izrađuju finalni topografski produkti kao što su: ortofoto, digitalni model terena, topografski plan, 3D model/mesh, itd.

Na tačnost u digitalnoj fotogrametriji najveći uticaj imaju razmera snimka (udaljenost od objekta koji se snima), korišćena kamera i način georeferenciranja snimaka. U fotogrametriji se, naročito kod visoko preciznih radova, najčešće koriste merne kamere poznatih geometrijskih karakteristika (distorzija objektiva, žižna daljina i sl.), ali one imaju i mogućnost kontrole ekspozicije [3]. Na slici 1 prikazane su tri tipične kamere. Levo je prikazana *Microsoft/Vexcel UltraCam Eagle 4.1* kamera velikog formata (tzv. *mutiframe* kamera sastavljena od 8 senzora, 500 MPix, težine oko 60 kg). Ovaj tip kamera se koristi za premeravanje većih teritorija. U sredini je prikazana *PhaseOne iXM-RS150F* kamera srednjeg formata koja se najčešće koristi za snimanja koridorskih projekata (150 MPix, izuzetnih radiometrijskih karakteristika, težina ~1.5 kg). Desno je prikazana kamera *DJI Zenmuse P1* koja predstavlja napredniju kameru za bespilotne letelice (45 MPix , 0.8 kg).

Slika 1. *Levo: Microsoft/Vexcel UltraCam Eagle 4.1 [20] ; Sredina: PhaseOne iXM-RS150F [21]; Desno: DJI Zenmuse P1 [22]*

Kamere u aerofotogrametriji se instaliraju na različite vrste platformi kako bi se dobile fotografije iz vazduha. U zavisnosti od potreba projekta, koriste se različite platforme, a najčešće avioni, helikopteri i bespilotne letelice. Prednost primene aviona i helikoptera u odnosu na bespilotne letelice je u tome što imaju daleko veću autonomiju leta, mogu da podignu sisteme za snimanje veće mase, pa se njima može snimiti veća teritorija korišćenjem sistema boljih performansi. Za manje teritorije korišćenje bespilotnih letelica je jeftinije, naročito od korišćenja helikoptera.

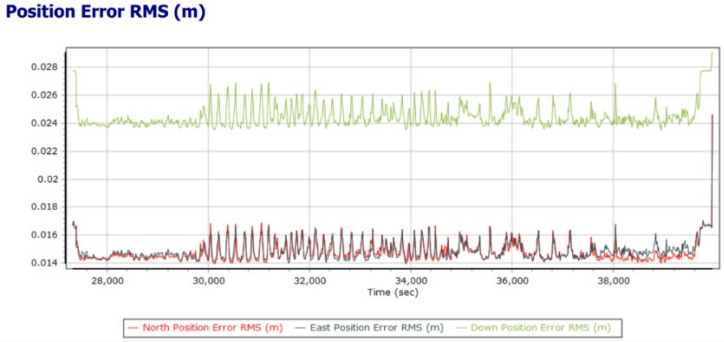


Slika 3. *Avion SILA (Serbian Industry of Light Aircraft) 750C – specijalno projektovan za instalaciju senzora za aero snimanje*

Georeferenciranje snimaka tradicionalno se izvodi korišćenjem blok izravnanja po metodi perspektivnih snopova, a u novije vreme korišćenjem SfM tehnike (engl. *Structure from Motion*). U oba slučaja koristi se

određeni broj tačaka za koje su poznate koordinate u ciljnom koordinatnom sistemu, automatski izmeren veliki broj zajedničkih tačaka na snimcima i podaci GNSS/IMU sistema iz aviona koji registruje podatke tokom aerofoto snimanja. GNSS prijemnik i inercijalna merna jedinica (engl. *Inertial Measurement Unit - IMU*) često se kombinuju kako bi se poboljšala preciznost i pouzdanost pozicioniranja u raznim oblastima primene [2].

Kvalitet GNSS/IMU sistema umnogome poboljšava kvalitet georeferenciranja snimaka, pa samim tim i izlaznih topografskih produkata. Na slici 2 prikazan je grafik tačnosti određivanja trajektorije aviona korišćenjem visokokvalitetnog GNSS/IMU sistema (GNSS: *Trimble AP50*, IMU: *Liton LN200*). Iz grafika se može videti da, bez obzira na brzinu aviona i eventualne turbulencije tokom leta, položajna tačnost određivanja trajektorije aviona (crvena i crna linija) tokom vremena iznosi oko 1.5 cm, dok visinska tačnost određivanja trajektorije aviona (zelena linija) tokom vremena iznosi oko 2.5 cm.



Slika 2. *Grafikon položajne i visinske tačnosti trajektorije aviona u funkciji vremena tokom snimanja [4]*

U tabeli 1 prikazani su rezultati blok izravnanja perspektivnih snopova aerofoto snimaka na projektu aerofoto snimanja obilaznice oko Beograda i Pančeva, sektor C od km596+670 do km627+650. Celokupna trasa projekta pokrivena je sa 2017 snimaka za koje je određeno 18 orijentacionih terenskih tačaka za georeferenciranje (iskorišćene su tačke operativnog poligona). Na osnovu priloženih podataka može se zaključiti da se na osnovu ovako georefenciranih aerofoto snimaka načelno mogu izrađivati topografske podloge kvaliteta koji odgovara i najzahtevnijim fazama projektovanja, kao što su Projekat za građevinsku dozvolu i Projekat izvedenog stanja, uz eventualne dopune nekim od drugih metoda snimanja, u zavisnosti od same teritorije projekta i zahteva projektantskih timova.

Tabela 1. *Standardna devijacija georeferenciranja snimaka na projektu izgradnje obilaznice oko Beograda i Pančeva, sektor C [4]*

	X [m]	Y [m]	Z [m]	Omega [mdeg]	Fi [mdeg]	Kappa [mdeg]
Srednja	0.017	0.017	0.016	1.4	1.3	0.6
Maksimalna	0.033	0.035	0.040	4.5	4.4	8.2
Minimalna	0.011	0.011	0.010	0.8	0.8	0.3

U najveće prednosti fotogrametrije ubrajaju se njena efikasnost i ekonomičnost. U veoma kratkom vremenu mogu se izvesti terenska merenja za veću teritoriju. Na osnovu njih se kasnije, bez obzira na vremenske uslove, mogu izrađivati topografske podloge. To je naročito došlo do izražaja u digitalnoj fotogrametriji gde je veći broj aktivnosti kod obrade snimaka automatizovan. Softverski alati koji se koriste za izradu topografskih podloga su efikasni, pa je tako učinak operatora veći u poređenju sa učinkom operatora terenskih metoda.

Za trodimenzionalnu rekonstrukciju detalja u fotogrametriji koristi se stereoskopsko merenje, tj. detalj mora da bude vidljiv na bar dva snimka kako bi se odredile njegove trodimenzionalne koordinate. Zbog ovoga jedan deo sadržaja koji se nalazi ispod guste vegetacije (drveće, žbunje,…) nije moguće pouzdano određivati ovom tehnikom snimanja. Ovo se delimično prevazilazi snimanjem u periodu sa najmanje vegetacije (kasna jesen ili rano proleće) ili kombinovanjem sa drugim tehnikama snimanja na mestima guste vegetacije. Slični problemi se javljaju i kod primene fotogrametrije u gusto izgrađenim gradskim područjima sa visokim zgradama.

2.4. Lasersko skeniranje (LiDAR)

Tokom poslednjih decenija lasersko skeniranje je postalo jedna od najznačajnijih metoda prikupljanja prostornih podataka. Rezultat laserskog skeniranja je oblak tačaka koji može da se koristi kao finalni produkt, ali se češće koristi kao osnova za izradu drugih topografskih produkata kao što su: digitalni model terena, topografski plan, 3D mesh, itd. Sistem za 3D lasersko skeniranje uglavnom čine tri glavne komponente: LiDAR (engl. *Light Detection and Ranging*) uređaj, uređaj za navigaciju/pozicioniranje i kontrolna jedinica [6][10].

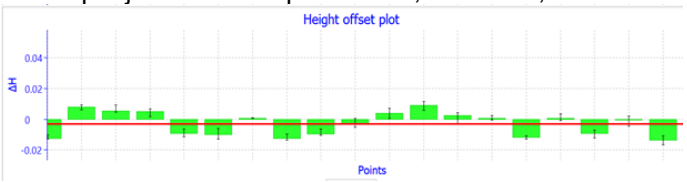
LiDAR uređaj koristi laserske zrake za merenje udaljenosti do objekata i stvaranje trodimenzionalnih modela scene. Sastoji se od izvora laserske svetlosti, detektora za prikupljanje reflektovane svetlosti i mehanizma za rotiranje ili pomeranje laserskog snopa kako bi se skenirala okolina [6]. Uređaj za navigaciju/pozicioniranje služi za određivanje trajektorije kretanja LiDAR uređaja koja je neophodna za georeferenciranje podataka. Za određivanje trajektorije LiDAR uređaja i georeferenciranje oblaka tačaka načelno postoje dva pristupa.

Prvi pristup se primenjuje kada se premerava otvoreno područje gde može da se prima GNSS signal. To su područja koja se snimaju iz vazduha (avionom, helikopterom ili bespilotnom letelicom) ili sa pokretnih vozila sa zemlje (automobil, kvad, čamac itd.). U tom slučaju se za određivanje trajektorije koriste GNSS/IMU uređaji kao i za georeferenciranje aerofoto snimaka. Drugi pristup se bazira na korišćenju SLAM (engl. *Simultaneous Localization and Mapping*) tehnologije za određivanje trajektorije LiDAR uređaja. Koristi se za premeravanje područja bez GNSS signala ili sa slabim GNSS signalom kao što su: tuneli, podzemni objekti, unutrašnjost objekata, urbani kanjoni, itd. [5]. Osnovna ideja SLAM-a je da se tokom pomeranja sistema kroz nepoznat prostor istovremeno sa snimanjem koriste i prikupljeni podaci za određivanje trenutne pozicije uređaja.

Sistem za 3D lasersko mapiranje može imati dodatne senzore, kao što su RGB kamere, termalne kamere ili drugi senzori koji proširuju funkcionalnosti sistema. Sistemi za lasersko skeniranje instaliraju se na različite vrste platformi. To mogu biti platforme za snimanje iz vazduha i platforme za snimanje sa zemlje. Za lasersko snimanje iz vazduha (engl. *Airborne Laser Scanning*) koriste se iste platforme kao i za aerofotogrametrijsko snimanje: najčešće avioni, helikopteri i bespilotne letelice. Najčešće pokretne platforme za snimanje sa zemlje (engl. *Mobile Laser Scanning*) su automobil, dresina, kvad, čamac, ranac za leđa, skeniranje iz ruke, a u poslednje vreme i roboti. Na slici 4 prikazani su tipični skeneri instalirani u avionu (levo) i na automobilu (desno), dok je na slici 7 prikazan ručni laserski skener (koristi se i engl. termin *Personal Laser Scanning*).

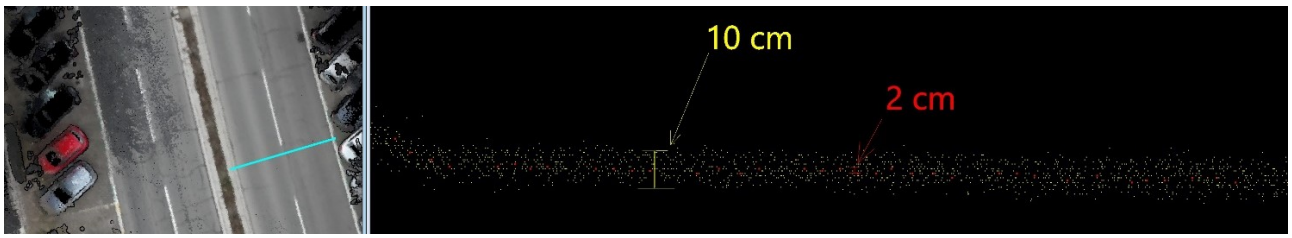
Slika 4. *Teledyne Geospatial Galaxy T1000 laserski skener na žirostabilizatoru Somag GSM3000 (levo) i Teledyne Geospatial CL-360 mobilni skener i NCTech ISTAR Pulsar+ 360 kamera instalirani na automobil (desno)*

Osnovne karakteristike po kojima se određuje kvalitet LiDAR uređaja su: tačnost određivanja udaljenosti i 3D položaja tačaka, domet merenja, brzina skeniranja, mogućnost registrovanja više povratnih signala, količina šuma u merenjima, horizontalni i vertikalni opseg skeniranja i stabilnost rada sistema tokom vremena. Za izradu topografskih podloga za potrebe projektovanja puteva najviše se koriste uređaji najviše klase, takozvani *survey grade* sistemi. Uz pravilan izbor parametara snimanja i obrade podataka korišćenjem ovakvih sistema, bez obzira da li se radi o sistemima za skeniranje iz vazduha ili sa zemlje, moguće je postići 1 do 3 cm tačnosti izlaznih produkata. Na slici 5 prikazan je grafikon odstupanja oblaka tačaka dobijen iz LiDAR skeniranja iz aviona za potrebe izrade digitalnih topografskih podloga za izgradnju autoputa E-763 Beograd – Požega, deonica: Preljina – Požega u odnosu na tačke merene preciznom GNSS statičkom metodom. Iz grafikona se može videti da se visinska odstupanja kreću u rasponu od -1,3 cm do 0,9 cm.



Slika 5. *Grafikon odstupanja oblaka tačaka dobijen iz LiDAR skeniranja iz aviona u odnosu na tačke određene preciznom GNSS statičkom metodom [7]*

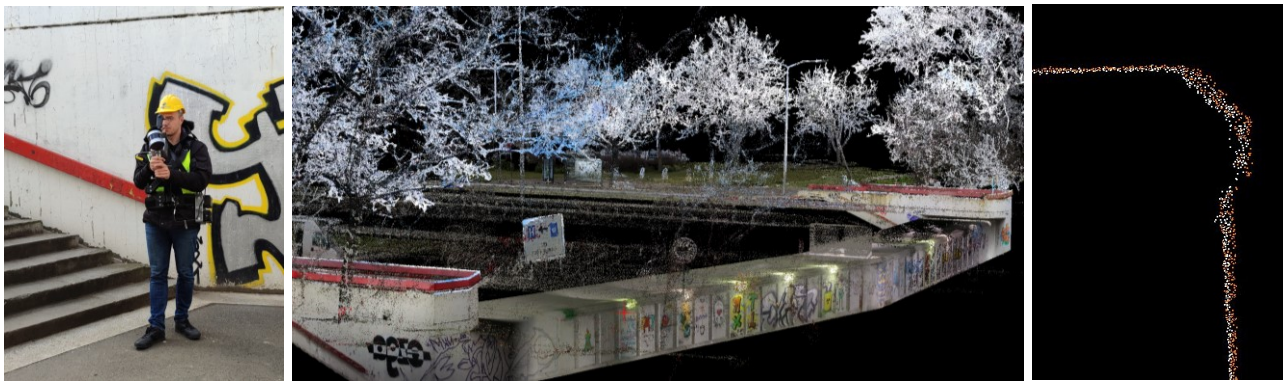
Na slici 6 prikazano je prisustvo šuma u oblacima tačaka koji se odnose na ravnu asfaltnu površinu, a koji su dobijeni iz dva različita snimanja. Oblak sa crvenim tačkama dobijen je LiDAR skeniranjem iz vazduha korišćenjem skenera najvišeg kvaliteta (*Teledyne Geospatial Galaxy T1000*). Oblak sa žutim tačkama dobijen je LiDAR skeniranjem korišćenjem skenera opšte primene instaliranog na bespilotnoj letelici (*DJI Zenmuse L2*). Primetna je razlika u rasipanju tačaka, pre svega zbog manjeg kvaliteta laserskog skenera, ali i zbog lošijeg georeferenciranja. U oblaku dobijenom skeniranjem skenerom visoke klase sa visine od 500 m, rasipanje tačaka je do 2 cm, dok je kod lošijeg skenera, iako je let bio na 90 m, rasipanje tačaka oko 10 cm.



Slika 6. *Uporedni prikaz profila oblaka tačaka dobijenih skeniranjem iz dva izvora na ravnoj asfaltnoj površini*

Na slici 7 prikazan je oblak tačaka podzemnog prolaza ispod autoputa na području Beograda. Skeniranje je izvršeno ručnim skenerom *FJDynamics Trion S1* koji određivanje trajektorije radi korišćenjem SLAM tehnologije. Levo je prikazan operater tokom skeniranja, u sredini deo kolorizovanog oblaka tačaka, a desno poprečni presek oblaka tačaka na kome se vide odstupanja profila podzemnog prolaza iz dva potpuno nezavisna skeniranja. Maksimalne razlike između oblaka tačaka nezavisnih skeniranja iznose oko 2 cm.

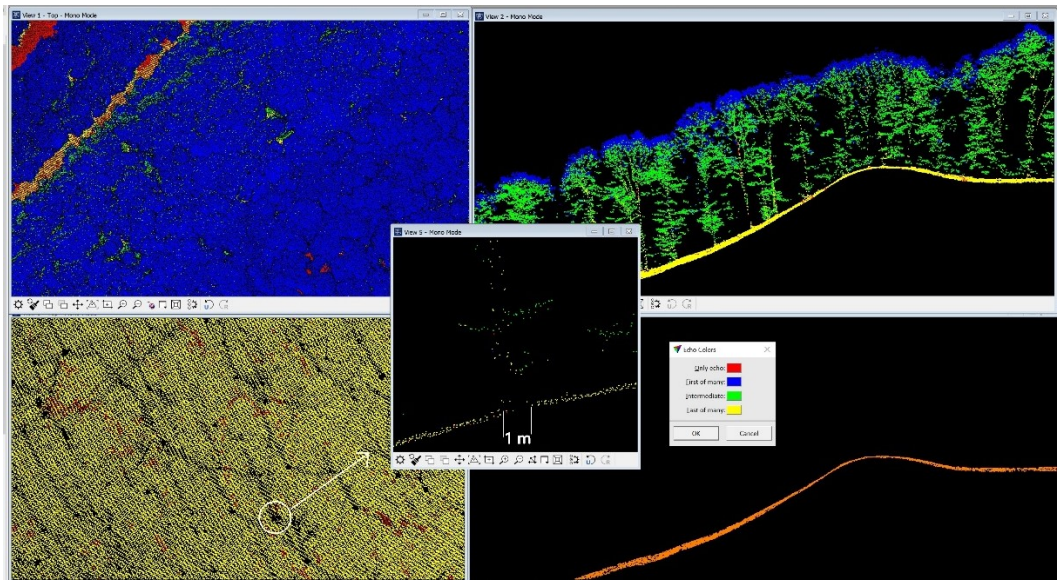
Glavna prednost laserskog skeniranja je to što se na terenu prikupljaju podaci za izradu kompletnog i detaljnog modela, a ne samo prikupljanje karakterističnih geometrijskih elemenata. Iako je retko potrebno modelirati sve objekte/elemente scene, ovo omogućava naknadno modeliranje novih elemenata sa željenom detaljnošću.



Slika 7. *SLAM oblak tačaka (levo: operater na terenu, sredina: kolorizovan oblak tačaka, desno: razlika dva nezavisna skeniranja u profilu podzemnog prolaza)*

Na slici 8 dat je primer penetracije laserskih zraka usred guste Fruškogorske šume skenirane u periodu guste vegetacije za potrebe izrade topografskih podloga za izgradnju Državnog puta IB, deonica: Novi Sad – Ruma. Gornja leva i desna slika prikazuju sve tačke oblaka gde je bojama prikazan prijem više signala od jednog poslatog (plavo - tačke registrovane od prvog odbijenog signala, žuto - tačke registrovane od poslednjeg odbijenog signala, zeleno - tačke registrovane između prvog i poslednjeg odbijenog signala, crveno - tačke koje su imale samo jedan povratni signal). Na donjim slikama se vidi gustina tačaka dobijenih odbijanjem od terena na osnovu čega se može zaključiti da praznine bez tačaka terena nisu veće od nekoliko metara.

Na osnovu navedenog, može se zaključiti da oblak tačaka iz laserskog skeniranja može biti korišćen za izradu topografskih podloga i u najzahtevnijim fazama projektovanja kao što su Projekat za građevinsku dozvolu i Projekat izvedenog stanja, pa samim tim i u ostalim fazama projektovanja koje zahtevaju podloge niže tačnosti.



Slika 8. *Prikaz penetracije laserskih zraka kroz gustu vegetaciju*

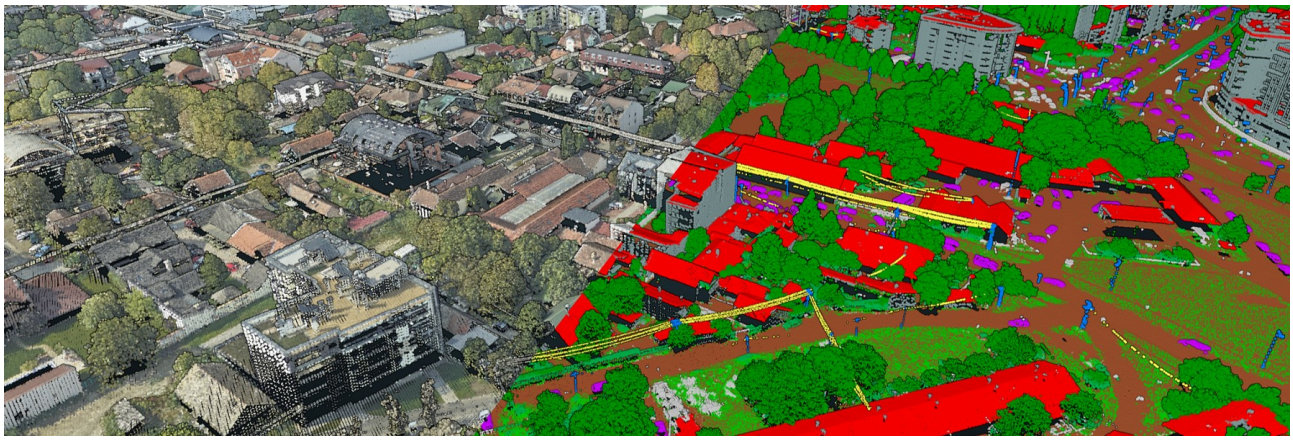
3. VRSTE TOPOGRAFSKIH PODLOGA

3.1. Oblak tačaka

Oblak tačaka je skup tačaka u 3D koordinatnom sistemu kojim se predstavlja struktura neke scene. Pored pozicije, tj. koordinata u 3D prostoru, svakoj tački iz oblaka se tokom same akvizicije ili tokom osnovne obrade najčešće dodeljuju informacije o boji (ukoliko je LiDAR uparen sa RGB kamerom – dobija se kolorizovan oblak tačaka), intenzitetu reflektovanog signala, GPS vreme, itd. Kombinacija 3D prostornih, spektralnih i ostalih karakteristika sadržanih u skupu podataka omogućava fleksibilnost kod daljeg upravljanja oblakom tačaka i izdvajanje potrebnih informacija. Neke od mogućnosti upravljanja i operacija nad oblakom tačaka su: 3D vizuelizacija (Slika 9), merenja u 3D prostoru, generisanje profila, filtriranje po atributima, klasifikacija, i sl.

Slika 9. *Vizuelizacija oblaka tačaka na web pretraživaču za potrebe projekta izgradnje puta Požega - Boljare*

Proces klasifikacije oblaka tačaka dobijenih LiDAR skeniranjem podrazumeva dodeljivanje određene kategorije ili klase svakoj tački na osnovu nekih njenih karakteristika. Standard za klasifikaciju oblaka tačaka definisan je od strane Američkog društva za fotogrametriju i daljinsku detekciju (*American Society for Photogrammetry and Remote Sensing - ASPRS*). ASPRS definiše šest osnovnih klasa za klasifikaciju oblaka tačaka: teren, niska, srednja i visoka vegetacija, objekti i vodene površine.



Slika 10. *Vizuelizacija oblaka tačaka: levo – prikaz po RGB atributima; desno – prikaz po klasama [8]*

Da bi se za potrebe projektovanja puteva izradili topografski produkti krupnih razmera za celokupno područje projekta, neophodno je da se izvrši skeniranje sa većom gustinom od, recimo, 30 tačaka po kvadratnom metru i više, a za neke detalje neophodno je skeniranje i od nekoliko stotina tačaka po metru kvadratnom.

Za potrebe projektovanja i održavanja puteva na osnovu oblaka tačaka najčešće se izrađuju digitalni model terena, 2.5D ili 3D vektorski podaci u formi CAD crteža, GIS lejer ili BIM model. Visok nivo detaljnosti i tačnost oblaka tačaka mogu dobro dočarati fizičke karakteristike lokacija ili objekata koji se teže razaznaju na 2D slikama (ortofotou) ili 2.5D vektorskim crtežima. Zbog toga se sam oblak tačaka često koristi za 3D vizuelizaciju tokom projektovanja ili održavanja puteva. 3D prikaz šireg područja projekta sa jednostavnim korisničkim interfejsom za upravljanje i merenje veoma je koristan u svim fazama projektovanja i održavanja puteva, jer često može zameniti izlazak na teren i pomoći kod prostorne analize šireg područja projekta.

3.2. Ortofoto

Osnovne karakteristike ortofotoa su prostorna rezolucija piksela (veličina piksela u prirodi), geometrijska tačnost (srednja greška položaja piksela), radiometrijski kvalitet (kvalitet boje i kontrasta), prisustvo lokalnih grešaka i uticaja (oblaci, magla, dim, senke i sl.). Na prostornu rezoluciju piksela utiču veličina piksela senzora, žižna daljina objektiva i udaljenost sa koje se snima objekat (visina leta). Kod projektovanja puteva najčešće se koriste prostorne rezolucije od 5-10 cm za Projekte za građevinsku dozvolu i Projekte za izvođenje i rezolucije od 10-20 cm za Idejne projekte i Idejna rešenja, mada se sve češće koristi ortofoto visoke rezolucije (oko 5 cm) za sve faze projektovanja.

Slika 11. *Primer ortofotoa (piksel od 5 cm) ulaznog portala tunela Gotardo u Švajcarskoj [9]*

Geometrijska tačnost ortofotoa zavisi od kvaliteta kamere, tj. kvaliteta (tačnosti) sa kojim su određeni geometrijski parametri kamere i od stabilnosti tih parametara, ali i od kvaliteta georeferenciranja snimaka i kvaliteta digitalnog modela terena (DMT) ili digitalnog modela površi (DMP) na osnovu kojih se radi ortorektifikacija snimaka. Ukoliko se koriste merne sertifikovane kamere i proces georeferenciranja radi uz poštovanje mera kontrole kvaliteta, najveći uticaj na geometrijsku tačnost ima kvalitet DMT-a ili DMP-a.

Obzirom na vrstu digitalnog modela koji koristimo za izradu ortofotoa poznajemo dve vrste ortofotoa: tzv. tradicionalni (najčešće se koristi samo termin ortofoto) i pravi (*true*) ortofoto. Tradicionalni ortofoto se izrađuje korišćenjem 2.5D DMT ignorišući trodimenzionalne objekte na terenu (zgrade, drveće, mostovi, itd.). Kao

rezultat dobija se ortofoto u kome su samo tačke na terenu na “pravoj” poziciji, a detalji snimka iznad terena su nagnuti i nalaze se na “pogrešnoj” poziciji tj. ostaju deformisani usled centralne projekcije snimka. Pravi (*true*) ortofoto je nadograđen tradicionalni ortofoto u kome se eliminišu greške nagiba i razlike u projekciji i za objekte iznad površi terena tako što se za njegovu izradu koristi DMP [17].

Slika 12. *Razlika između true ortofotoa (levo) i tradicionalnog ortofotoa (desno) na primeru zgrade Geozavoda u Beogradu [18]*

Ortofoto je veoma rasprostranjen u raznim oblastima primene, kako zbog jednostavnosti korišćenja, tako i zbog bogatstva informacija koje poseduje. Pored toga, ortofoto se veoma brzo izrađuje na osnovu aerofotogrametrijskog snimanja. Obzirom da se za izradu može koristiti automatski generisan DTM ili DSM, moguće je izraditi ortofoto za velike teritorije u veoma kratkom roku (nedelju ili dve za više desetina ili stotina kilometara trase). Korišćenje automatski generisanog DTM-a ili DSM-a bez dodatnih kontrola i popravki može prouzrokovati i greške u geometrijskom kvalitetu ortofotoa, tako da se za izradu ortofotoa za detaljnije faze projektovanja koristi isključivo precizni DTM ili DSM, detaljno proveren i editovan.

3.3. Digitalni model terena

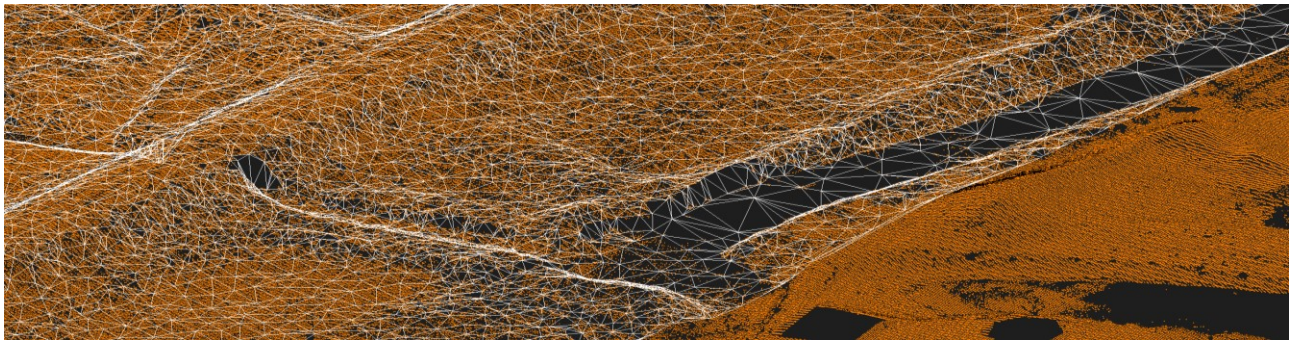
Prikupljanje podataka visinske predstave za potrebe projektovanja puteva tradicionalno je rađeno klasičnim terenskim geodetskim metodama tako što su snimani profili upravno na pravac trase, pri čemu rastojanje između profila zavisi od razmere podloge i tipa terena. Visinsku predstavu na topografskom planu činile se tačke sa ispisanim kotama (visinama), interpolovane izohipse i pojedini detalji za bolje predstavljanje zemljišnih oblika (padnice, vododelnice, vodoslivnice, useci i sl.). Savremeni pristup u velikoj meri promenio je tehnike prikupljanja, način uzorkovanja podataka i način upotrebe podataka visinske predstave terena od strane projektanata, pa samim tim i način predstavljanja podataka.

Terenske geodetske metode snimanja (polarna metoda i GNSS metoda) su veoma precizne, ali su mnogo manje efikasne od aerotogrametrije i laserskog skeniranja iz vazduha [5]. Zato se terenske metode snimanja danas po pravilu koriste za manja područja i za dopunu i kontrolu metoda daljinske detekcije.

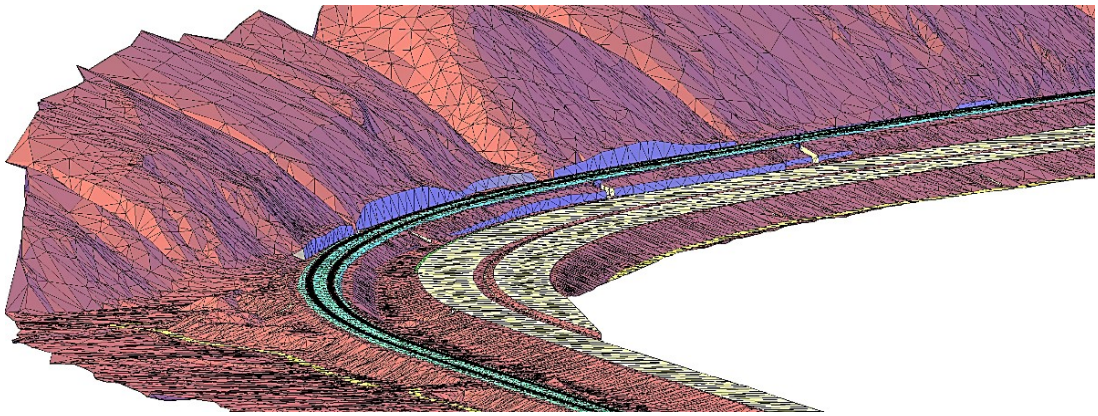
Lasersko skeniranje iz vazduha je danas najefikasnija metoda za prikupljanje DMT podataka. Korišćenje visokokvalitetnog LiDAR skenera i merne aerofotogrametrijske kamere, kao i naknadna obrada podataka omogućavaju optimalan balans između zahteva za kvalitetom podataka, s jedne strane, i efikasnosti i ekonomičnosti, sa druge. Nakon izvršene klasifikacije oblaka tačaka moguće je generisati vrlo kvalitetan DMT. Međutim, zbog izuzetno velike količine podataka, takav DMT je najčešće neupotrebljiv u većini CAD baziranih softvera za projektovanje. Naime, softveri za projektovanje se uglavnom zasnivaju na korišćenju DMT-a sa TIN strukturom. S obzirom da TIN DMT kreiran na osnovu oblaka tačaka često ima preveliku količinu podataka da bi bio efikasno korišćen u CAD okruženju, neophodno je izvršiti generalizaciju podataka. Generalizacija izvornih podataka može se izvoditi automatskim metodama za sitnije razmere ili kombinacijom automatskih metoda sa manuelnim kartiranjem strukturnih linija i karakterističnih tačaka kod krupnih razmera. Na slici 13 prikazani su izvorni podaci tačaka terena oblaka tačaka (braon boja) i TIN generisan na osnovu automatski proređenog skupa tačaka (bela boja). Može se primetiti da braon tačaka ima drastično više i da bi TIN generisan na osnovu njih bio praktično neupotrebljiv u CAD okruženju.

Za izradu DMT-a krupnije razmere (1:500 i 1:1000) neophodno je da se, pored generalizacije tačaka, izvrši i kartiranje prelomnih linija terena (engl. *breaklines*). Prelomne linije označavaju mesta gde površ terena nije glatka, tj. gde nije moguće odrediti normalu na površ terena (recimo, granice useka i nasipa). Iz prethodnog

se može zaključiti da se uzorkovanje podataka DMT-a ne radi po šablonu profila već se biraju karakteristični detalji (karakteristične tačke i prelomne linije) koje najbolje reprezentuju teren u skladu sa zahtevanom tačnošću DMT-a. Prelomne linije se kartiraju na osnovu oblaka tačaka ili, još bolje, na osnovu oblaka tačaka i aerofotogrametrijskih stereomodela čime se obezbeđuje veća pouzdanost identifikacije kartiranog detalja. TIN se dodatno obogaćuje informacijama o tome koji tip podloge predstavlja svaki od trouglova (npr. prirodan teren, beton, asfalt, kanal, rigola, zemljani put, makadam, itd.), što projektantima olakšava dalji rad (Slika 14).



Slika 13. *Primer generalizacije podataka digitalnog modela terena iz oblaka tačaka*



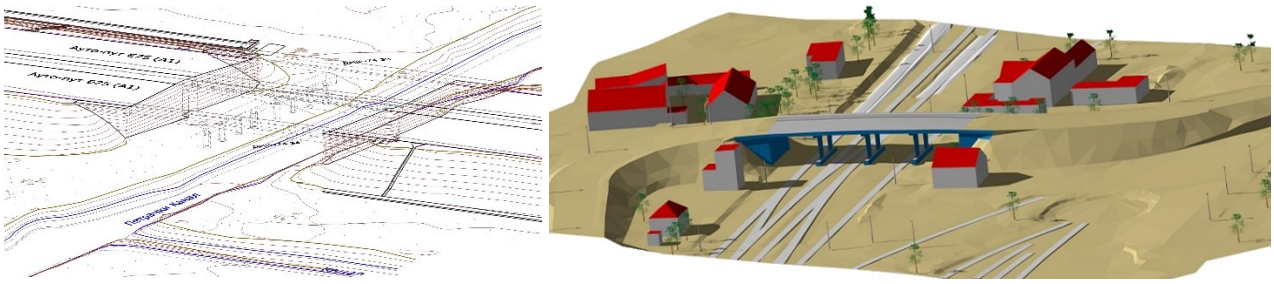
Slika 14. *Primer generisanog TIN DMT-a*

3.4. Digitalni topografski plan

Pod pojmom digitalnog topografskog plana u ovom radu podrazumeva se digitalna predstava topografskog sadržaja krupne razmere u vektorskom obliku. U prošlosti se topografski plan za potrebe izrade projekta puteva izrađivao na analognim podlogama (hamer, astralon, i sl.) tako što su se snimljeni podaci kartirali korišćenjem standardnih topografskih simbola za određene razmere. Izrađivale su se topografske podloge u razmerama propisanim za određene faze izrade tehničke dokumentacije. Danas se podloge izrađuju u vidu jedinstvenih celina (na primer, CAD crtež), bez podela na različite crteže po razmerama ili područjima. Podaci koji čine sadržaj tih podloga prikupljaju se i prikazuju u skladu sa propisima i zahtevima projektantskih timova. Zahtevi projektantskih timova sadrže i one koji se posebno odnose na detaljnije predstavljanje posebnih lokacija (na primer, ukrštanje sa drugim saobraćajnicama ili prugom i sl.) ili se zadaju posebni kriterijumi za određene tipove objekata (na primer, nadvožnjaci, podvožnjaci koji se ne ruše, itd.). Tokom izrade topografskog plana primenom opisanih metoda snimanja jednostavno se kombinuju podaci prikupljeni različitim metodama, pa se tako lako kombinuju i podaci koje karakteriše različita tačnost i nivo detaljnosti.

Projektantski timovi u svojim softverskim alatima sve manje topografski sadržaj analiziraju kao dvodimenzionalnu podlogu, sa pojedinačnim kotama i izohipsama, već sve više koriste 3D sadržaj. Pri tome, detaljnost i tačnost prikupljanja i prikaza tog 3D sadržaja odgovara zahtevima pojedinih projektantskih timova. Pri optimizaciji načina izrade topografskog plana uzimaju se u obzir i faktori ekonomičnosti i brzine izrade, pa se za određena područjima projekta, tipove objekata i faze izrade tehničke dokumentacije vrši optimizacija izbora načina geodetskog snimanja i način prikaza podataka. Kao izlazni rezultat dobija se hibridni digitalni topografski plan koji za određenu fazu projektovanja sadrži sve neophodne elemente koji su geodetski snimljeni i prikazani u jedinstvenom topografskom planu, i koji zadovoljava zahteve svih projektantskih timova

i olakšava im rad sa njihovim softverskim alatima. Pri tome se iz jedinstvenog topografskog plana mogu generisati različiti izlazi za pojedine projektantske timove. Na primer, za potrebe izrade tehničke dokumentacije za zaštitu od buke neophodni su podaci 3D objekata, najčešće sa LOD1 nivoom detaljnosti (osnova i najviša tačka). U tom slučaju se već izrađeni 3D objekti sa LOD2 nivoom automatski generalizuju na LOD1 i tako isporučuju projektantskom timu u željenom formatu. Na slici 15 levo prikazan je topografski plan gde su neki detalji predstavljeni preko 2.5D geometrija, a desno je ceo sadržaj prikazan u vidu 3D modela.



Slika 15. *Primer topografskog plana (levo: kombinacija 2.5 i 3D sadržaja, desno 3D sadržaj)*

3.5. 3D mesh

3D mesh je fotorealistični, trodimenzionalni model predstavljen mrežom površinskih elemenata (engl. *mesh*). Često se na ove elemente „lepi“ i odgovarajuća tekstura dobijena sa snimaka. 3D mesh se najčešće izrađuje na osnovu vertikalnih i kosih aerofotogrametrijskih snimaka veće rezolucije, eventualno u kombinaciji sa oblakom tačaka iz laserskog skeniranja iz vazduha. Visok nivo detaljnosti i tačnost 3D mesh-a mogu obezbediti dobar prikaz i uvid u fizičke karakteristike lokacija ili objekata koji se teže razaznaju na 2D slikama (ortofotou) ili 2.5D vektorskim crtežima. Zbog toga se 3D mesh koristi pre svega za 3D vizuelizaciju tokom projektovanja ili održavanja puteva.

Slika 16. *Primer 3D mesh-a (centar grada Kragujevca)*

3.6. GIS baze podataka i BIM modeli

Projektanti su uglavnom navikli da koriste vektorske podatke, tj. digitalne topografske podloge (planovi) u vidu CAD crteža (DWG/DXF datoteka). Ti crteži u stvari predstavljaju manje-više standardizovani kartografski prikaz prikupljenih podataka. Sadržaj je raslojen po CAD slojevima (lejerima), a za kartografsko oblikovanje i prikaz sadržaja koriste se elementi crteža: tačke, linije regioni, kružnice/lukovi, blokovi (skup elemenata) i sl., uz korišćenje različitih boja, tipova i debljina linija, šrafura i sl. U novije vreme sve se češće javlja potreba za isporučivanjem topografskih produkata pripremljenih za učitavanje u GIS baze podataka (najčešće za potrebe održavanja puteva) ili za učitavanje u BIM softvere.

Za razliku od CAD pristupa, GIS pristup podrazumeva da se elementi prostora modeliraju preko skupova entiteta/objekata sa pratećim atributima. BIM (engl. *Building Information Modeling*) pristup se zasniva na tome da građevinske objekte (zgrade, infrastruktura) treba modelirati preko elemenata/komponenti od kojih su ti objekti sastavljeni. BIM modeli su standardizovani i klasifikovani prema nivou detaljnosti (nivou razvoja, engl. *Level of Detail*, *Level of Development* - LOD) sa kojim se neki element BIM modela predstavlja.

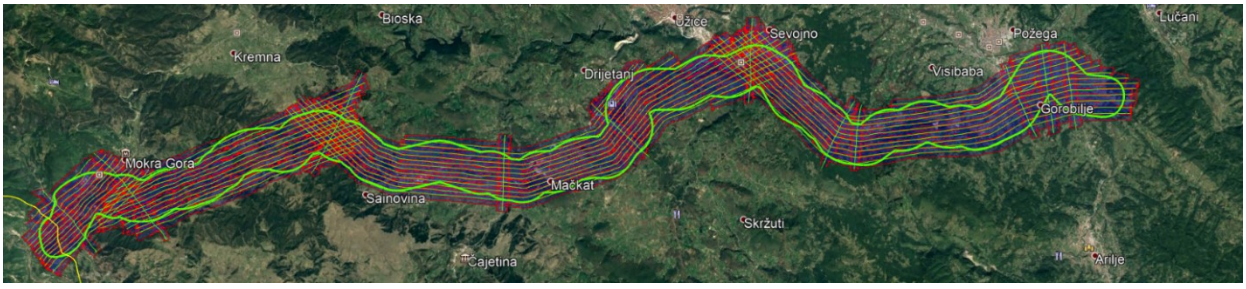
Opisane savremene metode prikupljanja prostornih podataka omogućava brzo i efikasno prikupljanje podataka na osnovu koji se naknadnom obradom efikasno izrađuju GIS baze podataka i BIM modeli. Ovo se naročito odnosi na metodu laserskog skeniranja u kombinaciji sa fotogrametrijskom metodom. Već postoje brojni softverski alati koji omogućavaju da se automatizuju procesi generisanja finalnih podataka na osnovu velike količine izvorno prikupljenih podataka. U ovoj oblasti se može očekivati i veliki napredak, jer primenom algoritama mašinskog učenja i veštačke inteligencije ovi poslovi se umnogome mogu automatizovati. Već sada je prepoznavanje jednostavnijih oblika i njihovih karakteristika (npr. horizontalne i vertikalne signalizacije ili rasvete iz oblaka tačaka) rutinska procedura, ali još uvek izazov predstavljaju složene pojave u prirodi. Očekuje se sve veća primena GIS i BIM modela kod projektovanja i izgradnje puteva i putne infrastrukture i u Srbiji, što će svakako uticati i na to kako se prikupljaju i obrađuju podaci koji čine sadržaj topografskih podloga za projektovanje.

4. PREPORUKE ZA IZRADU TOPOGRAFSKIH PODLOGA KOD PROJEKTOVANJA PUTEVA

Iz poglavlja u kome su opisivane metode snimanja uočeno je da svaka od njih, bez obzira na značajan napredak, ima i neke mane. S obzirom da prostornu osnovu svih metoda čini isti geodetski datum, danas se prikupljeni prostorni podaci veoma jednostavno kombinuju, bez obzira na tehniku prikupljanja.
Iz iskustava stečenih na realizaciji velikog broja projekata izrade topografskih podloga za potrebe izgradnje puteva (autoputeva, državnih i lokalnih puteva) proizašlo je nekoliko principa koji umnogome olakšavaju i ubrzavaju izradu topografskih podloga, ali i povećavaju njihovu pouzdanost:

1. Definisanje prostorne osnove za područje celog projekta

Prva faza na realizaciji geodetskih radova na projektima izrade topografskih podloga na svim infrastrukturnim projektima treba da bude uspostavljanje jedinstvenog koordinatnog sistema inženjerskog objekta. Ovo se mora uraditi na samom početku geodetskih radova, kako bi se svi prikupljeni podaci odnosili upravo na tako definisan referentni koordinatni sistem. Jednom usvojeni transformacioni parametri omogućavaju da se po potrebi, na bilo kom mestu i u bilo kom trenutku, u pojasu projekta primenom GNSS tehnologije mogu postavljati tačke sa kojih se u kasnijim fazama može prenositi projekat na teren, snimati detalji, pratiti i kontrolisati napredovanje realizacije projekta, itd. Na ovaj način se, pre svega, rešava problem prostorne neuniformnosti podataka u fazama istražnih radova, projektovanja, ali i izgradnje. Koordinatni sistem na terenu treba materijalizovati stalnim geodetskim tačkama.



Slika 17. *Snimanje šireg područja projekta Požega - Kotroman*

2. Inicijalno prikupljanje podataka za šire područje projekta

Svedoci smo skraćenja vremena za projektovanje u svim fazama, kao i da se faze projektovanja po deonicama jednog projekta često preklapaju. Iskustva ukazuju da je optimalno da se u cilju skraćenja vremena još u ranoj fazi projektovanja (za potrebe izrade idejnog rešenja ili idejnog projekta) izvrši inicijalno prikupljanje podataka multisenzorskim snimanjem iz vazduha za širu teritoriju projekta. Kvalitet podataka treba da je takav da može da zadovolji zahteve u svim fazama projektovanja. Inicijalno prikupljanje podrazumeva pripremu za multisenzorsko snimanje (aerofotogrametrijsko snimanje i lasersko skeniranje iz vazduha), samo snimanje i georeferenciranje podataka.

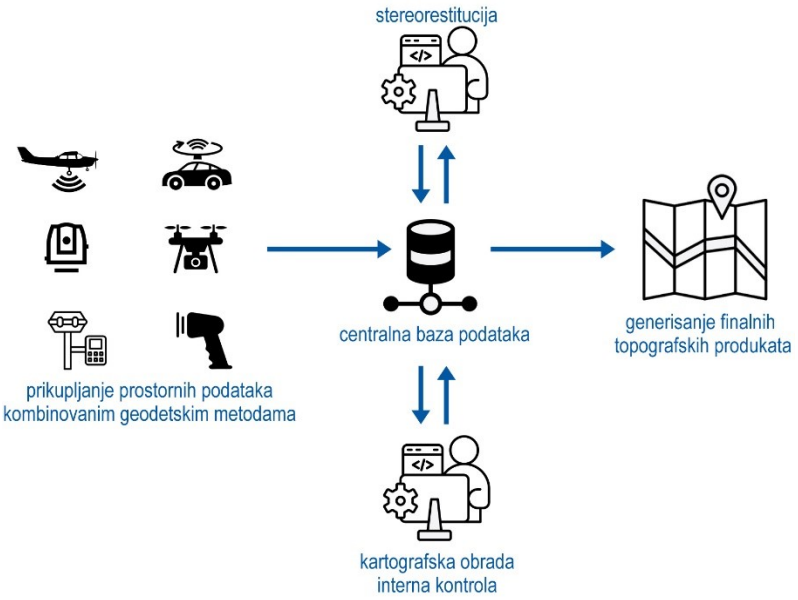
3. Fazna izrada topografskih podloga za delove snimljenog područja po prioritetima

Iz multisenzorskog snimanja se u početnim fazama projektovanja mogu izraditi topografske podloge nižeg kvaliteta automatskim metodama koji će zadovoljiti početne faze projektovanja (izradu idejnog rešenja), a u daljim fazama mogu se izraditi detaljne podloge za celokupnu trasu ili njene delove, ali u obimu koji je

potreban za određenu fazu projektovanja. Neminovno se dešava da je u toku razrade projekta potrebno proširiti područje projekta, tj. da treba uraditi topografske podloge za manje lokacije. Ova proširenja se mogu na jednostavan način i u kratkim rokovima izraditi na osnovu podataka dobijenih iz već postojećeg multisenzorskog snimanja šireg područja projekta.

4. Detaljno dosnimavanje mikrolokacija i specifičnih detalja dopunskim geodetskim metodama

Sav ostali sadržaj koji je sastavni deo topografskih podloga za projektovanje puteva, kao što su mostovske konstrukcije, propusti, podzemni prolazi, ostali podzemni objekti, detalji koji nisu mogli biti snimljeni dovoljnom tačnošću ili pouzdanošću treba snimati dopunskim metodama kao što su: polarna metoda totalnim stanicama, GNSS metoda, lasersko skeniranje sa automobila, lasersko skeniranje SLAM tehnologijom, itd.



Slika 18. *Proces izrade digitalnih topografskih podloga*

Obzirom da se topografske podloge dopunjuju tokom faza projektovanja, što može da traje više meseci, ali i godina, veoma je važno da se podacima upravlja na inteligentan način i da se minimiziraju greške isporuke neadekvatnih topografskih podloga. MapSoft je razvio sistem upravljanja podacima tako što se svi prikupljeni podaci smeštaju u jedinstvenu centralnu bazu podataka, a onda se iz tako skladištenih izvornih podataka generišu izlazni produkti. Bez obzira na izvor i metodu prikupljanja podataka podaci se smeštaju u centralnu bazu uz vođenje računa da u njoj ne postoje redundantni podaci, da svi podaci imaju uz sebe metapodatke o izvoru, epohi i tačnosti, a uz svaku geometriju čuva se i određen broj tematskih atributa koji određuju tip podatka, način vizuelizacije, da li geometrija učestvuje u formiranju DMT-a, itd. Iz centralne baze se po potrebi generišu izlazni produkti kao što su digitalni model terena, digitalni model površi, topografski planovi raznog sadržaja, itd. Ovim postupkom dobijaju se uniformne topografske podloge tokom vremena, sa minimalnom verovatnoćom izrade topografskih podloga na osnovu neadekvatnih, neažurnih podataka.

5. ZAKLJUČAK

Na osnovu izvršene analize savremenih metoda prikupljanja prostornih podataka kod izrade topografskih podloga za potrebe projektovanja i održavanja puteva, jasno je da ove metode otvaraju nove mogućnosti i za one koji prikupljaju te podatke, ali i za sve one kojima te podloge trebaju. Visok kvalitet prikupljenih podataka se danas postiže relativno lako izborom adekvatne metode rada i opreme. Veliki izbor senzora koji obezbeđuju visoku tačnost podataka i efikasnost rada, uz primenu geoinformatičkih alata to značajno olakšavaju. Ključni momenat je optimizacija rada da bi se obezbedila visoka efikasnost i ekonomičnost procedura za procesiranje podataka. Pri tome, potrebno je naći pravi balans između korišćenja automatskih procedura za efikasno procesiranje velike količine podataka i manuelne obrade kojom se postiže najveći kvalitet podloga uz redukciju redundantnih podataka. U suprotnom, korišćenje tih podloga od strane projektanata i izvođača radova može biti znatno otežano. Istovremeno, pojava novih tipova topografskih podloga kao što su oblak tačaka, 3D mesh,

GIS i BIM modeli zahtevaju prilagođavanja i izmene postojećih procedura kod projektovanja, izvođenja i održavanja puteva i putne infrastrukture. Da bi se celokupan proces učinio efikasnijim, neophodno je da se što pre pristupi standardizaciji informatičkih proizvoda i usluga u ovoj oblasti u Srbiji.

Zahvale

Autori izražavaju zahvalnost kompanijama: Saobraćajni institut CIP d.o.o., China Communication Construction Company Ltd. i VS Infra Design d.o.o, na podacima koji su ustupljeni za potrebe izrade ovog rada.

Literatura

[1] Wolf, P. R. and Ghilani, C. D. 2002. *Elementary surveying: an introduction to geomatics*. 10th ed.Upper Saddle River, New Jersey: Prentice-Hall.
[2] Groves, P.D. 2013. *Principles of GNSS, Inertial, and Multisensor Integrated Navigation Systems*. 2nd ed. GNSS Technology and Application Series, Boston; Artech House.
[3] Schenk, T. 2005. *Introduction to photogrammetry*. The Ohio State University, Columbus, 106(1).
[4] MapSoft i CIP 2023. Elaborat realizacije geodetskih radova na izradi topografskih podloga za potrebe izgradnje obilaznice oko Beograda i Pančeva, sektor C. Preduzeće za geomatiku MapSoft i Saobraćajni institut CIP.
[5] Hirt, C. 2016. *Digital terrain models*. In *Encyclopedia of Geodesy*. Springer, Berlin, New York.
[6] Vosselman, G. and Maas, H.-G. 2010: *Airborne and Terrestrial Laser Scanning*, CRC Press - Taylor and Francis Group.
[7] MapSoft i CCCC 2017. Elaborat realizacije geodetskih radova na izradi topografskih podloga za potrebe izgradnje autoputa E-763 Beograd – Požega, deonica: Preljina – Požega. Preduzeće za geomatiku MapSoft i China Communication Construction Company.
[8] MapSoft i CCCC 2022. Elaborat realizacije geodetskih radova na izradi topografskih podloga za potrebe izgradnje mosta u produžetku Bulevara Evrope u Novom Sadu – veza sa državnim putem II A-119. Preduzeće za geomatiku MapSoft i China Communication Construction Company.
[9] MapSoft i Kanton Ticino 2019. Elaborat realizacije geodetskih radova na izradi ortofotoa kantona Ticino Švajcarska. Preduzeće za geomatiku MapSoft i Kanton Ticino Švajcarska.
[10] Shan J. and Toth. C. 2018: *Topographic Laser Ranging and Scanning: Principles and Processing*, CRC Press - Taylor and Francis Group.
[11] Bailey, T., and Durrant-Whyte, H. 2006. Simultaneous localization and mapping (SLAM): Part II. IEEE robotics and automation magazine, 13(3), 108-117.
[12] Rosenberg, P. 1955. Information Theory and Electronic Photogrammetry. Photogrammetric Engineering, 21, 543-555.
[13] Stančić, Z. 1989. Digitalna fotogrametrija – Izazov danas, metoda za sutra. Geodetski list, 7-9, 267-278.
[14] Corumluoglu, O. and Kalayci, I. 2007. The Use of GPSSIT (GPS Virtual Station Technique) with Total Station for The Measurement of Details in Residential Areas. Survey Review, 39(303), pp.54-67.
[15] Toschi, I., Rodríguez-Gonzálvez, P., Remondino, F., Minto, S., Orlandini, S., and Fuller, A. 2015. Accuracy evaluation of a mobile mapping system with advanced statistical methods. ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 245-253.
[16] Kraus, K., Pfeifer, N. 1998. Determination of terrain models in wooded areas with airborne laser scanner data. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 53 (4), pp. 193-203.
[17] Li, T., Jiang, C., Bian, Z., Wang, M., & Niu, X. 2020. A Review of True Orthophoto Rectification Algorithms. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 780.
[18] MapSoft i Beograd na vodi, 2016. Elaborat realizacije geodetskih radova na izradi topografskih podloga za područje Beograda na vodi. Preduzeće za geomatiku MapSoft i Beograd na vodi d.o.o.
[19] Cai, C., Gao, Y. 2009. A Combined GPS/GLONASS Navigation Algorithm for use with Limited Satellite Visibility. Journal of Navigation, 62(4), 671–685. doi:10.1017/S0373463309990154
[20] Vexcel Imaging, 2024. On-line, available at: *https://www.vexcel-imaging.com/wp-content/uploads/2022/10/9_camera-base-quarter-2-1-close_v1-4k_1200x600px.jpg* (17.03.2024)
[21] Phase One, 2024. On-line, available at: *https://www.phaseone.com/wp-content/uploads/2021/01/ixm-rs150mp-1-2400x1000.jpg* (17.03.2024)
[22] DJI, 2024. On-line, available at: *https://dji-official-fe.djicdn.com/dps/fef76936fd00a2e4a5a10b79994f4d1a.png* (17.03.2024)

ПРОБЛЕМИ КОД МАШИНСКЕ ИЗРАДЕ БЕТОНСКЕ РИГОЛЕ У АСФАЛТНОМ КОЛОВОЗУ
(пример Изградња државног пута IБ реда бр. 27 Лозница-Ваљево-Лазаревац, деоница Иверак-Лајковац)

Милован Ћеранић, дипл.грађ.инж.[1]
[1] Коридори Србије доо, ceranicmilovan@gmail.com

Резиме: *Приликом изградње деонице аутопута, радови на одвођењу атмосферске воде са саобраћајнице се обично изводе пре израде асфалтних слојева. Најчешће се за одводњавање саобраћајница користе ивичњаци, сливници и шахтови. Због проблема са збијањем слојева насипа између шахта и сливника, проласка воде поред сливника ако није монтиран уз ивичњак, издигнутих или упуштених сливника, примена ових елемената одводњавања се показала као неефикасна. Зато се, као елементи одводњавања саобраћајнице, све више примењују риголе или ивичњаци са шахтовима који су смештени ван саобраћајнице у трапезна бетонска проширења тзв „нише“. Како се израда ових елемената за одводњавање воде са саобраћајнице изводи непосредно пре израде асфалтних слојева, због брзине рада, све више се примењује израда бетонских елемената машинским путем.*

Кључне речи: *Одводњавање, саобраћајница, шахт, сливник, ригола, проблеми*

PROBLEMS IN THE MACHINING OF CONCRETE GUTTERS IN ASPHALT ROADWAYS
(Example Construction of state road IB row no. 27 Loznica-Valjevo-Lazarevac, section Iverak-Lajkovac)

Milovan Ćeranić, BCE
[1] Koridori Srbije doo, ceranicmilovan@gmail.com

Abstract: *During the construction of a section of highway, work on the runoff of atmospheric water from the road is usually carried out before the construction of asphalt layers. Curbs, gullies and manholes are most often used for road drainage. Mounted along the curb, raised or lowered gutters, the application of these drainage elements has proven to be ineffective. That is why gutters or curbs with manholes are increasingly being used as road drainage elements, which are placed outside the road in trapezoidal concrete extensions called "niches". The production of these elements for drainage of water from the road is carried out immediately before the production of asphalt layers, due to the speed of work, the production of concrete elements by machine is increasingly used.*

Keywords: *Drainage, road, manhole, gully, gutter, problems*

1. УВОД

Приликом израде деонице аутопута, радови на одвођењу атмосферске воде са саобраћајнице се обично изводе пре израде асфалтних слојева. Најчешће се за одводњавање саобраћајница користе ивичњаци, сливници и шахтови. Због проблема са збијањем слојева насипа између шахта и сливника, проласка воде поред сливника, ако није монтиран уз ивичњак, издигнутих или упуштених сливника, примена ових елемената одводњавања се показала као неефикасна. Зато се, као елементи одводњавања саобраћајнице, све више примењују риголе или ивичњаци са шахтовима који су смештени ван саобраћајнице у трапезна бетонска проширења тзв „нише“. Како се израда ових елемената за одводњавање воде са саобраћајнице изводи непосредно пре израде асфалтних слојева, због брзине рада све више се примењује израда бетонских елемената машинским путем.

[1] ceranicmilovan@gmail.com

Слика 1: *Бетонска ригола*
(Изградња државног пута IБ реда бр. 27 Лозница-Ваљево-Лазаревац, деоница Иверак-Лајковац)

2. Проблеми код машинске израде бетонске риголе у асфалтном коловозу

Машинска израда бетонских ригола у саобраћајницама се показала као веома проблематично решење из много разлога:

1. Непостојање бетонске базе извођача радова;
2. Веома узак појас конзистенције свеже бетонске масе;
3. Немогућност прекида бетонирања ригола;
4. Почетак и крај бетонирања у току дана;
5. Проблеми бетонирања ригола око шахт решетки;
6. Сечење спојница на бетонским риголама;
7. Проблем увођења воде са саобраћајнице у риголе;
8. Честа оштећења ригола у току изградње саобраћајнице.

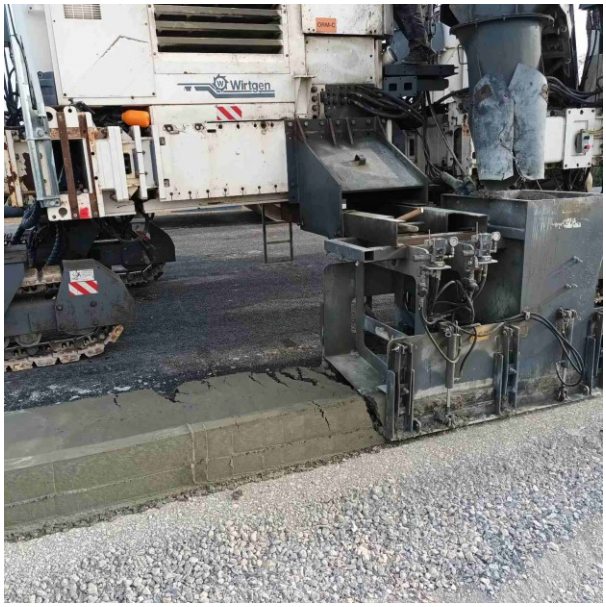
2.1. Непостојање бетонске базе извођача радова

Уколико извођач није поседовао бетонску базу на градилишту или у близини градилишта јављао се велики проблем у добијању задовољавајуће конзистенције свеже бетонске масе за уградњу. Због великих растојања од бетонске базе до места уградње, а врло често и градске вожње, није се могло тачно одредити време потребно за транспорт свеже бетонске масе, па тако ни континуитет уградње бетона у риголе. Из тог разлога су се на бетонској бази додавала хемијска средства „ретардери“ бетону како би се одложило време почетка везивања, Додавање „ретардера“ је повећало конзистенцију свеже бетонске масе за уградњу па је као резултат свега напред наведеног, испитивање конзистенције бетона пре уградње било веома битно за почетак уградње бетона у риголе.

2.2. Веома узак појас конзистенције свеже бетонске масе

Према техничким спецификацијама, конзистенција свеже бетонске масе за уградњу у риголе, слегање бетона методом Абрамсовог конуса, треба да буде између 3 – 5цм, што се у пракси показало као проблематично због немогућности обезбеђења облика тзв. форме. Искуствено се показало да је слегање бетонске масе требало да буде између 1 – 3цм, у неким случајеваима је тај појас још ужи 1 – 2,5цм, што је имало за последицу смањење времена уградње бетона у риголе. С тим у вези се и количина свеже бетонске масе, која се транспортовала миксерима, смањује на 5 - 6м3 по миксеру. Резултат свега наведеног је да се за вредности конзистенције преко 3цм није могао обезбедити облик

(форма) риголе, а за вредности испод 1цм појављивало се одвајање бетонске масе и формирања риголе је било онемогућено.



Слика 2: *Одвајање бетонске масе*

Слика 3: *Уградња свеже бетонске масе*

(Изградња државног пута IБ реда бр. 27 Лозница-Ваљево-Лазаревац, деоница Иверак-Лајковац)

2.3. Немогућност прекида бетонирања ригола

Израда бетонских ригола машинским путем, ако је консистенција одговарајућа, представља бржи начин од мануелне уградње, задовољавајућег квалитета и изгледа. Међутим, сваки прекид бетонирања представљао је проблем. Приликом прекида, свежа бетонска маса остајала је у калупу и машини а у зависности од дужине прекида бетонирања губила је своју уградљивост и обрадљивост. Ако је време застоја било веће, долазило је до појаве великих празнина у риголама и тако изведене риголе су морале бити уклоњене и поново се вршило бетонирање. У случајевима краћег прекида бетонирање појављивале су се пукотине које су мануелно биле поправљане. Мануелна уградња је захтевала неколико радника који су ручно наносили бетон и вршили обраду површине риголе. Такође, много ручног рада и поправки на површинама ригола за последицу ће неизоставно имати смањење трајности ригола а може се довести у питање и постизање захтеване марке бетона због накнадног додавање адитива бетону.

Слика 4: *Ручна обрада свеже бетонске масе*

(Изградња државног пута IБ реда бр. 27 Лозница-Ваљево-Лазаревац, деоница Иверак-Лајковац)

2.4. Почетак и крај бетонирања у току дана

Почетак бетонирања риголе био је проблем. Машина је преко покретне траке убацивала бетон у калуп и након заузимања облика у калупу, почињала је са вибрирањем бетона. Након времена предвиђеног за почетно вибрирање, машина је кретала предвиђеном брзином. У случају да постоји трење између калупа и цементног „млека“, које се појављује на ивицама бетонске масе након вибрирања, дошло би до пријањања цементног „млека“ за калуп и смањења конзистенције бетонске масе, а самим тим, и до смањења уградљивости и обрадљивости. Како би се смањила прионљивост свежег бетона за метални калуп на машини за израду ригола, пре почетка рада наносило се оплатол уље. Пошто је проблем са конзистенцијом бетонске масе и обезбеђење задовољавајуће конзистенције свеже бетонске масе било константно присутно, то је наношење уља за оплату, у првим метрима риголе, био додатни проблем за добијање задовољавајућег облика (форме).

Сличан је случај и са завршетком дневног бетонирања ригола. Бетон, који се уграђује из миксера, због времена проведеног на уградњи почиње да губи своје карактеристике (конзистенција, уградљивост, обрадљивост). Сада није проблем одржања форме (облика) већ је проблем са континуалношћу. Појављивале су се пукотине , које су се ручно обрађивале и којих је било све више и све већих. Неке од њих није било могуће санирати и оне су биле уклоњене са трасе. Из тог разлога се дилатација изводила на 30 метара, што је био учинак бетонирања ригола из једног миксера

6м3 / 0,2м3/м' риголе = 30 метара.

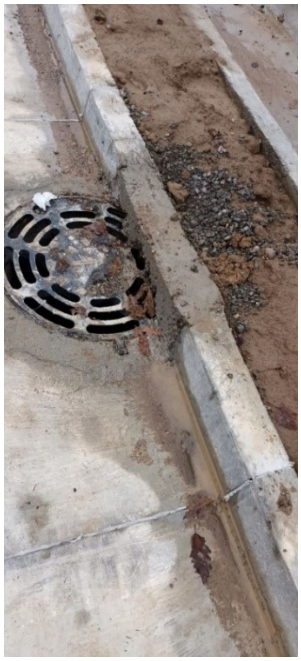
Слика 5*: Машина за израду ригола WIRTGEN SP25*
(Изградња државног пута IБ реда бр. 27 Лозница-Ваљево-Лазаревац, деоница Иверак-Лајковац)

2.5. Проблеми бетонирања риголе око шахт поклопаца

Израда бетонске риголе у зони шахт поклопаца се показала као веома захтеван посао, како у погледу квалитета изведених радова тако и у погледу правца простирања шахтова у саобраћајници.

Пошто је бетонски прстен већег пречника од пречника шахт поклопца, потребно је било обезбедити потребну збијеност каменог материјала, како у саобраћајници тако и у банкини, а такође и потребан нагиб. Након што је монтиран шахт поклопац, приступило се машинском бетонирању риголе.

Из слике 7. може се видети да је висина монтираног прстена већа од висине слоја каменог материјала 0/31,5мм што значи да је дебљина риголе на делу изнад прстена смањена. Напони у бетону ригола, на споју каменог материјала и прстена су били првелики и они су изазивали појаву пукотина у риголама. И спој металног прстена шахт поклопца и риголе је морао бити додатно ручно обрађен јер је требало обезбедити да висина шахт поклопца не прелази коту риголе како би вода несметано улазила у шахту.



Слика 6*: Положај шахт поклопца у риголи*

Слика 7: *Бетонски прстен испод риголе*

(Изградња државног пута IБ реда бр. 27 Лозница-Ваљево-Лазаревац, деоница Иверак-Лајковац)

Одводњавање воде са саобраћајнице се обезбеђује полагањем цеви у банкинама и разделном појасу и постављањем шахтова на одређеним растојањима, обично 30 метара. Приликом постављања шахтова, иако су геометри обележили тачан положај шахте, може доћи до малог померања, на пр. приликом затрпавања и збијања материјала око шахти. То мало померање доводило је до постављања шахт поклопаца у риголи или делом ван риголе, на ивицама риголе или испод дела риголе (слика 6). У том случају постојао је проблем обезбеђења континуитета риголе (слика 7) или проблем отварања шахт поклопаца (слика 6).

2.6. Сечење спојница на бетонским риголама

Сечење спојница је, дефинитивно, проблем код свих бетонских радова у саобраћајницама. Одредити тачно време почетка сечења и не дозволити да бетонски елемент неконтролисано испуца зависило је од много фактора, као на пр. од спољашње температуре, времена почетка везивања бетона, додатака бетону приликом справљања, температуре бетона приликом уградње, дебљине самог елемента. Почетак сечења бетонског елемента је могао да буде после неколико сати а дешавало се да буде и следећег дана. Спојнице су се, на овом пројекту, секле дан након бетонирања и сечење се изводило машином за сечење фуга. На појединим местима су се појављивале пукотине, што због касног сечења бетона а што због проблема око шахт поклопаца.

2.7. Проблем увођења воде са саобраћајнице у риголу

Пошто је технологија извођења радова на саобраћајницама захтевала да се риголе изведу пре извођења асфалтерских радова, то је проблем обезбеђења несметаног отицања воде са саобраћајнице у риголу постао значајан. Како су се појављивали проблеми са дебљинама ригола око шахт поклопаца, а такође и са континуитетом риголе, одводњавање воде на спојевима ригола и асфалта су постали видљиви. Свако задржавање воде на коловозу имае за последицу, након дужег временског периода, оштећења коловоза на том делу и могућност проласка воде у доње слојеве саобраћајнице. Из тог разлога је било потребно да се на спојеве риголе и асфалтних слојева обрати пажња и да се постави заштита од проласка воде низ риголу. На пројекту изградње државног пута IБ

реда бр. 27 Лозница-Ваљево-Лазаревац, деоница Иверак-Лајковац овај поблем је решен тако да је кота асфалта била виша од коте риголе и асфалт је прелазио у риголу и тако је било спречен вертикални пролаз воде низ риголу у доње слојеве конструкције.

Слика 8: Спој асфалта и риголе
(Изградња државног пута IБ реда бр. 27 Лозница-Ваљево-Лазаревац, деоница Иверак-Лајковац)

2.8. Честа оштећења риголе у току изградње саобраћајнице

После израде риголе, изводили су се радови на изради асфалтних слојева финишером. У току ваљања асфалта, долазило је до повременог контакта ваљице и бетонске риголе и оштећења исте. Нарочито је то било изражено код ваљања завршног слоја асфалта.
Дешавало се да дође до оштећења риголе и приликом преласка механизације, у току радова. Због проблема обезбеђења прилаза домаћинствима, на појединим деловима на траси, долазило је до преласка локалних девијација преко трасе саобраћајнице. Исто се дешавало и код прекида локалних путева за прилаз њивама. Прилазни пут је морао бити обезбеђен до тренутка док није био испројектован и изведен нови прилаз домаћинствима и њивама.

3. ЗАКЉУЧАК

Изградња аутопутева и брзих саобраћајница су велике инвестиције за Републику Србију и очекује се да њихов век трајања буде 20 година. Задржавање воде на коловозу представља проблем који смањује век трајања а често доводи и до саобраћајних незгода, нарочито у зимском периоду.
Изградња саобраћајнице са риголама је показала много проблема код самог извођења а постоје проблеми и током експлоатације. Одржавање саобраћајнице, чишћење саме риголе (блато, лишће и др.), у циљу несметаног одвода воде, захтева свакодневну контролу и интервенцију. Како би се што једноставније обезбедио одвод воде са коловоза, изградња „ниша“ се показала као најбоље решење.
Предности изградње „ниша“ су:

- вода дуж ивичњака се одводи до „ниша“, које су ван коловоза, тако да не постоји могућност задржавања воде на коловозу,
- време за извођење ових радова је краће него за израду ригола
- машинска уградња ивичњака, тј. могуће је убрзање радова
- лакше одржавање саобраћајнице у зимском периоду.

Литература

[1] Пројекат за извођење, Државни пут бр. 27: Лозница – Ваљево – Лазаревац, Деоница: Иверак – Лајковац, 2.2 Грађевински пројекат саобраћајнице, Београд, јануар 2022, Институт за путеве АД Београд, Булевар Пека Дапчевића 45

ANALIZA MOGUĆNOSTI POTPUNE ZAMENE BITUMENA U ASFALTNIM MEŠAVINAMA BIO-BITUMENOM SA ASPEKTA MASTIKSA

Stefan Trifunović[1], Johannes Büchner[1], Michael P. Wistuba[1]
[1] Braunschweig Pavement Engineering Center (ISBS), Technische Universität Braunschweig, Beethovenstraße 51b, 38106 Braunschweig, Germany

Rezime: *Sektor izgradnje puteva trenutno u potpunosti zavisi od eksploatacije fosilnih goriva, odnosno proizvodnje bitumena. U Evropi se godišnje potroši 10 miliona tona bitumena za izgradnju i održavanje fleksibilnih kolovoznih konstrukcija. Proizvodnja bitumena zahteva ogromne količine energije i vode. Za proizvodnju jedne tone bitumena potrebno je oko 1.000 litara vode i 15.000 kilovat-časova električne energije, što je ekvivalentno prosečnoj godišnjoj potrošnji električne energije domaćinstva u EU. Štaviše, sektor izgradnje puteva odgovoran je za većinu obimnih tokova otpada u EU. U 2020. godini, količina raspoloživog struganog asfalta narasla je na 85 miliona tona. Ovo istraživanje obuhvata ispitivanje mastiksa asfaltnih mešavina sa dodatkom 50%, 75% i 100% struganog asfalta spravljenih sa standardnim PmB bitumenom i bio-bitumenom. Analiza mogućnosti potpune zamene bitumena izvršena je na osnovu ispitivanja perfomansi mastiksa pri niskim i visokim temperaturama, kao i otpornosti na zamor.*

Ključne reči: bio-bitumen, mastiks, Dynamic Shear Rheometer (DSR)

ANALYSIS OF THE FEASIBILITY OF COMPLETE REPLACEMENT OF FOSSIL-BASED BITUMEN IN ASPHALT MIXTURES WITH BIO-BITUMEN FROM THE ASPECT OF MASTIC

Stefan Trifunović[1], Johannes Büchner[1], Michael P. Wistuba[1]
[1] Braunschweig Pavement Engineering Center (ISBS), Technische Universität Braunschweig, Beethovenstraße 51b, 38106 Braunschweig, Germany

Abstract: *The road construction field is currently completely dependent on the exploitation of fossil fuels, i.e. the production of bitumen. In Europe, 10 million tons of bitumen are used annually for the construction and maintenance of flexible pavements. Bitumen production requires huge amounts of energy and water. The production of one ton of bitumen requires about 1,000 liters of water and 15,000 kilowatt-hours of electricity, which is equivalent to the average annual electricity consumption of a household in the EU. Furthermore, the road construction sector is responsible for most of the volume waste flows in the EU. In 2020, the available amount of reclaimed asphalt pavements has grown to 85 million tons. This research includes the testing of mastic of asphalt mixtures with high content of RAP, 50%, 75% and 100%, made with standard PmB bitumen and bio-bitumen. The analysis of the feasibility of complete replacement of fossil based bitumen was carried out based on testing mastic performance at low and high temperatures, as well as fatigue resistance.*

Keywords: bio-bitumen, mastic, Dynamic Shear Rheometer (DSR)

1. UVOD

Poslednjih godina društvo svedoči velikim promenama na tržištu energenata na teritoriji Evrope. Paralelno, potražnja i zavisnost od fosilnih goriva i dalje je u porastu što negativno utiče na održivost. Evropska komisija u decembru 2019. godine je usvajila paket mera pod nazivom „Fit for 55" [1]. Ovaj paket mera ima za cilj da se emisija gasova koji doprinose efektu staklene bašte smanji za 55% procenata do 2030. godine u odnosu na emisiju tokom 1990. godine. Takođe, ovaj paket mera za zelenu tranziciju i dekarbonizaciju preporučuje zaustavljanje eksploatacije fosilnih goriva. Ovakav radikalan pristup diktira dalje povećanje cena fosilnih goriva u budućnosti [2], i dovešće do smanjene ponude materijala na bazi bitumena u građevinskom sektoru.

Sektor putogradnje koji je trenutno potpuno zavistan od eksploatacije fosilnih goriva, odnosno proizvodnje bitumena, takođe zahteva potrošnju ogromne količine prirodnih agregata. Godišnje se na teritoriji Evropske unije potroši oko 1.000 miliona tona prirodnog agregata, a potražnja i dalje raste. Pritom ovaj sektor građevinarstva je odgovoran za ogromne količine građevinskog otpada u Evropi. U 2020. godini, količina

[1] S. Trifunović: s.trifunovic@tu-braunschweig.de

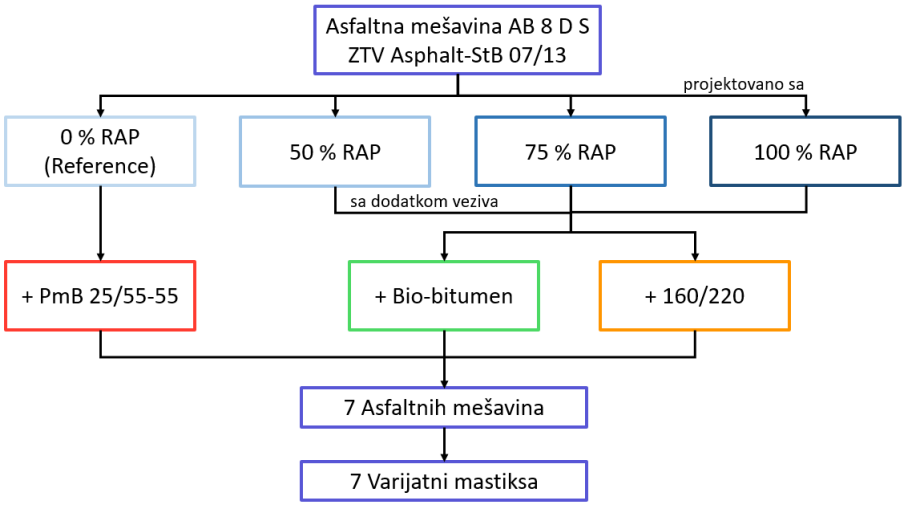
struganog asfalta (RAP) dostigla je brojku od 85 miliona tona [3]. Pored tolike potražnje prirodnog agregata i dostupnih količina struganog asfalta, ponovna upotreba struganog asfalta u asfaltnim mešavinama nije uobičajena i svodi se na par procenata. Usled ovih izazova, istraživači širom sveta su nedavno otpočeli sa istraživanjem novih veziva za kolovozne konstrukcije na bazi bioloških i obnovljivih materijala, kao i ponovnoj upotrebi struganog asfalta u asfaltnim mešavinama.

Usled velikih napora u ovoj oblasti, postoji veliki broj istraživanja koja ohrabruju pristup potpune zamene bitumena fosilnog porekla bio-bitumenom [4–8]. Bio-bitumen se sastoji od bioloških materijala (ili bio-otpada) i pritom ne sadrži bilo kakve sastojke fosilnog porekla. Tokom istraživanja identifikovani su materijali koji imaju obećavajuća svojstva za ove potrebe. Ti materijali su lignin, različite smole i ulja koja se mogu preraditi iz industrijskog otpada i koji imaju potencijalno ekvivalentna ili čak i bolja (u određenim temperaturnim rasponima) svojstva u poređenju sa fosilnim vezivima.

Na tržištu su već dostpuni pojedini bio-bitumeni kao što su Vegecol®, Sequoia® i Biophalt®. Kako bi ova veziva ispunila sve kriterijume za uspešnu upotrebu u asfaltnim mešavinama u celom temperaturnom opsegu, dodatak određenog procenta različitih polimera fosilnog porekla ovim vezivima je i dalje neophodan. Stoga, upotreba pojma bio-bitumen nije u potpunosti opravdana. Takođe, izgrađene su mnoge probne deonice sa ovim bio-bitumenima u Brazilu i Francuskoj. Pomenuta istraživanja i probne deonice imaju za cilj potpunu zamenu bitumena fosilnog porekla bio-bitumenom u kombinaciji sa niskim procentom (< 30%) ponovne upotrebe struganog asfalta, dok kombinacija sa visokim procentom ponovne upotrebe struganog asfalta nije ispitana. Ovo istraživanje obuhvata ispitivanje mastiksa (mešavine bitumena i kamenog brašna) asfaltnih mešavina sa dodatkom 50%, 75% i 100% struganog asfalta spravljenih sa standardnim polimer-modifikovanim (PmB) bitumenom i bio-bitumenom. Ispitivanje mastiksa predstavlja brži i povoljniji način ispitivanja u odnosu na isptivanje asfaltnih mešavina pri čemu je korelacija rezultata ispitivanja na nivou mastiksa i asfaltnih mešavina uveliko potvrđena u brojnim studijama [9, 10].

2. MATERIJALI I ISPITIVANJA

Ovo istraživanje ima za cilj da ispita izvodljivost pristupa „100% ponovna upotreba struganog asfalta sa dodatkom 0% bitumena fosilnog porekla“. Asfaltna mešavina AB 8 D S projektovana u skladu sa [11] predstavlja predmetnu asfaltnu mešavinu u ovom istraživanju. Projektovani optimalni sadržaj bitumena je 6,5 M.-% za sve vrste korišćenih veziva. Ova asfaltna mešavina projektovana je sa visokim procentima struganog asfalta, odnosno sa dodatkom 50%, 75% i 100% struganog asfalta. Asfaltne mešavine projektovane su sa standardnim putnim bitumenom za ove potrebe 160/220, kao i sa bio-bitumenom Biophalt. Pored pomenutih šest asfaltnih mešavina, projektovana je referentna asfaltna mešavina bez dodatka struganog asfalta i sa uobičajnim vezivom za ovaj tip asfaltne mešavine PmB 25/55-55. Opisani pristup projektovanih asfaltnih mešavina ilustrovan je na Slika 1. Sve pomenute projektovane asfaltne mešavine predstavljaju ukupno sedam mešavina koje su predmet ovog istraživanja. Nakon projektovanja svih mešavina, odgovarajući odnos veziva i kamenog brašna, uzimajući u obzir povratno, dodato kameno brašno i kameno brašno iz struganog asfalta, koristi se za spravljanje mastiksa. U okviru ovog istraživanja, kao standardno kameno brašno korišćeno je kameno brašno krečnjačkog porekla dok je kao povratno kameno brašno korišćeno kameno brašno od gabra. Strugani asfalt je kategorisan sa maksimalnom veličinom zrna 8 mm i sa sadržajem bitumena od 5,5 M.-%. Uprkos tome što asfaltne mešavine sa dodatkom 100 % struganog asfalta i dalje zahtevaju dodatak svežeg bitumena u cilju da se dostigne projektovani optimalan sadržaj bitumena, tvrdoća rezultujućeg bitumena ne odgovara tvrdoći referentnog bitumena PmB 25/55-55. Ove mešavine zahtevaju dodatak osveživača. Procenat dodatog osveživača određen je na osnovu ispitivanja bitumena pomoću *„Bitumen-Typisierungs-Schnell-Verfahren (BTSV)“* [12] ispitivanja i *Temperature Sweep (T-Sweep)* [13] ispitivanja u dinamičkom reometru *(Dynamic Shear Rheometer (DSR))*. Varijanta sa dodatkom 100 % struganog asfalta spravljena sa bio-bitumenom zahteva dodatak od 6 M.-% osveživača, dok varijanta spravljena sa putnim bitumenom 160/220 zahteva dodatak od 6,5 M.-% osveživača.



Slika 1. *Ilustracija projektovanih predmetnih asfaltnih mešavina u okviru istraživanja.*

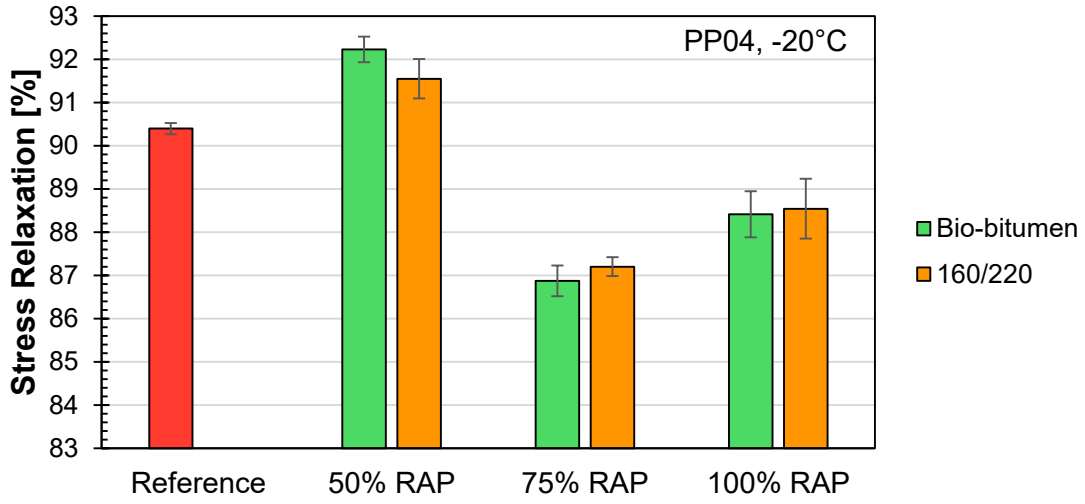
Izvodljivost potpune zamene bitumena fosilnog porekla bio-bitumenom proverana je ispitivanjem performansi mastiksa pri niskim, srednjim i visokim temperaturama pomoću DSR-a. Svojstva mastiksa pri niskim temperaturama ispitana su pomoću opita *„Relaxation 4 mm“* iu DSR-u [10]. Ovo ispitivanje se vrši upotrebom *„Parallel Plate-Plate*“ sistema ispitivanja sa prečnikom Ø 4 mm i rastojanjem između ploča od 2 mm. Ispitivanje se vrši pri konstantnoj temperaturi od – 20 °C i sa apliciranim konstantnim smičućim naponom od 0,1 %. Rezultat ispitivanja je *„Stress Relaxation“* nakon 60 minuta i predstavlja procentualni odnos između maksimalnog smičućeg napona i smičućeg napona nakon 60 minuta. Ispitivanje svojstava mastiksa pri srednjim temperaturama, odnosno otpornosti na zamor, ispituje se pomoću *„Stress Amplitude Fatigue Test (SAFT)“* ispitivanja u DSR-u [14]. Za potrebe ovog ispitivanja takođe se koristi *„Parallel Plate-Plate“* sistem ispitivanja međutim sa prečnikom geometrije od Ø 8 mm i sa rastojanjem između ploča od 2 mm. Ispitivanje se sastoji u oscilatornom opterećenju uzorka mastiksa frekvencijom od 10 Hz i sa povećanjem smičućeg napona za 1 kPa svakih 10 sekundi. Ispitivanje se vrši pri konstantnoj temperaturi od + 20 °C. Kao rezultat *SAFT* ispitivanja, analizira se parametar N_{Rowe} kao indikator otpornosti na zamor [15]. Ispitivanje otpornosti mastiksa na trajnu deformaciju pri visokim temperaturama vrši se pomoću *„Single Shear Creep Test (SSCT)“* ispitivanja u DSR-u [14]. Ovo ispitivanje se vrši takođe upotrebom *„Parallel Plate-Plate“* sistema ispitivanja sa prečnikom geometrije od Ø 25 mm i sa rastojanjem između ploča od 1 mm. Ispitivanje se sastoji u apliciranju konstantnog smičućeg napona od 0,5 kPa u trajanju od 60 minuta pri konstantnoj temperaturi od + 60 °C. Kao indikator otpornosti mastiksa na trajnu deformaciju, koristi se parametar *„Creep rate“* koji predstavlja brzinu puzanja u opsegu linearnog puzanja i izražava se u jedinici procentat puzanja po sekundi [%/s]. Svaka varijanta mastiksa je ispitana pomoću pomenutih ispitivanja na najmanje tri uzorka.

3. REZULTATI

Kao što je već napomenuto, ovo istraživanje obuhvata ispitivanje svojstava mastiksa pri niskim, srednjim i visokim temperaturama iz sedam projektovanih asfaltnih mešavina. Sva ispitivanja sa izvršena na najmanje tri uzorka tako da je standardna devijacija manja od 5%. Rezultati ispitivanja prikazani su na Slika 2-4. Varijacija rezultata je takođe prikazana na slikama u vidu *„Error bars-a*“.

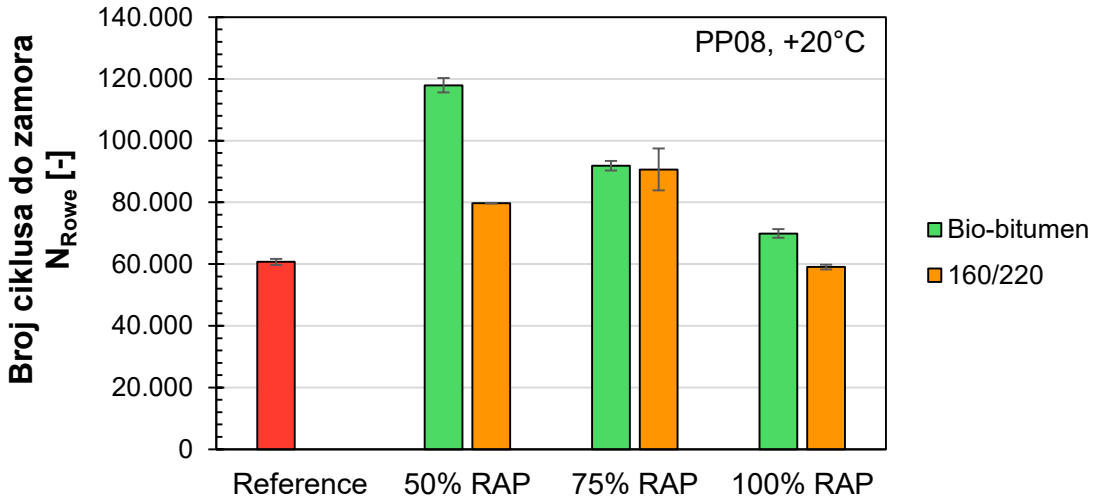
Slika 2 prikazuje rezultate opita *„Relaxation 4 mm“* za sedam varijanti mastiksa, odnosno prikazuje parametar „*Stress Relaxation*“ nakon 60 minuta pri temperaturi od -20°C. Parametar *„Stress Relaxation“* je u linearnoj korelaciji sa ponašanjem asfalta pri niskim temperaturama, odnosno viša vrednost parametra „Stress Relaxation“ predstavlja bolja svojstva asfalta pri niskim temperaturama. Parametar *„Stress Relaxation“* nakon 60 minuta za varijatnu mastiksa sa 50% sadržaja RAP-a i bio-bitumenom, iznosi 92,2 % što je najviše među svim ispitanim varijantama mastiksa. Međutim, varijanta mastiksa sa 75% RAP-a i bio-bitumenom ima najnižu vrednost parametra *“Stress Relaxation”* od 86,7%, što je za 3,5% u apsolutnoj vrednosti niže u odnosu na vrednost parametra *„Stress Relaxation“* za referentnu varijantu mastiksa od 90,4%. Varijante mastiksa sa 100% RAP-a takođe pokazuju niže vrednosti parametra u odnosu na referentnu varijantu mastiksa, ali takođe za par procenata više vrednosti u odnosu na varijante mastiksa sa 75% RAP-a. Ovi rezultati ukazuju da asfaltne mešavine sa 75% dodatka RAP-a takođe zahtevaju dodatak osveživača. Takođe, asfaltne mešavine

sa dodatkom 100% RAP-a zahtevaju veći procenat dodatka osveživača kako bi u potpunosti bile poredive sa referentnom asfaltnom mešavinom. Ovakav fenomen je i očekivan shodno tome da je procenat osveživača određen pri srednjoj i visokoj temperaturi. Generalno, svojstva varijante mastiksa sa bio-bitumenom su u potpunosti porediva sa svojstvima varijanti mastiksa sa bitumenom 160/220. Sa druge strane, varijante mastika sa 50% dodatkom RAP-a pokazuju bolja svojstva od referentne varijante mastiksa, dok varijante mastiksa sa 75% i 100% dodatka RAP-a pokazuju nešto lošija svojstva u odnosu na referentnu varijantu mastiksa.



Slika 2. Rezultati "Stress Relaxation" ispitivanja na -20 °C za 7 varijanti mastiksa.

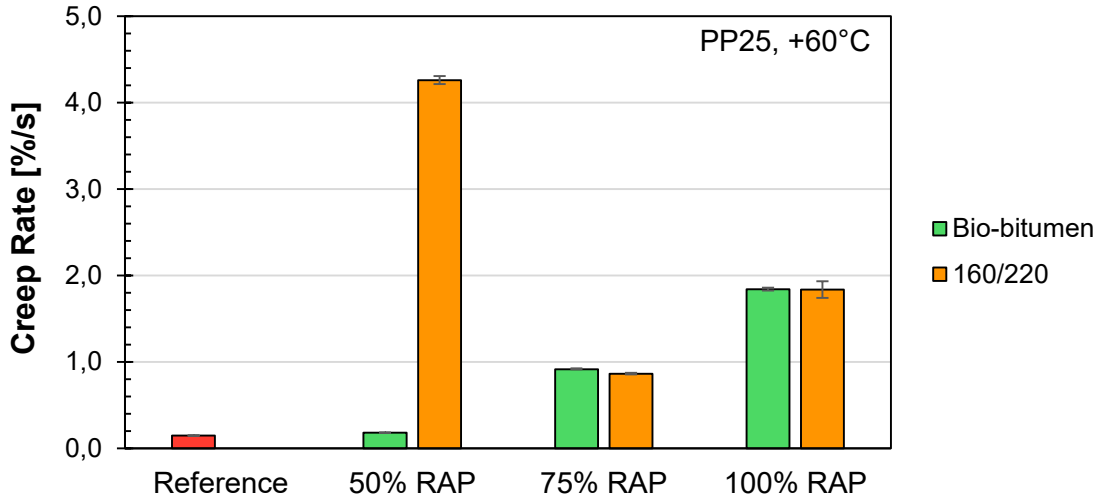
Slika 3 prikazuje rezultate ispitivanja zamora, odnosno *SAFT* ispitivanja, za sedam varijanti mastiksa. Kao što je već pomenuto u poglavlju "Materijali i ispitivanja", analiziran je parametar N_{Rowe} odnosno broj ciklusa opterećenja do pojave zamora. Parametar N_{Rowe} je u linearnoj korelaciji sa otpornošću asfaltnih mešavina na zamor, odnosno viša vrednost parametra N_{Rowe} predstavlja bolju otpornost asfaltne mešavine na zamor. Varijanta mastiksa sa dodatkom 50% RAP-a i bio-bitumenom pokazuje daleko nabolja svojstva pri srednjim temperaturama, pri čemu pokazuje gotovo duplo bolja svojstva od referentne varijante mastiksa. Generalno, sve varijante mastiksa sa dodatkom RAP-a bez obzira na vrstu dodatog bitumena pokazuju bolja svojstva pri srednjim temperaturama u odnosu na referentnu varijantu mastiksa. Takođe, sve varijante sa dodatkom bio-bitumena pokazuju nešto bolja svojstva u segmentu zamora u odnosu na varijante mastiksa sa dodatkom bitumena 160/220. Ovi rezultati ispitivanja potvrđuju rezultate ispitivanja na probnoj deonici u okviru istraživačkog projekta "BioRePavation" [6].



Slika 3. Rezultati SAFT ispitivanja na +20 °C za 7 varijanti mastiksa.

Slika 4 prikazuje rezultate *SSCT* ispitivanja za sedam varijanti mastiksa, odnosno prikazuje parametar „*Creep rate*" pri temperaturi od +60°C. Ovaj parametar je u orbnutoj korelaciji sa svojstvima asflatnih mešavina pri

visokim temperaturama, odnosno niža vrednost parametra *"Creep Rate"* predstavlja bolja svojstva asfaltnih mešavina pri visokim temperaturama. Parametar *"Creep Rate*" ima najnižu vrednost za referentnu varijantu mastiksa sa PmB 25/55-55 i iznosi 0,149 %/s. Ovaj rezultat ukazuje da polimeri prisutni u ovoj vrsti bitumena vrše svoju primarnu funkciju i referentna varijanta mastiksa ima visoku otpornost na trajnu deformaciju. Varijanta mastiksa sa dodatkom 50% RAP-a ima nešto viši parametar u odnosu na referentnu varijantu mastiksa i on iznosi 0,183 %/s. Sa druge strane, varijanta mastiksa sa dodatkom 50% RAP-a i bitumenom 160/220 ima daleko lošija svojstva pri visokim temperaturama što je očekivano s obzirom da je u pitanju varijanta sa velikom količinom dodatog svežeg mekog bitumena koji nije modifikovan polimerima. Generalno, varijante mastiksa sa dodatkom 75% i 100% RAP-a imaju daleko nepovoljnija svojstva pri visokim temperaturama u odnosu na referentnu varijantu mastiksa. Ovaj fenomen je posledica malog prisustva polimera u asfaltnim mešavinama sa visokim dodatkom RAP-a, u slučaju asfaltne mešavine sa dodatkom 100% RAP-a projektovano je dodavanje samo 1 M.-% svežeg bitumena što očigledno nije dovoljno kako bi se postigla poredива svojstva sa asfaltnom mešavinom spravljenom sa svežim PmB 25/55-55.



Slika 4. Rezultati "Single Shear Creep Test" ispitivanja na +60 °C za 7 varijanti mastiksa.

4. ZAKLJUČAK

Razvoj obnovljivih i održivih alternativa za izgradnju puteva stimulisan je sve većom potražnjom za asfaltnim kolovozima, pitanjima životne sredine, iscrpljivanjem prirodnih rezervi sirove nafte i kamenog agregata. Puno istraživanja je sprovedeno tokom poslednjih nekoliko godina o primeni bio-bitumena dobijenog iz obnovljivih resursa bio-mase za izgradnju fleksibilnih kolovoznih konstrukcija. Međutim, veliki je izazov da se održe svojstva konvencionalnih bitumenskih veziva prilikom primene novih veziva na bazi bioloških materijala. Stoga, ova studija ima za cilj da proveri mogućnost zamene veziva fosilnog porekla pomoću bio-bitumena i da pritom maksimizira ponovnu upotrebu struganog asfalta. Takođe, ovaj studija se fokusira na inovativnim metodama ispitivanja svojstava mastiksa. Na osnovu svih prikazanih rezultata, mogu se izneti sledeća saznanja:

- Varijante mastiksa projektovanih asfaltnih mešavina sa dodatkom 50% RAP-a poseduju povoljnija svojstva od referentne varijante mastiksa pri niskim temperaturama, bez obzira na dodatak bio-bitumena ili bitumena 160/220. Međutim, varijante mastiksa projektovanih asfaltnih mešavina sa dodatkom 75% i 100% RAP-a poseduju nešto nepovoljnija svojstva pri niskim temperaturama u odnosu na referentnu varijantu mastiksa;
- Svojstva pri niskim temperaturama varijanti mastiksa sa dodatkom bio-bitumena u potpunosti su poredива sa varijantama mastiksa sa dodatkom bitumena fosilnog porekla 160/220, pri čemu u slučaju varijanti mastiksa sa dodatkom 50% RAP-a imaju čak i povoljnije svojstvo u odnosu na varijantu mastiksa sa bitumenom fosilnog porekla;
- Varijante mastiksa projektovanih sa dodatkom RAP-a imaju znatno veću otpornost na zamor u odnosu na referentnu varijantu mastiksa, što dovodi do zaključka da dodatak RAP-a povoljno utiče na otpornost na zamor. Metode ispitivanja zamora na mastiksu su brojne, pri čemu velike uticaje na rezultate ispitivanja imaju uslovi ispitivanja, uslovi kontrolisanog napona ili dilataciju, čak i sama konstrukcija DSR uređaja, stoga ove rezultate treba posmatrati jako kritično;

- Otpornost mastiksa pri zamoru za varijante mastiksa sa dodatkom bio-bitumena je u potpunosti porediva u odnosu na varijante mastiksa sa dodatkom bitumenom fosilnog porekla, čak i za određeni procenat veću otpornost na zamor;
- Varijanta mastiksa sa dodatkom 50% RAP-a i bio-bitumenom jedino ima porediva svojstva pri visokim temperaturama u odnosu na referentnu varijantu mastiksa. Varijante mastiksa sa višim dodatkom RAP-a zahtevaju dodatnu količinu polimer-modifikovanog bitumena.
- Generalno, svojstva varijante mastiksa sa dodatkom bio-bitumena su u potpunosti porediva sa svojstvima varijanti mastiksa sa dodatkom bitumena fosilnog porekla;
- Varijanta mastiksa projektovane asfaltne mešavine sa 50% RAP-a i bio-bitumenom, jedino zadovoljava svojstva pri niskim, srednjim i visokim temperaturama u odnosu na referentnu varijantu mastiksa.

Zahvale

Autori se zahvaljuju studentkinji Zcho Yinn Lee na podacima iz master rada koji predstavljaju osnovu za izradu ovog istraživačkog rada.

Literatura

1. Europäische Kommission (2021) Fit for 55. Delivering on the proposals. https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal/delivering-european-green-deal/fit-55-delivering-proposals_en.
2. Gielen D, Boshell F, Saygin D, Bazilian MD, Wagner N, Gorini R (2019) The role of renewable energy in the global energy transformation. Energy Strategy Reviews 24:38–50. doi:10.1016/j.esr.2019.01.006.
3. EAPA (2021) Asphalt in Figures 2020, Brussels.
4. Lee ZY (2023) 100% Recycling with 0% Fossil-Based Bitumen. Masterarbeit, Technische Universität Braunschweig, Institut für Straßenwesen.
5. Zhang Y, Liu X, Ren S, Jing R, Lin P, Apostolidis P, Erkens S, Wang X, Scarpas T (2022) Effect of Bio-oil on Rheology and Chemistry of Organosolv Lignin–Modified Bitumen. J. Mater. Civ. Eng. 34(4), American Society of Civil Engineers (ASCE). doi:10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0004140.
6. Pouget S, Chailleux E, Porot L, Williams RC, Planche J-P, Lo Presti D, Blanc J, Hornych P, Carrion AJdB, Gaudefroy V (2021) BioRePavation - Innovation In Bio-Recycling 7th E&E Congress Proceedings, Paper 91.
7. Pais J, Santos CR, Cabette M, Hilliou L, Ribeiro J, Wang H, Mohd Hasan MR (2023) Feasibility of using bio-oil from biodiesel production for bio-bitumen creation. Road Materials and Pavement Design 24(sup1):209–228. doi:10.1080/14680629.2023.2180305.
8. Del Jiménez Barco Carrión A, Lo Presti D, Chailleux E, Airey GD (2023) Rheological investigation on the ageing performance of bio-recycled asphalt binders and mixtures. Road Materials and Pavement Design, Taylor & Francis. doi:10.1080/14680629.2023.2181010.
9. Pratelli C (2020) Experimental Investigation and Rheological Modelling of the Fine Aggregate Matrix (FAM) Phase in the Multiscale Transition from Binder to Asphalt Mixture. Dissertation, Technische Universität Braunschweig, Institut für Straßenwesen.
10. Büchner J (2021) Prüfung von Asphaltmastix im Dynamischen Scherrheometer, Dissertation. Schriftenreihe Straßenwesen, Heft 38, Braunschweig.
11. ZTV Asphalt-StB (2014) Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Bau von Verkehrsflächenbefestigungen aus Asphalt, 2007. Aufl. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV), FGSV Verlag, Köln.
12. EN 17643 (2022) Bitumen and bituminous binders – Determination of equi-shear modulus temperature and phase angle using a Dynamic Shear Rheometer (DSR) – BTSV test;. European Committee for Standardization, Brussels.
13. EN 14770 (2023) Bitumen und Bitumenhaltige Bindemittel - Bestimmung des komplexen Schermoduls und des Phasenwinkels - Dynamisches Scherrheometer (DSR). Europäisches Komitee für Normung, Beuth Verlag GmbH, Berlin.
14. Wistuba MP, Büchner J, Trifunovic S (2023) Optimierung von Verfahren zur Prüfung von Füller-Bitumen-Gemischen (Asphaltmörtel) mit dem Dynamischen Scherrheometer („RHEMAS“). 2. Zwischenbericht

zum Forschungsprojekt FE 07.0317/2021/AGB, im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur.

15. Bouldin MG, Dongré RN, Rowe GM, Sharrock MJ, Anderson DA (2000) Predicting Thermal Cracking of Pavements from Binder Properties - Theoretical Basis and Field Validation. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists 69, Association of Asphalt Paving Technologists (AAPT):455–496.

UTILIZATION OF B-WIM DATA COLLECTED AT STOPANSKI DVOR

Bajko Kulauzović[1], Zoran Slamkov[2], Nexhat Bajrami[2]
[1] Cestel d.o.o., Špruha 32, SI-1236 Trzin, Slovenia, [2] PESR, Dame Gruev 14, 1000 Skopje, R. of N. Macedonia

Abstract: The key aim of the project led by The Public Enterprise for State Roads (PESR), overseeing the national road network in North Macedonia, was to conduct a comprehensive analysis of traffic, assess bridges, and demonstrate the system's capabilities. Furthermore, the project involved comparing current data with past measurements at the same locations. This comparison was part of a previous PESR initiative, focusing on determining Equivalent Single Axle Load (ESAL) information for the most heavily trafficked road sections in Macedonia. The goal was to aid in planning and programming maintenance treatments using the RAMS approach, ultimately establishing an average equivalency factor for each vehicle type. This paper seeks to highlight the diverse and significant applications of Weigh-in-Motion (WIM) data in informing crucial decisions for future road network maintenance and design, with a specific emphasis on realistic traffic loading factors.

Keywords: B-WIM, ESAL, RAMS, road network, loading factors.

1. INTRODUCTION

Based on the agreement between Public Enterprise for State Roads (PESR), Republic of North Macedonia and Cestel Company, Slovenia, weigh-in-motion measurements have been carried out on a bridge near Stopanski Dvor on a Highway A2 between Tetovo and Aračinovo. The purpose of the measurement was to perform traffic analysis, bridge assessment and show capability of the system. In this report, 30 days of data was used for traffic analysis and bridge assessment.

Source for traffic analysis was data from B-WIM measurements only, which detects only heavy vehicles with gross vehicle weight over 3,5 tons, as impact of light vehicles with gross vehicle weight below 3,5 tons to the pavement and bridging objects is negligible.

Previous project focused on most trafficked road sections for planning and programming of maintenance treatments in RAMS and the scope of the project were 20 fortnight B-WIM measurements. ESAL factors for each vehicle type were determined during this project.

All presented results are related to the traffic in both directions.

2. WIM MEASUREMENTS

Weigh-in-motion (WIM) techniques traditionally measure vehicle weight at highway speeds, providing detailed data on gross weights, individual axle loads, velocities, and axle spacing for passing vehicles. Bridge WIM (B-WIM) utilizes existing bridges as weighing scales, employing strain sensors on the structure's soffit and axle detectors in the pavement. Early B-WIM systems in the 1970s lacked impact, but significant advancements occurred in the late 1990s with the WAVE project, enhancing accuracy, usability, portability, and durability. B-WIM systems record strains throughout a vehicle's pass, offering valuable data on dynamic effects, unlike pavement installations. The latest version of B-WIM system eliminates the need for axle detectors on or near the bridge, marking a significant advancement.

2.1. Data collection

System stores data in its own text format and XML files which contains the following information about each individual vehicle:

- Road section,
- Number (ID) of the instrumented bridge,
- Date,
- Exact time (hour, minute, second) of the passing vehicle,
- Vehicle category according to specified classification based on axle spacing (unlimited number of categories),
- Axle loads,

[1] Bajko Kulauzovic, bajko.kulauzovic@cestel.si

- Gross vehicle weight,
- Axle spacing,
- Velocity,
- Length from the first to the last axle,
- Temperature.

Results are stored in metric units.

2.1.1. Classification of vehicles

B-WIM system classifies vehicles primarily based on axle spacing. There are no limits for number of classes which can be used. For some specific types of vehicles with similar axle spacing, such as 2-axle trucks and vans, their class is fine-tuned based on the gross vehicle weights and axle loads. For practical purposes vehicle classes are merged into categories.

All popular vehicle classification schemes like FHWA, EURO-6, EURO-13 and COST323 are readily available.

2.1.2. Accuracy of the measurements

Accuracy of bridge WIM results depends on the type of the structure and particularly on the evenness of the pavement. Accuracy is evaluated according to the European specifications for Weigh-in-motion [5] by comparing WIM results to the values obtained on a more accurate static scale. These specifications define an accuracy class with a letter and a number in the parentheses. Class A(5) is the most accurate one and is followed by classes B+(7), B(10), C(15), D+(20), D(25) and E(30). The number in parentheses is the confidence interval δ at the confidence level π of approximately 95 % of all results.

Accuracy class B(10) for example means that approximately 95 % of the gross weight results can be expected between ±10 % from the true static value. Single axle loads can be expected in the interval ±15 % and group axles in the interval ±12 %. Accuracy classes achievable with bridge WIM systems range from the excellent class A(5) on very good structures with even pavement and optimized calibration (per vehicle type, velocity compensation, temperature compensation, auto-calibration…) to still acceptable class D(25) on less ideal bridges with rough pavement. Typically classes B(10) or C(15) can be expected.

.

2.1.3. Comparison between static and dynamic measurements

Dynamic values measured with weigh-in-motion systems differ from the static values because of dynamic influence such as bouncing of the vehicle, air resistance and breaking or accelerating of vehicles. All moving vehicles bounce on their tires and suspensions. There are two main components of this motion (Figure 1):

a) Low frequency vertical bouncing of the sprung masses, typically at 2 to 4 Hz; and

b) High frequency bouncing of the axles (wheel hop), typically at 10 to 15 Hz.

The magnitude of the bounce depends on the roughness of the road, the type of suspension and the vehicle's speed.

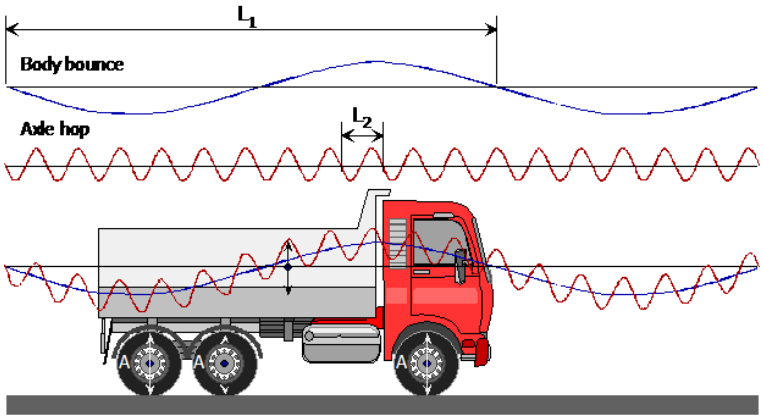


Figure 1. *Dynamic of a driving vehicle: body bounce and axle hop [14]*

2.1.4. Influence of traffic on pavement

Influence of traffic on pavement is usually accounted for with the number of the Equivalent Single Axle Loads (ESALs). In Macedonia ESAL of 80 kN is used. The common procedure to evaluate cumulative ESAL value for certain traffic can be described by the formula:

$$ESAL = \sum_{i=1}^{n} 10^{-8} \times f_a \times (f_t \times P_i)^{\alpha}$$

Where:

ESAL	-	traffic loading expressed as sum of nominal (equivalent single) axle loads
f_a	-	axle factor which depends on the type of the axle and the reference axle load
f_t	-	factor representing influence of the type of the tyre and type of suspension on the axle
P	-	axle loading in kN
α	-	factor depending on type of the pavement and the damage phenomena; in most countries a constant value of 4 is used
n	-	number of axles

Based on the information from OECD, the following parameters were taken into account in the present study: reference axle loads 80kN for the single axles (an axle load equal to the reference axle load gives ESAL value 1) and fourth power (α=4) of the axle load.
This gives the following f_a factors for different types of axles:
f_{a1} = 2,4414 for single axles,
f_{a2} = 0,2326 for double axles and
f_{a3} = 0,0736 for triple axles.

2.2. Bridge assessments

When optimizing assessment of existing bridges, which are also heavily deteriorated and thus suffer from reduced carrying capacity, it is essential to use as accurate data as possible in the assessments. One of the options is to use the site-specific load models which take all benefits of WIM data measured on the bridge that is being analyzed. As a result, uncertainties of the calculation models can be considerably decreased, which generally results in less severe or even abolished rehabilitation measures on bridges.

Similarly, without the WIM data, the highway asset owners and managers are not aware of and cannot properly respond to the problems of overloading. In other words, they cannot perform efficient enforcement and take measures needed for optimal maintenance and reconstruction of road infrastructure.

With collected WIM data, a novel load testing procedure, called “soft load testing”, which was developed in the European Commission 5th Framework Project “SAMARIS – Sustainable and Advanced Materials for Road Infrastructure" can be used instead of standard load testing, to optimize the structural model used for structural assessment of a particular bridge [11].

Soft load testing was enabled only through the development and implementation of the new generation of bridge weigh-in-motion systems, which, in addition to the “normal” traffic data (axle spacing and loads, gross weight, speed, vehicle class, etc.…) provide information about structural behavior of the bridge that the sensors are attached [2].

Apart from that, structural analysis, to show if the assessed bridge is safe under certain (normal or exceptional) transport loading, can be performed, together with the measurements of dynamic amplification factors and load distribution factors.

Major benefit of the WIM systems is that their results can be used to assist enforcement to protect bridges.

3. MAINTENANCE AND PLANNING SECTOR

Analysis of GVW, overloading and ESAL calculation for all types of vehicles was prepared according to specifics in vehicle classification table for vehicles on that road section.

Influence of traffic on pavement is usually accounted for with the number of the Equivalent Single Axle Loads (ESALs).

Traffic loading was calculated with the OECD method [8], which converts axle loads to Equivalent Single Axle Loads (ESALs) using a 80 kN reference axle load and the power of 4.

Three types of traffic data; Average Annual Daily Traffic (AADT), Truck Average Daily Traffic (TADT), and Equivalent Single Axle Load (ESAL) are usually collected by transportation agencies. ESAL value converts all traffic into an equivalent damage done by the passing of a single 10-ton axle (or 80kN in Macedonia). Since higher traffic loadings will cause more damage to the pavement, design procedures generally account for increased traffic loading with increased pavement thickness. The effect of traffic loading on pavement performance should be considered whenever appropriate.

According to the Macedonian specification the maximum total gross weight imposed on the highway or other surface by a vehicle or combination of vehicles, including load or contents, shall not exceed 40 tons.

In addition to that, the same regulation defines maximum allowable axle load for different axle types and configurations, as shown in Table 1.

Except when provided by special permits, no vehicle or combination of vehicles exceeding the gross weights specified above shall be permitted to travel on the public highways.

Table 1. *Maximum axle load [10]*

Type of axle	Absolute maximum axle load [t]
Non-drive Single	10
Drive single	11,5
Non-drive Double	18
Drive Double	19
Triple	24

The service life of a flexible (asphalt) pavement is typically designed in the range of 15 to 20 years [1]. Required thicknesses of each layer of a flexible pavement vary widely depending on the materials used, magnitude, number of repetitions of traffic loads, environmental conditions, and the desired service life of the pavement. Factors such as these are taken into consideration during the design process so that the pavement will last for the designed life without excessive distresses [8].

Over the service life of a flexible pavement, accumulated traffic loads may cause excessive rutting or cracking, inadequate ride quality, or an inadequate skid resistance. These problems can be avoided by adequately maintaining the pavement, but the solution usually has excessive maintenance costs, or the pavement may have an inadequate structural capacity for the projected traffic loads.

A Pavement Management System (PMS) requires prediction of pavement life. Pavement life can be defined by two terms, service life and remaining service life. Service life of a pavement is the time elapsed between two successive constructions performed on a particular pavement. Both service life and remaining service life of pavement can serve as tools for PMS. The purpose of remaining service life of a pavement is to help the pavement management system in assessing the pavement's current and projected condition, determine budget needs to maintain the average condition of pavement above an accepted level, prioritize projects, and optimize spending of maintenance funds. The evaluation of remaining service life is necessary to make optimal use of the structural capacity of the in-service pavement. It simply represents the useful life left in the pavement until a failure condition is reached. Knowledge of remaining service life facilitates decision making in regard to strategies for reconstruction-rehabilitation of roads, thereby leading to the efficient use of existing resources. Prediction of remaining service life is important because prediction of future pavement condition is one of the most important functions of a PMS, i.e. when the pavement will reach its terminal condition which requires rehabilitation.

Results for all above addressed issues are presented in the following pages.

3.1. Traffic analysis

As soon as enough data was collected, the first preliminary check of the data was performed. Final analysis was performed after all data was collected. For the purpose of traffic analysis and to show the capability of the system, measurement on the bridge close to Stopanski Dvor on Highway A2 between Tetovo and Aračinovo took place for 30 days.

During the latest measurement over 36 600 commercial vehicles were detected with SiWIM system.

Source for traffic analysis was data from B-WIM measurements only, which detects only heavy vehicles with gross vehicle weight over 3,5 tons, as impact of light vehicles with gross vehicle weight below 3,5 tons to the pavement and bridging objects is negligible. Only commercial vehicles are presented in the results.

As for vehicle types, 5 and 6-axle tractor trailers and semitrailers are the dominant type, representing 53,7% of all heavy vehicles, followed by medium heavy trucks (2-axle trucks) with 34,5% of all vehicles. Busses have 6,8% share of all vehicles, followed by heavy trucks with 5,0%, as presented in Figure 2.

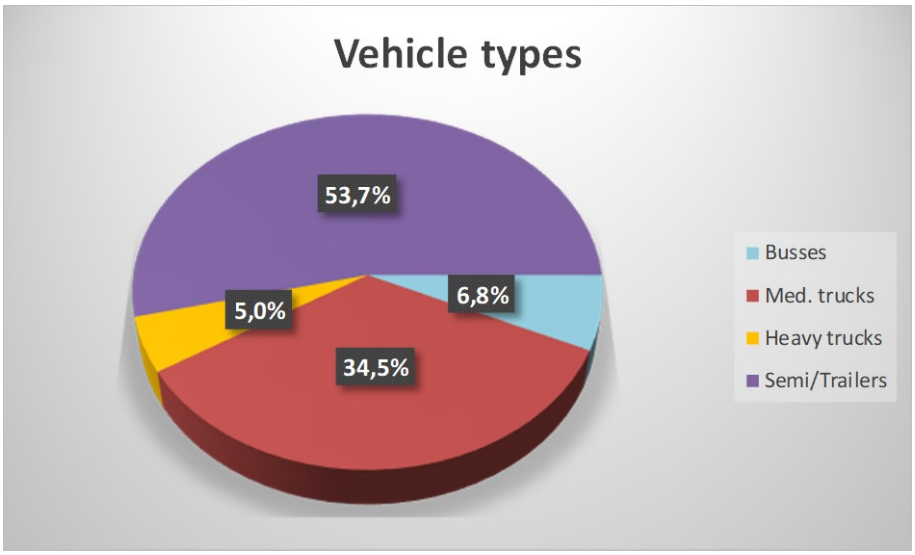


Figure 2. *Vehicle types [10]*

Since no AADT data was available from traffic counter data, no comparison was made on the expected number of vehicles. As the B-WIM system is capable of classifying all vehicles according to any of the classification schemes, analysis was performed according to the main category classification. As shown in Table 2, on average 1.110 heavy vehicles (with gross vehicle weight over 3,5 t) were detected and weighed per day during whole measurement. Average ESAL was also calculated for each vehicle category and major categories are also shown – busses, medium weight vehicles, heavy rigid vehicles, trucks with trailers or semi-trailers. There were also few other types of vehicles (predominantly exceptional transports and light vehicles over 3,5 t), which contributed slightly to the overall traffic loading.

Table 2. *Comparing vehicle count and traffic loading [10]*

	Busses	Med.trucks	Heavy Trucks	Semi/trailers	Other	Together
Number of vehicles (acording to SiWIM measurements):						
Tetovo - Aračinovo	38,8	301,0	25,9	278,1	5,4	649,2
Aračinovo - Tetovo	35,4	190,4	29,3	312,9	4,8	572,8
Number of vehicles in both directions	74,2	491,4	55,1	591,1	10,1	1221,9
Average Equivalency Factor (avgEF)	1,40	0,60	0,70	1,60		
WIM traffic loading ($ESAL_{SiWIM}$):						
Tetovo - Aračinovo	**103,12**	**227,83**	**155,87**	**1543,41**	**43,34**	**2073,6**
Aračinovo - Tetovo	**101,54**	**193,40**	**150,14**	**2448,41**	**40,16**	**2933,7**
WIM traffic loading in both directions	**204,67**	**421,22**	**306,01**	**3991,82**	**83,51**	**5007,2**

3.1.1. Traffic loading

To mitigate the influence of specific days/weeks, when B-WIM measurements were performed, loading data should be scaled to represent a year-round daily average. This is done so that the traffic load, which was calculated based on the measurement of actual traffic in a given number of days is multiplied by the adjustment factor, derived from the ratio between the AADT divided by average daily traffic, measured with B-WIM system.

Scaled traffic loading obtained from B-WIM data for all vehicles was $ESAL_{ALL}$ = **5.007,2 ESAL / day** (Table 3). This yields **4,10 ESAL** per vehicle on average. This is expected, since majority of the vehicles are heavily loaded trailers and semi-trailer trucks, followed by medium heavy trucks.

Table 3. *Calculated ESALs from axle loads of all heavy traffic per day [10]*

Measured with SiWIM system	# of axles			Traffic loading			
Measured traffic loading	Single	Double	Triple & more	Single	Double	Triple & more	sum / day
Tetovo - Aračinovo	1.280,2	126,0	186,7	1.275,4	156,1	642,0	2.073,6
Aračinovo - Tetovo	1.118,7	116,1	239,0	1.547,0	160,8	1.225,9	2.933,7
Both directions	**2.398,9**	**242,1**	**425,8**	**2.822,4**	**317,0**	**1.867,9**	**5.007,2**
Overloading	Single	Double	Triple & more	Single	Double	Triple & more	sum / day
Tetovo - Aračinovo	43,7	8,8	31,1	130,9	42,9	127,0	300,8
Aračinovo - Tetovo	73,3	9,2	54,9	213,5	28,4	325,9	567,8
Both directions	**117,1**	**17,9**	**86,1**	**344,4**	**71,4**	**452,9**	868,6
Legal loading	Single	Double	Triple & more	Single	Double	Triple & more	sum / day
Tetovo - Aračinovo	1.236,5	117,2	155,6	1.144,6	113,2	515,0	1.772,8
Aračinovo - Tetovo	1.045,3	106,9	184,1	1.333,5	132,4	900,0	2.365,8
Both directions	**2.281,8**	**224,2**	**339,7**	**2.478,0**	**245,6**	**1.415,0**	**4.138,6**

3.1.2. Overloaded vehicles

During the measurement overloaded vehicles were detected. There was significant asymmetry in the number of overloaded vehicles in both directions. Same is valid for actual overloading, which was significantly higher in the direction towards Tetovo. Vehicles were predominantly GVW or GVW and axle overloaded. Overall 20,8% of all vehicles were overloaded (Table 4).

Table 4. *Overloaded vehicles per lane and per type of overloading [10]*

Overloading per direction	All vehicles per day	Only axially overloaded veh. per day		Exceeded alowable total mass		Exceeded at least one axle load and total mass		All overloaded vehicles per day	Share of overloaded vehicles per day
Tetovo - Aračinovo	644	11	1,7%	24	3,8%	62	9,6%	97	15,1%
Aračinovo - Tetovo	568	14	2,5%	37	6,5%	103	18,2%	155	27,2%
Both directions	1.212	25	2,1%	62	5,1%	165	13,6%	252	20,8%

Figure 3 shows the structure of the overloaded vehicles, where 65,6% of all overloaded vehicles are those with axles and GVW overloaded at the same time.

In Figure 4 additional graphic representation of overloading was made, showing overloading throughout the average day. There is distinctive peak between 12:00 and 13:00.

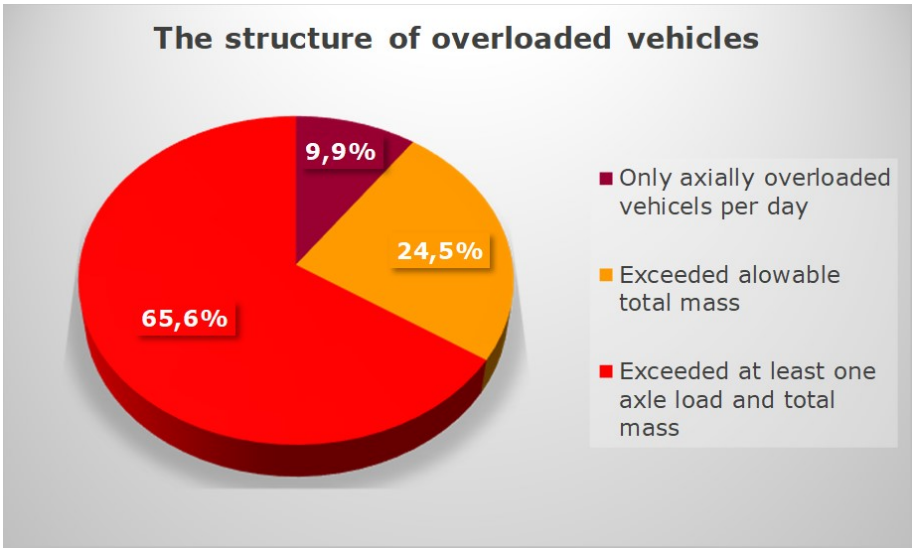


Figure 3. *Structure of overloaded vehicles [10]*

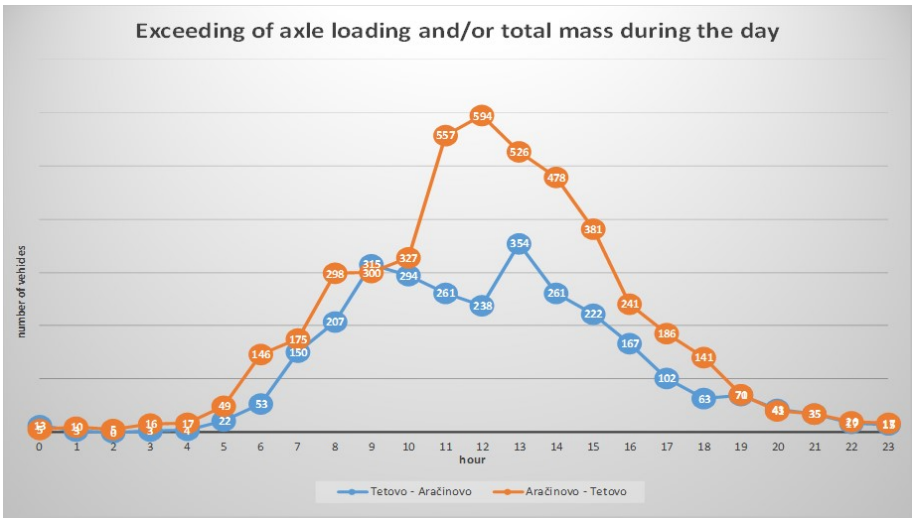


Figure 4. *Overloaded vehicles on average day – both directions [10]*

Additional analysis of overloaded axles and groups of axles are presented in Figure 5, where single axles are predominantly overloaded up to 2 tons, where double axles are mostly overloaded between 1 and 2 tons and over 3 tons. Triple axles are similarly mostly overloaded either between 1 and 2 tons and over 3 tons per axle group.

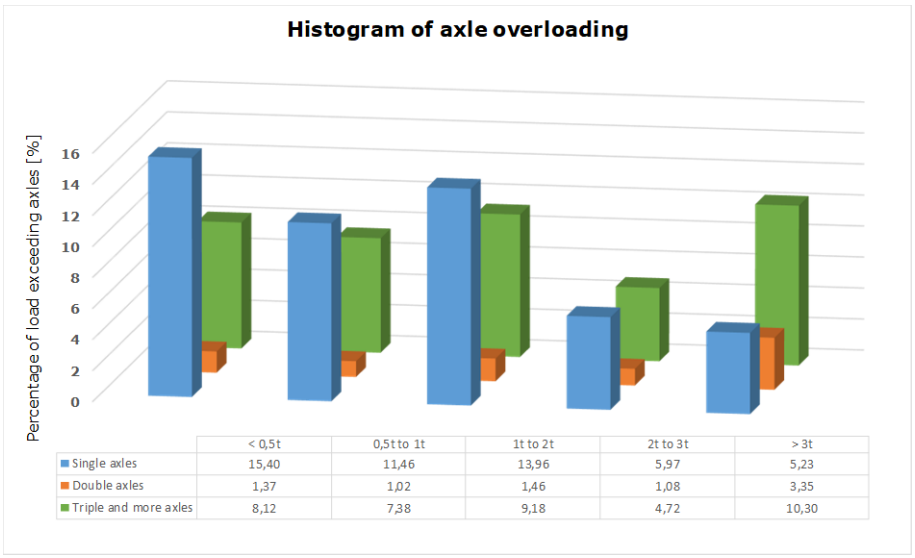


Figure 5. *Share of overloaded axles / axle groups [10]*

3.1.3. Service life

As service life of a flexible pavement is typically designed in the range of 15 to 20 years [8], by using B-WIM data, one can estimate remaining service life of a road section according to the measured traffic loads and especially contribution of overloaded vehicles to the excessive traffic loading. Remaining service life (RSL) is the number of years that a pavement will be functionally and structurally in an acceptable condition with only routine maintenance. This combines severity and extent of different distresses and rates of deterioration.

Also, it is important to understand, that basis for RSL calculations is 80 kN reference axle. Since we had no reference value for AADT, comparison was done on the same number of vehicles, but referenced to all legally loaded vs. actual traffic with overloaded vehicles. As shown on Figure 6, initial service life is shortened to 16,1 years instead of predicted 20, if overloaded vehicles are also taken into account.

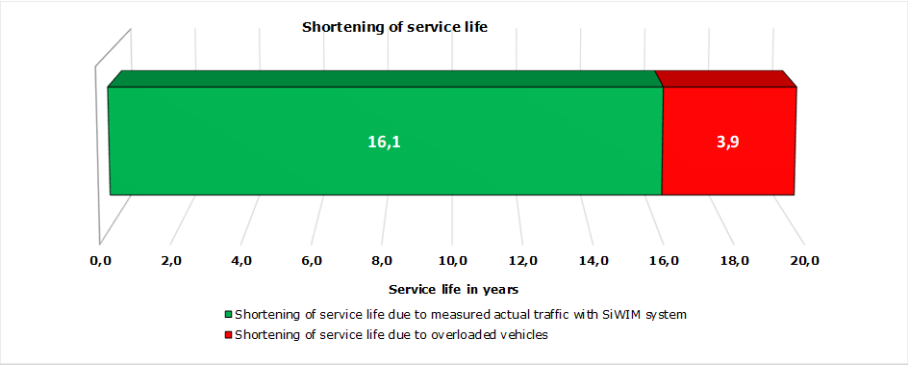


Figure 6. *Remaining service life [10]*

3.2. Accuracy of the measurement

Calibration of the measuring site was done by using pre-weighed vehicle. A 5-axle semi-trailer was used. Vehicle was statically weighed before the calibration runs with static scales.

At least 10 good runs per lane were required [5], where overtaking lane had significantly lower amount of traffic, so it was decided to limit number of calibration runs on overtaking lane. Initial accuracy of the installed system was calculated. It was within expected limits (Table 5).

Table 5. *Initial accuracy of the measurement [10]*

Direction	Single	Group	GVW
Towards Aračinovo	B+(7)	B+(7)	B (10)
Towards Tetovo	B(10)	A(5)	A(5)

4. BRIDGE ASSESSMENT

The purpose of bridge assessment is to verify that a structure has adequate capacity to safely carry or resist specific loading levels/effects prescribed according to specified limit states and criteria for satisfaction of those limit states. The methodology is used to identify those structures which probability of failure exceeds that specified as acceptable by the structure owner/manager, either locally or globally. The process can employ site specific modelling of loading and material resistance for the structure thereby facilitating the development of a structure specific safety rating.

4.1. Partial safety factor format

The partial safety factor format is the basis of many codes and standards, such as the Eurocodes [6], currently in use. It is claimed to be semi-probabilistic, considering the application of statistics and probability in the evaluation of input data, the formulation of assessment criteria and the determination of load and resistance factors. However, from the user's point of view, the application of the partial safety factor format is deterministic. Thus, the partial safety factor format does not provide information that would allow the user to assess the actual risk or reserve carrying capacity of a specific structure.

The semi-probabilistic partial safety factor format replaces actual probability calculations by the verification of a criterion involving characteristic values of the resistance R and the stress S, denoted as R_k and S_k, as well as partial safety factors γ_R and γ_S and can be described by the following formal limit state [9]:

$$S_k \cdot \gamma_S \leq \frac{R_k}{\gamma_R}$$

The reliability of a structure is ensured by certain requirements for the limit state, the characteristic values and the partial safety factors. These requirements are typically stated in the codes. Partial safety factors are designed to cover a large number of uncertainties and may therefore not be very representative for evaluating the reliability of a particular structure. They should be calibrated using probabilistic methods and idealized

reliability formats, but in most of the countries where semi-probabilistic codes are used, the actual values for the partial safety factors are still influenced by experience and economic and political considerations.

4.1. Carrying capacity of the critical cross sections

Determination of carrying capacity of the critical cross sections of the test bridge were not subject of this demonstration, but are typically obtained in three ways:

a) using exact dimensions of the cross sections and reinforcement as measured on site and using the actual amount of reinforcement and pre-stressing, with material characteristics either measured or taken from the design,
b) from the data available from bridge drawings and documentation, or
c) recalculating the capacity according to the design rules from the time of construction and using experience from previous analyses of similar structures.

Clearly, the level of reliability of these methods is decreasing, which must be taken into account. Any appropriate software can be used to calculate cross-sections' capacities.

The design capacities of cross sections may need to be reduced to account for the reduced capacity due to deterioration. For example, the Slovene recommendations [3] define the capacity reduction factor φ that is related to the bridge condition rating, as obtained from bridge inspection, in the following way:

$$\Phi = B_R . e^{-\alpha_R . \beta_c . V}$$

where:
B_R is the bias of carrying capacity, i.e., the ratio of existing and designed mean resistance of the critical member section; in most cases taken as 1.
α_R is the deterioration factor, accounting for the condition of the observed member and the anticipated further reduction of the carrying capacity until next inspection (Table 6).
V is the coefficient of variation of the member resistance recognizing also the reliance of the testing data.
β_c is the target value of the safety index, accounting also for the redundancy of the structure and anticipated failure mode; taken 3.5 for normal and 2.5 for limited service life.
Factor **φ** is further adjusted based on type of the structure (redundant or non-redundant) and quality of maintenance.
Evaluation of influence of structural damage on structural safety is demanding and requires an expert:

- with experience in bridge inspection,
- who is able to estimate how resistance is influence by:
  - severity and extension of damages,
  - structural details and,
  - expected progress of the damages during validity of the assessment.

Table 6. *Relation between condition value and deterioration factor α_R [10]*

Class	Condition	Necessary intervention	Deterioration factor α_R
1	Very good	No maintenance/repair work required	0.3
2	Good	Regular maintenance work needed	0.4
3	Satisfactory	Intensified maintenance/repair work needed within 6 years	0.5
4	Tolerable	Substantial repair work needed within 3 years	0.6
5	Inadequate	Immediate posting and repair required	0.7
6	Critical	Immediate closing, then repair (strengthening) required	0.8

4.2. Site-specific traffic load modelling

This chapter demonstrates one possible procedure to calculate the site-specific load effects based on WIM data. It should be noted that presented measurements on the test bridge were relatively short and thus results are only indicative. For reliable information it is recommended to acquire axle loads and spacings of at least 100 000 heavy goods vehicles [12]. Furthermore, WIM Data for bridge assessment requires the individual vehicle records to be recorded with 1/100 of a second precision or better, which are not provided by all WIM systems.

Load effects are calculated for all loading events on the bridge by combining the axle loads of the measured vehicles with the bending and shear influence lines. The same is done for the shear forces and, for continuous bridges over several spans, for the moments above the intermediate supports.

These measured load effects are used to simulate the maximum expected load effects. A number of statistical distributions (Gumbel, Fréchet or Weibull, even Normal) can be used to fit the tail of load effects distributions and then to extrapolate to the ultimate expected values [9]. Alternatively, simulation methods are also available and can provide even more accurate results [7].

The SiWIM bridge assessment module is built around the convolution, a simplified simulation method that assumes that the maximum load effect on a bridge is achieved with one vehicle in each of the two lanes of traffic [12], [13], [15]. This limits its application to bridges with influence lines shorter than approximately 30 meters, which, however, includes well over 90% of all bridges.

Convolution method assumes that the distributions of the load effects for both lanes are independent, thus the probability mass function for an event is expressed as:

$$f_Z(z) = \sum_{k=1}^{m} f_X(k) \cdot f_Y(z-k)$$

where f_X and f_Y are the PMF – probability mass functions (histograms) of load effects for lane 1 and lane 2, and f_Z is the PMF of the load effects for events comprising all combinations of vehicle from both lanes. X and Y are assumed to be independent, i.e. traffic in lane 1 does not affect traffic in lane 2. Consequently, Z is equal to X + Y. If f_X and f_Y include m bins, then the length of f_Z consists of 2.m-1 bins.

In the next step, from the probability mass function of an event f_Z, the cumulative probability density function (probability curve $F_Z(z)$) is calculated. Then, to determine the convolution curves F_{max} for different time periods z, the extreme value theory is applied [1]:

$$F_{max}(z) = F_Z{}^N(z)$$

Results for the bending moments and shear forces for the test bridge are presented Figure 7 and Figure 8 for the measured influence lines.

It should be noted that the various sources [5], [12] recommend to use in bridge load modelling at least 100 000 WIM records. Therefore, the values of bending moments and shear forces presented in this report are very likely too low.

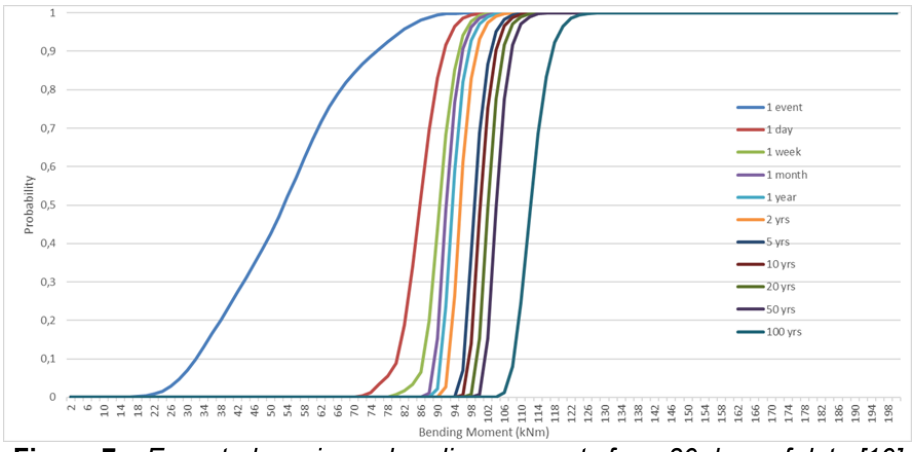


Figure 7. *Expected maximum bending moments from 30 days of data [10]*

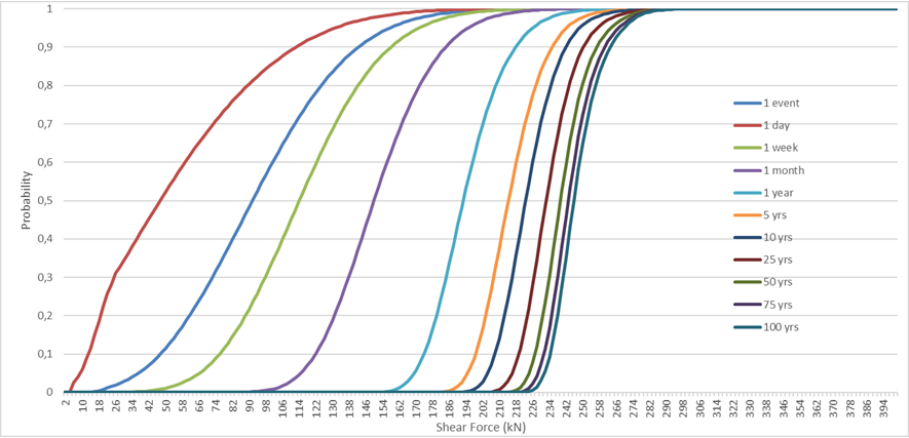


Figure 8. *Expected maximum shear forces from 30 days of data [10]*

4.3. Dynamic Amplification Factor

The dynamic load, usually in a form of Dynamic Amplification Factor – DAF, is accounted for in the design codes either with special factor as in German code DIN 1072:

DAF = 1,4 - 0,008 X L

where L is the span length in m, or is already accounted for in the static loading scheme [6].

Several studies (e.g. [4], [11]) indicated that theoretical DAF values from the design codes are over-conservative as the DAF values decrease with total loading on the bridges. If measurements on a specific bridge are note preformed, the ARCHES project recommended using values around 1.15, which are much lower than those from the design codes.

If SiWIM measurements are performed, DAF values can be measured which was done on the test bridge. Although measurements were too short (at least 100 000 loading events are recommended for reliable results), the available 39.791 vehicles resulted in the expected Gumbel shape of distribution of DAF. If plotted as a function of gross vehicle weights (Figure 9), the results are within expectations, with DAF values reducing as the GVW increases.

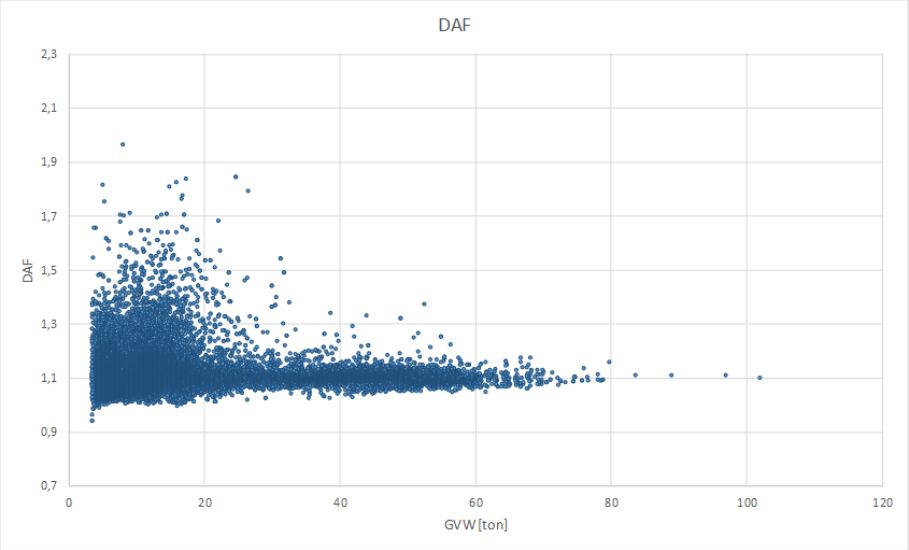


Figure 9. *Experimentally evaluated DAF values as a function of GVW [10]*

However, the bridge itself is quite ‘inactive´, while the first natural frequency was still at 3.2 Hz, which is very close to the frequency of heavy vehicle bounce. In Figure 9 these vehicles are presented as high value dots

and there are not so many. Consequently, the average value of DAF is 1.10, compared to typical 1.05 for typical 'quieter' bridges. Similarly, 4% of DAF values exceed 1.30, which is also slightly above the value for quitter bridges.

Still, the DAF values of the heaviest vehicles decrease with gross weight and with the maximum strains induced. This is one of the key characteristics that can optimize structural analysis and demonstrates reserves in behavior of the bridge.

5. CONCLUSIONS

The study focused on traffic analysis, bridge assessment, and system capabilities, utilizing 30 days of data for evaluation and comparing results with previous measurements on the same location. Weigh-in-motion techniques, particularly Bridge WIM (B-WIM), were employed to measure vehicle weights accurately at highway speeds, providing detailed information on axle loads, gross weights, velocities, and axle spacing for heavy vehicles over 3.5 tons.

Furthermore, the study emphasized the role of WIM data in optimizing bridge assessments by providing accurate data for structural models and load testing procedures. The use of soft load testing based on WIM data was highlighted as a valuable tool for assessing structural behavior and optimizing maintenance strategies. Additionally, the study discussed the influence of traffic loading on pavement performance, considering factors like ESALs, pavement thickness design, and remaining service life predictions. It underscored the importance of proper maintenance planning based on traffic data to ensure optimal infrastructure management.

Overall, the conclusions emphasize the critical role of weigh-in-motion systems in enhancing traffic analysis, bridge assessments, and maintenance planning by providing accurate data for structural evaluations and load modeling. The study's findings underscore the significance of utilizing WIM data to optimize infrastructure management practices and ensure the safety and longevity of bridges under varying traffic conditions.

Works Cited

[1] Ang, A. H. & Tang, W. H., 1975. Probability Concepts in Engineering Planning and Design. s.l.:Wiley and Sons.

[2] ARCHES D16, 2009. Recommendations on the use of soft, diagnostic and proof load testing. Brussels: European Commission, http://arches.fehrl.org.

[3] ARCHES, 2009. Report D08: Recommendations on bridge traffic load monitoring, Brussels: European Commission.

[4] ARCHES, 2009. Report D10: Recommendations on dynamic amplification allowance, Brussels: European Commission.

[5] COST 323, 2002. Weigh-in-Motion of Road Vehicles: Final Report of the COST 323 Action. Jacob, B., OBrien, E.J., Jehaes, S. (Eds.), Paris: LCPC

[6] EN 1991 - Eurocode 1, 2009. Actions on structures, Part 2: Traffic loads on bridges. s.l.:CEN.

[7] Enright, B., 2010. Simulation of traffic loading on highway bridges - PhD thesis, Dublin: University College Dublin.

[8] Mamllouk, M. et.al., 2011, Data collection to support implementation of the mechanic-empirical pavement design guide for country roads. J. Transp. Res. Board

[9] OBrien, E., Schmidt, F., Hajializadeh, D. & Sheils, E., 2015. A Review of Probabilistic Methods of Assessment of Load Effects in Bridges. Structural Safety 53.

[10] PESR, 2023. Report: SiWIM Bridge Weigh-In-Motion technology, Stopanski Dvor. Trzin, 2023.

[11] SAMARIS, 2006. Report D30: Guidance for the optimal assessment of highway structures. http://www.fehrl.org/?m=32&id_directory=355 ured. Ljubljana: Zavod za gradbeništvo Slovenije

[12] Žnidarič, A., 2017. Influence of number and quality of weigh-in-motion data on evaluation of load effects on bridges, Doctoral disertation. Ljubljana: University of Ljubljana.

[13] Žnidarič, A., Kreslin, M., Lavrič, I. & Kalin, J., 2012. Simplified approach to modelling traffic loads on bridges. Athens, Grece, Elsevier publishing.

[14] Žnidarič, A., Lavrič, I., Kalin, J. & Kulauzović, B., 2014. SiWIM Bridge Weigh-in-Motion Manual, 5th Edition. Ljubljana, Slovenia.

[15] Žnidarič, A. & Moses, F., 1997. Structural Safety of Existing Road Bridges. Kyoto, McGraw Hill, pp. 1843-1850.

ZNAČAJ GEOPROSTORNIH BAZA PODATAKA U UPRAVLJANJU PUTNOM IMOVINOM

Zoran Pešović
Javno preduzeće ''Putevi Srbije'', zoran.pesovic@putevi-srbije.rs
Marija Dotto
Javno preduzeće ''Putevi Srbije'', marija.dotto@putevi-srbije.rs
Ana Vučićević
Javno preduzeće ''Putevi Srbije'', ana.vucicevic@putevi-srbije.rs

Rezime: Kako bi se na optimalan i efikasan način planirala sredstva, pratile performanse puta i upravljalo putnom infrastrukturom neophodno je uspostavljanje adekvatnog sistema za prikupljanje, upravljanje i analizu podataka o putu i saobraćaju. Osnova za uspostavljanje sistema za upravljanje putnom imovinom (RAMS) su ažurne baze podataka o putnoj mreži i saobraćajno-tehničkim podacima o putu. Baza podataka kao osnova sistema za upravljanje putnom imovinom treba da sadrži prostornu prezentaciju podataka o putnoj mreži sa podacima o geometriji svakog putnog segmenta, putnom inventaru, funkcionalnim i strukturnim karakteristikama kolovoznih konstrukcija, podatke o saobraćaju, kao i podatke o ulaganjima u puteve. Baza podataka sa ažuriranim podacima je ključan alat za procenu vrednosti puteva i donošenje strateških odluka u vezi sa putnom infrasturkturom. JP ''Putevi Srbije'' poseduje veliki broj specijalizovanih baza podataka koje redovno ažurira i koje predstavljaju osnovu za integraciju i uspostavljanje RAMS-a na nivou preduzeća.

Ključne reči: *RAMS, baze podataka, GIS, mreža puteva*

THE IMPORTANCE OF GEOSPATIAL DATABASES IN ROAD ASSETS MANAGEMENT

Zoran Pešović
Public Enterprise ''Roads of Serbia'', zoran.pesovic@putevi-srbije.rs
Marija Dotto
Public Enterprise ''Roads of Serbia'', marija.dotto@putevi-srbije.rs
Ana Vučićević
Public Enterprise ''Roads of Serbia'', ana.vucicevic@putevi-srbije.rs

Abstract: In order to optimally and efficiently plan resources, monitor road performance and manage road infrastructure, it is necessary to establish an adequate system for collecting, managing and analyzing data on pavement structures and traffic. The basis for the establishment of a road asset management system (RAMS) are up-to-date databases on the road network and traffic-technical data on the road. The database as the basis of the road asset management system should contain a spatial presentation of road network data with data on the geometry of each road segment, road inventory, functional and structural characteristics of pavement structures, traffic data, as well as data on road investments. A database with up-to-date roads is a key tool for evaluating road values and making strategic decisions about road infrastructure. PE Roads of Serbia has a large number of specialized databases that it regularly updates and which represent the basis for the integration and establishment of RAMS at the company level.

Keywords: *RAMS, data bases, GIS, road network*

1. UVOD

Geoprostorne baze podataka i GIS tehnologija predstavljaju moćan alat koji čini osnovu za uspostavljanje sistema za upravljanje putnom imovinom (RAMS – Road Asset Management System), značajni su u različitim fazama upravljanja saobraćajem, identifikovanju problema i rizika i za definisanje prioriteta za adekvatno održavanje puteva i putne infrastrukture. Kako bi se uspostavio sistem za upravljanje putnom imovinom u osnovi je neophodno da postoje kvalitetno struktuirane i ažurne baze podataka. JP ''Putevi Srbije'' kao upravljač državnih puteva prema zakonu ima obavezu da vodi evidenciju o putevima i saobraćajno tehničkim podacima o putu, pa je u skladu sa ovom obavezom u preduzeću oformljeno posebno Odeljenje baze podataka čije se primarne aktivnosti odnose na upravljanje i održavanje specijalizovanih baza podataka o različitim elementima puta i saobraćajnim podacima. Baze podataka se redovno ažuriraju i koriste u različitim aktivnostima u okviru upravljanja mrežom državnih puteva.

Obzirom da su baze podataka razvijene prema aktuelnim tehnološkim rešenjima i da se redovno ažuriraju, sledeći zadatak je uspostavljanje RAMS-a. RAMS je sistem koji se koristi za prikupljanje, upravljanje i analizu podataka za potrebe planiranja, razvoja i održavanja puteva. Ovakav pristup upravljanja putnom infrastrukturom predstavlja strateški i sistematski proces održavanja puteva tokom njihovog životnog ciklusa na najoptimalniji način u ekonomskom pogledu, u skladu sa inženjerskim principima i poslovnom praksom. U ovom radu biće predstavljen dosadašnji razvoj sistema baza podataka u JP ''Putevi Srbije'', način prikupljanja i ažuriranja podataka o putnoj mreži, a sve u cilju razvoja sistema za upravljanje putnom imovinom.

2. USPOSTAVLJANJE SISTEMA ZA UPRAVLJANJE PUTNOM IMOVINOM

Putna mreža čini jednu od najvećih kapitalnih vrednosti u Srbiji, a drumski saobraćaj predstavlja osnovni vid transporta robe i putnika. Putnim pravcima preko Srbije uspostavljene su efikasne veze zapadne i centralne Evrope sa južnom i jugoistočnom Evropom. Prema aktuelnom referentnom sistemu državnih puteva[1] ukupna dužina državne putne mreže u Republici Srbiji, bez teritorije AP Kosovo i Metohija, iznosi 14.521,815 km, od čega su putevi IA reda (autoputevi) 962,872 km, putevi IB reda 3.828,147 km, putevi IIA reda 6.963,798 km i putevi IIB reda 2.766,998 km. Takođe, drumska infrastruktura je u konstantnom razvoju i u toku je izgradnja većeg broja saobraćajnica.

Tabela 1. *Dužina mreže državnih puteva (km)*

Kategorija državnog puta	**Teritorija Republike Srbije**		**Teritorija Republike Srbije bez teritorije AP Kosovo i Metohija u skladu sa rezolucijom SB UN 1244**		**Teritorija AP Kosovo i Metohija u skladu sa rezolucijom SB UN 1244**	
	Izgrađeno	Ukupno	Izgrađeno	Ukupno	Izgrađeno	Ukupno
I i II reda	**16436,013**	**16999,152**	**14521,815**	**15029,654**	**1914,198**	**1969,498**
I reda	5418,106	5559,271	4791,019	4932,184	627,087	627,087
II reda	11017,907	11439,881	9730,796	10097,470	1287,111	1342,411
IA	962,872	1080,117	962,872	1080,117		
IB	4455,234	4479,154	3828,147	3852,067	627,087	627,087
IIA	7822,546	7928,287	6963,798	7061,510	858,748	866,777
IIB	3195,361	3511,594	2766,998	3035,960	428,363	475,634

(Izvor: Referentni sistem državnih puteva – oktobar 2023)

Javno preduzeće „Putevi Srbije“ kao upravljač državnih puteva prema zakonu je u obavezi da razvija, održava i upravlja putnom infrastrukturom na način da zadrži i unapredi njenu vrednost tako da ostvari ekonomičnost u održavanju puteva i da svoje aktivnosti sprovodi u cilju ekonomskog razvoja zemlje. Na ovom putu glavni zadatak je da sve aktivnosti sprovodi tako da obezbedi bezbednost učesnicima u saobraćaju. Zakonom se nalaže i obaveza upravljača puta da vodi evidenciju o mreži puteva i saobraćajno tehničkim podacima o putu tako što se precizno definiše koji su sve elementi deo evidencije i koje informacije treba da budu sadržane za svaki element iz evidencije [3]. Kako bi se ispunili osnovni zadaci i ciljevi upravljača puta, ali i išlo u korak sa razvojem putnog sektora neophodno je razviti adekvatan sistem za upravljanje putnom imovinom.

Primarni cilj upravljanja putnom imovinom je optimizacija održavanja državnih puteva, uspostavljanje potrebnog kvaliteta uz minimalne troškove, doprinos u drugim društvenim sferama i modernizacija mreže državnih puteva na osnovu dugoročnih odluka. Kako bi se uspostavio adekvatan RAMS potrebno je da se sprovedu određene aktivnosti:

- Uspostavljanje baze podataka o kompletnom inventaru mreže puteva
- Uspostavljanje jasne slike o trenutnom stanju putne mreže
- Sprovođenje postupka procene vrednosti imovine
- Definisanje budućih potreba u saobraćaju i usluga koje je potrebno pružiti korisnicima puta
- Procenjivanje potrebe i troškova održavanja mreže puteva

[1] Odluka o usvajanju referentnog sistema mreže državnih puteva Republike Srbije, od 27.10.2023.god

- Određivanje prioriteta u ciljevima koji se odnose na kvalitet i učinak putne mreže
- Definisanje scenarija finansiranja za redovno održavanje i nadogradnju putne imovine
- Definisanje strategije (RAM plan)
- Sprovođenje RAM plana

Iz navedenog se može zaključiti da su glavne komponente na kojima počiva RAMS:

1. Prikupljanje i ažuriranje podataka o svim karakteristikama puta, inventaru, stanju puta i saobraćaju
2. Baze podataka uspostavljene na osnovu informacija koji se prikupljaju
3. Alati za analizu i donošenje odluka o održavanju i ulaganju u putnu mrežu (npr. HDM4)
4. Izveštaji koje će koristiti donosioci odluka prilikom definisanja strategije za upravljanje putnom imovinom.

Razvoj informacionih tehnologija donosi inovativne mogućnosti za razvoj RAMS-a, posebno u delu obrade i analize podataka. U susret modernim tehnologijama za odgovorno i efikasno upravljanje mrežom puteva i saobraćajem, baze podataka i GIS imaju ključnu ulogu, pa je shodno tome veliki akcenat stavljen na razvoj i unapređenje ovih sistema. Pouzdani i tačni podaci su neophodni u svakoj fazi upravljanja putnom imovinom i saobraćajem kako bi se na ispravan način identifikovali problemi, faktori rizika, postavili ciljevi, definisale strategije i pratio učinak.

3. PRIKUPLJANJE PODATKA O PUTNOJ IMOVINI

Ključni cilj RAMS-a je da obezbedi činjeničnu osnovu za poboljšanje kvaliteta donošenja odluka u vezi sa ulaganjima u putnu mrežu, projektovanjem, izgradnjom i održavanjem. Donošenje kvalitetnih odluka zahteva ažurno stanje inventara putne mreže, procenu trenutnog stanja kolovoza i upotrebne vrednosti, procenu budućeg stanja i implikacija koje mogu dovesti do promene stanja na mreži puteva. U savremenom kontekstu baza podataka je centralni segment RAMS-a. Formiranje baze podataka sa istorijskim i ažurnim podacima o kolovozu neophodno je za efikasno funkcionisanje i kvalitetno donošenje odluka u okviru RAMS-a.

Tipovi podataka potrebni za upravljanje kolovozom mogu se klasifikovati kao podaci o inventaru i podaci o stanju kolovoza. Inventarski list puta čine podaci o pružanju puta (geometrija puta), podaci koji se odnose na trup puta i elemente za odvodnjavanje, podaci o objektima (mostovi, tuneli i dr.) i pratećem sadržaju (parkinzi, odmorišta, stanice za snabdevanje gorivom i dr.), saobraćajni priključci, saobraćajna signalizacija i oprema, objekti za potrebe javnog puta (putne baze, naplatne stanice i dr.), podaci o prelazu puta preko železničke pruge i sva ostala oprema na putu (kao što su uređaji za kontrolu saobraćaja – ITS oprema). Podaci o stanju kolovoza odnose se na mere kvaliteta kolovoza i čine ih podaci o performansama/hrapavosti, strukturi, oštećenju i klizanju.

Prikupljanje podataka vrši se na tri nivoa:

- Prikupljanje podataka na nivou mreže za potrebe donošenja opštih strateških odluka i planiranja na nivou mreže
- Prikupljanje podataka na nivou projekta za donošenje odluka o najoptimalnijim aktivnostima koje će se primeniti na konkretnoj deonici puta
- Prikupljanje podataka na nivou istraživanja kako bi se prikupili detaljni podaci o specifičnim osobinama kolovoza

3.1. Izbor metode prikupljanja podataka

U postupku upravljanja i vođenja RAMS-a obično je najobimnija i najskuplja aktivnost upravo prikupljanje podataka. U skladu sa tim važno je na adekvatan i optimalan način organizovati dinamiku ovog postupka, tako da se prikupljanje podataka ne vrši previše često, a da se pri tome ne izgubi na ažurnosti podataka i da se ispoštuju obaveze propisane zakonom. Takođe, važno je odabrati tehnologiju prikupljanja podataka (zavisno od tipa podataka) koja će zadovoljiti ciljeve, ali i biti u skladu sa raspoloživim resursima i načinu rada upravljača puta. Prilikom izbora metode snimanja potrebno je obezbediti pouzdanost podataka i ostvariti kompromis između tačnosti metode i produktivnosti. Nakon samog postupka prikupljanja podataka, a pre skladištenja u bazu podataka kojom upravlja RAMS neophodno je sprovesti postupak kvalitativne i kvantitativne kontrole i verifikacije podataka. Samim tim potrebno je pored mernih instrumenata obezbediti i resurse za efikasan i kvalitetan transfer podataka u bazu. Čitav postupak treba da bude obezbeđen tehničkom podrškom, adekvatnim kadrom i finansijskim sredstvima za kontinuirano održavanje procesa prikupljanja podataka.

Za potrebe prikupljanja podataka o mreži državnih puteva koja se prostire na teritoriji čitave zemlje i ima veliki protok saobraćaja nisu pogodne ručne ili poluautomatske metode koje iziskuju puno vremena i zahtevaju velike ljudske resurse, već je efikasno i svrsishodno opredeliti se za automatizovane metode sa specijalizovanom kompozitnom opremom kojom je moguće meriti više parametara istovremeno. Ove metode su brze, pouzdane i obezbeđuju direktan prenos podataka na dalju obradu, ali sa druge strane zahtevaju veća finanskijska ulaganja.

3.2. Dinamika i obim prikupljanja podataka

U Republici Srbiji dinamika i obim prikupljanja podataka o elementima puta, saobraćaju i funkcionalnim i strukturnim karakteristikama kolovoznih konstrukcija definisani su Zakonom o putevima, Pravilnikom o načinu označavanja i evidenciji javnih puteva, Pravilnikom o radovima na redovnom održavanju javnih puteva i ostalim zakonskim aktima koji definišu ovu oblast. Kroz zakone i pravilnike definisani su svi elementi puta za koje je upravljač dužan da vodi ažurnu evidenciju (bazu podataka), kao i osnovni set atributa koji je potrebno da sadrži svaki od elemenata. Prema navedenim zakonskim aktima, a radi utvrđivanja stanja javnog puta vrše se redovni, sezonski, sistematski i vanredni pregledi. Redovnim pregledima se utvrđuje potreba za izvođenjem radova na pojedinim elementima javnog puta i njihova učestalost zavisi od kategorije puta. Sezonski pregledi se obavljaju sa ciljem utvrđivanja i evidentiranja stanja pojedinih elemenata javnog puta kao što su stanje kolovoza, sistema za odvodnjavanje, stanje bankine, razdelnog pojasa, kosina useka i nasipa, stanje trupa i pojave sleganja, odrona i klizanja terena, stanje signalizacije i opreme i stanje objekata na putu. Na osnovu utvrđenog stanja elemenata kolovoza proizilazi predlog prioritetnih radova za redovno održavanje. Sistematskim pregledima i merenjima utvrđuje se stanje i daje ocena pokazatelja funkcionalnih svojstava (podužna ravnost, otpornost na klizanje, oštećenost kolovozne površine) i nosivost kolovoznih konstrukcija (u okviru Tabele 2 dat je prikaz učestalosti merenja ovih parametara). Pored navedenih postoji i vanredni pregled koji se vrši nakon vanrednih događaja kao što su elementarne nepogode u zoni puteva. Pravilnikom su definisane specifičnosti, odnosno parametri koji se mere za svaki element puta, a sama dinamika se definiše u skladu sa kategorijom puta.

Tabela 2. *Učestalost merenja pokazatelja funkcionalnih svojstva i nosivosti kolovoznih konstrukcija*

Indikator godine	Ravnost		Otpornost na klizanje		Oštećenost kolovozne površine	Nosivost
	Državni putevi I reda	Ostali javni putevi	Državni putevi I reda	Ostali javni putevi		
N (1)	+	+	+	+	+	+
N+3	+	+	+	+		
N+4	+		+			
N+5	+		+		+	+
N+6	+	+	+	+		
N+7	+		+		+	
N+8	+		+		+	
N+9	+	+	+	+	+	
N+10	+		+		+	+
* N (1) – godina u kojoj započinje održavanje kolovozne konstrukcije, odnosno početna godina eksploatacije posle građenja, rehabilitacije ili rekonstrukcije;						
* N (+3) – N (+10) – treća godina do desete godine od početne godine održavanja kolovozne konstrukcije;						

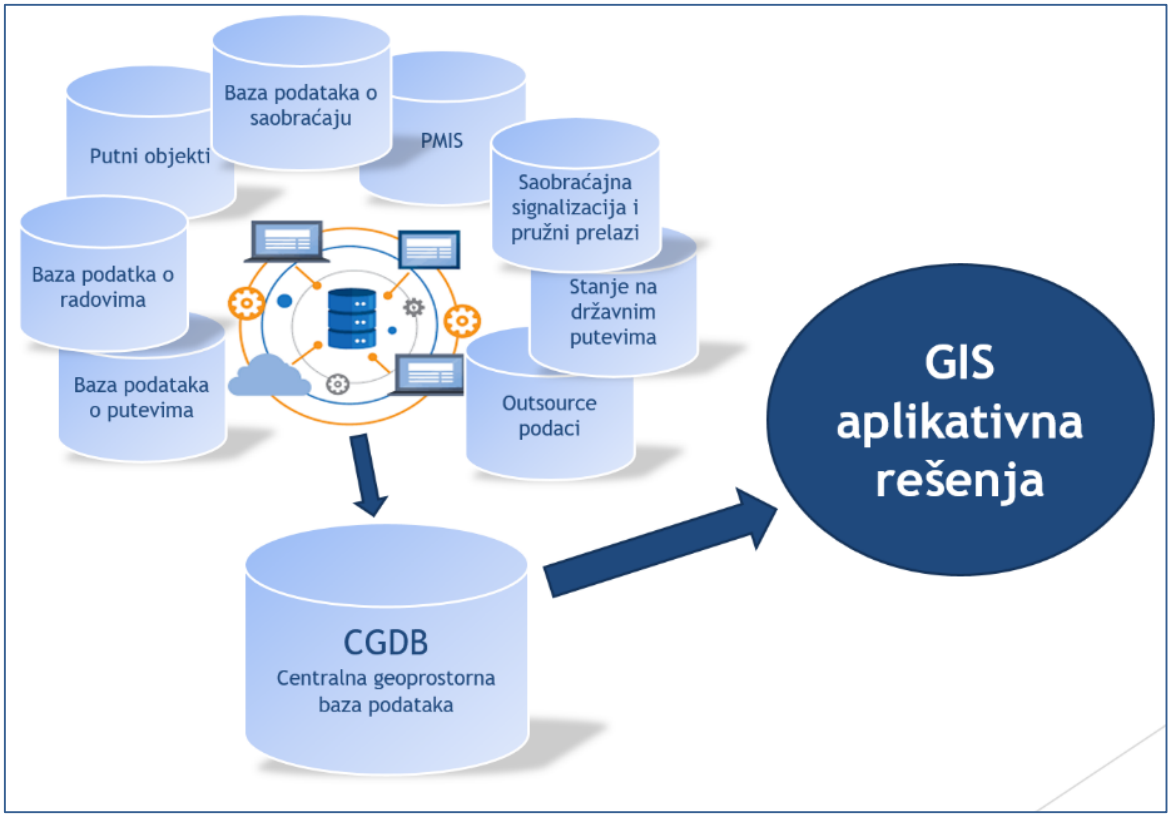
(Izvor: Pravilnik o radovima na redovnom održavanju javnih puteva "Sl. glasnik RS", br. 15/2020)

4. RAZVOJ BAZA PODATAKA U JP ‘’PUTEVI SRBIJE’’

Obaveza upravljača puta za formiranje geoprostorne baze podataka o putevima i saobraćajno tehničkim podacima o putu sa neophodnim atributima propisuje se Zakonom o putevima i pratećim dokumentima. U cilju ispunjenja ovih obaveza upravljača puta u okviru Sektora za upravljačko informacione sisteme u saobraćaju, u Odeljenju baze podataka razvijen je veliki broj specijalizovanih baza podataka za upravljanje različitim segmentima saobraćaja i putne mreže. Sve baze podataka su smeštene na serverskoj infrastrukturi JP ‘’Putevi Srbije’’ na PostgreeSQL ili MC SQL sistemu za upravljanje bazom podataka i sadrže geoprostornu komponentu. Takođe, za svaku bazu razvijene su i prateća veb GIS aplikativna rešenja za pristup i upravljanje podacima na različitim korisničkim nivoima. Baze podataka se i dalje razvijaju i nadograđuju, a za sada se mogu izdvojiti sledeće celine:

- Baza podataka o putevima
- Modul za dinamičko izveštavanje o radovima
- Baze podataka o mostovima, tunelima i potpornim konstrukcijama
- Baza podataka o saobraćajnoj signalizaciji i opremi i pružnim prelazima
- Baza podataka o saobraćaju
- Baza podataka o saobraćajnim nezgodama
- Putno meteorološki informacioni sistem
- Stanje na državnim putevima
- Centralna geoprostorna baza podataka JPPS

Sledeći korak u daljem razvoju sistema baza podataka je njihova integracija i uspostavljanje centralnog softverskog rešenja koje će zadovoljiti osnovna načela za uspostavljanje RAMS-a sa mogućnošću određivanja prioriteta tokom procesa planiranje i operativnog upravljanja nad radovima na održavanju državnih puteva.



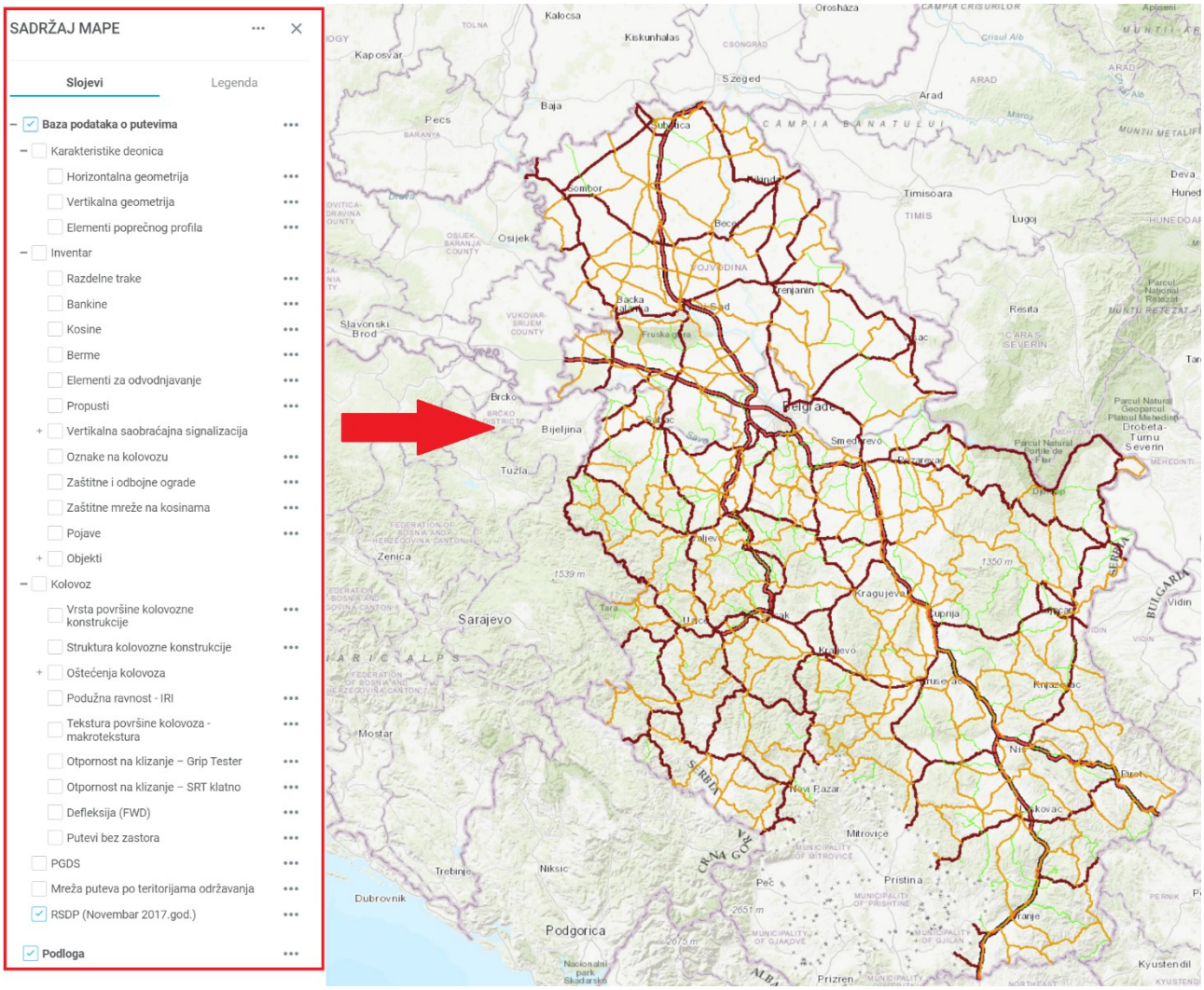
Slika 1. *Sistem baza podataka*
(Izvor: JP ‘’Putevi Srbije’’)

U nastavku će biti predstavljene produkcione specijalizovane baze podataka koje su primarni činioci u budućem razvoju RAMS-a.

4.1. Baza podataka o putevima

Baza podataka o putevima sadrži obiman set podataka o geometriji puta, putnom inventaru, strukturnim i funkcionalnim karakteristikama kolovoznih konstrukcija za celu mrežu državnih puteva i poslednji put je ažurirana 2019. godine. Na osnovu podataka iz ove baze sprovedena je klasifikacija oštećenja po deonicama i izvršena ocena stanja kolovoza sa preporukama o merama sanacije, čime su kreirani višegodišnji planovi održavanja i ulaganja u mrežu državnih puteva. Shodno svojoj upotrebnoj vrednosti i sveobuhvatnosti predviđa se da će ova baza podataka predstavljati osnovnu strukturu modela za razvoj RAMS-a.

Ažuriranje baze podataka o putevima vršiće se na osnovu podataka iz ostalih specijalizovanih baza podataka i redovnim merenjima na terenu prema propisanoj metodologiji u okviru Pravilnika o radovima na redovnom održavanju javnih puteva [2]. Podaci iz Baze podataka o putevima se putem GIS servisa publikuju i dostupni su internim korisnicima za potrebe obavljanja različitih radnih procesa i u postupcima odlučivanja.



Slika 2. *Sadržaj Baze podataka o putevima*
(Izvor: Baza podataka o putevima)

4.2. Modul za dinamičko izveštavanje o radovima

Modul za dinamičko izveštavanje o radovima predstavlja deo centralne GIS platforme JP „Putevi Srbije" koji je izrađen za potrebe centralizacije i automatizacije radnih procesa u okviru Sektora za održavanje državnih puteva I i II reda. Modul pruža mogućnost kreiranja, upravljanja i praćenja životnog ciklusa radnog naloga od pokretanja radnog naloga, do praćenja realizacije radova kroz mesečne situacije. Sistem je georeferenciran i omogućava vizualizaciju radova na mapi. Modul za dinamičko izveštavanje o radovima je predvićen da pruža odgovore na upite o ulaganjima, izgradnji, rokovima, putarskim preduzećima zaduženim za održavanje i izvođenju radova i drugim parametrima koji se definišu kroz pokretanje radnih naloga.

Modul je razvijen kao veb GIS aplikativno rešenje koje radi nad bazom podataka o radovima i sastoji se iz 3 segmenta:

- Prvi segment predstavlja aplikaciju za unos podataka o radovima i kreiranje dokumentacije u cilju automatizacije radnog procesa, praćenja i upravljanja podacima o radnim nalozima. Uneti podaci o radovima se na osnovu stacionaža vizualizuju na mreži državnih puteva, na osnovu čega je izrađen drugi segment - GIS preglednik
- U okviru GIS preglednika pored vizuelnog prikaza navedenih podataka moguće je generisati izveštaje o realizaciji po okruzima i opštinama i vršiti druge prostorne analize
- Treći segment predstavljaju interaktivne kontrolne table koje pružaju grafički prikaz realizacije radova prema različitim parametrima za svaki upravni okrug i pripadajuće opštine.

4.3. Baza podataka o mostovima, tunelima i potpornim konstrukcijama

Baza podataka o putnim objektima (mostovi, tuneli i potporne konstrukcije) je posebna celina u sistemu baza podataka i razvijena je kroz tri segmenta za svaki element puta. Bazu podataka prati veb GIS aplikacija za pristup i upravljanje podacima, a sam razvoj baze realizovan je na osnovu izrađenih metodologija i sadrži izuzetno širok spektar atributa. Predviđeno je da se kroz ovaj sistem ažuriranje podataka vrši kroz popunjavanje inventarskih listova i sumarnim pregledom stanja putnih objekata, kao i putem sprovođenja sistematskih pregleda, dok će se kroz različita izveštavanja iz sistema odlučivati o potrebnim aktivnostima na održavanju putnih objekata. Baza podataka o putnim objektima osnova je za razvoj sistema za upravljanje putnim objektima kroz RAMS. Ovim modelom upravljanja putnim objektima obezbeđuje se sistematski pristup u donošenju odluka u vezi sa urgentnim radovima na sanaciji putnih objekata i isplativim planovima održavanja, rehabilitacije i rekonstrukcije.

4.4. Baza podataka o saobraćajnoj signalizaciji i opremi i pružnim prelazima

Evidencija podataka o saobraćajnoj signalizaciji i opremi i pružnim prelazima u osnovi se sastoji od implementacije najnovijih geoprostornih tehnologija uzimajući u obzir postojeća dostignuća iz ove oblasti. Omogućena je integracija podataka o saobraćajnoj signalizaciji i opremi i pružnim prelazima u veb GIS okruženje, pri čemu struktura podataka i izbor atributa zadovoljava zahteve propisane zakonom i ostalim aktima koji regulišu ovu oblast. Geoprostorna baza podataka ističe se zbog mogućnosti korišćenja prostorne komponente podataka koja je od velikog značaja u identifikaciji ovih elemenata. Baza podataka o saobraćajnoj singnalizaciji i opremi i pružnim prelazima kreirana je na osnovu prethodno izrađenih metodologija i sadrži sveobuhvatni set podataka za svaki od elemenata. Predviđeno je da se podaci ažuriraju redovnim obilascima i prikupljanjem podataka putem razvijenih GIS alata za mobilno mapiranje i ažuriranje koji su sinhronizovani sa centralnom produkcionom bazom podataka, ali i putem drugih izvora kao što su globalni projekti snimanja putne mreže.

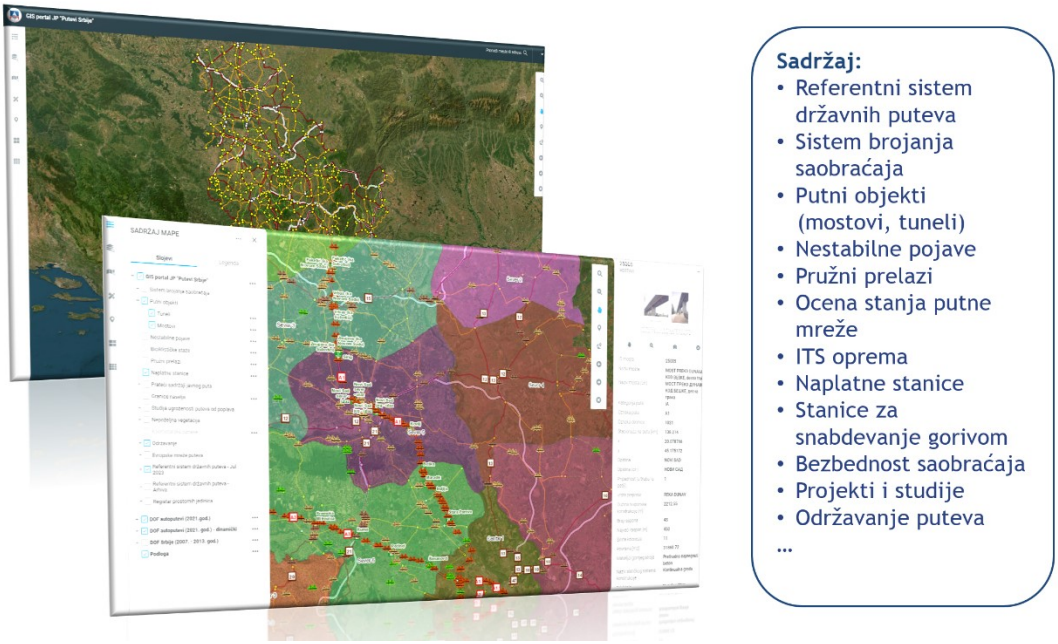
4.5. Baza podataka o saobraćaju

Baza podataka o saobraćaju prikuplja podatke sa automatskih brojača saobraćaja koji su raspoređeni na mreži državnih puteva. Automatski brojači saobraćaja služe za brojanje saobraćaja i kategorizaciju vozila. Rade na principu induktivnih petlji. Napajanje se vrši preko solarnog panela koji se nalazi na vrhu stuba. Automatski brojači saobraćaja snimaju saobraćaj u realnom vremenu, pa se može pratiti satni, dnevni i mesečni protok saobraćaja. Osim brojanja saobraćaja, meri se brzina i prikupljaju podaci o strukturi vozila. Na državnim putevim u ovom trenutku ugrađeno je ukupno 453 brojača, dok je trenutno u toku realizacija projekta ugradnje novih brojača. Standardni period za slanje podataka sa brojača je 15 minuta. Na osnovu ovih podataka vrši se detaljna obrada i dobijaju informacije kao što je prosečni godišnji dnevni saobraćaj. Razvoj ove oblasti predviđa izradu aplikativnog softvera koji će automatizovati obradu podataka i samim tim efikasnije će se voditi evidencija podataka o saobraćaju koji su od velikog značaja za donošenje odluka o ulaganju u putnu infrastrukturu.

4.6. Centralna geoprostorna baza podataka i GIS portal JPPS

Centralna geoprostorna baza podataka razvijena je kao centralno mesto za objedinjavanje svih vrsta podataka o mreži državnih puteva, a u cilju različitih vrsta prostornih i alfanumeričkih analiza. Podaci u centralnoj geoprostornoj bazi podataka se ažuriraju iz različitih izvora, na osnovu podataka iz drugih specijalizovanih produkcionih baza podataka, prikupljanjem podataka na terenu, iz različitih projekata ili studija i sl.

Za razliku od specijalizovanih baza podataka u ovoj bazi se čuvaju podaci sa osnovnim setom atributa, dok se za detaljnije analize o svakom pojedinačnom elementu primenjuju matične baze podataka. Prednost i osnovna namena centralne geoprostorne baze podataka je mogućnost ukrštanja različitih podataka o putu i saobraćaju. Takođe, podaci iz centralne geoprostorne baze podataka su dostupni različitim grupama korisnika unutar preduzeća, a deo podataka dostupan je i javnosti putem veb GIS portala JPPS. Podaci se publikuju putem GIS servisa i prikazuju na veb GIS portal JPPS čime je korisnicima omogućeno da pregledaju i primenjuju osnovne GIS alate za manipulaciju nad podacima. Takođe, ovim pristupom je omogućeno da su korisnicima dostupni ažurni podaci direktno iz centralne baze. Ažuriranjem podataka u centralnoj bazi izmene su direktno vidljive na GIS portalu.



Slika 3. *Veb GIS portal JPPS – interni pristup podacima*
(Izvor: GIS portal JPPS)

5. ZAKLJUČAK

Zakonom o putevima definiše se obaveza upravljača puta da donosi godišnje i petogodišnje izveštaje o izvršenoj kontroli i oceni stanja državnih puteva. Kako bi se kvalitetno odgovorilo na sve zadatke i zakonske obaveze neophodno je uspostaviti plan merenja i ažuriranja različitih grupa podataka. U skladu sa navedenim zahtevima koji su postavljeni pred Upravljača puta razvijaju se specijalizovane baze podataka za praćenje različitih elemenata puta. Ove baze je potrebno planski redovno ažurirati i integrisati ih u jednu celinu koja će predstavljati jezgro RAMS-a.

U proteklih desetak godina razvoj baza podataka u JP “Putevi Srbije” je doživeo ekspanziju i modernizaciju tako da se danas sve baze zasnivaju na principima vodećih tehnoloških rešenja. Primenjuju se savremene metodologije i dostupni su precizni i efikasni alati za prikupljanje podataka. Primena RAMS-a ističe ključne elemente koji su uključeni u upravljanje državnom putnom mrežom i kombinuje menadžment, finansijsku, inženjersku i tehničku praksu kako bi se obezbedio zahtevani nivo usluga. Međutim, glavni izazov za kvalitetnu implementaciju RAMS-a i postizanje funkcionalnog učinka u primeni RAMS-a je uspostavljenje adekvatnih mehanizama za redovno ažuriranje različitih grupa podataka.

Najznačajniji aspekti RAMS-a za njegovu adekvatnu primenu uključuju bazu podataka o putnom inventaru, bazu podataka o stanju putnih deonica i sistem za upravljanje kolovozom. Precizni podaci o putnom inventaru omogućavaju detaljnu analizu i klasifikaciju radova redovnog održavanja. Ovi podaci su ključni za ugovaranje radova po količini i ceni. Podaci o stanju putnih deonica omogućavaju procenu i kreiranje liste prioriteta za održavanje. Usvojeni sistem za upravljanje kolovozom (npr. HDM-4) predstavlja glavni alat za planiranje i upravljanje kolovozom. Uz pomoć metodologije za određivanje rejtinga, moguće je utvrditi koje deonice su najpre i/ili najviše ugrožene i kojima je potrebno najviše pažnje i resursa. Ovim se omogućava formiranje optimalnih planova i programa za održavanje. Sve ove komponente i sistemi su ključni za efikasno i odgovorno upravljanje putevima i održavanje putne mreže jer omogućavaju bolje planiranje, budžetiranje i izveštavanje o stanju infrastrukture i trebalo bi da doprinesu poboljšanju kvaliteta i bezbednosti puteva, te se zato kao jedan od glavnih ciljeva u budućem periodu ispred upravljača puta postavlja upravo integracija baza podataka i uspostavljanje RAMS-a.

Literatura

[1] "Sl. glasnik RS", br. 41/2018, 95/2018 – dr. zakon i 92/2023 – dr. zakon. Zakon o putevima
[2] "Sl. glasnik RS", br. 15/2020. Pravilnik o radovima na redovnom održavanju javnih puteva
[3] "Sl. glasnik RS" br. 84/2015. Pravilnik o načinu označavanja i evidenciji javnih puteva
[4] Pm Du Plessis, A Breytenbach, I Sallie (2021) – Creating an integrated provincial road asset management system (RAMS) using open source technology, Virtual Southern African Transport Conference 2021
[5] Asian Development Bank 2018. *Compendium of Best Practices in Road Asset Management*
[6] Marević, M.; Ištoka Otković, I. 2012. Zakonski okviri i planiranje gospodarenja cestama, Elektronički časopis građevinskog fakulteta Osijek 3(4): 83-92.
[7] Zagvozda, M.; Dimter, S.; Moser V.; Barišić, I. 2019. Primjena GIS tehnologije u sustavima održavanja kolnika, Građevinar 71 (2019) 4: 297-304
[8] Deloitte doo Beograd, Deloitte Central Europe Ltd, WYG International Ltd 2018. *Consulting Services for Road Sector Reform in Serbia*

USE OF REACTIVE MODIFIER FOR BITUMEN AND IMPROVEMENT OF ASPHALT MIXTURE PERFORMANCE

Goran Mladenović[1], Olivier Fleischel[2], Aleksandar Đureković[3], Felix Brueggemann[4]
[1] University of Belgrade, Faculty of Civil Engineering, Belgrade, Serbia
[2] BASF SE, Ludwigshafen, Germany
[3] University of Belgrade, Faculty of Civil Engineering, Belgrade, Serbia
[4] BASF Polyurethanes GmbH, Lemfoerde, Germany

Abstract: *Asphalt pavements are nowadays exposed to ever increasing axle loading and changing climate conditions that are primarily manifested in increasing temperatures. The need for improved performance has resulted in the increased use of modified bitumen and development and use of innovative materials that improve performance, particularly on high temperatures. In this study, a novel liquid, low-viscous reactive additive has been used for bitumen modification. The performance of typical asphalt mixture used for base layers on heavily trafficked roads and highways in Serbia with road bitumen B50/70 modified with 3% of an isocyanate-based additive has been compared to the performance of same mixture with PmB 45/80-65. The testing included water sensitivity, resistance to permanent deformation, stiffness and fatigue. The results obtained so far show at least comparable or slightly improved resistance to water and rutting of mixture with additive compared to mixture with PmB. The master curves indicate increased stiffness over the range of operational frequencies/temperatures, while at low temperatures the stiffness is comparable to mixture with PmB.*

Keywords: *Isocyanates, reactive modification, polymer modified bitumen (PmB), rutting, stiffness, fatigue*

PRIMENA REAKTIVNOG MODIFIKATORA ZA BITUMEN RADI POBOLJŠANJA KARAKTERISTIKA ASFALTNIH MEŠAVINA

Goran Mladenović[1], Olivier Fleischel[2], Aleksandar Đureković[3], Felix Brueggemann[4]
[1] Univerzitet u Beogradu, Građevinski fakultet, Beograd, Srbija,
[2] BASF SE, Ludwigshafen, Nemačka
[3] Univerzitet u Beogradu, Građevinski fakultet, Beograd, Srbija
[4] BASF Polyurethanes GmbH, Lemfoerde, Nemačka

Abstract: *Asfaltni kolovozi su danas izloženi sve većem osovinskom opterećenju i promenljivim klimatskim uslovima koji se prvenstveno manifestuju u porastu temperatura. Potreba za poboljšanim performansama rezultirala je povećanom upotrebom modifikovanog bitumena i razvojem i upotrebom inovativnih materijala koji poboljšavaju performanse, posebno na visokim temperaturama. U ovoj studiji, novi tečni, nisko viskozni hemijski aditiv je korišćen za modifikaciju bitumena. Performanse tipične asfaltne mešavine koja se koristi za slojeve gornje podloge na putevima i autoputevima sa velikim saobraćajnim opterećenjem u Srbiji sa putnim bitumenom B50/70 modifikovanim sa 3% aditiva na bazi izocijanata upoređene su sa performansama iste mešavine sa PmB 45/80-65. Ispitivanje je uključivalo osetljivost na vodu, otpornost na trajne deformacije, krutost i zamor. Do sada dobijeni rezultati pokazuju barem uporedivu ili neznatno poboljšanu otpornost na vodu i kolotrage mešavine sa dodatkom aditiva u poređenju sa mešavinom sa PmB. Master krive ukazuju na veću krutost u opsegu radnih frekvencija/temperatura, dok je na niskim temperaturama krutost uporediva sa mešavinom sa PmB.*

Keywords: *isocianat, reaktivna modifikacija, polimer-modifikovani bitumen (PmB), trajna deformacija, krutost, zamor*

1. INTRODUCTION

Asphalt pavements are nowadays exposed to ever increasing axle loading and changing climate conditions that are primarily manifested in increasing temperatures, put increasing demand on use of improved materials that would be able to resist the most typical distresses, such as rutting, thermal and fatigue cracking over the pavement life cycle.

The component that has the biggest impact on the performance of asphalt mixtures is the asphalt binder, which, as extensively explained in [1], is a complex colloidal material composed by a polar phase (*n*-heptane insoluble) and a less polar to un-polar phase (*n*-heptane soluble). Often, the highly polar phase is referred to as asphaltene fraction in contrast to the partially polar to nonpolar maltene fraction containing resins, aromatics and saturates [2].

[1] Autor zadužen za korespodenciju: email emladen@imk.grf.bg.ac.rs

Many researches have focused on the development of asphalt binder additives that can help asphalt mixtures be less susceptible to rutting, fatigue failure and/or thermal cracking. The most common way to modify the asphalt binder consists in the addition of polymers. The different additives fall traditionally into two categories, elastomers and plastomers, and depending on their composition can produce a physical and/or a chemical modification. Polymer modifiers like SBS, recycled tire rubber, ethyl vinyl acetate (EVA), reactive ethylene terpolymer, among many others have been intensively used in asphalt mixtures [3–5]. The main goal of modifying an asphalt binder is to increase the stiffness at high temperatures, making the binder less susceptible to rutting, and lowering the stiffness at low temperatures, giving the binder the ability to relax cryogenic stresses in winter. In other words, asphalt modification seeks to extend the useful temperature range of the asphalt binder to withstand the increasing traffic loads and extreme climatic conditions [6].

The most commonly used polymer by the European pavement industry is the elastomer Styrene-butadiene-styrene (SBS), a block copolymer. Other popular additives include recycled tire rubber and plastomeric polymers like Ethylene Vinyl Acetate (EVA). The use of SBS may lead to phase separation and/or poor distribution of the polymer within the binder, while use of recycled tire rubber results in extensive emissions in asphalt mixing plants [2]. Plastomeric polymers like EVA have been widely used to modify asphalt binders. EVA increases the rutting stability and reducing the thermal susceptibility of the binder, but is not exempt of storage stability problems [4–7].

Regarding chemical modifications of asphalt binders, the most popular additive is a reactive ethylene terpolymer (Elvaloy®). This polymer is believed to produce a chemical reaction that leads to a network between asphaltenes and the polymer [1,8]. This network increases the stiffness of the binder, increasing rutting stability and reducing the thermal susceptibility. It solves the phase separation problems that other additives have, but can lead to low temperature cracking, and when overdosing, could lead to severe gelation issues [8]. To summarize, there are many alternatives when it comes to enhancing the performance of asphalt binders.

The additive used in this study is a liquid isocyanate-based low-viscous binder additive developed by BASF, which has been recently made commercially available. This additive creates a chemical network among the molecules within the asphalt binder, increasing the stiffness and the stability at high temperatures, and thus, the resistance to permanent deformation. Bitumen is known to bear nucleophilic functionalities within its polar structures like alcohol, amino and thiols groups, for example. The working principle is that the isocyanate group –NCO reacts with the nucleophilic groups within the bitumen, creating a chemical flexible network [2].

The main objective of this study is to provide comparison of two asphalt mixtures for the base course AC 22 BASE made with limestone aggregate and with different binders, one with PmB 45/80-65 that is used for the asphalt layers for most heavily loaded motorways, highways and streets in Serbia, and one with plain bitumen, B50/70 that is routinely available on local market, with 3% of an isocyanate-based additive from BASF.

2. MATERIALS AND METHODS

2.1. Materials

Two asphalt mixtures for base course with maximum aggregate size of 22 mm (AC 22 BASE) and with two types bitumen, polymer modified bitumen PmB 45/80-65, and plain bitumen, B50/70 with 3% of an isocyanate-based additive (ISO P101) are used in this study. The optimal content of the additive was obtained based on laboratory testing of both types of bitumen and comparison of their properties, performed by BASF, Germany. The mixing of additive and bitumen was performed in the laboratory following the Producer's instructions.

The properties of the bitumen are presented in Table 1.

Table 1. *Properties of bitumen*

Property	Method	PmB 45/80-65	B50/70	B50/70+ 3% ISO P101
Penetration (25°C, 0.1 mm)	SRPS EN 1426:2017	55.7	46.8	23.5
Softening point (°C)	SRPS EN 1427:2017	82.7	55.4	74.2
Penetration index	SRPS EN 12591:2013	5.0	-0.1	1.7
Specific gravity (kg/m^3)	SRPS EN 15326:2013	1026	1032	1030

Mineral mixture was made of limestone aggregate Krst Valjevo and limestone filler Pro-kalk, Donje Crniljevo.

The composition of mineral mixture with basic information about aggregate source and type are presented in Table 2.

Table 2. *Stone aggregate fractions used for AC22 BASE asphalt mixture*

No.	Content in the mineral mixture (mass %)	Description	Fraction Aggregate Size	Source
1	7.0	Filler – Limestone	< 0.09 mm	Pro-kalk, Donje Crniljevo
2	37.0	Limestone (sedimentary rock)	0/4 mm	Krst, Valjevo
3	16.0	Limestone (sedimentary rock)	4/8 mm	Krst, Valjevo
4	23.0	Limestone (sedimentary rock)	8/16 mm	Krst, Valjevo
5	17.0	Limestone (sedimentary rock)	16/22 mm	Krst, Valjevo

The properties of the filler are presented in the Table 3.

Table 3. P*roperties of mineral filler*

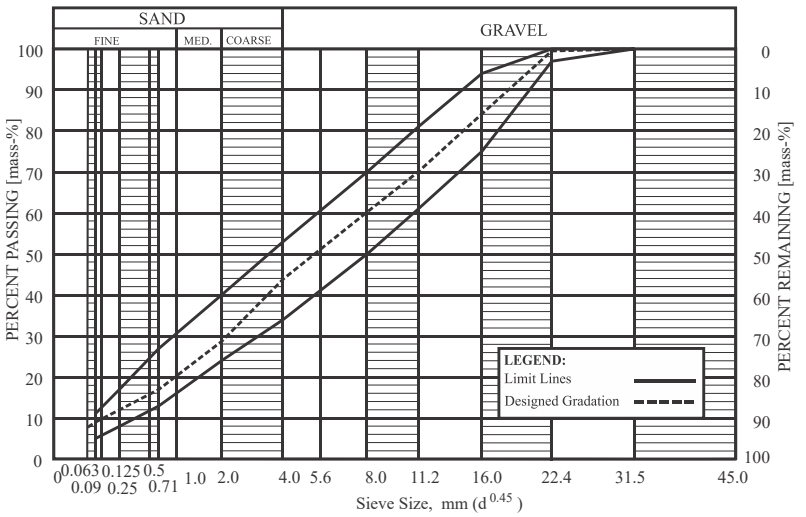
Property	Sieve size (mm)	Method	Value
Particle size distribution (passing through sieve opening, %)	0.063	SRPS B.B8.105:1984 - withdrawn	76.4
	0.09		86.4
	0.25		98.8
	0.71		100.0
Particle density (Mg/m^3)		SRPS EN 1097-7:2023	2.720
Voids in dry compacted mineral filler (%)		SRPS EN 1097-4:2008	29

The properties of the aggregate fractions, as well as the particle size distribution of aggregate fractions is presented in the Table 4.

Table 4. *Particle size distribution of aggregate fractions*

Property	Sieve size (mm)	Method	Aggregate fraction (mm)			
			0/4	4/8	8/16	16/22
Particle size distribution (passing through sieve opening, %)	0.063	SRPS EN 933-1:2013	6.2	0.5	0.1	0.1
	0.09		7.7	0.6	0.1	0.1
	0.25		13.6	0.7	0.2	0.1
	0.71		26.6	0.7	0.2	0.1
	2.0		58.0	0.7	0.2	0.1
	4.0		96.4	7.0	0.2	0.1
	8.0		100.0	96.5	3.0	0.2
	11.2			100.0	43.7	0.4
	16.0				98.7	9.0
	22.4				100.0	97.1
	31.5					100.0
Methylene Blue MB_F (g/kg)		SRPS EN 933-9:2023	3.2			
Methylene Blue MB (g/kg)			1.0			
Sand Equivalent (%)		SRPS EN 933-8:2016	81			
Particle Density (Mg/m^3)		SRPS EN 1097-6:2023		2.700		
Shape Index (%)		SRPS EN 933-4:2010			12.4	
Los Angeles on fraction 8/16 mm (%)		SRPS EN 1097-2:2020			24.3	

Particle size distribution of mineral mixture is provided in the Figure 1.



Sieve Size (mm)	PERCENT PASSING, mass-%	
	Designed Gradation	Limit lines
0.063	7.8	0.063
0.09	9.0	0.09
0.25	12.1	0.25
0.71	17.0	0.71
2.0	28.7	2.0
4.0	43.9	4.0
8.0	60.2	8.0
11.2	70.1	11.2
16.0	84.2	16.0
22.4	99.5	22.4
31.5	100.0	31.5

Figure 1. *Gradation of mineral mixture for AC22 BASE with limit lines*

The OBC of AC22 BASE was determined using the Marshall method. The OBC was 3.9% and same OBC was applied for both mixtures.

Properties of both asphalt mixtures with OBC are presented in Table 5.

Table 5. *Volumetric properties, Stability and Flow of both asphalt mixtures*

Asphalt Mixture	Optimum Bitumen Content	Air Voids	Voids in Mineral Aggregate	Voids Filled with Bitumen	Density	Maximum Density	Stability	Tangent. Flow
	OBC	AV	VMA	VFA	G	G_{max}	S	TF
	(%)	(%)	(%)	(%)	(kg/m^3)	(kg/m^3)	(kN)	(mm)
AC 22 BASE PmB 45/80-65	3.9	4.3	13.6	68.7	2440	2549	15.3	1.7
AC 22 BASE B50/70+3% ISO P101	3.9	4.8	14.1	66.0	2428	2550	16.1	1.4
Specifications (PE Roads of Serbia)		3 -6		55 - 74				

2.2. Methods

In addition to testing of properties of componential materials and determination of optimal binder content, the testing program included determination of water sensitivity, resistance to permanent deformation, stiffness modulus with development of master curves and testing resistance to fatigue.

The water sensitivity of both mixtures was tested according to SRPS EN 12697-12:2018, method A, at 25 ^{o}C and expressed by a ratio Indirect Tensile Strength Ratio (ITSR) of ITS of Marshall specimens, compacted with 2 × 35 blows and immersed in water for 70 h at 40°C, and the ITS of dry specimens compacted with same compaction energy.

Testing of the resistance to permanent deformation of asphalt mixtures was performed on a small device, in air, at a temperature of 60°C, after 10 000 cycles (20,000 passes) in accordance with procedure B of SRPS EN 12697-22:2020. For both mixtures, two slabs 320 × 260 × 70 mm were tested for each mixture. In order to simulate field conditions, prior to the compaction of slabs, asphalt mixtures were conditioned at a temperature of 135°C for 4 h.

The stiffness testing was performed according to SRPS EN 12697-26:2018, Annex C – Indirect Tension on Cylindrical Specimens (IT-CY) with diameter, Φ150 mm and height h = 60 mm. The specimens were cored from the slabs previously compacted in the segment compactor in the laboratory. The total of 18 samples were prepared for stiffness and fatigue testing (presented in Figure 2), out of which four specimens were selected for stiffness testing.

Figure 2. *Cylindrical Specimens for stiffness and fatigue testing*

Prior to testing, the specimens were conditioned at test temperature for two hours. Testing was performed at five temperatures 5°C, 10°C, 15°C, 20°C and 25°C, using haversine load waveform, with pulse repetition period of 3 s, and loading time of 125 ms, 200 ms, 300 ms. The maximum horizontal deformation was 8.0 μm. For each testing temperature and loading time, five cycles of loading were performed on two perpendicular directions of each specimen, and stiffness modulus was obtained as average.

The representative frequencies of 1.7 Hz, 2.5 Hz and 3.8 Hz were obtained using Fourier Transformation for loading times of 125 ms, 200 ms, 300 ms [9] and used for construction of master curves.

The stiffness modulus of asphalt mixture obeys the frequency/temperature superposition principle. The master curve of the asphalt mixture is constructed using a sigmoidal model, presented by the following equation [10]:

$$log|E^*| = \delta + \frac{\alpha}{1+e^{(\beta+\gamma \cdot log f_{red})}} \quad [1]$$

where:
f_{red} – reduced frequency, and
$\delta,\alpha,\beta,\gamma$ – fitting parameters.

The results of the complex modulus tests at different temperatures are shifted with respect to time of loading until a single smooth curve emerges, by means of the reduced frequency parameter (f_{red}). The reduced frequency is defined as the actual loading frequency in the test multiplied by the time-temperature shift factor, a(T).

$$f_{red} = a(T) \cdot \mathrm{f} \quad [2]$$

$$log\big(a(T)\big) = a \cdot \big(T - T_{ref}\big)^2 + b \cdot \big(T - T_{ref}\big) \quad [3]$$

where:

f – frequency (Hz),
a(T) – shift factor as a function of temperature (°C),
T - temperature (°C),
T_{ref} – reference temperature (°C), and
a,b – fitting parameters.

The reference temperature was 20°C.

The testing of resistance to fatigue was performed according to SRPS EN 12697-24:2018, Annex E – Indirect Tension on Cylindrical Shaped Specimens (IT-CY), at temperature of 20 °C, according to requirements of standard SRPS EN 13108-20:2016, table D.4, item D.4.8. Prior to testing, specimens were conditioned at testing temperature for four hours. Testing was performed with haversine load waveform, with loading time of 0.4 ms and rest time of 0.1 ms. For both mixtures, the specimens were tested at three load (stress) levels, and deformation method was used to develop the fatigue lines.

The fatigue lines are presented with the following equation:

$$log\left(N_{f,\varepsilon}\right) = \log(k_\varepsilon) + n_\varepsilon \cdot \log(\varepsilon_o) \quad [4]$$

where:
$N_{f,\varepsilon}$ – number of load cycles to fatigue,
k_ε, n_ε – regression parameters of the fatigue line.

3. RESULTS AND DISCUSSION

This section presents the results of experimental tests performed in this study, namely, volumetric composition, stability, and flow of asphalt mixtures, water sensitivity, resistance to permanent deformation, stiffness and resistance to fatigue. Subsequently, the results are discussed in detail for each experimental test.

3.1. Volumetric properties, stability and flow of asphalt mixtures

Both mixtures have relatively similar volumetric composition with OPC. Air voids were 4.3% for mixture with PmB 45/80-65 and 4.8 % for mixture with B50/70+3% ISO P101. Stability was slightly lower for the first mixtures, and flow was slightly higher, which corresponds well with results of resistance to permanent deformation, presented in section 3.3.

3.2. Water sensitivity

The indirect tensile strength test was performed in accordance with the requirements of the standard - Determination of the indirect tensile strength of bituminous specimens. The test results are presented in Table 6.

Table 6. *Water sensitivity of both asphalt mixtures*

Parameter	Asphalt Mixture	
	AC 22 BASE PmB 45/80-65	**AC22 BASE B50/70 + 3% ISO P101**
Indirect Tensile Strength, ITS_d (kPa)	1.720	1.726
Indirect Tensile Strength, ITS_w (kPa)	1.676	1.763
Indirect Tensile Strength Ratio, *ITSR* (%)	**97.4**	**102.1**

Technical Specifications of PE Roads of Serbia [11] have no requirements (NR) for water sensitivity, meaning that results should be reported. However, ITSR values for both mixtures are well above limit of 70% to 80% that are used in other countries. For example, specifications in Croatia require 70% for ITSR for the base course [12].

3.3. Resistance to rutting

Results of Wheel Tracking test are presented in Figure 3 and Table 7.

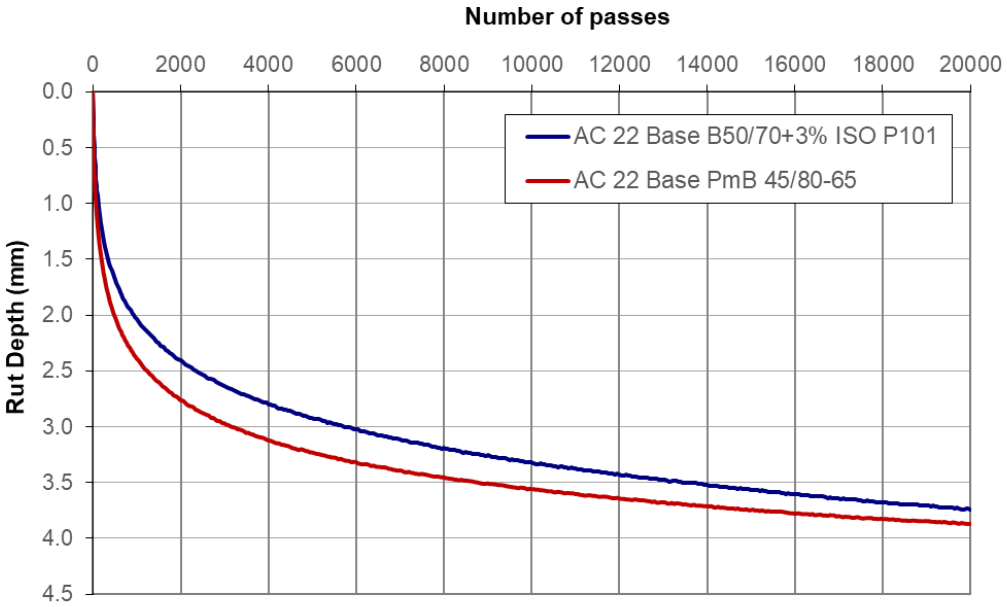


Figure 3. *Resistance to permanent deformation of both tested mixtures*

Table. 7 *Results of the Wheel Tracking Test*

Parameter	Designation	Asphalt Mixture	
		AC22 BASE PmB 45/80-65	AC22 BASE B50/70+3% ISO P101
Proportional Rut Depth (%)	PRD_{AIR}	5.5	5.2
Wheel Tracking Slope (mm/10^3 loading cycles)	WTS_{AIR}	0.062	0.085

Results show slightly lower permanent deformation after 20000 cycles, of mixture with road bitumen B50/70 and the isocyanate-based additive ISO P101. Both mixtures satisfy typical limit in specifications of European Road Agencies, including Serbia, of PRD_{AIR} = 7%. However, the slope of deformation curve is also a slightly higher, meaning faster accumulation of deformation. Overall, it can be concluded that performance of both mixtures regarding permanent deformation is comparable.

3.4. Stiffness

The values of fitting parameters of the model for both asphalt mixtures are presented in Table 8.

Table 8. *Fitting parameters of the model for master curve*

Model parameter	Asphalt Mixture	
	AC22 BASE PmB 45/80-65	AC22 BASE B50/70+3% ISO P101
α	5.16598594	4.85422696
β	-1.5	-1.2
γ	-0.5711618	-0.6060419
δ	-0.4667789	-0.1966536
a	0.00052452	0.00087107
b	-0.0874787	-0.0988579
R^2 (%)	99.7	98.8

Figure 4 presents the master curve for stiffness modulus for both asphalt mixtures.

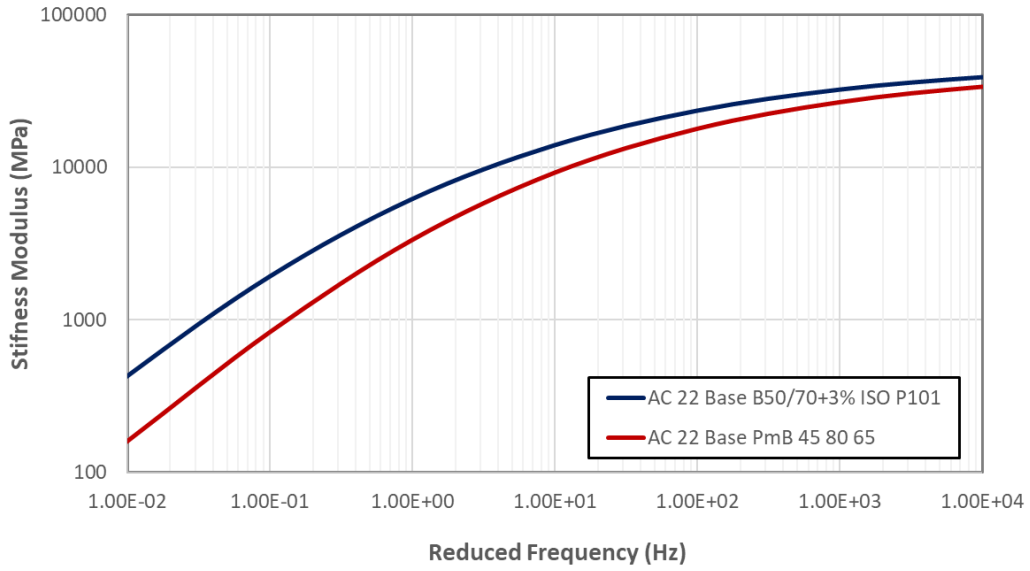


Figure 4. *Master curves for both mixtures*

The mixtures with plain bitumen and ISO P101 additive have substantially higher stiffness at high temperatures / low frequences (left side of the master curves diagram) while at low temperatures / high frequences (right side of the master curves). The higher stiffness at high temperatures is beneficial to resistance to permanent deformation, and corresponds well to the results of wheel tracking test presented in Figure 3. The higher stiffness over the range of temperatures should reduce strains in the pavement structure.

3.5. Resistance to Fatigue

The values of fatigue parameters for fitting lines, coefficient of determination, and the initial strain corresponding with a fatigue life of 10^6 cycles for both asphalt mixtures are presented in Table 9.

Table 9. *Parameters of the fatigue lines*

Model parameter	Asphalt Mixture	
	AC22 BASE PmB 45/80-65	AC 22 BASE B50/70+3% ISO P101
k_ε	14.946	14.865
n_ε	-4.748	-5.027
R^2 (%)	95.6	95.0
ε_6 (μm/m)	76.6	58.0

Figure 5 provides graphical presentation of the fatigue lines for both asphalt mixtures.

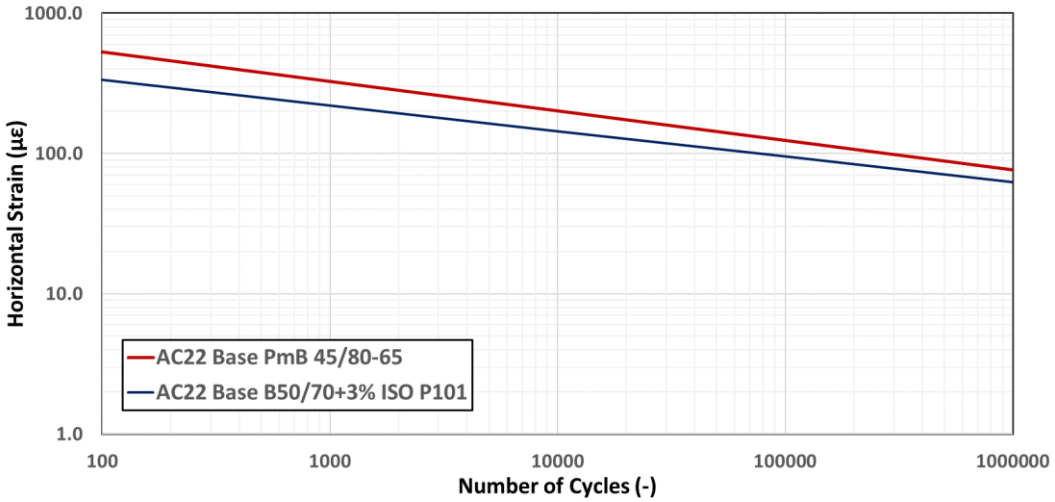


Figure 5. Graphical presentation of the fatigue lines

The asphalt mixture with PmB 45/80-65 consistently showed better performance regarding fatigue with larger initial strain corresponding with a fatigue life of 10^6 cycles, although the deference is decreasing with increasing number of cycles. However, since the mixture with plain bitumen B50/70 and ISO P101 had consistently higher stiffness over the range of temperatures / frequencies, it would be important to consider these results in the context of pavement structures and this analysis will be performed following this study.

4. CONCLUSION

Based on testing results, presented, several conclusions can be drawn as result of this study:

- Both mixtures satisfied requirements related to the water sensitivity.
- Mixture with B50/70+3% ISO P101 showed slightly better resistance to permanent deformation and lower rut depth during the wheel tracking test, which is important for base layer, but may be even more important for binder, or surface layer.
- Based on developed master curves for stiffness modulus, mixture with B50/70 + 3% ISO P101 showed substantially higher stiffness at high temperatures, which corresponds well with results of wheel tracking test for resistance to permanent deformation. The stiffness of this mixture was higher over the range of temperatures / frequences, which would reduce the strains in the pavement structure during exploitation. At low temperatures, it is approaching stiffness of mixture with PmB 45/80-65. Still, testing of resistance to low temperature cracking would be helpful to complement results of this study.
- Asphalt mixture with polymer modifies bitumen PmB 45/80-65 showed better resistance to fatigue and higher ε_6 strain. However, it would be important to consider this finding in the context of entire pavement structures, as well as increased stiffness of base layer with B50/70 with ISO P101, because use of this layer may decrease strains, including tensile strain at the bottom of asphalt layer. Therefore, an additional study will be performed to assess the implication of these parameters on pavement design.

Overall, the performances of both asphalt mixtures for AC22 BASE with limestone aggregates with two binders, one polymer modified PmB 45/80-65 and plain bitumen B50/70 with 3% of an isocyanate-based are comparable. However, it must be noticed that in the case of an isocyanate-based additive, the dosage and modification can be directly done at the asphalt mixing plants. This may offer more flexibility in order to dose new additive on-demand. Further effects of the isocyanate-based additives were not considered in the study like the anti-stripping agent effects on acidic minerals, the improvement of workability of the asphalt mixes made thereof and the possibility to reduced production and lay down temperatures.

Literature

[1] Lesueur, D. 2009. The colloidal structure of bitumen: consequences on the rheology and on the mechanisms of bitumen modification, Adv Colloid Interface Sci 145 (1–2) (2009), 42–82, https://doi.org/10.1016/j.cis.2008.08.011.

[2] Carreno Gomez N.H., Oeser, M. Fleischel, O. 2021. Chemical modification of bitumen with novel isocyanate-based additive to enhance asphalt performance, Construction and Building materials, 301 (2021) 124128

[3] Yildirim, Y. 2007. Polymer modified asphalt binders, Constr. Build. Mater. 21 (1) (2007) 66–72, https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.07.007.

[4] Porto, M., Caputo, P., Loise, V., Eskandarsefat, S., Teltayev, B., Oliviero R.C. 2019. Bitumen and bitumen modification: A review on latest advances, Appl. Sci. 9 (4) (2019) 742, https://doi.org/10.3390/app9040742.

[5] Zhu, J., Birgisson, B., Kringos, N. 2014. Polymer modification of bitumen: Advances and challenges, Eur. Polym. J. 54 (2014) 18–38, https://doi.org/10.1016/j. eurpolymj.2014.02.005.

[6] Airey, G.D. 2002. Rheological evaluation of ethylene vinyl acetate polymer modified bitumens, Constr. Build. Mater. 16 (8) (2002) 473–487, https://doi.org/10.1016/ S0950-0618(02)00103-4. [6] L. Socal da Silva, M.M. de Camargo

[7] Gonzalez, O., Munoz, M.E., Santamaría, A. García-Morales, M., Navarro, F.J., Partal, P. 2004. Rheology and stability of bitumen/EVA blends, Eur. Polym. J. 40 (10) (2004) 2365–2372, https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2004.06.001

[8] Geçkil, T. 2019., Physical, chemical, microstructural and rheological properties of reactive terpolymer-modified bitumen, Materials (Basel) 12 (6) (2019) 921, https://doi.org/10.3390/ma12060921.

[9] Austroads 2013. AUSTROADS TECHNICAL REPORT AP-T248-13 - Improved Design Procedures for Asphalt Pavements: Pavement Temperature and Load Frequency Estimation

[10] Radišić, M. 2018. Personal Communication, University of Belgrade, Faculty of Civil Engineering

[11] PE Roads of Serbia, 2018. Technical Specification for Roads Construction, Volume 2: particular Technical Specifications, Book 2: Pavements

[12] Technical regulation for Asphalt Pavements, 2021. Ministry of Physical Planning, Construction and State Assets, Croatia

DEVELOPMENT OF A DECISION SUPPORT SYSTEM FRAMEWORK FOR CONSTRUCTION AND MAINTENANCE OF SUSTAINABLE ASPHALT PAVEMENTS

Rosa Veropalumbo[1], Cristina Oreto[1] and Francesca Russo[1]
[1] Department of Civil, Construction and Environmental Engineering, Via Claudio 21, Naples - Italy
University Federico II of Naples

Abstract: Cold asphalt pavement (CAP) is a sustainable road pavement maintenance technology for the operation and complete reuse of reclaimed asphalt pavement. Anyway, its application combined with other alternative secondary materials as the construction and demolition waste (CDW) to maximize circularity is still not applicated due to poor knowledge of their multiple sustainability aspects, and how to integrate them into rational decision support systems for road maintenance operations when other mixtures made up of different type of alternative materials are used for binder layer. This study aims to systematically analyse 125 different intervention solutions with CAP combined with CDW for a base layer for the maintenance of a road superstructure in Southern Italy after the analysis of the pavement condition index (PCI) for the recognition of damages, and to identify the optimal one in order to reduce the environmental impact, the costs and increase the service life of the road superstructure. Life cycle analysis was performed to measure the ecotoxicity, damage for human life and resource consumption that, along with the mechanical performance of the pavement and the operational costs were used as decision criteria for the definition of the best solution through a multicriteria analysis.

Keywords: Asphalt mixture, performance, pavement conditions index, maintenance, sustainability

1. INTRODUCTION

The works connected to the design and construction of a new road pavement superstructure, as required by law, must be carried out in a workmanlike manner. Despite this, it can still be stated that road pavements, due to multiple events, do not have an unlimited useful life and therefore require periodic work to re-establish optimal conditions of safety and comfort [1]. For example, only by considering the wear of the road surface, due to vehicular traffic and meteorological events, can and must be foreseen, already in the executive project, ordinary maintenance (scheduled maintenance) which periodically restores the structure of the road pavement to the optimal construction situation, i.e. before its use and therefore its progressive deterioration has begun.
The maintenance operations to be carried out during the useful life of a pavement depend on the different damage conditions present, even involving the complete renovation of the road package where the mechanical performance of the layers is decayed [2].
To date it is crucial, from an environmental point of view, defined the most suitable asphalt mixture solution for the maintenance operation of an asphalt pavement layer. Many scholars are looking for new alternative asphalt mixture solutions, for example attention is being focused on mixtures made up of reclaimed asphalt pavement (RAP), demolition and construction materials (CDW), fly ash (FA) where an improvement of the final mechanical performance is obtained [3-4-5].
Although there is the opportunity to use sustainable asphalt pavement solutions in the maintenance operation, the public administration found difficult to provide a pavement management system [6] that have in mind other characteristics of a mixture that goes beyond the only mechanical performance. Many times, the biggest constraint is due to costs, as being limited also makes the choices available restricted. It is not yet common practice to choose, based on budget availability, innovative mixtures which, in addition to guaranteeing excellent mechanical performance, also have less impact on the surrounding environment and on the consumption of resources.
Therefore, this research aimed to provide public administrations with decision support in the field of road infrastructure maintenance, analyzing the advantages and disadvantages of different maintenance solutions, accompanied not only by information on mechanical characteristics and costs of intervention but also from information on the environmental impact of individual mixtures.
The work was developed taking into account totally new aspects for a maintenance plan for a road superstructure, in particular the effects of the individual work phases on the surrounding environment evaluated through LCA analysis and inserted into a set of different variables such as mechanical performance , useful life, costs which were found to be the criteria for choosing the optimal maintenance solution for a case study of a road in Southern Italy through the application of a multi-criteria analysis.

2. MATERIALS

A total of nine different asphalt mixtures were used for the design of the layer solutions to be employed in the contest of the maintenance. In table 1 are reported the asphalt mixtures adopted with the reference to the layer and volumetric properties due to the mix design carried out through a gyratory compaction [7].

Table 1 Asphalt mixture features.

Mixture ID	Layer	Alternative material	Tecnology	Aggregate density (Mg/m3)	Binder content (%)	Air Voids (%)
HMAw	Wearing Course	-	Traditional	2.67	5.30	4.00
HMA_B	Binder	-	Traditional	2.70	4.50	4.00
HMA_{PMB}	Binder	-	PMB	2.70	3.75	4.00
HMA_{PMA}	Binder	-	PMA	2.70	4.50	4.00
HMA_{CDW}	Binder	CDW	Traditional	2.74	5.75	5.55
HMA_{FA}	Binder	FA	Traditional	2.71	4.75	4.78
HMA_{BC}	Base course	-	Traditional	2.65	4.00	4.9
CAP	Base course	RAP	Cold	2.73	3.75	9.15
CAP_{CDW}	Base course	RAP and CDW	Cold	2.70	4.15	8.75

As it can be seen from the table 1 the mixtures are different among them for the type of alternative materials introduced and/or for the technology used for their production.
The mixtures HMA_W, HMA_B and HMA_{BC} were traditional hot asphalt mixtures made up of limestone aggregates and neat bitumen 50/70.
Three different alternative materials were adopted as the Construction and Demolition waste (CDW), the fly ashes (FA) and the reclaimed asphalt pavement (RAP).
The CDW is the product derived from the demolition of civil engineering manufacturing, mainly constituted of cement, past and bricks [3].
The FA is the by-product of the coal combustion process for thermal power plant [8], while the RAP consists of the milled wearing and binder layers of a deteriorated asphalt pavement and is composed of a mixture of loose basalt and limestone aggregates covered in binder [9].
These three materials were used for the mixing of asphalt mixtures for binder and base layer (HMA_{CDW}, HMA_{FA}, CAP e CAP_{CDW}).
In addition, different polymer compounds made up of recycled plastics were adopted for the blending of the asphalt mixture for the binder layer (HMA_{PMA}).
A modified bitumen PMB 45/70-80 [ref] was used in the case of HMA_{PMB}.
The mixtures CAP and CAP_{CDW} in addition to the alternative materials, they are completely cold-produced mixtures where the mixing temperatures are 60 °C lower and the bituminous binder used in this case is a 60/40 bituminous emulsion [10].

3. METHODOLOGY

Several methodological steps were followed.
A first steps involved the identification of the performance index of the pavement evaluated on the basis of the distress present on the road under examination; in this case it is refer to the Pavement condition index (PCI).
The second step concerned the design of several stratigraphy of flexible road pavement by applying the rational method in the respect of the fatigue damage and rutting.
The third step was focused on the calculation of maintenance costs of the different hypothesized scenarios and their environmental compatibility through Life Cycle Assessment (LCA) analysis. The last step was concentrated on the identification of the best solution by performing the multi criteria decision analysis (MCDA).

3.1. Pavement condition index

The Pavement Condition Index (PCI) consists of a numerical value, between 0 and 100, which expresses the conditions of the road pavement, and it is obtained via a method based on visual investigations developed by the U.S. Army Corps of Engineers. The PCI is closely connected to the Pavement Condition Rating (PCR), a verbal description of the condition of the pavement, which varies from "not passable" to "excellent".

For the purpose of analyzing the condition of the pavement, the section of interest must be divided into sample units of areas of 225±90 m^2, which must be distinguished in such a way as to allow inspectors to locate them easily (e.g. through particular signs at the edge of the street or house numbers). The number of units to be inspected within the section can vary from all to a number that guarantees a 95% confidence interval, or even a lower number. The inspection is carried out measuring the amount of instability for each level of severity recording it on a specific form; from the comparison between the "Distress Identification Manual for the Long-Term Pavement Performance Program" (FHWA) catalog and the failures recognized by the U.S. Army Corps of Engineers for the calculation of the PCI, a new failure registration form is obtained for each sample unit, in which the information relating to the distance of the failure with respect to the point of origin has been added for greater ease of identification of the sample unit. For each failure, the degree of severity, the number (or the extension in meters, or in surface area) will be distinguished, and the density of the deterioration will be calculated, respect to the area under exam.
Once the PCI has been calculated according to [11] the condition of the pavement is deduced via a scale in which, at each interval, a PCR is associated, i.e. the verbal description of the state of the pavement. Each category of PCI values is then associated with the type of maintenance intervention to be carried out, to preserve or restore the functionality of the pavement, and a synthetic qualitative judgment on the conditions of the pavement.

Table 2 Pavement condition rating [12]

Category	PCI Value	Maintenance intervention and integrated qualitative judgement
1	85-100	Routine or preventive interventions. Few or no anomalies for high PCI values (90-100), small cracks or surface flaking for low values (75-89)
2	70-85	Rehabilitative interventions. Adequate travel quality, limited anomalies, but deterioration process started for PCI values of 60-74.
3	55-70	
4	40-55	Detoriated pavements and ride quality below the standard offered by the pavement category for PCI values of 45-59.
5	25-40	Major rehabilitation or reconstruction interventions. Large anomalies, limited traffic flow speed.
6	10-25	Reconstruction interventions. The conditions of the pavement make driving the vehicle particularly difficult.
7	0-10	

3.2. Asphalt pavement design

The design of a pavement starts from the analysis of the state of tension and deformation that traffic determines in a road pavement. A pavement is schematized as a series of overlapping horizontal layers, infinite in plan and of constant thickness, which have properties of homogeneity, isotropy and linear elasticity, therefore each characterized by the complex modulus E* and by the Poisson coefficient [13]; these layers are placed on the substrate, schematized as an indefinite half-space, which is also homogeneous, elastic and isotropic. The traffic loads acting on the surface of the pavement are the vertical ones transmitted by the most heavily loaded axle passing on the type of road, which are considered uniformly distributed on circular surfaces, with an area equal to that of the tire footprint, with pressure equal to the inflation pressure of the same.
The elastic multilayer scheme is solved through differential equations [14] which they require as input the load conditions, thicknesses and mechanical characteristics of the materials used and provide as output the tension and deformation state of the pavement package.
Once the stress-strain state has been obtained, it is possible to carry out checks on the resistance of the superstructure, i.e. its ability to guarantee adequate levels of service within a predefined period of time equal to the useful life of the pavement. It must be ensured that the service levels of the superstructure do not decline during its useful life. This resistance is aimed at the main degradation phenomena that occur on the pavement such as fatigue cracking and rutting.
In the case of fatigue damage, reference is made to Miner's Law. This law presupposes the adoption of a degradation law which links the tensions and deformations induced by the loads with the number of repetitions admissible to the corresponding ones, thus allowing the calculation of the cumulative fatigue damage (CD) in accordance with the Equation 1.

$$CD = \sum_{i=1}^{S} \frac{n_i}{N_i} \quad (1)$$

where:

n_i is the number of ESAL passings in the i-th period (determined using the AASTHO Design method (AASHTO 1993) on the most charged running lane, assuming a fair distribution of traffic by direction and evenly distributed among the i periods);.
N_i is the number of ESAL passings in the i-th period that leads to an extension of fatigue cracking damage to up to 10% of the lane area of the road pavement during its useful life; it is determined according to the Asphalt Institute's fatigue prediction law.

As regards the rutting, it consists of a depression on the road surface that develops along the tracks of the tyres. The rut is generated by the progressive accumulation of permanent deformations following the repeated passage of vehicles. The check to be carried out consists in verifying that the total rut that occurs over the entire useful life of the pavement, calculated in accordance with equation 2, is accepted if do not go above the maximum limit of 2cm (see Equation 2).

$$U = \sum_i \sum_j \varepsilon_{ij} \cdot h \leq 2cm \quad (2)$$

where ε_{ij} is the permanent deformation after n load cycle and h is the thickness of each layer.

3.3. Cost assessment

To prepare the estimated metric calculations, reference was made to a price list from the Southern Italian region. The price list essentially consists of a catalog showing the items relating to all the services and procedures that contribute to the creation of a work. The list of items, ordered and systematic, is not the same for the entire Italian territory, but rather has a regional character since every single cost can be influenced by boundary conditions strictly linked to the geographical location in which the work is carried out. In any case, the price list covers not only the items of materials, but also the entire set of operations that allow the implementation of the construction site's activities, from the transport of material to earthmoving, from labor costs to the rental of equipment and machinery.

3.4. Environmental analysis

The LCA study involves four phases, represented with the relative connections which include: 1) the phase of defining the objective and the field of application; 2) the inventory analysis phase; 3) the impact assessment phase; 4) the interpretation phase.
The objective indicates the motivations for the study and the audience for which the analysis is intended.
The scope, including the limitations of the system and the level of detail of the LCA, depends on the subject and the intended use of the study. The depth and breadth of the LCA can differ considerably depending on the objective of a particular LCA.
The scope includes the definitions of the product system studied, the functional unit, the system boundary, the allocation procedures, the selected impact categories, the impact assessment methodologies and their interpretation, the quality requirements of the data and the hypotheses underlying the analysis.
The life cycle inventory analysis phase (LCI phase – "Life Cycle Inventory") is the second phase of the LCA. This is the inventory of input and output data relating to the system to be studied. LCI involves collecting the data necessary to achieve the objectives of the defined study.
The life cycle impact assessment phase (LCIA phase – "Life Cycle Impacts Assessment") is the third phase of the LCA. The purpose of the LCIA is to provide additional information to help evaluate product system LCI results to gain a better understanding of their environmental significance. Life cycle interpretation is the final stage of the LCA procedure, in which the results of an LCI or an LCIA, or both, are summarized and discussed, according to the definition of the objective and scope, as a basis for conclusions, recommendations and decisions. The methodological procedures followed for this work are reported in [15]. The results were expressed in terms of damage to human life, damage to the ecosystem and damage to the availability of resources.

3.5. Multi-criteria decision analysis

Multi-criteria decision analysis consists of a set of techniques used to compare alternatives on the basis of different criteria, explicitly taking into account the relative importance attributed to each of them. The purpose of multi-

criteria analysis is to create a decision support system. The steps followed for the multi-criteria analysis were as follows:
1. Identification of alternatives
2. Identification of evaluation criteria
3. Analysis of alternatives
4. Normalization of measurements according to a comparable scale
5. Estimate of the weights to be attributed to the criteria
6. Calculation of synthetic values and presentation of results

Four different analysis methods were employed: Utility Method, Multipol Method, Distance Method and Electre Method.

3.5.1 Utility method

Each alternative is attributed a utility value ($\tilde{U}$) equal to the sum of the individual utilities (Uj) for the associated weight calculated following the Equation 3.

$$\tilde{U} = \max_j \{Uj\} \quad (3)$$

3.5.2 Multipool method

In the multipool method, multiple weight vectors are identified to be associated with each alternative, where for each alternative there is a number of utilities equal to the number of weight vectors chosen. Once the utilities of each alternative have been calculated, the average value and standard deviation are calculated. The best alternative is the one that has the highest mean value and the lowest standard deviation among the alternatives analyzed [16].

3.5.3 Distance Method

In the distance method it is assumed to have an absolute best solution, an ideal solution that presents the utility matrix in which every single element is set equal to 1, indicated by X*. The real alternatives available will certainly be worse than this ideal alternative. The distance method consists in calculating the distance (see Equation 4) between the ideal solution and the real solutions.

$$\delta_J = \sqrt[q]{\sum_{i=1}^{n} d_i \cdot \left|U_{ij} - U_{iX*}\right|^q} \quad (4)$$

where
$\boldsymbol{di}$ is the weight relating to the i-th criterion
$\boldsymbol{Ui}$j is utility of the j-th solution in correspondence with the i-th criteria
$\boldsymbol{U_{iX*}}$ is the ideal utility equal to 1
$\boldsymbol{q}$ assumes values from 1 to 30

3.5.4 Electre method

The method involves comparing all the alternatives in pairs, calculating two indicators for each A-B pair compared:
➢ Concordance index (cij): Sum of the weights of alternative A where the utility of A is greater than the utility of B, otherwise equal to zero.
➢ Discordance index (dij): It is the maximum value of the difference between utilities if A's utility is less than B's utility, otherwise it is equal to 0 if A's utility is greater than that of B (in the comparison between A and B).

Once the indicators have been calculated for each pair, the table of concordances and discordances is constructed In order to make a selection of the best alternatives, threshold values are compared to the concordance and discordance index calculated:

$$c^* = \frac{\sum cij}{n} \quad (5)$$

$$d^* = \frac{\sum dij}{n} \quad (6)$$

Where c* is the threshold value of the concordance index and d* is the threshold value of the discordance index. The best solutions will be those with concordance index greater than th threshold value and discordance index less than the threshold value.

4. CASE STUDY

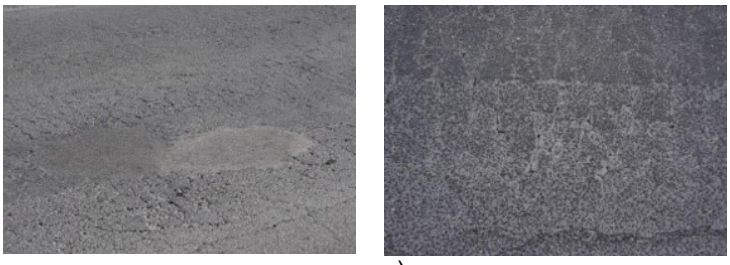
The case study concerns the inspection of the infrastructure, the design and analysis of maintenance interventions solutions in a road located near Naples with an extension of 1410m. The context in which the infrastructure exists is urban. The branch has been divided into three different sections, each homogeneous in terms of traffic and the geometric characteristics can be considered homogeneous: 1. first section, of 560 m, which constitutes section I; 2. second section, also 560 m long and recently maintained, namely section II; 3. third section, 290 m long, coinciding with section III.

4.1 PCI analysis

From numerical calculations, the PCI values were found to be as follows:
• PCI 36 in SECTION I
• PCI 62 in SECTION II
• PCI 45 in SECTION III.
Sections I and III are characterized by disruptions such as fatigue cracking, patches and potholes with medium-high severity and spread over the entire section (see Figure 1a-c); while section II is characterized by disruptions such as graining and smoothing of the aggregates with medium-low severity and localized diffusion on some parts of the pavement (see Figure 1b). It was evident that in sections I and section III there were structural deficiencies in the load-bearing capacity of the asphalt mixtures which therefore needed to be completely removed and built from scratch. In section II there were surface adhesion problems, it was necessary to remove and rebuild only the wear and binder layers.

a)

b)



c)

Figure 1 Damage on the road under exam: a) Section I, b) Section II and c) Section III.

4.2 Designed solutions

The design of the solutions started from a fixed combination of 4- 6-20 cm respectively for wearing course, binder layer and base course. Since the three sections required different maintenance intervention, in the case of the section II the mechanical characteristic of the base course was defined through the adoption of on-site core sampling. Table 3 reported the mechanical characteristics of the mixtures derived from a laboratory testing according to the Annex C of the EN 12697-26 standard.

Table 3 Mechanical characteristics of the mixtures.

Mixture ID	Layer	E* @5°C	E* @10°C	E* @20°C	E* @30°C
HMAw	Wearing Course	1.29E+04	6.30E+03	5.30E+03	2.25E+03
HMA_B	Binder	1.70E+04	1.48E+04	8.00E+03	1.00E+03
HMA_{PMB}	Binder	1.45E+04	1.30E+04	6.80E+03	2.00E+03
HMA_{PMA}	Binder	1.77E+04	1.65E+04	8.60E+03	1.50E+03
HMA_{CDW}	Binder	1.76E+04	9.73E+03	8.83E+03	4.20E+03
HMA_{FA}	Binder	1.71E+04	1.45E+04	8.40E+03	3.20E+03
HMA_{BC}	Base course	1.55E+04	7.35E+03	6.95E+03	2.96E+03
CAP	Base course	5.86E+03	2.97E+03	2.27E+03	1.49E+03
CAP_{CDW}	Base course	8.68E+03	3.22E+03	2.43E+03	1.61E+03
HMA_{degr}	Base course	4.98E+03	1.52E+03	1.01E+03	8.21E+03

Since correct design requires CD values between 0.7 and 1, starting from the fixed thicknesses, for each of the combinations of the mixtures described in the previous chapter, with the exception of the combination entirely in HMA, three different cases have developed: 1) The modification of the thickness of the binder layer; 2) Changing the thickness of the base layer; 3) Changing the thickness of the binder and base layer.
Considering the latter applied to the maintenance of three sections, 125 different combinations were obtained.
To evaluate the costs of each mixture and processing, reference was made to a price list from the Southern Italian, while for the tariffs do not present in the price list, specific new prices were drawn up. Below is reported a list of the rates extracted from the price list:

- Milling of asphalt mixture paving layers (including transport and waste disposal) 0.42 €/m2 * cm ;
- Wearing course with neat bitumen (HMA_w) €142.15/m^3
- Asphalt mixture for binder layer (HMA_B) €134.13/m^3
- Asphalt mixture for binder layer (HMA_{PMB}) 154.57 €/m^3
- Asphalt mixture improved through the addition of polymeric compounds for the binder layer (HMA_{PMA}) 144.35 €/m^3
- Base layer produced on site through the use of regenerated milled material with bituminous emulsion and cement (including milling and addition of suitable aggregates) (CAP) 81.28 €/m^3
- Primer 1.21 €/m^2.

Since the price list does not include any tariff for the mixtures of HMA_{CDW}, HMA_{FA} and CAP_{CDW}, for these latter the elementary costs of labor, vehicles, equipment and materials were extracted from the price list and subsequently were drawn up in the new prices for the missing mixtures. The new price were as follows:

- NP.01 Asphalt mixture for binder layer in HMA_{CDW} equal to 140.26 €/m3

- NP.02 Asphalt mixture for binder layer in HMA_{FA} equal to 141.75 €/m3
- NP.03 Asphalt mixture for base course CAP_{CDW} equal to 110.50 €/m3

In table 4 is reported an extract of the combination designed. As it can be seen, the solutions differ from each other for the total thickness, in particular due to the thickness of the base layer, consequently the correspondences in terms of fatigue and rutting were found to be discretizing for the entire thickness. In addition, the total useful life for each section has changed depending on the different mixes used for each layer.

Table 4 Extraction of 3 combinations of the pool of 125.

ID	Features	SEC. I		SEC. II		SEC. III		Total cost (€)
5	**Layers**	**Mix**	**Thickness (cm)**	**Mix**	**Thickness (cm)**	**Mix**	**Thickness (cm)**	**560,262**
	Wearing course	HMAw	4	HMAw	4	HMAw	4	
	Binder	HMA_B	7	HMA_{FA}	7	HMA_B	7	
	Base	CAP_{CDW}	18	HMA_{degr}	18	CAP	18	
	Total (cm)	29		29		29		
	CD	0.92		0.9		0.8		
	U [cm]	1.22		1.27		1.26		
	N [life]	15		6		15		
69	**Layers**	**Mix**	**Thickness (cm)**	**Mix**	**Thickness (cm)**	**Mix**	**Thickness (cm)**	**601,886**
	Wearing course	HMAw	4	HMAw	4	HMAw	4	
	Binder	HMA_{PMB}	7	HMA_{CDW}	7	HMA_{CDW}	7	
	Base	CAP_{CDW}	23	HMA_{degr}	23	CAP	23	
	Total (cm)	34		34		34		
	CD	0.97		0.94		0.99		
	U [cm]	1.61		1.6		1.5		
	N [life]	35		14		15		
105	**Layers**	**Mix**	**Thickness (cm)**	**Mix**	**Thickness (cm)**	**Mix**	**Thickness (cm)**	**598,762**
	Wearing course	HMAw	4	HMAw	4	HMAw	4	
	Binder	HMA_{FA}	7	HMA_{CDW}	7	HMA_{FA}	8	
	Base	CAP_{CDW}	23	HMA_{degr}	23	CAP	22	
	Total (cm)	34		34		34		
	CD	0.98		0.94		0.99		
	U [cm]	1.44		1.6		1.15		
	N [life]	15		14		15		

Figure 2 shows a summary of the costs. As it can be seen, it was possible to divide the solutions into 4 different ranges, in particular 64 solutions fall into the 500k-515k range, 11 solutions fall into the 515k-530k range, 33 solutions fall into the 530k-545k range, and 17 solutions fall into the 545-560k range.
It was found that all the solutions having the greatest overall thickness, and therefore high cost, fell into the first two ranges, where the useful life of the flooring was not taken into consideration and no feedback regarding the benefit of the introduction of the alternative material or technology used.

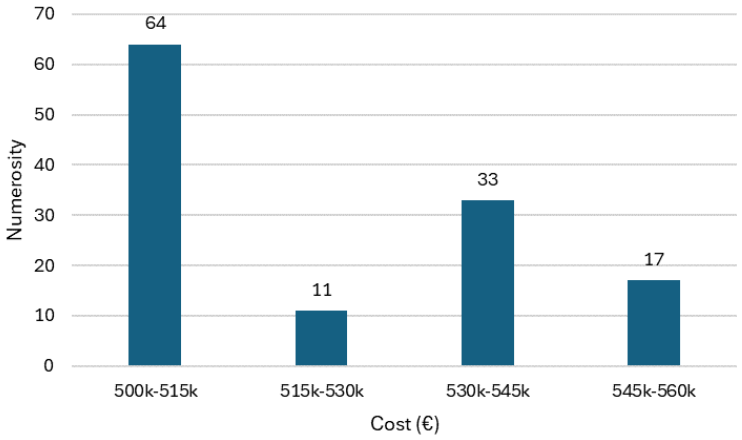
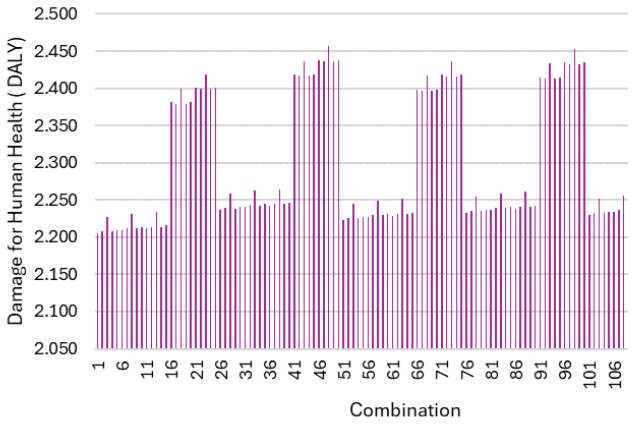
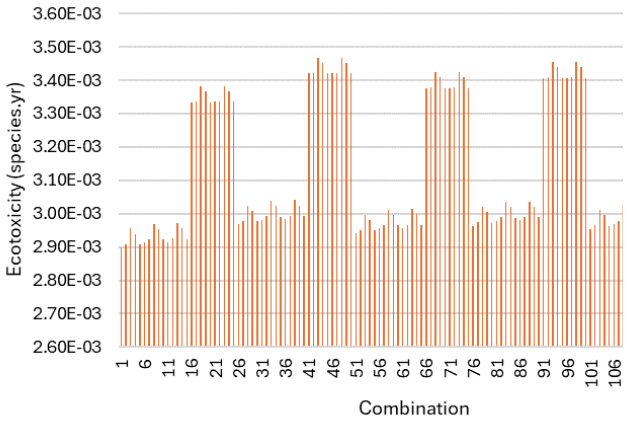


Figure 2 Classification of the numerosity of the solutions in function of the Cost.

4.3 Sustainability of the choice

The LCA analysis was the "endpoint" type. The peculiarity of this type of analysis is that of considering the environmental impacts of individual mixtures not in specific indicators (e.g. climate change, acidification of soil and water, use of renewable or non-renewable sources) but global indicators such as "damage to the human life", "damage to the ecosystem" and "damage to the availability of resources".
The results of the LCA analysis are reported in Figure 3. It is possible to see how two different behaviors result regardless of the impact indicator evaluated. In terms of Human health, the two groups present an average difference of 85%, a difference of 90% in terms of ecosystems and an average difference of 86% for the Resources scenario. These observations are particularly due to the technology used for the production of the asphalt mixture under exams; a cold technology lead obviously at a reduction of the CO_2 emissions for the lower production and laying temperature than a traditional hot asphalt mixture where the temperature are near 150 °C; in addition the emission, in general are more reduced when cold asphalt mixture production is performed in situ and than the transport phases are reduced.





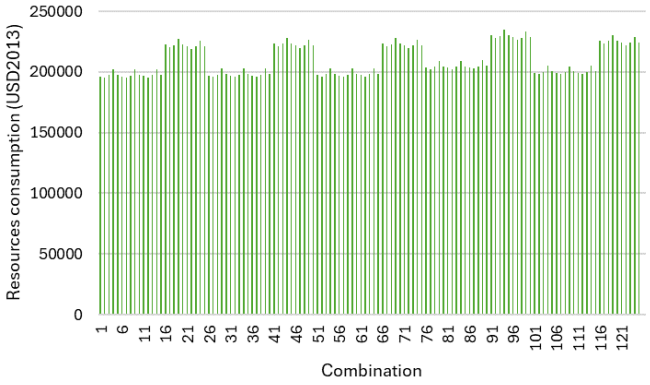


Figure 3 LCA results.

Since the single analysis do not lead to the definition of a best solution, a multi-criteria analysis was applied. The multi-criteria analysis phase consisted of collecting all the solutions resulting from the 125 combinations of different thicknesses and mixtures and analyzing them using the chosen methods, obtaining the solution that best combines the evaluation criteria and reflects the weight vectors used.
For the study under analysis, the multi-criteria analysis was applied in two cases.
CASE 1 consisted in the evaluation of the following criteria:

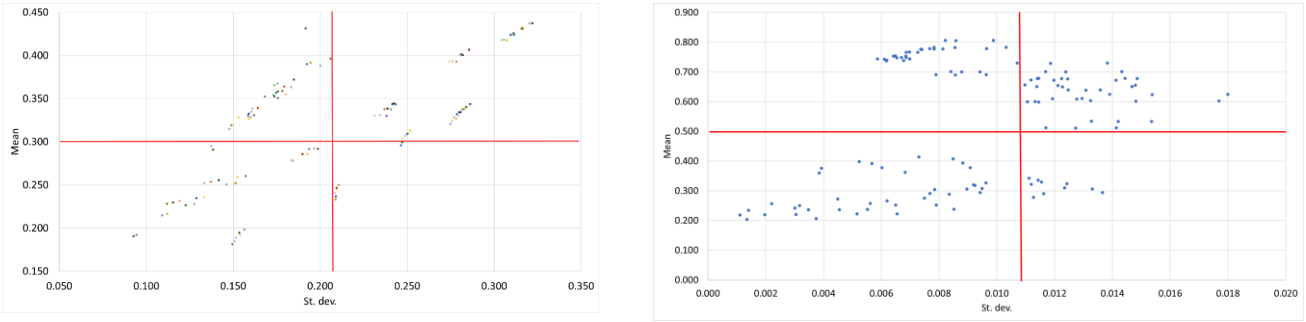
- Cost of intervention
- Average useful life of packages
- Average rutting at the end of useful life

CASE 2 consisted in the evaluation of the following criteria:

- Cost of intervention
- Average useful life of packages
- Average rutting at the end of useful life
- Average cumulative damage at the end of the useful life
- Harm to human life
- Damage to the eco-system
- Damage due to the availability of resources.

As it can be possible to notice, in the CASE 2 the criteria belong to three separate groups: Cost, mechanical characteristics and environmental impacts.

Once the evaluation criteria were chosen, for both cases the weight vectors were defined with reference to 4 groups of combinations:
Group 1) 0% of the weight to one indicator and 100% of the weight equally distributed among the other criteria
Group 2) 25% of the weight to an indicator and 75% of the weight equally distributed among the other criteria
Group 3) 50% of the weight to one indicator and 50% of the weight equally distributed among the other criteria
Group 4) 75% of the weight to one indicator and 25% of the weight equally distributed among the other criteria
Group 5) all possible combinations with the numbers 1,2,3,4,…k with k number of criteria analyzed
In Figure 4 are reported the results of the Multipool method for the Case I and Case II. Since the pool of solutions situated in the first quadrant are different among them, they were subjected to the Distance method and the best solution derived were further subjected to Electre analysis.
The results were that the combination 21 and combination 31 were the best solution, respectively for Case I and Case II whose properties are reported in Table 5.



a) b)

Figure 4 Multipool results: a) Case I and b) Case II.

It can be seen from the results reported in table 5 that the predominant solution in CASE I was found to be the solution with the highest useful life values, with the greatest thicknesses and high cost, unlike CASE II where the right combination between all the criteria analyzed and above all making a winning solution which compared to that of CASE II returns Human health, Ecosystem and Resources values lower by 7, 11 and 12% respectively. at the same time this solution returns a cost reduction of 5% compared to the CASE I solution. It is therefore clear from these results that the addition of other significant criteria from an environmental point of view completely reverses the choice.

Table 5 Best solutions according to Multi-criteria results.

ID	Layer	SEC. I		SEC. II		SEC. III		Cost (€)
		Mix	Thickness (cm)	Mix	Thickness (cm)	Mix	Thickness (cm)	
21	Wearing Course	HMA_w	4	HMA_W	4	HMA	4	593107
	Binder layer	HMA_B	7	HMA_B	7	HMA_{FA}	8	
	Base Course	CAP_{CDW}	23	HMA_{degr}	23	CAP	22	
	Total weight [cm]	34		34		34		
	CD	0.9		0.9		0.99		
	U (cm)	1.28		2.33		1.15		
	N (years)	30		14		15		
	Human health (DALY)	2.40						
	Ecosystems (species.yr)	3.33E-03						
	Resources (USD 2013)	221166						
ID	Layer	SEC. I		SEC. II		SEC. III		Cost (€)
		Mix	Thickness (cm)	Mix	Thickness (cm)	Mix	Thickness (cm)	
31	Wearing Course	HMAw	4	HMAw	4	HMAw	4	563515
	Binder layer	HMA_{PMA}	7	HMA_B	7	HMA_{PMA}	7	
	Base Course	CAP_{CDW}	18	HMA_{dgr}	18	CAP	18	
	Total weight [cm]	29		29		29		
	CD	0.85		1.06		0.73		
	U (cm)	1.32		1.45		1.34		
	N (years)	15		8		15		
	Human health (DALY)	2.240						
	Ecosystems (species.yr)	2.98E-03						
	Resources (USD 2013)	196784						

5. CONCLUSION

In conclusion, it is possible to give a definitive judgment on the alternative mixtures proposed in this research and on the methodology applied. The introduction of the LCA procedure in the maintenance plan allowed the environmental assessment of the designed mixtures. The proposed maintenance plan is therefore based not only on the intervention costs and the mechanical performance of the mixtures but also on the environmental impacts deriving from the production, installation and disposal of the mixtures themselves.
The results achieved have highlighted how the alternative mixtures used (especially for the mixtures which see the combination of PMA mixtures for the binder layers and the base layer cold recycled on site through reuse of the milled material) allow to obtain an overall improvement in the behavior package effort, a significant reduction in costs, a lower environmental impact which translates into a decrease in damage to human life, damage to the ecosystem and damage to the availability of resources produced by the mixtures.
Ultimately, the thesis work can represent decision support for key figures for the drafting and implementation of a maintenance plan, such as:

- Public administrators who deal with the economic planning of maintenance interventions by approving the three-year plan of public works together with the PA budget as prescribed by the regulatory references.
- Technicians and designers who have the task of drawing up the three-year plans for public works and therefore temporally planning maintenance interventions.
- Contracting companies that, in the context of a tender with the most economically advantageous offer, can receive additional scores thanks to the use of the methodology and/or mixtures used in this maintenance plan.

References

[1] Hu, J., Gao, X., Wang, R., & Sun, S. (2017). Research on comfort and safety threshold of pavement roughness. Transportation Research Record, 2641(1), 149-155.
[2] Wang, H. P., Guo, Y. X., Wu, M. Y., Xiang, K., & Sun, S. R. (2021). Review on structural damage rehabilitation and performance assessment of asphalt pavements. *Reviews on Advanced Materials Science*, *60*(1), 438-449.
[3] Gómez-Meijide, B., & Pérez, I. (2014). Effects of the use of construction and demolition waste aggregates in cold asphalt mixtures. *Construction and Building Materials*, *51*, 267-277.
[4] Jain, S., & Singh, B. (2021). Cold mix asphalt: An overview. *Journal of cleaner production*, *280*, 124378.
[5] Woszuk, A., Bandura, L., & Franus, W. (2019). Fly ash as low cost and environmentally friendly filler and its effect on the properties of mix asphalt. *Journal of Cleaner Production*, *235*, 493-502.
[6] Zofka, A., Josen, R., Paliukaitė, M., Vaitkus, A., Mechowski, T., & Maliszewski, M. (2014). Elements of pavement management system: case study. *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*, *9*(1), 1-9.
[7] Mallick, R. B. (1999). Use of Superpave gyratory compactor to characterize hot-mix asphalt. *Transportation Research Record*, *1681*(1), 86-96.
[8] Russo, F., Veropalumbo, R., Pontoni, L., Oreto, C., Biancardo, S. A., Viscione, N., ... & Race, M. (2022). Sustainable asphalt mastics made up recycling waste as filler. *Journal of Environmental Management*, *301*, 113826.
[9] Oreto, C., Veropalumbo, R., Viscione, N., Biancardo, S. A., & Russo, F. (2021). Investigating the environmental impacts and engineering performance of road asphalt pavement mixtures made up of jet grouting waste and reclaimed asphalt pavement. *Environmental Research*, *198*, 111277.
[10] Veropalumbo, R., Oreto, C., Viscione, N., Pirozzi, F., Pontoni, L., Trancone, G., ... & Russo, F. (2023). Exploring the effect on the environment of encapsulated micro-and nano-plastics into asphalt mastics for road pavement. *Environmental Research*, *216*, 114466.
[11] Shah, Y. U., Jain, S. S., Tiwari, D., & Jain, M. K. (2013). Development of overall pavement condition index for urban road network. Procedia-Social and Behavioral Sciences, 104, 332-341.
[12] Hasibuan, R. P., & Surbakti, M. S. (2019). Study of Pavement Condition Index (PCI) relationship with International Roughness Index (IRI) on Flexible Pavement. In MATEC web of conferences (Vol. 258, p. 03019). EDP Sciences.
[13] Witczak, M. W., & Fonseca, O. A. (1996). Revised predictive model for dynamic (complex) modulus of asphalt mixtures. *Transportation Research Record*, *1540*(1), 15-23.
[14] Sun, Y., Guo, R., Gao, L., Wang, J., Wang, X., & Yuan, X. (2019). Study on dynamic response characteristics of saturated asphalt pavement under multi-field coupling. *Materials*, *12*(6), 959.

[15] Oreto, C., Veropalumbo, R., Viscione, N., Biancardo, S. A., Botte, M., & Russo, F. (2021). Integration of life cycle assessment into a decision support system for selecting sustainable road asphalt pavement mixtures prepared with waste. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, *26*, 2391-2407.
[16] Russo, F., Oreto, C., & Veropalumbo, R. (2021). A practice for the application of waste in road asphalt pavements in an eco-friendly way. *Applied Sciences*, *11*(19), 9268.

EMBEDDED SENSORS FOR PAVEMENT MONITORING: TECHNOLOGY REVIEW AND CHALLENGES

Nemanja Nešković[1], MSc
Professor Kim J Jenkins[2], PhD
[1] *Stellenbosch University, Department of Civil Engineering, 27806138@su.ac.za*
[2] *Stellenbosch University, Department of Civil Engineering, kjenkins@sun.ac.za*

Abstract: *Over the years, various types of embedded sensing technologies have been used for monitoring engineering structures; however, the implementation in road infrastructure remains limited. The main setbacks of sensors gaining traction could be the prices of equipment, installation especially in live roads, and conditions the embedded network needs to sustain under traffic and environment. The temperature and pressure conditions during the construction of asphalt layers are a major consideration. In recent years there has been an increasing number of studies investigating possibilities of various embedding sensing technologies for pavement management. Conventional strain gauges, fibre optic sensors, as well as sensors based on piezoresistive, and piezoelectric effects are some of the most examined in research and pavement management systems. This paper intends to present a summary of technologies tested worldwide and notify the main challenges for wider implementation in pavement monitoring considering pavement specifics in comparison to other engineering structures*.

Keywords: *pavements, structural-health monitoring (SHM), strain gauges, thermocouples, fibre optic sensors, piezoelectric sensors, piezoresistive sensors*

1. INTRODUCTION

According to Dulac (2013),"it is expected that the world will need to add nearly 25 million paved road lane-kilometres (km) and 335 000 rail track kilometres (track-km), or a 60% increase over 2010 combined road and rail network length by 2050" (p. 6). In addition, the European Union estimates a yearly investment of approximately 112 billion Euros in transportation, with most of the resources used for road maintenance and construction (Brons, et al., 2022).

Lack of resources in terms of available material and finances increases the importance of their optimal usage. Also, there is a global need for the reduction of $C0_2$ emissions and the construction industry is recognized as one of the main sources of pollution (e.g., Inger, 2022). One direction to achieve the required goals concerning road construction and maintenance activities is the constant development and implementation of various pavement recycling methodologies and more energy-efficient construction processes (e.g., Milad, et al., 2020). On the other hand, it is necessary to have enough pavement condition data and proper analysis tools for decision-making to ensure the optimal allocation of available resources.

The Long-Term Pavement Performance (LTPP) project started in 1987 with the primary goal of better understanding pavement behaviour (FHWA, 2014) is a good example of how well-organized datasets could be further used for the improvement of pavement design and construction procedures. Data collected during this project has been inter alia used for the development of the American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide (MEPDG) as stated by FHWA (2014).

Pavement condition data can be obtained in multiple ways. One of the options is to take pavement structure samples (for example by coring), but this always leaves a "weak spot" within the pavement structure. There is also a variety of non-destructive methodologies used to determine pavement structure's bearing capacity, evenness, and skid resistance characteristics (e.g., Shahin, 1994). Pavement condition distresses were first collected manually by visual inspections with the Pavement Condition Index (PCI) recognized as one of commonly used (e.g., ASTM, 2020). Further progress in technology led to the development of specialized vehicles equipped with cameras for more efficient data collecting (e.g., Shahin, 1994) and in recent days there have been research projects considering the implementation of remote sensing techniques for distress data acquisition (e.g., Schnebele, et al., 2015). A common for most of the currently used methodologies is that they require specialized equipment to perform testing operated by experienced road laboratories. This means that

[1] Corresponding author: *27806138@su.ac.za*

pavement condition data could be acquired only periodically with possible difficulties to compare data between two measurements.

One of the options for more frequent and easier-to-compare pavement condition data collecting is the implementation of sensors installed within the pavement structure during construction. In the last few decades, there has been a variety of research with different sensor technologies used for pavement instrumentation. None of these techniques have been implemented as a common tool for pavement assessment, however. Some of the drawbacks for wider implementation typically noticed in literature are high prices of sensors and/or data acquisition and communication equipment, difficulties during installation, especially concerning high temperature and expected pressure occurring during asphalt works, as well as maintenance of the system when operational. With the development of materials and sensing technologies in recent years, there is a noticeable increment of research papers in this field ensuring that the day when the instrumentation of pavement will become regular practice is closer every day. The following sections will summarise conventional technologies used for structural health monitoring primarily of asphalt pavements, but also newly adopted techniques that are currently examined for future implementation as a main data source for real-time pavement management systems.

2. TECHNOLOGY REVIEW

2.1. Conventional methodologies

Conventional, off-the-shelf, strain gauges are traditionally used for the monitoring of pavement structures (Tabatabaee, et al., 1990). There are already significant trial sections like the Smart Road project in Virginia, where 12 different zones were heavily instrumented (Loulizi, et al., 2001; Al-Qadi, et al., 2004) and testing done at the National Centre for Asphalt Technology (NCAT) at Auburn University (Timm, Priest & McEwen, 2004; Tim & Priest, 2004). Conventional asphalt strain gauges were also used for airport pavement performance analysis, for instance at the National Airport Test Facility (Garg & Hayhoe, 2001; Gopalakrishnan & Thompson, 2006) as well as at the John F. Kennedy International Airport (Garg, et al., 2011) and Newark Liberty International Airport (EWR) where asphalt strain gauges were used for investigation of interlayer delamination of runway pavement structure (Cook, et al., 2016).

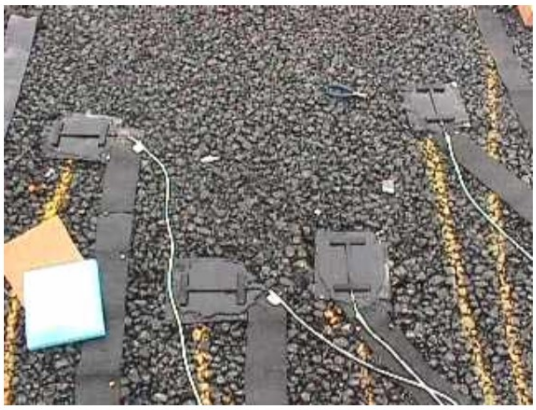


Figure 1. Asphalt *strain-gauge installation example.*
Source: (Al-Qadi, et al., 2004)

In the case of all trial sections described above, strain gauges were typically installed both in longitudinal and transversal directions. Based on four different pavement structures tested by an accelerated pavement testing machine at the University of Illinois, Garcia & Thompson (2008) concluded that ”in general, the transverse pulse durations were about three times those in the longitudinal direction” (p. 1) and “generally speaking, the transverse tensile strains were about 1.5 times greater than those in the longitudinal direction” (p. 1) as it is presented in Figure 2.

Although widely used and tested in the field, conventional asphalt strain gauges were mostly used for scientific purposes, and mostly to further calibrate or develop new design procedures. It is difficult to expect that any of the commercially available asphalt strain gauges could be used as a main source for collecting data mainly due to their relatively high price of at least a couple hundred euros for sensor only without a data acquisition unit (DAQ) and communication devices (Yang, 2014; Weinmann, et al., 2004; Barriera, et al., 2020). On the

other hand, since there is a lot of data available, it should be expected that some of the off-the-shelf strain gauges would still be used at least during the laboratory and trial section as a benchmark for other methodologies.

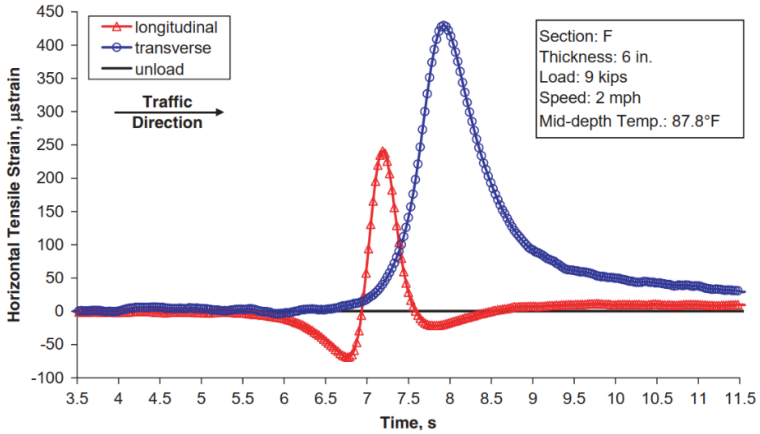


Figure 2. *Typical longitudinal and transverse strain pulse caused by accelerated pavement testing equipment single tire load.*
Source: (Garcia & Thompson, 2008)

Also, it should be noted that some of the described instrumentalizations of pavements, especially in the case of Virginia Smart Road and testing done in NCAT considered the usage of a lot more types of sensors, like pressure cells, moisture probes (e.g., Al-Qadi, et al., 2004), however, since methodologies that will be discussed in following chapters are mostly related to monitoring of asphalt layers strains and damage detection, strain gauges were in the main focus of this chapter.

Concerning real-time temperature measurement, authors generally agreed that thermocouples are the most used conventional methodology for pavement monitoring (e.g., Barriera, et al., 2020).

2.2. Disturbed Optical Fibre Sensors (DOFS)

Progress in fibre optic sensors made possible usage of Disturbed Optical Fibre Sensors (DOFS) for structural health monitoring of infrastructure objects, primarily thanks to the constant development of interrogator units based on some of the recognized scattering processes: Raman, Rayleigh, and Brillouin. Brillouin and Rayleigh are recognized for both strain and temperature measurement, while Raman scattering is typically used for temperature monitoring only (Barrias, et al., 2016; Glisic & Inaudi, 2012; Guo, et al., 2011). Technologies have been tested successfully on bridges, with a good example of Brillouin scattering-based SHM tested in Sweden (Enckell, et al., 2011), and in geotechnics, where Disturbed Acoustic Sensing (DAS), also based on Rayleigh backscattering, has been proven as a good alternative to conventional methodologies based on geophones (Rossi, et al., 2022). In recent years also there has been an increasing number even of full-scale tests conducted on asphalt pavements.

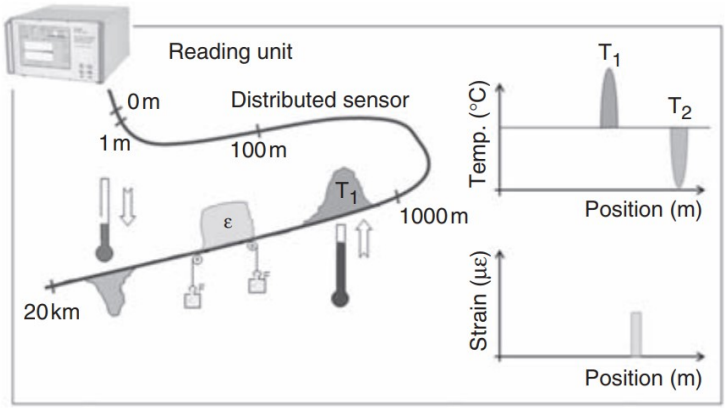


Figure 3. *Schematic representation of a distributed sensor.*
Source: (Glisic & Inaudi, 2012)

At the IFSTAR laboratory in France, the Rayleigh scattering process has shown potential for damage detection of pavements (Chapeleau, et al., 2014; Chapeleau, et al., 2017). An Optical Backscatter Reflectometer (OBR) was used as a measuring device (Chapeleau, et al., 2017; LUNA, n.d.). Test results were good despite the low-cost telecommunication cable used instead of cables specially designed for intended use that are 3 to 5 times more expensive according to authors (Chapeleau, et al., 2017). Mentioned could be interesting especially in the case of pavement since the cost-effectiveness of the monitoring system is far more important in comparison to other engineering structures like dams or bridges.

As mentioned above, besides Rayleigh scattering there is Brillouin scattering, as one of the recognized DFOS techniques. In general, it has been stated that Brillouin scattering has a significantly higher sensing range of even up to 200 km (150 - 200 km in case of BOTDA - Brillouin Optical Time Domain Analysis or 20 – 50 km in case of BOTDR - Brillouin Optical Time Domain Reflectometer technique used) comparing to Rayleigh OBR (also known as Optical Frequency Domain Reflectometry - OFDR) 50 to 70m. On the other hand, Rayleigh scattering-based OBR/OFDR has a greater spatial resolution of approximately 1 mm compared to 2 cm to 2m in the case of BOTDR and BOTDA techniques (Barrias, et al., 2016). Brillouin scattering-based methodology, for example, has been tested on asphalt-layered slopes on one dam in the northern district of Japan and has proven as a good option, especially for the determination of pavement plastic deformation under static load (Imai, et al., 2014).

Compared to the tested Optical Backscatter Reflectometer (OBR) at the IFSTAR laboratory with a relatively modest range of 50 to 70m, there is an increasing number of studies, especially recently, done concerning already mentioned Disturbed Acoustic Sensing (DAS) and in particular phase-sensitive Optical Time Domain Reflectometry (φ-OTDR) with very high sensitivity, spatial resolution and stated range of more than 100km (Soga & Luo, 2018). Technology has been tested at UC Berkeley's Richmond field station, showing its advantages over OFDR, with conventional stain gauges used for results verification (Hubbard, et al., 2022).

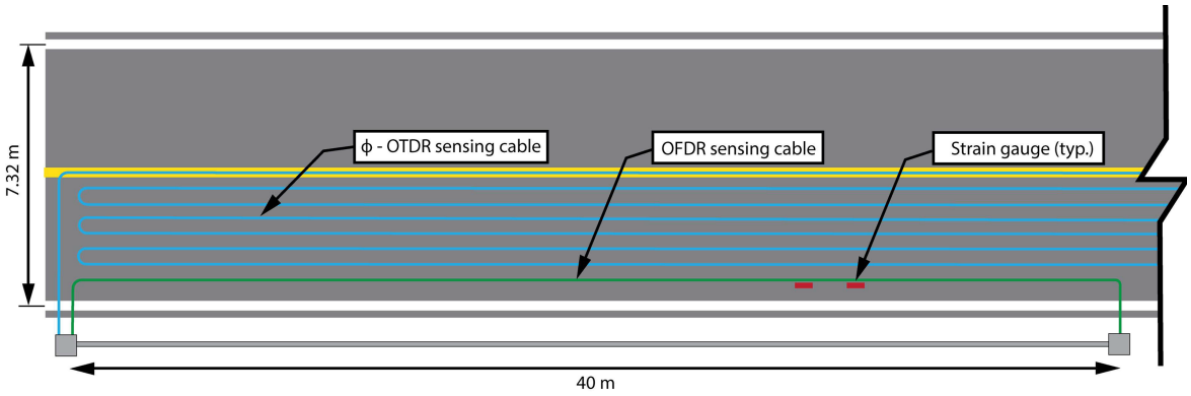


Figure 4. *Instrumentation of pavement at UC Berkeley's Richmond field station.*
Source: (adapted from Hubbard, et al., 2022)

In most of the case studies mentioned above fibre optic sensors needed some type of protection due to expected load and temperature, during asphalt works primarily. However, the usage of protection is absorbing part of the strain induced within the surrounding material, which motivated scientists to perform theoretical and experimental strain transfer analyses (e.g., Wang & Xiang, 2016; Xiang & Wang, 2018).

Fibre Optic Sensors, have unambiguously great potential for SHM systems, however, one of the most significant shortcomings for more extensive use is the cost of the interrogator unit which is according to the preliminary market research estimated to be around 100 000 euros. The stated price relates to interrogators only (without communication devices and fibre optic cables), but with the constant development of technology (e.g., Pozo & Beletkaia, 2019) it is possible that shortly, there will be more affordable equipment on the market.

2.3. Fiber Bragg Grating sensors (FBGs)

Fiber Bragg Grating sensors (FBGs) are a promising methodology for structural health monitoring of pavements. The concept of FBG sensors has been known for more than thirty years now (Meltz, et al., 1989). As De Maeijer, et al. (2019) explained:

> FBG is a small portion of an optical fibre several millimetres long in which a diffraction grating is written by ultraviolet (UV) exposure. The optical property of this grating is to reflect a narrow optical band (around a centre wavelength called Bragg wavelength) of the incident spectrum. FBG have the intrinsic quality to be very sensitive to thermal and mechanical stimuli. The Bragg wavelength is proportional to the temperature and/or strain variation. Since this sensor is very brittle, it needs to be packaged. (p. 3)

It is stated that, among others, FBG sensors were used for monitoring strain, temperature, pressure, dynamic magnetic field, etc (Rao, 1997). An additional advantage in favour of FBGs for structural monitoring is the fact that over the years couple of studies have been conducted related to simultaneous strain and temperature measurement. Rao (1997) summarized seven different potential methodologies, with two maybe the most intuitive like dual wavelength (Xu, et al., 1994), and one with reference FBGs. As an example, researchers from Taiwan developed a configuration with reference fibre grating and a grating pair scheme. Wang, et al., (2006) showed that "measurement errors of 6 με and 0.13°C for strain and temperature could be achieved, respectively" (p. 1).

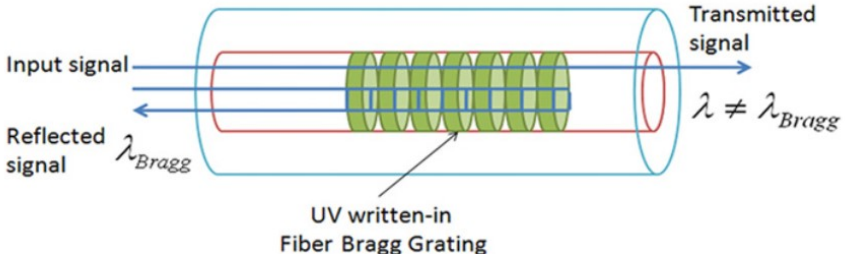


Figure 5. *Schematic of the signal interrogation system and sensor operation principle.*
Source: (adapted from Zhou, et al., 2012)

There are multiple examples of the implementation of FBG sensors in civil structures, such as the case of an all-fibre reinforced polymer composite road bridge in the United Kingdom. The bridge was constructed in 2002 with FBGs integrated during the assembly and bonding phase (Gebremichael, et al., 2005). Also, FBGs have already been tested on pavements like in the case of a bicycle path in Belgium. FBGs have been embedded in three pavement structure layers by two different installation techniques. Sensors were installed in prefabricated asphalt specimens and the previously constructed asphalt layer (see Figure 6) with a survival rate of 100%. According to the authors, the quality of obtained data will be the focus of future analysis (De Maeijer, et. al, 2019; De Maeijer, et al., 2018a; De Maeijer, et al., 2018b). As part of the ASPARi research project several experimental programs were carried out where FBGs were applied to asphalt pavement, with the conclusion that pavement FBGs have a potential for pavement monitoring but advised further research to adapt the technology for implementation in roads (De Maeijer, et. al, 2019; Vegt, 2016).

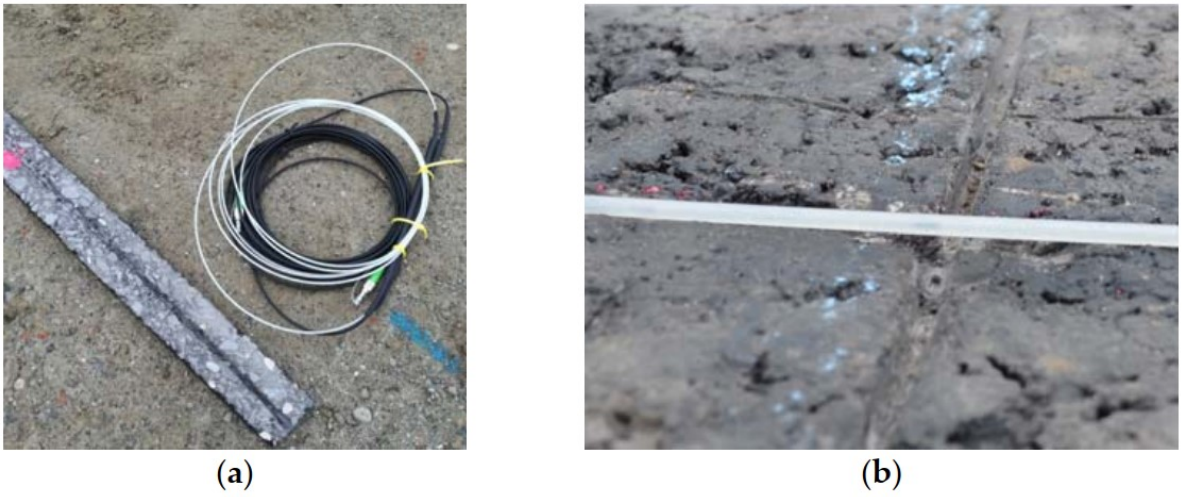


Figure 6. *Installation of FBGs in prefabricated asphalt in the base layer (a) and installation of FBGs in the previously constructed asphalt layer (b).*
Source: (De Maeijer, et al., 2018a)

Besides installing only fibre optic cables with printed FBGs researchers have tried also different forms of prefabrication like as combining fibre optic sensors with geotextile (Artières, et al., 2012) or in a case study done in China where 3D strain sensors packed in fibre-reinforced polymer for structural monitoring has been proposed (Zhou, et al., 2012).

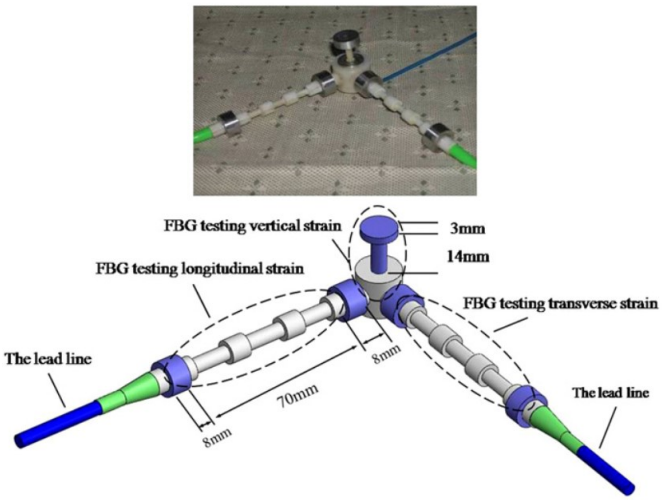


Figure 7. *Fabricated 3D strain sensor assembly for 3D structural strain monitoring.*
Source: (Zhou, et al., 2012)

When comparing the FBGs interrogators with one used in the case of the above-described Disturbed Fiber Optic Sensors (DFOS) they are far more affordable (according to market analysis it could be estimated that they are at least 3 to 10 times less expensive, depending on models). But in the case of FBGs implementation, there is an additional cost of sensor printing. When comparing FBGs with BOTDA and BOTDR some authors point out the high precision and special resolution of FBG, but also a more significant range of BOTDA and BOTR concluding that the overall price per sensor is much lower in the case of those DFOS techniques (e.g., Liu, et al., 2015).

2.4. Self-powered wireless sensors

Self-powered wireless sensors have also been widely researched in the last few years. Salehi, et al., (2021) pointed out their advantages like “ease of installation, cost-effectiveness, and a sustainable energy resource to empower wireless sensor networks for innovative civil engineering applications” (p. 11).

Self-power properties of sensing networks are based on energy harvesting processes. Lajnef, et al., (2011) explained that “Energy harvesting (often referred to as energy scavenging) is the process of converting ambient energy into electrical energy that can be used to power a sensor” (p. 514). Multiple energy harvesting technologies were analysed for implementation in self-powered networks, like sensor network monitoring environmental data powered by solar energy harvesting (e.g., Wu, et al., 2017), mechano-luminescent-optoelectronic composites strain sensor (e.g., Pulliam, et al., 2017), the triboelectric sensor developed to measure impacts at high energy in structures made of composite materials (e.g., Garcia, et al., 2019) or railway condition monitoring system powered by magnetic levitation energy harvester (e.g., Gao, et al., 2017). When analysing pavement condition monitoring only, piezoelectricity energy harvesting has been identified as the most investigated solution primarily as stated in the literature because piezoelectric harvesters are the most efficient one due to their large power density and ease of application (Salehi, et al., 2021). Bera & Sakar (2016) defined piezoelectricity as “an effect that is about the production of electrical potential in a substance as the pressure on it changes” stating further that “The most well-known material that has piezoelectric effect is the perovskite structured lead zirconate titanate Pb [Zr, Ti] O_3 (PZT), which has found huge applications in electromechanical sensors, actuators and energy generators” (p. 1407).

As a good example, researchers from Michigan State University and Washington University in cooperation with the Federal Highway Administration (FHWA) developed and tested a couple of solutions for self-powered wireless sensor networks for pavement monitoring based on piezoelectricity and floating gate computational circuits. The different types of epoxy packages were tested. Metallic materials must be avoided due to the Faraday cage effect which would jeopardise wireless communication (Alavi, et al., 2016; Hasni, et al., 2017; Lajnef, et al. 2013).

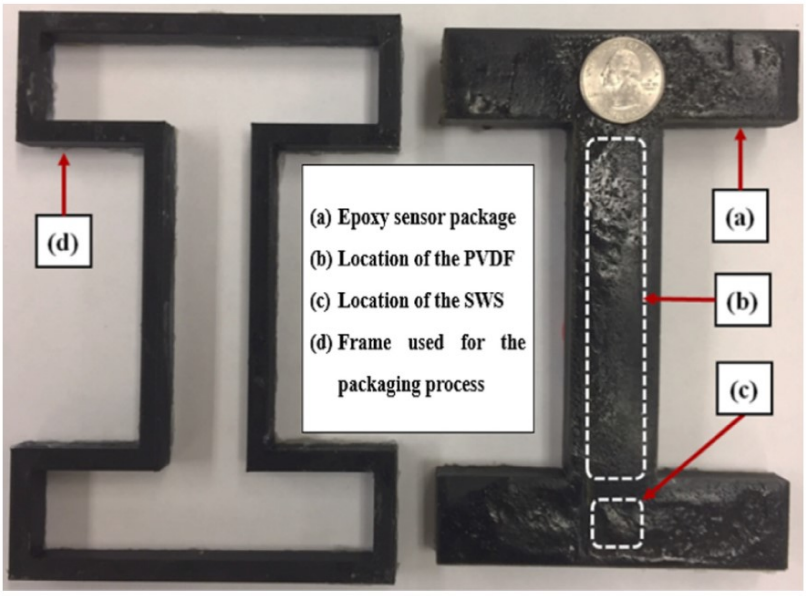


Figure 8. *Sensor packaging design example.*
Source: (Hasni, et al., 2017)

The same group of authors also investigated the potential of self-powered wireless sensors in combination with Radio Frequency Identification (RFID) Tagging Technology to be included in the infrastructural Internet of Things (*i*-IoT) concept presented in Figure 9.

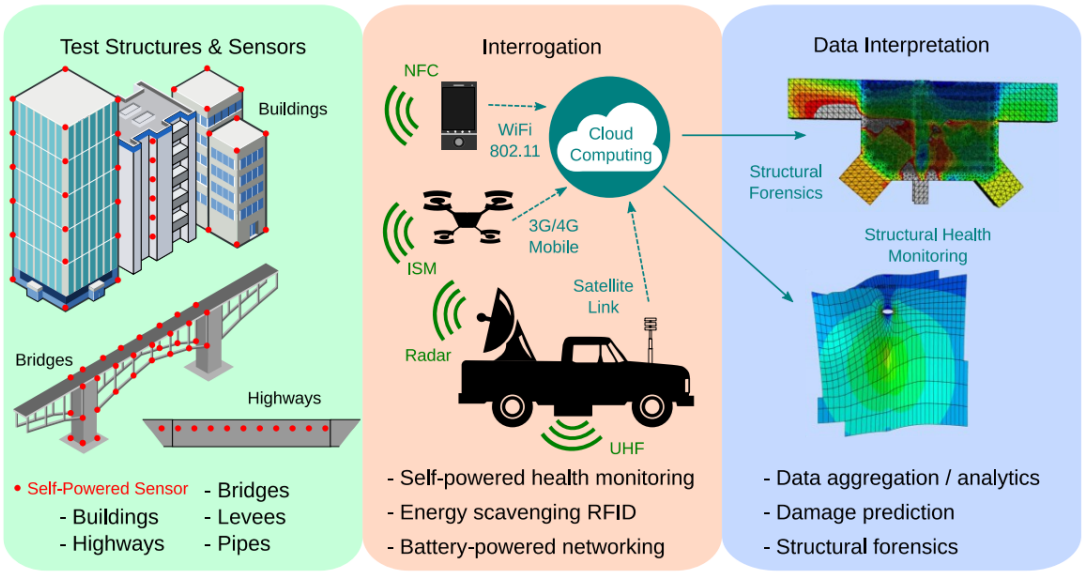


Figure 9. *The framework of infrastructural Internet of Things.*
Source: (Aono, et al., 2017)

2.5. Piezoresistive sensors

The piezoresistive effect was discovered in the 19th century (Fiorillo, et al., 2018) and according to Wang, et al., (2023) is defined as the "variation in the electrical resistance when subjected to an external load" (p. 10). The phenomenon is widely used in various sensor solutions, with metal strain gauges considered one of the most affordable and reliable technologies (Fiorillo, et al., 2018). Typical piezoresistive sensors consist of a Wheatstone bridge or half-bridge circuit (Fiorillo, et al., 2018). Farshidi (2011) explained the Wheatstone bridge as:

> Traditionally, the voltage-driven Wheatstone bridge configuration is used for the measurement of small resistance changes. It consists of four resistors connected in a quadrilateral form in addition to an excitation voltage connected across one diagonal of the bridge. The output voltage of the bridge is measured

differentially between the voltage divider outputs connected across the other diagonal. The deviation of one or more resistors (for example metal strain gauge) in the bridge from a nominal value is measured as an indication of the change in the measured physical variable, and the output voltage across the bridge indicates the resistance change. (p. 38)

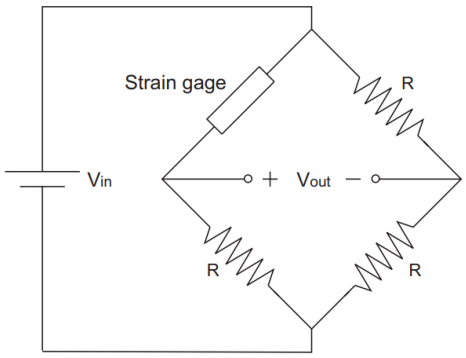


Figure 10. *One type of Wheatstone bridge for strain measurement.*
Source: (adapted from Kon, et al., 2007)

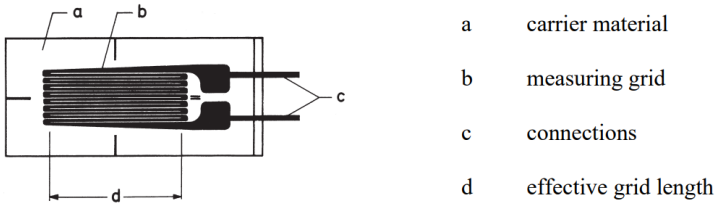


Figure 11. *The characteristic design of a strain gauge with etched metal foil measuring grid.*
Source: (Hoffman, 2012)

In recent years there has been an increasing number of research investigating the possibilities to use conductive materials as additives to asphalt and concrete pavements to make self–sensing asphalt pavements. Researchers from three German highway and construction materials institutes analysed carbon-based additives stating that those are best to realize functions of traffic detection, weight-in-motion (WIM), and self-sensing, but pointing out the main challenges especially how to achieve all three functions simultaneously (Wang, et al., 2023). As an example, scientists in Spain and Sweeden, analysed a combination of electric arc furnace slag used as fine aggregate and graphene nanoplatelets (GNPs) concluding that this combination (with GNPs participating by 7% of the binder) has a good potential for both pavements as well as traffic monitoring systems (Gulisano, et al., 2022). Simultaneously, the usage of additives with required conductive properties could increase the costs of asphalt mixtures, and in this regard, prefabrication has been proposed as one of the possibilities how to use the piezoresistive properties of the material, but not to increase the cost of the project noticeably (Gulisano, et al., 2022).

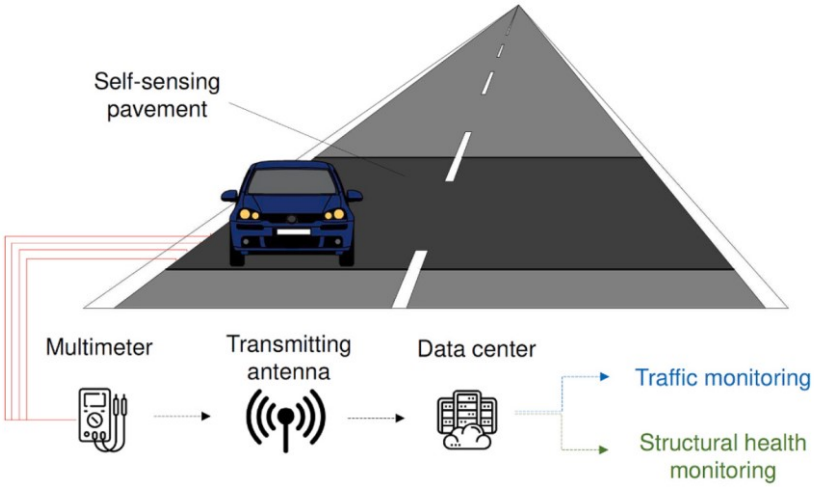


Figure 12. *Working principle of self-sensing pavement.*
Source: (Gulisano, et al., 2022)

Xin, et al., (2022) proposed an innovative approach to developing a “strain sensor with high sensitivity for pavement deformation monitoring by epoxying composites with hybrid nano/micro fillers” and further investigated “the effect of combined carbon black/carbon nanotubes (CB/CNT), and graphene nanoplatelet/carbon nanotubes (CNT/GNP) fillers on the self-sensing behaviour, morphology, dynamic mechanical performance, and thermal properties of epoxy composites” (p. 3945). Proposed solutions were tested in the laboratory with a three-point bending test comparing the results of the developed sensor and bonding commercial strain gauge used for calibrations. Testing results showed linear dependence between the sensor, developed, and embedded in asphalt mixture, and resistance change. It also had been proven that the proposed solution could sustain the expected harsh environment and that it is sensitive enough for intended use as a pavement monitoring tool (Xin, et al., 2022). A similar study done also by researchers in China investigated the implementation of modified epoxy/anhydride blends for encapsulating metal-foil strain gauges to enable the possibility of metal-foil strain gauges (traditionally used as stick-up sensing elements) being used as embedded strain sensors. The polymer they designed presented a good correlation with asphalt modulus, at the same time guaranteeing better properties concerning sensor protection sustaining expected high temperatures occurring during asphalt works. It is also concluded that the encapsulated strain gauge keeps its sensing properties (Su, et al., 2022).

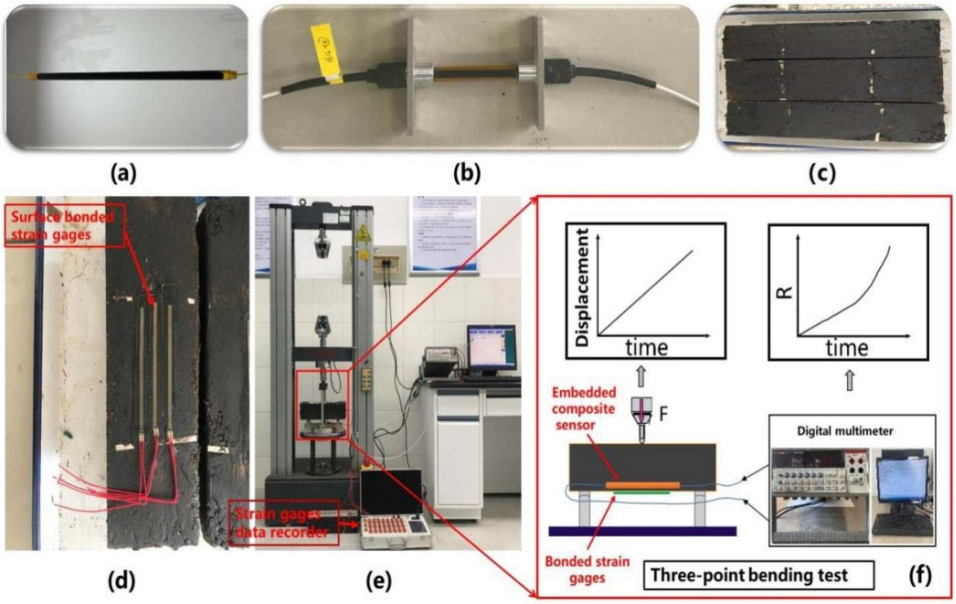


Figure 13. *A scheme of three-point bending test for asphalt mixture beams embedded with self-developed composite strain sensor: (a) encapsulated strip sensor, (b) installed sensor, (c) asphalt concrete beam embedded self-developed sensor, (d) bonding commercial strain gages for calibration, (e) three-point bending test for asphalt mixture beam, and (f) data acquisition.*
Source: (Xin, et al., 2022)

3. CONCLUSION

Some of the most common methodologies for continuous structural monitoring of pavements via embedded sensing networks analysed by researchers worldwide, have been presented. It concludes that embedded sensing networks show great potential as pavement monitoring and performance prediction tools capable of collecting reliable and comparable data in real time. On the other hand, it is visible that implementation of embedded sensors for pavement management remains limited since the installation of the embedded sensors equipment increases construction costs significantly, especially when considering potential maintenance costs as well as difficulties of embedded network maintenance. Instrumentation of the trial sections on the other hand for some time now is relatively regular, since it provides valuable data needed for improved understating of materials and further improvement of design methodologies, construction, and maintenance techniques. Furthermore, research related to embedded sensor networks for structural health monitoring of pavement structures should provide more economical and robust solutions capable of operating for a long time with minimal maintenance under harsh conditions without increasing the costs of pavement structures significantly. Most new technologies need actual trial section data since it is the only possibility to assess the quality of the solution and actual benefits to pavement management.

4. Acknowledgement

Research funded by EU project Circular and Connected Pavements for Carbon-Neutral and Digital Roads (CIRCOPAV) - Grant agreement ID: 101072820

References

[1] Dulac, J. (2013). *Global Land Transport: Infrastructure Requirements Estimating Road and Railway Infrastructure Capacity and Costs to 2050*. IEA Publications.
[2] Brons, M., Dijkstra, L., Ibáñez, J. N., & Poelman, H. (2022). *Road Infrastructure in Europe: Road Length and Its Impact on Road Performance* (No. WP 03/2022).
[3] FHWA, Long-Term Pavement Performance Program (LTPP), FHWA-HRT-15-018: https://infopave.fhwa.dot.gov/InfoPave_Repository/Reports/A10%20-%20Reports%20and%20Briefs/A10_20%20-%20Resource%20Documents/A10_20_20%20-%20Brochures/FHWA_HRT-15-%20018.pdf
(Last visited on: 12.04.2024)
[4] Tabatabaee, N., & Sebaaly, P. (1990). State-of-the-art pavement instrumentation. *Transportation Research Record*, *1260*, 246-255.
[5] Loulizi, A., Al-Qadi, I. L., Lahouar, S., & Freeman, T. E. (2001). Data collection and management of the instrumented smart road flexible pavement sections. *Transportation Research Record*, *1769*(1), 142-151.
[6] Al-Qadi, I. L., Loulizi, A., Elseifi, M., & Lahouar, S. (2004). The Virginia Smart Road: The impact of pavement instrumentation on understanding pavement performance. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, *73*(3), 427-465.
[7] Timm, D. H., Priest, A. L., & McEwen, T. V. (2004). *Design and instrumentation of the structural pavement experiment at the NCAT test track* (No. NCAT Report 04-01). National Center for Asphalt Technology (US).
[8] Timm, D. H., & Priest, A. L. (2004). Dynamic pavement response data collection and processing at the NCAT test track. *NCAT Report*, *4*(03).
[9] Garg, N., & Hayhoe, G. F. (2001). Asphalt concrete strain responses at high loads and low speeds at the National Airport Pavement Test Facility (NAPTF). In *Advancing Airfield Pavements* (pp. 1-14).
[10] Gopalakrishnan, K., & Thompson, M. R. (2006). Effect of dynamic aircraft gear loads on asphalt concrete strain responses. *Journal of ASTM International*, *3*(8), JAI100530.
[11] Garg, N., Flynn, R. M., Pecht, F., & Brill, D. R. (2013). FAA's instrumentation project at John F. Kennedy International Airport to study load and environment induced responses in concrete pavements. In *Proceedings of the international conferences on the bearing capacity of roads, railways and airfields* (pp. 101-111).
[12] Cook, K., Garg, N., Singh, A., & Flynn, M. (2016). Detection of delamination in the HMA layer of runway pavement structure using asphalt strain gauges. *Journal of Transportation Engineering*, *142*(11), 04016047.
[13] Garcia, G., & Thompson, M. R. (2008). Strain and pulse duration considerations for extended-life hot-mix asphalt pavement design. *Transportation Research Record*, *2087*(1), 3-11.
[14] Yang, S. (2014). *Health monitoring of pavement systems using smart sensing technologies* (Doctoral dissertation, Iowa State University).
[15] Weinmann, T. L., Lewis, A. E., & Tayabji, S. D. (2004, September). Pavement sensors used at accelerated pavement test facilities. In *Proceedings of the second international conference on accelerated pavement testing*. University of Minnesota, Minneapolis, MN.
[16] Barriera, M., Pouget, S., Lebental, B., & Van Rompu, J. (2020). In situ pavement monitoring: A review. *Infrastructures*, *5*(2), 18.
[17] Barrias, A., Casas, J. R., & Villalba, S. (2016). A review of distributed optical fiber sensors for civil engineering applications. *Sensors*, *16*(5), 748.
[18] Glisic, B., & Inaudi, D. (2012). Development of method for in-service crack detection based on distributed fiber optic sensors. *Structural Health Monitoring*, *11*(2), 161-171.
[19] Guo, H., Xiao, G., Mrad, N., & Yao, J. (2011). Fiber optic sensors for structural health monitoring of air platforms. *Sensors*, *11*(4), 3687-3705.
[20] Enckell, M., Glisic, B., Myrvoll, F., & Bergstrand, B. (2011). Evaluation of a large-scale bridge strain, temperature and crack monitoring with distributed fibre optic sensors. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, *1*, 37-46.
[21] Rossi, M., Wisén, R., Vignoli, G., & Coni, M. (2022). Assessment of Distributed Acoustic Sensing (DAS) performance for geotechnical applications. *Engineering Geology*, *306*, 106729

[22] Chapeleau, X., Blanc, J., Hornych, P., Gautier, J. L., & Carroget, J. (2014, July). Use of distributed fiber optic sensors to detect damage in a pavement. In *Proceedings of the 7th European Workshop on Structural Health Monitoring, Nantes, France* (pp. 8-11).
[23] Chapeleau, X., Blanc, J., Hornych, P., Gautier, J. L., & Carroget, J. J. J. O. C. S. H. M. (2017). Assessment of cracks detection in pavement by a distributed fiber optic sensing technology. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, *7*, 459-470.
[24] Imai, M., Igarashi, Y., Shibata, M., & Miura, S. (2014). Experimental study on strain and deformation monitoring of asphalt structures using embedded fiber optic sensor. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, *4*, 209-220.
[25] Soga, K., & Luo, L. (2018). Distributed fiber optics sensors for civil engineering infrastructure sensing. *Journal of Structural Integrity and Maintenance*, *3*(1), 1-21.
[26] Hubbard, P. G., Ou, R., Xu, T., Luo, L., Nonaka, H., Karrenbach, M., & Soga, K. (2022). Road deformation monitoring and event detection using asphalt-embedded distributed acoustic sensing (DAS). *Structural Control and Health Monitoring*, *29*(11), e3067.
[27] Meltz, G., Morey, W. W., & Glenn, W. H. (1989). Formation of Bragg gratings in optical fibers by a transverse holographic method. *Optics letters*, *14*(15), 823-825.
[28] Kara De Maeijer, P., Luyckx, G., Vuye, C., Voet, E., Van den bergh, W., Vanlanduit, S., ... & De Wolf, J. (2019). Fiber optics sensors in asphalt pavement: state-of-the-art review. *Infrastructures*, *4*(2), 36.
[29] Rao, Y. J. (1997). In-fibre Bragg grating sensors. *Measurement science and technology*, *8*(4), 355.
[30] Xu, M. G., Archambault, J. L., Reekie, L., & Dakin, J. P. (1994). Discrimination between strain and temperature effects using dual-wavelength fibre grating sensors. *Electronics letters*, *30*(13), 1085-1087.
[31] Wang, J. N., Tang, J. L., & Chang, H. P. (2006, April). Fiber Bragg grating sensors for use in pavement structural strain-temperature monitoring. In *Smart Structures and Materials 2006: Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems* (Vol. 6174, pp. 1205-1216). SPIE.
[32] Zhou, Z., Liu, W., Huang, Y., Wang, H., Jianping, H., Huang, M., & Jinping, O. (2012). Optical fiber Bragg grating sensor assembly for 3D strain monitoring and its case study in highway pavement. *Mechanical Systems and Signal Processing*, *28*, 36-49.
[33] Gebremichael, Y. M., Li, W., Boyle, W. J. O., Meggitt, B. T., Grattan, K. T. V., McKinley, B., ... & Luke, S. (2005). Integration and assessment of fibre Bragg grating sensors in an all-fibre reinforced polymer composite road bridge. *Sensors and Actuators A: Physical*, *118*(1), 78-85.
[34] Kara De Maeijer, P., Van den bergh, W., & Vuye, C. (2018a). Fiber Bragg grating sensors in three asphalt pavement layers. *Infrastructures*, *3*(2), 16.
[35] Kara De Maeijer, P., & Vuye, C. (2018b). Case study on the technique of installation of fiber bragg grating sensors in three asphalt layers. In *Proceedings of 13th ISAP conference on Asphalt Pavements, 19-21 June, Fortaleza, Brazil, 2018* (pp. 1-7).
[36] Vegt, G. J. (2016). *Verlicht asfalteren. Over de haalbaarheid van Fiber Bragg Grating sensoren in het asfaltverwerkingsproces* (Bachelor's thesis, University of Twente).
[37] Artières, O., Bacchi, M., Bianchini, P., Hornych, P., & Dortland, G. (2012, March). Strain measurement in pavements with a fibre optics sensor enabled geotextile. In *7th RILEM International Conference on Cracking in Pavements: Mechanisms, Modeling, Testing, Detection and Prevention Case Histories* (pp. 201-210). Dordrecht: Springer Netherlands.
[38] Salehi, H., Burgueño, R., Chakrabartty, S., Lajnef, N., & Alavi, A. H. (2021). A comprehensive review of self-powered sensors in civil infrastructure: State-of-the-art and future research trends. *Engineering Structures*, *234*, 111963.
[39] Lajnef, N., Rhimi, M., Chatti, K., Mhamdi, L., & Faridazar, F. (2011). Toward an integrated smart sensing system and data interpretation techniques for pavement fatigue monitoring. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, *26*(7), 513-523.
[40] Bera, B., & Sarkar, M. D. (2016). Piezoelectric effect, piezotronics and piezophototronics: a review. *Imperial Journal of Interdisciplinary Research (IJIR)*, *2*(11), 1407-1410.
[41] Alavi, A. H., Hasni, H., Lajnef, N., & Chatti, K. (2016). Continuous health monitoring of pavement systems using smart sensing technology. *Construction and Building Materials*, *114*, 719-736.
[42] Hasni, H., Alavi, A. H., Jiao, P., Lajnef, N., Chatti, K., Aono, K., & Chakrabartty, S. (2017). A new approach for damage detection in asphalt concrete pavements using battery-free wireless sensors with non-constant injection rates. *Measurement*, *110*, 217-229.
[43] Lajnef, N., Chatti, K., Chakrabartty, S., Rhimi, M., & Sarkar, P. (2013). *Smart pavement monitoring system* (No. FHWA-HRT-12-072). United States. Federal Highway Administration.
[44] K Aono, S. H. (2017, January). Self-powered sensors to facilitate infrastructural internet-of-things for smart structures. In *The 13th International Workshop on Advanced Smart Materials and Smart*

Structures Technology.
[45] Aono, K., Lajnef, N., Faridazar, F., & Chakrabartty, S. (2016, May). Infrastructural health monitoring using self-powered internet-of-things. In *2016 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS)* (pp. 2058-2061). IEEE.
[46] Fiorillo, A. S., Critello, C. D., & Pullano, S. A. (2018). Theory, technology and applications of piezoresistive sensors: A review. *Sensors and Actuators A: Physical*, *281*, 156-175.
[47] Wang, T., Faßbender, S., Dong, W., Schulze, C., Oeser, M., & Liu, P. (2023). Sensitive surface layer: A review on conductive and piezoresistive pavement materials with carbon-based additives. *Construction and Building Materials*, *387*, 131611.
[48] Farshidi, E. (2011). A low-voltage current-mode Wheatstone bridge using CMOS transistors. *International Journal of Electrical & Computer Sciences*, *5*(10), 1368-1372.
[49] Kon, S., Oldham, K., & Horowitz, R. (2007, April). Piezoresistive and piezoelectric MEMS strain sensors for vibration detection. In *Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems 2007* (Vol. 6529, pp. 898-908). SPIE.
[50] Hoffmann, K. (2012). An introduction to stress analysis and transducer design using strain gauges.
[51] Gulisano, F., Buasiri, T., Apaza, F. R. A., Cwirzen, A., & Gallego, J. (2022). Piezoresistive behaviour of electric arc furnace slag and graphene nanoplatelets asphalt mixtures for self-sensing pavements. *Automation in Construction*, *142*, 104534.
[52] Xin, X., Qiu, Z., Luan, X., Ding, X., Liang, M., Yao, Z., & Li, Y. (2022). Novel conductive polymer composites for asphalt pavement structure in situ strain monitoring: Influence of CB/CNT and GNP/CNT nano/micro hybrid fillers on strain sensing behavior. *IEEE Sensors Journal*, *22*(5), 3945-3956.
[53] Su, L., Luan, X., Qiu, Z., Liang, M., Rong, Y., Xin, X., ... & Ma, C. (2022). Sensing performance and optimizing encapsulation materials of a coordinated epoxy-encapsulated sensor for strain monitoring of asphalt pavement layered structures. *IEEE Sensors Journal*, *22*(10), 9811-9823.

Bibliography

[1] Inger, A. (2022). The Closing Window: Climate Crisis Calls for Rapid Transformation of Societies.
[2] Milad, A., Taib, A. M., Ahmeda, A. G., Solla, M., & Yusoff, N. I. M. (2020). A review of the use of reclaimed asphalt pavement for road paving applications. *J. Teknol*, *82*(3), 35-44.
[3] Shahin, M. Y. (1994). *Pavement management for airports, roads, and parking lots*.
[4] ASTM D6433-20: Standard Practice for Roads and Parking Lots Pavement Condition Index Surveys
[5] Schnebele, E., Tanyu, B. F., Cervone, G., & Waters, N. J. E. T. R. R. (2015). Review of remote sensing methodologies for pavement management and assessment. *European Transport Research Review*, *7*, 1-19.
[6] OPTICAL BACKSCATTER REFLECTOMETRY (OBR) – OVERVIEW AND APPLICATIONS, LUNA: https://www.lunainc.com/sites/default/files/assets/files/resource-library/OBR%20-%20Overview%20and%20Applications.pdf (Last seen on: 12.04.2024)
[7] Wang, H., & Xiang, P. (2016). Strain transfer analysis of optical fiber based sensors embedded in an asphalt pavement structure. *Measurement Science and Technology*, *27*(7), 075106.
[8] Xiang, P., & Wang, H. (2018). Optical fibre-based sensors for distributed strain monitoring of asphalt pavements. *International Journal of Pavement Engineering*, *19*(9), 842-850.
[9] Pozo, J., & Beletkaia, E. (2019). Brillouin to Revolutionize the Distributed Sensing Market: Novel technologies such as Brillouin fiber ring lasers and “magic” tape make the Brillouin fiber optic sensors significantly more accessible. *PhotonicsViews*, *16*(2), 27-29.
[10] Liu, W., Wang, H., Zhou, Z., Xing, X., Cao, D., & Jiang, Z. (2015). Optical fiber-based sensors with flexible encapsulation for pavement behavior monitoring. *Structural Control and Health Monitoring*, *22*(2), 301-313.
[11] Wu, F., Rüdiger, C., & Yuce, M. R. (2017). Real-time performance of a self-powered environmental IoT sensor network system. *Sensors*, *17*(2), 282.
[12] Pulliam, E., Hoover, G., & Ryu, D. (2017, September). Multifunctional mechano-luminescent-optoelectronic composites for self-powered strain sensing. In *Smart Materials, Adaptive Structures and Intelligent Systems* (Vol. 58264, p. V002T05A010). American Society of Mechanical Engineers.
[13] Garcia, C., Trendafilova, I., & del Rio, J. S. (2019). Detection and measurement of impacts in composite structures using a self-powered triboelectric sensor. *Nano Energy*, *56*, 443-453.
[14] Gao, M., Wang, P., Wang, Y., & Yao, L. (2017). Self-powered ZigBee wireless sensor nodes for railway condition monitoring. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, *19*(3), 900-909.

UTICAJ PETROGRAFSKOG SASTAVA ŠLJUNKA NA OTPORNOST NA DROBLJENJE I POSLEDIČNO NA SPRAVLJANJE BETONA I IZRADU ASFALTNIH MEŠAVINA

Olivera Đokić[1], Marko Nikolić[1], Bojana Đokić[2], Miodrag Dančetović[1]
[1]Institut za puteve ad, Beograd, Srbija, email:o.djokic@highway.rs; marko.nikolic@highway.rs
[2]Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Beogradu, Srbija, email: bojanadjokic005@gmail.com

Rezime: *Prirodno nevezani agregati se u Srbiji tradicionalno koriste za spravljanje betona (B). Ukoliko se pojedine frakcije ovih agregata predrobe, potencijalno se mogu koristiti za izradu asfaltnih mešavina (AM). Uticaj petrografskog sastava agregata na ostale performanse bitnih karakteristika agregata je takav da direktno utiče da li će se ovaj potencijal ostvariti. U radu su ispitani petrografski sastavi prirodno nevezanih agregata poreklom iz reke Drine, Kolubare i Morave (Velike, Južne, Zapadne). Prikazani su i sastavi drobljenih prirodnih agregata iz reke Drine i Velike Morave. Ovim analizama pridodata su određena tehnička svojstva. Zaključeno je da agregati iz Drine i Kolubare imaju više krečnjaka, dijabaza i peridotita, a manje kvarcita i škriljaca u odnosu na agregate iz Južne Morave, pa su im otpornosti na drobljenje (LA) bolje. Velika Morava ima najviše kvarcita i gnajseva dobrih karakteristika drobljivosti. Zbog toga se agregati iz Drine i Kolubare i potencijalno Velike Morave mogu koristiti, osim za spravljanje betona i za izradu asfaltnih mešavina, za razliku od agregata iz Južne i Zapadne Morave koji, iako se predrobe, ostaju u domenu upotrebe za spravljanje betona.*

Ključne reči: *rečni agregati, LA, tehnička svojstva, B, AM*

THE INFLUENCE OF THE PETROGRAPHIC COMPOSITION OF GRAVEL ON RESISTANCE TO FRAGMENTATION AND CONSEQUENTLY ON THE MAKING OF CONCRETE AND THE PRODUCTION OF ASPHALT MIXTURES

Olivera Đokić[1], Marko Nikolić[1], Bojana Đokić[2], Miodrag Dančetović[1]
[1]Institut za puteve ad, Beograd, Srbija, email:o.djokic@highway.rs; marko.nikolic@highway.rs
[2]Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Beogradu, Srbija, email: bojanadjokic005@gmail.com

Abstract: *Naturally unbound aggregates are traditionally used in Serbia to make concrete (B). If specific fractions of these aggregates are crushed, they can potentially be used to produce asphalt mixtures (AM). The impact of the petrographic composition of the aggregate on other performances of the essential characteristics of the aggregate is such that it directly affects whether this potential will be realised. The paper examines the petrographic compositions of naturally unbound aggregates from the Drina, Kolubara, and Morava rivers (Velika, Južna, Zapadna). Compositions of crushed natural aggregates from the Drina and Velika Morava rivers are also presented. Specific technical features have been added to these analyses. It was concluded that the aggregates from Drina and Kolubara have more limestone, diabase, and peridotite and less quartzite and schist than those from Južna Morava river, so their resistance to crushing (LA) is better. Velika Morava has the most quartzites and gneisses and is well resistant to fragmentation. That is why aggregates from Drina and Kolubara and potentially from Velika Morava can be used, except for making concrete and for making asphalt mixtures, unlike aggregates from Južna and Zapadna Morava, which, although they are processed, remain in the domain of use for making concrete.*

Keywords: *river aggregates, LA, technical properties, B, AM*

1. UVOD

Crnomorski sliv je najveći sliv u Srbiji i obuhvata oko 92 % ukupne teritorije Republike Srbije. Neke od najvećih reka Crnomorskog sliva, koje su i predmet ovog rada, jesu Drina (dužine 487 km), Kolubara (dužine 123 km), Velika Morava (dužine 185 km), Južna Morava (dužine 295 km) i Zapadna Morava (dužine 308 km). Pomenuti rečni tokovi, kao i njihove pritoke, eroduju stene i tranportuju klastični materijal iz različitih geoloških formacija i geotektonskih jedinica. Sitniji klastični materijal se transportuje lebdeći u vodi, dok se krupniji transportuje kotrljanjem po dnu. U zavisnosti od jačine vodenog toka, zavisi i mogućnost transporta odlomaka stena po veličini. Takođe, osim veličine klastičnog materijala, na transport utiče i njihova zapreminska masa i oblik valutica.

prkos raznolikosti petrografskih vrsta stena, samo mali broj ima široku primenu u putogradnji i deo su aktivnih kamenoloma čiji se kvalitet materijala kontroliše i potvrđuje sertifikatom. Od sedimentnih stena u Srbiji se u putogradnji za donje noseće slojeve, bitumenizirane noseće slojeve (BNS) i asfalt-betone (AB) do srednjeg saobraćajnog opterećenja koriste krečnjaci, dolomiti i drobljeni iber. Od magmatskih stena se za AB i BNS za sve grupe saobraćajnog opterećenja koriste daciti, andeziti, dijabazi i gabrovi, obzirom da je njihova upotreba za donje noseće slojeve skupa [1].

Stene, odnosno od njih proizvedeni ili separisani agregati, da bi mogli da se koriste u građevinskoj industriji, moraju da poseduju određena tehnička svojstva, koja su u saglasnosti sa nacionalnim tehničkim uslovima zemlje gde se ugrađuju. Otpornost na drobljenje i habanje su, na primer, svojstva koja su deo svih tehničkih uslova kada su u pitanju agregati koji će se upotrebiti građevinskoj industriji kako u niskogradnji tako i u visokogradnji. Ova svojstva direktno zavise od petrografskog sastava stena koje se koriste kao agregati za proizvodnju betona i izradu asfaltnih mešavina.

Određene grupe stena pokazuju dobru otpornost na drobljenje (LA) i habanje i obrnuto. Kada je u pitanju habanje, u literaturi se mogu naći podaci da sveže magmatske stene koje sadrže slobodnu siliciju pokazuju bolju otpornost na habanje nego bazične stene koje imaju visok sadržaj feromagnezije [2]. Međutim, kada je u pitanju drobljenje, bazične stene često pokazuju bolju otpornost. Postoje i stene koje imaju i dobru otpornost na drobljenje i habanje, kao što su na primer dijabazi [1]. Kada su u pitanju krečnjaci i dolomiti, veću otpornost na drobljenje pokazuju kriptokristalasti krečnjaci u odnosu na mikrokristalaste. Od metamorfnih stena gnajsevi se slično ponašaju magmatskim stenama zbog sličnog mineralnog sastava i krupnoće zrna, dok su škriljci manje otporni, zbog škriljave teksture i pločastog oblika zrna, koja se lako drobe i razaraju pod dejstvom čeličnih kugli u Los Anđeles mašini.

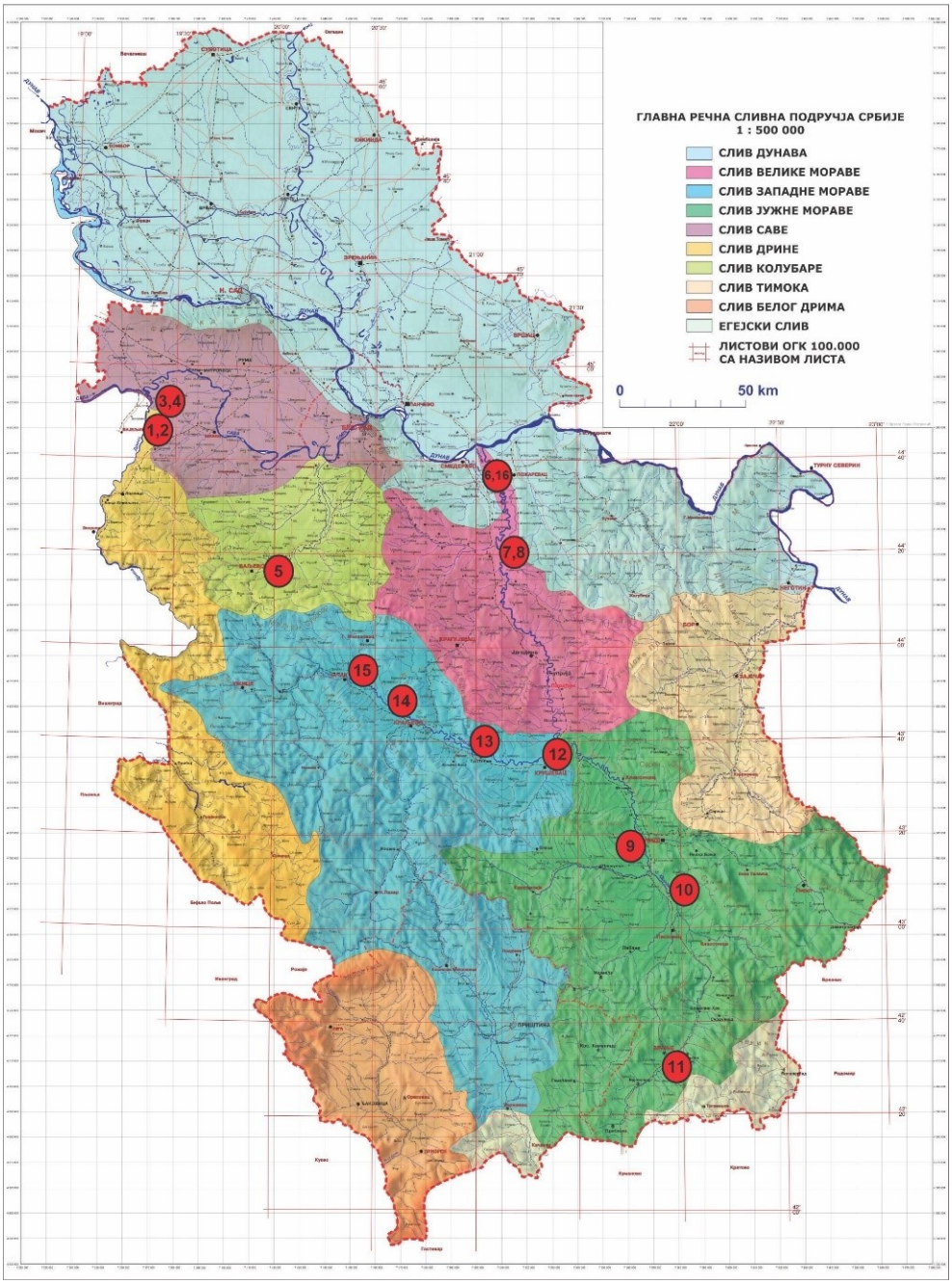
Korelacije između tehničkih svojstava i različitih vrsta stena ispitivali su mnogi istraživači. Teymen je, na primer, ispitivao odnos između LA i drugih tehničkih svojstava četrdesetak uzoraka različitih članova familije magmatskih stena iz Turske koje je klasifikovao kao dubinske, subvulkanske, vulkanske, piroklastične i metamorfne (magmatskog porekla). Rezultati studije pokazali su da postoje značajne i visoke korelacije sa različitim parametrima kao što su koeficijent čvrstoće stene, tvrdoće stene, otpornosti na udar, upijanja vode i tako dalje [3]. Ispitujući kvalitet putnih agregata u Portugalu, ustanovljeno je da bazalt, šljunak (aluvijalni) i granitoidi (isključujući granite) pokazuju bolje rezultate od ostatka krupozrnih agregata. Agregati od granita i mermera pokazuju lošije performanse, dok krečnjak/dolomitni agregati imaju srednje performanse otpornosti na drobljenje [4]. Spasovski je ispitivao fizičke, mehaničke (LA), petrografske i hemijske karakteristike dijabaza Košarska Reka (Vardarska zona, Republika Makedonija) za građevinske svrhe. Utvrđeni rezultati su pokazali da ove stijene zadovoljavaju zahtjeve za asfalt beton, beton, nevezani materijal i druge primjene u građevinarstvu [5].

U Srbiji je još uvek dozvoljena eksploatacija šljunka iz eksploatacionih polja za vađenje rečnog nanosa, koja se nalaze duž korita naših reka - Drine, Kolubare i Morave (Velike, Južne, Zapadne). Šljunak se kao nevezani materijal separiše i kao takav predstavlja ulaznu komponentu za proizvodnju betona. Drobljeni šljunak iz Drine se, za sada, osim za proizvodnju betona, jedini koristi i za izradu asfaltnih mešavina. Šljunak iz Morave ne. Da bi dobili odgovor zašto je to tako, postavili smo za cilj da ispitamo petrografski sastav šljunkova iz naših reka i izvršimo korelaciju sa otpornosti na drobljenje LA. Rezultati ovih istraživanja doprineće boljem poznavanju uticaja petrografskih karakteristika šljunka na otpornost na drobljenje, a posredno i na njegovu krajnju upotrebu na mestu ugradnje i eventualno otvoriti nove mogućnosti korišćenja drobljenog agregata šljunka.

2. MATERIJALI I METODE

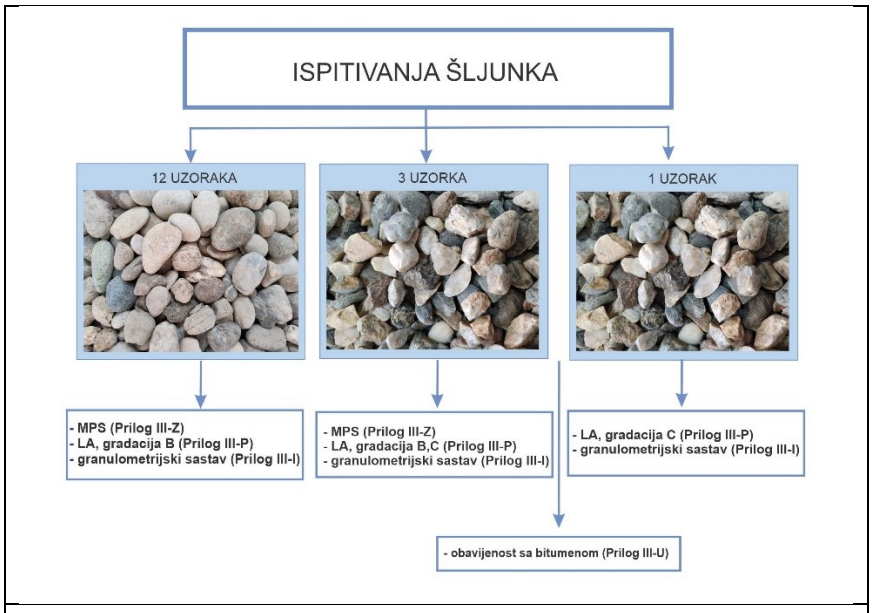
U radu su prikazani rezultati petrografskih sastava šljunkova i otpornosti na drobljenje LA od kojih je dvanaest analiza vezano za prirodno nevezane agregate (prirodni šljunak) a tri analize za drobljene prirodne agregate (drobljeni šljunak). Na šesnaestom uzorku ispitana je samo otpornost na drobljenje. Mesta uzorkovanja šljunka prikazana su na slici 1.

Prirodno nevezani agregati šljunka potiču iz reke Drine (dva uzorka), Kolubare (jedan uzorak), Velike Morave (dva uzorka), Zapadne Morave (četri uzorka) i Južne Morave (tri uzorka). Uzorkovani su sa separacija koje ih koriste kao ulaznu sirovinu za proizvodnju separisanih agregata za spravljanje betona. Metode za određivanje pomenutih svojstava agregata preuzete su iz ''Pravilnika o tehničkim zahtevima za frakcionisani agregat za beton i asfalt'' (Pravilnik) [6].



Slika 1. *Mesta uzorkovanja šljunka iz aluviona reka Drine, Kolubare, Velike Morave, Zapadne Morave i Južne Morave*

Šljunkovi su oprani, osušeni i prosejani na slogu sita. Za analizu petrografskog sastava odvojene su frakcije 16/32 mm i 8/16 mm koje se koriste za formiranje test uzorka pri ispitivanju otpornosti na drobljenje po metodi Los Anđeles – gradacija B (slika 2).



Slika 2. *Dijagram ispitnih metoda agregata za beton (prirodni)i asfaltne mešavine (drobljeni) prema Pravilniku [6]*

Drobljeni prirodni agregati šljunka potiču iz reke Drine (dva uzorka) i Velike Morave (dva uzorka). Uzorkovani su sa istih gorepomenutih separacija. Ulazna sirovina za proizvodnju drobljenih agregata je frakcija 16/32 mm i ''iberlauf'' (veličina zrna agregata veća od 32 mm). Od proizvedenih šljunkova prosejavanjem su takođe izdvojene frakcije 16/32 mm i 8/16 mm na kojima su ispitani petrografski sastavi (tri uzorka). Za LA gradaciju C odvojene su frakcije 8/16 mm i 4/8 mm.

Kako je u okviru istraživanja cilj bio utvrditi potencijalni uticaj određene vrste stene prisutnog u šljunku na vrednosti otpornost na drobljenje materijala LA (%), petrografskim ispitivanjima izdvojili smo trinaest različitih vrsta stena i sagledavali korelacije sa LA.

Osim toga, izdvajali smo i različite grupe stena i analizirali korelacije sa LA. U radu su prikazane samo dve grupe sa najboljim korelacijama a to su:

- grupa krupnozrnih stena (granitoidi, gabrovi, peridotiti, peščari, kvarciti, gnajsevi) i škriljavih stena (kao što su razni škriljci - biotitski, muskovitski, epidotski, hloritski, i mikašisti) i
- grupa sitnozrnih magmatskih i sedimentnih stena (daciti, andeziti, dijabazi, konglomerati, krečnjaci i dolomiti).

Peščari su svrstani u krupnozrnije stene zbog velikog učešća mineralnih zrna u odnosu na vezivo, a konglomerati u sitnozrne stene zbog obilnog prisustva sitnozrnog veziva u odnosu na odlomke stana. Svrstavanje je bazirano na makroskopskoj odredbi stena.

Otpornosti na drobljenje i habanje po metodi Los Anđeles preuzete su iz ranijih ispitivanja agregata u Laboratoriji za kamen i kamene agregate, Instituta za puteve. Dijagram ispitnih metoda prirodnog agregata za spravljenje betona (gradacija B) i drobljenog prirodnog agregata za spravljenje betona i/ili izradu asfaltnih mešavina (gradacija B i C) prikazan je na slici 2. Kada su u pitanju drobljeni agregati šljunka, dodati su podaci o obavijenosti površine kamenog materijala bitumenom.

Kako bismo analizirali potencijalne korelacije između prisustva određenih vrsta stena i vrednosti LA, koristili smo np.corrcoef funkciju u programskom jeziku Python. Ova funkcija dolazi iz popularne biblioteke NumPy koja je široko korišćena u analizi podataka. NumPy pruža mnoge efikasne alate za manipulaciju numeričkim podacima u Pythonu.

np.corrcoef funkcija računa Pearsonovu korelaciju, koja predstavlja meru linearnog odnosa između dve kontinuirane promenljive. Ova mera korelacije pomaže nam da razumemo kako se promene u prisustvu određenog tipa stena u šljunku mogu odraziti na vrednosti LA, što nam daje uvid u potencijalni uticaj vrste stena na otpornost na drobljenje materijala.

Formula za Pearsonovu korelaciju između dva niza promenljivih x i y koju smo koristili je:

$$r = \frac{n(\sum xy) - (\sum x)(\sum y)}{\sqrt{[n\sum x^2 - (\sum x)^2][n\sum y^2 - (\sum y)^2]}} \quad (1)$$

Gde n predstavlja broj uzoraka, a x i y promenljive.

Rezultate smo zatim vizualizovali kroz barplot. Pozitivna korelacija ukazuje na to da postoji tendencija da se vrednosti LA povećavaju sa povećanjem prisustva određene vrste stene u šljunku, dok negativna korelacija implicira suprotan odnos. Vrednosti oko nule sugerišu slabo ili nepostojeće linearno povezivanje između promenljivih. Važno je napomenuti da korelacija ne implicira uzročno-posledični odnos, već samo meri stepen povezanosti između varijabli. Stoga, rezultati istraživanja mogu pružiti korisne uvide o potencijalnom uticaju određenih vrsta stena i/ili grupa stena na otpornost na drobljenje šljunka.

3. REZULTATI

3.1. Petrografski sastav

Petrografskom analizom prirodno nevezanih agregata (prirodnog i drobljenog šljunka) iz reke Drine utvrđeno je da u krupnom agregatu dominiraju olomci sedimentnih stena (krečnjaci i peščari oko 52 %) a zatim magmatskih stena (dijabaza/spilita, peridotita, andezita/dacita oko 37 %). Podređenije su zastupljeni fragmenti metamorfnih stena kvarcita i gnajs/migmatita oko 11 % (tabela 1).

Reka Kolubara se sastoji od odlomaka sedimentnih (krečnjaka, peščara i rožnaca oko 59 %) i magmatskih stena (dijabaza/spilita, peridotita oko 34 %). Odlomci metamorfnih stena su zastupljeni manje od 10 %.

Velika Morava je dominantno izgrađena od metamorfnih stena kvarcita, gnajs/migmatita i malo škriljaca – 66%. Peščari, rožnaci i konglomerati čine 17 %, dok su magmatske stene zastupljene sa 17 % a čine ih odlomci granitoida, dijabaza i andezita. Južna Morava ima isti mineralni sastav kao i Velika Morava samo što je veći sadržaj metamorfnih stena (kvarcita i škriljaca – 76 %), a manji sedimentnih stena oko 12 %. Sadržaj magmatskih stena je približno isti kao i sedimentnih.

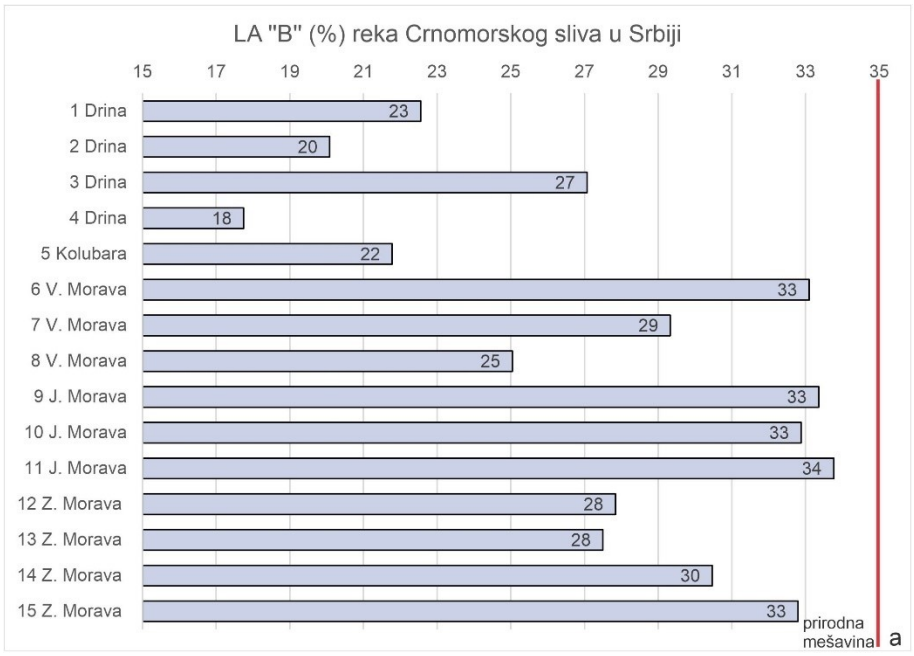
Zapadna Morava je izgrađena od magmatskih stena (43 % peridotita, dijabaza/spilita, andezita/dacita), promenljivog sadržaja odlomaka sedimentnih (33 %) i metamorfnih stena (25 %).

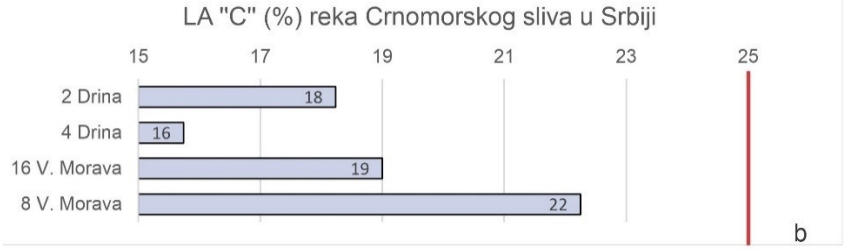
Tabela 1. *Mineraloško-petrografski sastav šljunka*

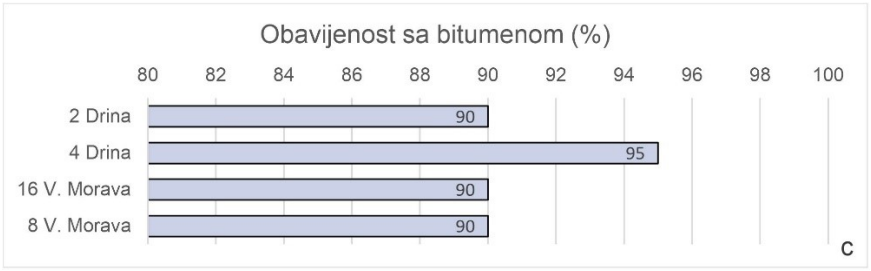
		Učešće u frakciji (%)														
		SEPARACIJE														
GENETSKA		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
GRUPA		Drina	Drina	Drina	Drina	Kolubara	Velika Morava	Velika Morava	Velika Morava	Južna Morava	Južna Morava	Južna Morava	Zapadna Morava Kruševac	Zapadna Morava V.Banja	Zapadna Morava Kraljevo	Zapadna Morava Čačak
	Naziv stene	prirodni	drobljeni	prirodni	drobljeni	prirodni	prirodni	prirodni	drobljeni	prirodni	prirodni	prirodni	prirodni	prirodni	prirodni	prirodni
MAGMATSKE STENE	granitoidi	6,5	5,1	4,0	3,6	0,0	3,9	6,5	3,9	7,2	4,6	3,8	5,5	0,0	7,8	0,0
	gabro	7,1	10,9	2,2	2,5	3,3	2,3	0,8	0,0	0,0	0,0	0,0	10,4	6,5	2,8	8,9
	dacit/andezit	1,7	7,3	9,7	12,1	3,9	8,0	3,4	4,2	8,2	7,4	0,9	18,4	16,1	6,4	5,5
	dijabaz/spilit	14,6	10,6	4,4	8,7	25,1	6,1	3,8	3,9	1,4	0,5	0,0	5,7	3,1	2,7	5,8
	peridotit (serpent.)	17,9	2,9	5,0	11,1	1,8	4,6	0,0	0,0	2,0	0,0	0,0	12,5	29,2	10,8	12,6
SEDIMENTNE STENE	konglomerat	0,0	0,0	4,1	3,8	0,0	2,0	2,8	4,6	2,2	0,0	0,0	1,3	8,2	0,6	0,0
	peščari	7,6	12,6	15,9	6,7	14,1	5,8	11,7	10,7	19,6	3,6	1,6	2,2	10,3	15,8	27,1
	krečnjak/dolomit	25,4	39,0	38,1	41,2	34,9	0,0	0,0	0,0	7,9	0,0	0,0	25,0	6,2	2,0	7,4
	rožnac	9,3	4,0	1,3	0,0	10,0	4,5	6,7	2,6	0,7	1,1	0,0	11,0	5,1	4,2	4,9
METAMORFNE STENE	kvarcit	9,3	7,9	7,2	10,5	5,7	48,3	43,1	51,4	29,1	32,8	13,9	0,0	13,7	34,2	23,8
	gnajs/migmatit	0,0	0,0	8,3	0,0	0,0	3,9	15,9	15,2	20,0	29,8	18,2	0,0	0,0	4,3	0,0
	škriljci (Bi, Mu, Ep, Co)	0,9	0,0	0,0	0,0	1,5	7,1	5,2	3,6	1,9	20,2	43,7	8,4	1,8	8,8	4,4
	mikašist	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	3,8	0,0	0,0	0,0	0,0	18,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	MAGMATSKE ST.	47,7	36,6	25,3	37,9	34,0	24,8	14,5	11,9	18,8	12,5	4,7	52,3	54,8	30,4	32,7
Ukupno	SEDIMENTNE ST.	42,3	55,6	59,3	51,6	58,9	12,2	21,3	17,9	30,3	4,7	1,6	39,5	29,7	22,5	39,3
	METAMORFNE ST.	10,2	7,9	15,4	10,5	7,2	63,0	64,2	70,2	51,0	82,8	93,7	8,4	15,5	47,2	28,2

3.2. Tehničke karakteristike

Otpornost na drobljenje izražena je koeficijenatom Los Anđeles. Utvrđene LA vrednosti za gradaciju B kreću se u rasponu od 18 % do 34 %, sa srednjom vrednosti od 28 % (slika 3a). Što je niža vrednost ovog koeficijenta, otpornost na drobljenje šljunka je bolja i obrnuto. Najmanja vrednost od 18 % utvrđena je u uzorku drobljenog šljunka koji potiče iz reke Drine pod brojem 4, dok je najveća vrednost od 34 % utvrđena u uzorku šljunka iz Južne Morave pod rednim brojem 11.







Slika 3. *Otpornost na drobljenje LA za gradaciju B prirodnih i drobljenih agregata šljunka (a), za gradaciju C drobljenih agregata (b) i obavijenost sa bitumenom drobljenih agregata (c)*

Otpornost na drobljenje - LA vrednosti za gradaciju C za drobljeni šljunak kreće se u rasponu od 18 % do 22 %, sa srednjom vrednosti od 19 % . Niže (bolje) vrednosti su utvrđene kod uzorka drobljenog šljunka iz Drine, a najviše kod uzorka šljunka iz Zapadne Morave.

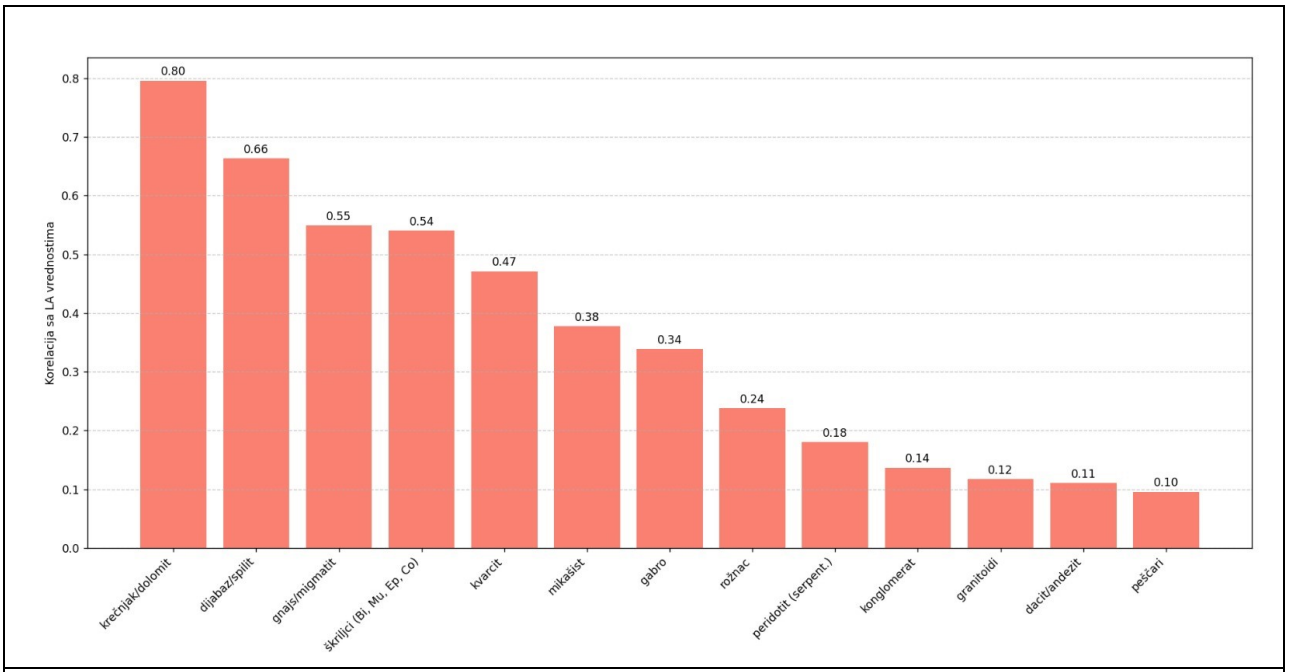
Prionljivost agregata sa bitumenom kod drobljenih agregata šljunka je od 90% do 95%.

4. DISKUSIJA

4.1. Korelacije LA i vrsta stena

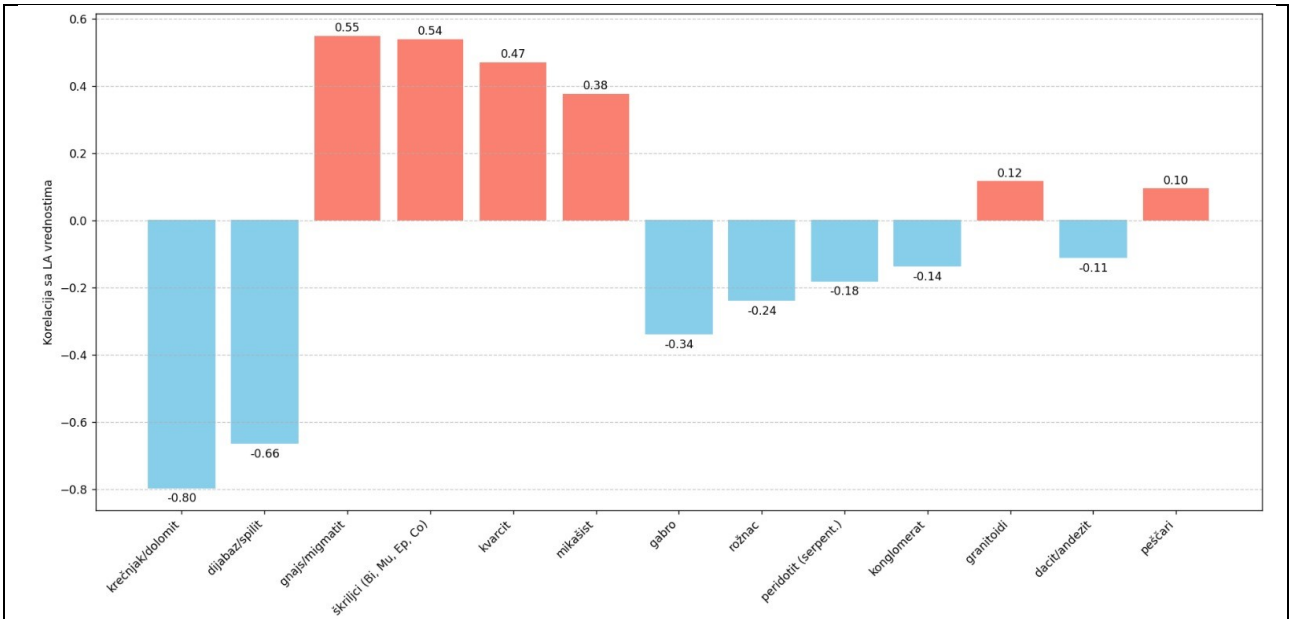
U predhodnom poglavlju, u tabeli 1, prikazan je petrografski sastav šljunka iz naših reka iz kojih se šljunak eksploatiše u obliku prirodnog agregata (samo prosejanog) i drobljenog prirodnog agregata. Petrografski sastav koji je prikazan tiče se samo frakcija 8/16 mm i 16/32 mm, odnosno frakcija koje se koriste za ispitivanje LA testa – gradacija B. Ovaj petrografski sastav nije uključio procentualni sadržaj stena u ostalim frakcijama kao ni minerale koji se dominantno javljaju u sitnijim frakcijama šljunka (0/2 mm).

Geološka podloga svake zemlje je specifična, tako da su predstavljeni podaci karakteristični za stene preko kojih teku reke Srbije i ne mogu se primeniti za reke u drugim geološkim područjima. Naši krečnjaci, dijabazi i peridotiti preko kojih teče reka Drina su čvrsti, jedri, kompaktni, pa je i njihova otpornost na drobljenje najveća. Geološka podloga Drine je takva da seče geotektonske jedinice Dinaride i Vardarsku zonu. Na slici 4. prikazane su apsolutne vrednosti korelacija vrsta stena sa LA vrednostima kako bi se preglednije videlo koje vrste stena i u kojoj meri utiču na otpornost na drobljenje, ali se zato ne vidi da li utiču pozitivno ili negativno. Apsolutna korelacija vrednosti LA sa krečnjacima i dijabazima je najveća (-0,80, - 0,66), a manja sa peridotitima (-0,18) (slike 4 i 5). Međutim, ukoliko bi reka proticala preko poroznih krečnjaka, alterisanih dijabaza i serpentinisanih (u većoj meri) peridotita, ne bismo mogli tvrditi da je prisustvo ovih stena poželjno. Korelacija LA vrednosti sa ovim stenama je negativna (slika 5), što implicira da će veći sadržaj krečnjaka, dijabaza i peridotita u sastavu reke dati manju, odnosno bolju vrednost LA. Odlomci metamorfnih stena u Drinskim šljunkovima su mali.



Slika 4 . *Apsolutna korelacija otpornosti na drobljenje LA (%) i petrografije ispitivanih šljunkova*

Kolubara ima sličan petrografski sastav kao i Drina, samo je još veće učešće krečnjaka i peščara. Geološki posmatrano pripada Vardarskoj zoni. Interesantno je su LA vrednosti najmanje korelisane sa peščarima iako je potvrđeno da Drinski šljunkovi generalno imaju dobre LA vrednosti, odnosno da su ovi peščari kompaktni (slika 4). Korelacija otpornosti na drobljenje LA sa peščarima je blizu nule (-0.10), što ukazuje na slabu ili nepostojeću linearnu povezanost (slika 5). Objašnjenje za ovakvu korelaciju peščara i otpornosti na drobljenje može da bude da su peščari iz Drine manje čvrsti i kompaktni u odnosu na peščare Velike Morave koji, obzirom da su blizu ušća u Dunav, predstavljaju pored kvarcita i gnajseva, najčvršće materijale u reci.



Slika 5 . *Relativna korelacija otpornosti na drobljenje LA (%) i petrografije ispitivanih šljunkova*

Velika Morava pripada Srpsko-makedonskoj masi koja je generalno metamorfisana, pa je i reka dominantno (2/3) izgrađena od metamorfnih stena kvarcita, gnajs/migmatita i malo škriljaca. Kvarciti su izuzetno tvrde stene, ali ujedno i krte, pa čelične kugle u bubnju Los Anđeles znaju odlomke kvarcita da raspolove i/ili izdrobe. Zbog toga su i vrednosti LA kod ove reke veće u odnosu na šljunak iz Drine. Južna Morava takođe pripada Srpsko-makedonskoj masi. Sastav joj je sličan kao kod Velike Morave, samo što se, idući ka Vranju, smanjuje sadržaj kvarcita, a povećava sadržaj škriljaca i mikašista. Upravo ove stene utiču na smanjenje otpornosti na drobljenje. Apsolutna korelacija otpornosti na drobljenje LA i gnajseva, škriljaca, kvarcita i mikašista je od 0,55 do 0,38 (slika 4). Korelacija otpornosti na drobljenje LA i ovih stena je pozitivna – što ih više u reci ima – lošije će biti vrednosti LA (slika 5). Kada vrednosti LA u prirodnoj mešavini agregata pređu 35%, takav šljunak se ne može upotrebiti kao sirovina za proizvodnju frakcija za izradu betona i asfaltbetona. Primećeno je da je to slučaj sa Južnom Moravom i njenim pritokama južnije od Vranja.

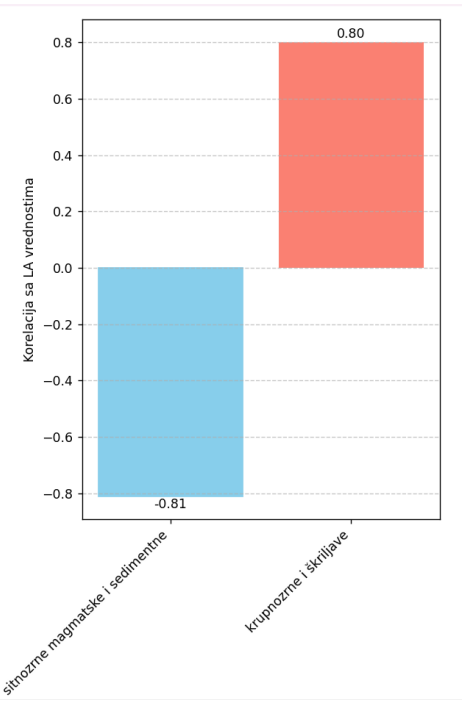
Zapadna Morava poprečno preseca više geotektonskih jedinica (Vardarska zona, Srpsko-makedonska masa) pa je i sastav šljunkova različit (tabela 1). Posmatrajući srednji sadržaj stena, izgrađena je više od 40% od magmatskih stena (peridotita, dijabaza/spilita, andezita/dacita) i gotovo istog procentualnog sadržaja sedimentnih i metamorfnih stena (oko 30 %). Uočeno je da se od Kruševca ka Čačku otpornost na drobljenje smanjuje, odnosno LA vrednost povećava. Obzirom na raznolikost vrsta stena i njihovog procentualnog učešća, ne može se izvesti jasan zaključak zašto se to dešava. Verovatno zato što šljunak kod Kruševca ima veći sadržaj krečnjaka i dacita/andezita (negativna korelacija sa LA), a šljunak kod Čačka veći sadržaj kvarcita i peščara (pozitivna korelacija sa LA) (slika 5).

4.2. Korelacije LA i grupa stena

Najveće vrednosti korelacije otpornosti na drobljenje LA i petrografije šljunka, kada su u pitanju grupe stena, postignute su kod sitnozrnih magmatskih i sedimentnih stena (negativna korelacija - 0,81) i krupnozrnih i škriljavih stena (pozitivna korelacija 0,80) (slika 6).

Negativna korelacija LA vrednosti postignuta je sa sitnozrnim magmatskim i sedimentnim stenama (kao što su daciti, andeziti, dijabazi, konglomerati, krečnjaci i dolomiti). Dobijeni rezultati u ovoj studiji su u saglasnosti ranije objavljenim radovima koji su ukazivali da smanjenje veličine zrna u steni poboljšava otpornost na drobljenje i habanje, ali i da je prisustvo finozrnijeg matriksa ovde krucijalno [7].

Iz ovoga se može zaključiti da prisustvo krupnozrnijih stena (kao što su granitoidi, gabrovi, peridotiti, peščari, kvarciti, gnajsevi) i škriljavih stena (kao što su razni škriljci - biotitski, muskovitski, epidotski, hloritski, i mikašisti) smanjuje otpornost na drobljenje (slika 6). Ovo je u saglasnosti sa relativnom korelacijom (slika 5) za sve vrste stena osim za gabrove i peridotite koji, uprkos krupnoznijoj strukturi, utiču na manju LA vrednost.



Slika 6 . *Relativna korelacija otpornosti na drobljenje LA (%) i petrografije grupe stena (sitnozrne magmatske i metamorfne i krupnozrne i škriljave)*

Laboratorijska ispitivanja su pokazala da najkrupnija frakcija šljunka i njeno učešće u ukupnom sastavu šljunka, imaju veliki uticaj na svojstva betonskih mešavina, pri čemu se dobijaju betoni većih čvrstoća [8]. Iako bi proizvođačima betona odgovaralo da je potražnja za četvorofrakcijskim betonima što veća, praksa pokazuje da se projekti u najvećem broju slučajeva izvode sa trofrakcijskim betonima, zbog gusto armiranih betonskih elemanata i neophodnih uslova za kvalitetnu izgradnju betona. Betoni izgrađeni od šljunka, sa druge strane najviše makroskopski najviše podsećaju na konglomerate, koji su prirodno formirane stene nastale konsolidacijom šljunka. Za njih bi trebalo da važe isti zakoni kao i za betone kada je u pitanju čvrstoća na pritisak. Međutim, kada je u pitanju otpotnost na drobljenje, ove stene se, pod uslovom da imaju veće učešće sitnozrnije frakcije (što je slučaj sa konglomeratima ispitanih drinskih šljunkova), približavaju stenama porfirske strukture, kao što su daciti ili andeziti, čija je otpornost na drobljenje veća u poređenju sa stenama sa zrnastim strukturama.

4.3. Regulativa

Regulativa za upotrebu prirodne mešavine šljunka za proizvodnju betona i izradu asfaltnih mešavina oslanja se na trenutno važeći Pravilnik [6]. Granična vrednost otpornosti na drobljenje LA za beton je 35% za gradaciju B (za prirodnu mešavinu šljunka) i 30% (za prirodni separisani agregat). Granična vrednost otpornosti na drobljenje LA za asfaltbeton za gradaciju C je 25% (drobljeni separisani agregat karbonatnog i/ili metamorfnog porekla za srednje saobraćajno opterećenje). Prikazane vrednosti LA prikazane na slici 3a, utvrđene su kod prirodnih mešavina šljunka i drobljenih šljunkova za gradaciju B. Obzirom da su sve vrednosti manje od 35% može se zaključiti da šljunkovi iz svih reka (1-15) zadovoljavaju propisane tehničke uslove za proizvodnju betona.

Kada su u pitanju asfaltbetoni, posmatraju se vrednosti LA za drobljeni šljunak (gradacija C). Granicu od 25% (slika 3b) zadovoljavaju šljunkovi reke Drine (srednja vrednost 17%) i Velike Morave (21%). Vrednosti LA za gradaciju C generalno su manje u odnosu na gradaciju B, pa bi očekivana LA vrednost za šljunak Kolubare bila oko 20%. Za ocenu šljunkova iz Južne Morave i Zapadne Morave nemamo dovoljno podataka o drobljenim agregatima šljunka. Obzirom na povišene vrednosti LA (gradacija B 28% i više – od 30% do 34%) realna je pretpostavka da drobljeni agregati iz Zapadne Morave i Južne Morave ili neće zadovoljiti tehničke uslove za proizvodnju asfaltbetona ili će uvek biti na samoj granici što predstavlja veliku nesigurnost za proizvođače agregata.

Dodatno, šljunkovi u asfaltnim mešavinama moraju i dobro da budu obavijeni bitumenom. Na slici 3c vidi se da šljunkovi iz Drine i iz Velike Morave imaju dobru obavijenost. Šljunkovi iz Drine imaju dosta krečnjaka, dijabaza, gabrova i peridotita koje su bazičnog sastava pa je stoga obavijenost sa bitumenom ovih stena dobra. Ovo je u saglasnosti sa literaturnim podacima o prionljivosti bitumena sa različitim mineralima i stenama [9]. Šljunak iz Velike Morave je oko 70 % izgrađen od stena kiselog sastava – kvarcita, peščara, konglomerata, rožnaca, granitoida, pa se kod ovih šljunkova mogu očekivati lošiji rezultati prionljivosti od postignutih.

5. ZAKLJUČAK

Zaključci koji su izvedeni iz analiziranja uticaja petrografskog sastava šljunka na otpornost na drobljenje, a u cilju upotrebe šljunka za spravljanje betona i izradu asfaltnih mešavina su sledeći:

- petrografski sastav šljunka definitivno utiče na otpornost na drobljenje agregata;
- korelacija vrednosti LA sa krečnjacima i dijabazima naših reka je najveća;
- što je veći sadržaj krečnjaka, dijabaza i peridotita u sastavu šljunka to će njegova otpornost na drobljenje biti bolja, a LA vrednost manja;
- korelacija LA vrednosti sa peščarima iz svih ispitivanih reka je mala, što ne znači da ove korelacije ne postoje ako se analiziraju reke pojedinačno;
- što je veći sadržaj gnajseva, škriljaca, kvarcita i mikašista u sastavu šljunka to će njegova otpornost na drobljenje biti slabija, a LA vrednost veća;
- prisustvo sitnozrnih magmatskih i sedimentnih stena povećava otpornost na drobljenje;
- prisustvo krupnozrnijih i škriljavih stena smanjuje otpornost na drobljenje;
- svi ispitivani šljunkovi iz Drine, Kolubare i Morave (Velike, Južne, Zapadne) se koriste za proizvodnju betona;
- šljunkovi reke Drine, Kolubare i Velike Morave zadovoljavaju tehničke uslove za izradu asfaltbetona, međutim u praksi se za asfaltne mešavine koriste samo šljunkovi iz Drine; zalihe šljunka iz Kolubare su sporne, a tvrdoća šljunka iz Velike Morave odbija i najsmelije proizvođače;
- šljunkovi iz Južne Morave i Zapadne Morave imaju povećane vrednosti LA (gradacija B) pa se pretpostavlja da neće zadovoljiti tehničke uslove za proizvodnju asfaltbetona.

Zahvale

Autori se zahvaljuju Zoranu Stojanoviću i Aleksandru Radeviću na deljenju velikog praktičnog iskustva koje je bilo značajno prilikom izvođenja zaključaka rada. Takođe zahvaljujemo se Dušanu Novakoviću na pomoći oko izbora frakcija za petrografska ispitivanja i Laboratoriji za kamen i kamene agregate na permanentoj podršci.

Literatura

[1] O. Djokic and V. Milicevic, “Main technical characteristics of rocks used in road construction in Serbia,” *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, vol. 72, no. 1, pp. 137–141, Feb. 2013, doi: 10.1007/s10064-012-0442-7.

[2] M. Smith and L. Collis, *Aggregates: Sand, gravel and crushed rock aggregates for construction purposes (3rd edition)*, Second edi. London: The Geological Society, 2001.

[3] A. Teymen, “Estimation of Los Angeles abrasion resistance of igneous rocks from mechanical aggregate properties,” *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, vol. 78, no. 2, pp. 837–846, Mar. 2019, doi: 10.1007/s10064-017-1134-0.

[4] F. C. Branco, M. Quinta-Ferreira, and I. Fernandes, “Characteristics of aggregates used in road construction in Portugal, complying with the requirements of European Conformity (CE marking),” *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, pp. 1–13, 2017, doi: 10.1007/s10064-017-1066-8.

[5] O. Spasovski, ““Physical-mechanical and mineralogical-petrographical characteristics of the diabases at the locality “Košarska reka‘(Vardar zone, Republic Macedonia), as basis for the use of the diabases for construction stones,’” vol. 75, no. 1, pp. 65–75, 2013.

[6] Ministar građevinarstva, “Pravilnik o tehničkim zahtevima za frakcionisani agregat za beton i asfalt,” Službeni glasnik RS, broj 78 od 29. maja 2020., p. 19, 2020.

[7] S. Lundqvist and M. Göransson, “Evaluation and Interpretation of Microscopic Parameters vs. Mechanical Properties of Precambrian Rocks from the Stockholm Region, Sweden,” in *Proceedings of the 8th Euroseminar on Microscopy Applied to Buildings Materials*, Athens, Greece, 2001, pp. 13–20.

[8] M. Muravljov, D. Zakić, and A. Radević, *Tehnologija betona - teorija i praksa*. Beograd: Univerzitet u Beogradu - Građevinski fatkultet; Akademska misao, 2022.

[9] D. Svetel, “Prionljivost bitumena za kameni agregat i primena aditiva za poboljšanje prionljivosti,” in *Reološke osobine bitumena*, Beograd: Studio PLUS, 2001, pp. 114–122.

SPECIFIČNOSTI IZVOĐENJA ASFALTNIH RADOVA NA REKONSTRUKCIJI POLETNO-SLETNE STAZE AERODROMA „NIKOLA TESLA“ – BEOGRAD

Krsmanović Branislav, dipl.ing.građ.
NEO AERODROMES ENGINEERING Beograd, branislav.krsmanovic@neo.co.rs
Bodiroga Saša, dipl.ing.geod.
NEO AERODROMES ENGINEERING Beograd, sasabodiroga@yahoo.com
Ivović Nikola, dipl.ing.građ.
NEO AERODROMES ENGINEERING Beograd, nikola.ivovic@neo.co.rs

Rezime*: Rekonstrukcija Poletno-slete staze (PSS) na aerodromu koji je u punom operativom stanju, kao sto je to slučaj na Aerodromu „NIKOLA TESLA Beograd“, predstavlja ozbiljan izvođački zadatak. Izvođenje asfaltnih radova predstavlja krunu svih radova. Dobar asfaltni zastor predstavlja lice PSS i utiče na organizaciju i bezbednost vazdušnih operacija. Međutim, usklađivanje zahteva iz projekta sa mogućnostima Izvođača asfaltnih radova je složen organizacioni i tehnički proces, koji je uspešno proveden na rekonstrukciji Glavne PSS.*

Ključne reči*: Kolovozna konstrukcija (KK), Asfaltni zastor, Fleksibilna i kruta KK, Asfaltni slojevi, Poletno sletna staza (PSS)*

AIRPORT SPECIFITY OF ASPHALT WORKS IN RECONSTRUCTION OF BELGRADE RUNWAY

Krsmanović Branislav,
NEO AERODROMES ENGINEERING Belgrade, branislav.krsmanovic@neo.co.rs
Bodiroga Saša,
NEO AERODROMES ENGINEERING Belgrade, sasabodiroga@yahoo.com
Ivović Nikola,
NEO AERODROMES ENGINEERING Belgrade, nikola.ivovic@neo.co.rs

Abstrct: *Reconstruction of Main Runway of airport which is in full operation stage, as it was on Airport „Nikola Tesla Beograd“ is serious contractor task. Performing of asphalt works represents the crown of all works. Good quality of asphalt pavement reprsents the face of runway and have influence to organization and security of flying operations. But, matching of demands from Design with the contractors possibilites is complexed organization and technical problem and process, which was successfully conducted within the reconstruction of Main Runway.*

Key words: *pavement construction (kk), asphalt pavement, flexible and rigid pavement, asphalt layers*

1. KRATKA ISTORIJA GLAVNE PSS AERODROMA BEOGRAD

Glavna PSS izgrađena je u periodu 1958-1961 godine, uključujući i sve platforme i rulne staze.

U periodu 1961 – 1995 godine izvršeno je nekoliko opravki i ojačanja (1981, 1986, 1991) sa konačnim stanjem nosivosti PSS – PCN 40 – 65 prosečno i terenskim CBR ispod kolovozne konstrukcije (KK), u srednjem CBR=7%.

Posle izgradnje nove PSS, u periodu 2021-2023 predviđena je rekonstrukcija Glavne PSS. Rast saobraćaja podstakao je brzu rekonstrukciju Glavne PSS.

Pred Projektantom rekonstrukcije NEO AERODROMES ENGINEERING Beograd – Aleksandar Vučković, dipl.ing.građ, i projektantom KK- Mustapha Masdan, EUROVIA – VINCI Pariz, našao se veoma složen konstruktorski zadatak rekonstrukcije KK sa što manje izmena nivelete i sistema odvodnje atmosferskih voda i postojećeg sistema navigacije i svetlosnog obeležavanja.

U tom smislu izvršena je transformacija srednjeg dela profila PSS u širini od 20 m sa krute na fleksibilnu KK primenom metode rablizacije (rublization), kao i minimalno podizanje nivelete PSS za oko 15 cm.

2. OBIM I VRSTA ASFALTNIH RADOVA I PROBLEMATIKA

Projektom predviđeni slojevi i tipovi asfaltnih mešavina bili su uslovljeni poprečnim presekom PSS, sa rablizovanim (*rublization*) srednjim delom širine 20 m(± 10m), do postojećeg tamponskog sloja, koji je linijski odsečen u podužnom smislu do dubine tampona, u cilju sprečavanja pukotina i prenosa vibracija na susedne slojeve KK, koje izaziva proces rablizacije.

Prethodno je izvršeno struganje – frezovanje asfaltnih slojeva KK do nivelete starog betonskog kolovoza.

Tokom rablizacije smanjena je visina rablizovanog sloja postojećeg starog betonskog zastora prosečno za 10 – 12 cm, sto je uslovilo ugradnju tucaničkog sloja iste debljine, frakcije 0/22 mm u okviru širine od 20m.

Zadatak pred Izvođačem asfaltnih radova sastojao se od dva bitna dela - izvođenje radova i kontrola kvaliteta asfaltne mase kroz sledeće faze:

a) Organizacija izvođenja radova, sa transportom na relaciji Ruma- Aerodrom, uz uslov svakodnevnog prolaska tehnike, ljudstva, kamiona sa asfaltnom masom preko „državne granice“ (ulaz na teritoriju aerodroma) sa procedurom gde nema izuzetaka, uz veoma česte zabrane ulaska usled vremenskih uslova (ulaska aerodroma u tzv. CAT III, tj. Instrumentalno letenje). I pored pune saradnje Izvođača sa meteo službom nepredviđeni zastoji su bili česti, uz opasnost hlađenja asfaltne mase u kamionima (sl.1) .

Slika 1. *Kamioni sa asfaltom u čekanju*

b) Veliki obim struganja – frezovanja postojećih asfaltnih slojeva (oko 22 000 m3)
c) Strogo kontrolisana nivelacija u toku ugradnje asfaltne mase, posebno prvog sloja.
d) Maksimalno izbegavanje tzv. „hladnih“ spojeva između traka
e) Priprema „hladnih“ spojeva do mere ne prepoznavanja posle ugradnje.

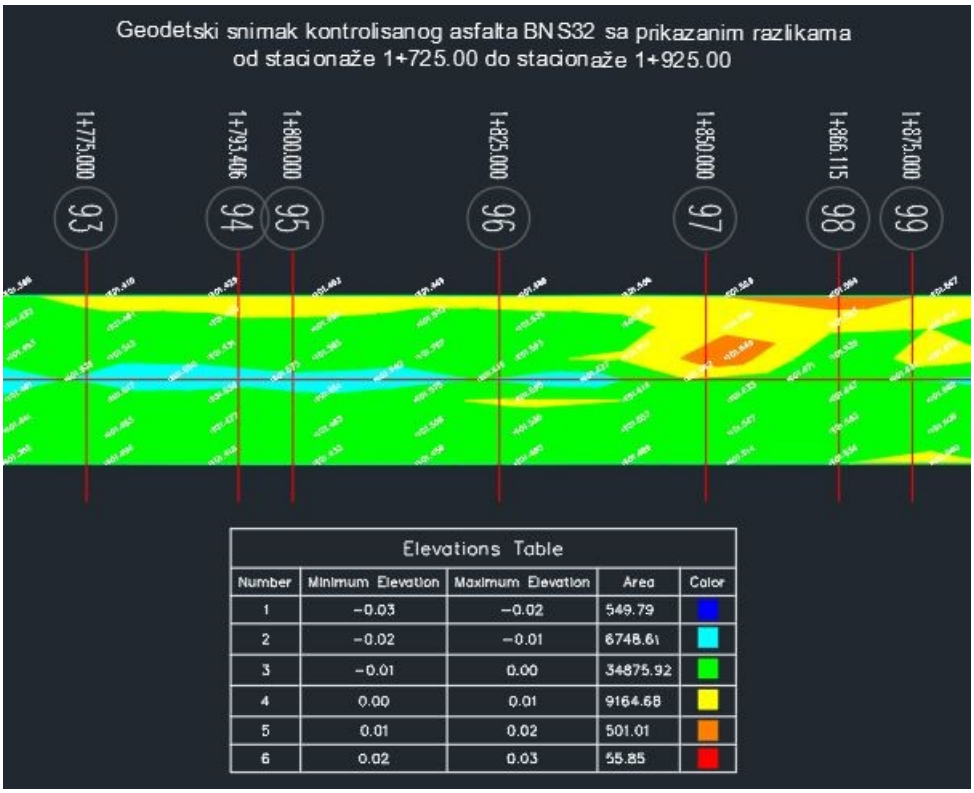
U tehnološkom pogledu, ugrađivani su sledeći slojevi:

- Vezni sloj asf.beton AC 32, d=9 cm (srednji deo od 20 m) ;
- Vezni sloj asf.beton AC 22 (Pmb) d= 8 cm (do 45 m od ose) ;
- Habajući sloj asf.beton AC 16 Pmb, d= 6 cm ;
- Noseći sloj asf.beton BNS 22sA d= 6 cm u zoni ramena (shoulder), širine 7.5m ;
- Gornji sloj ramena, asf.beton AB 11s, d= 4 cm .

Sve mešavine, projektovane i ugrađene bile su prihvaćene i kontrolisane laboratorijom Izvođača, terenskom laboratorijom INSTITUTA ZA ISPITIVANJE MATERIJALA SRBIJE (IMS) i Nadzornom službom. Za svaku mešavinu prethodno je usvojen MAR – *Material approval request*.

Geodetske službe Izvođača i Nadzorne službe kontrolisale su Izvođača radova u pogledu izvedene visine površine koja se asfaltira, sa tolerancijom za izvođenje od ± 1 cm u visinskom smislu (H) i položajno ±2.5 cm(Y,X) , što je bio osnov za organizaciju ugradnje u pogledu ravnosti sloja. U tom smislu korišćene su tzv „stringovi“ ili uređaj „multiplex“.

Prikaz tačnosti izvedenih visina prethodnog sloja i novougrađenog ostvaren je izradom svakodnevnog snimka po metodi rasutih tačaka (na udaljenosti ne više od 6.25 m) i prikazom u bojama. (sl. 2).



Slika 2. *Prikaz dela geodetskog snimka izvedenog asfalta BNS32 sa prikazanim razlikama projektovano – mereno.*

Tačnost izvedenih visina zastora na aerodromima određena je u principu graničnim vrednostima u podužnom i poprečnom profilu Pravilnikom Sl.Glasnik br. 11/17 i 16/19 i međunarodnim preporukama:

- EASA 13972014 -za Evropu ;
- ICAO ANEX 14 Aerodromes, Vol. 1 ;
- ICAO DOC. 9157. Design manuel for runways ,

što je geodetska služba strogo primenila. Nakon svakog ugrađenog sloja Izvođač je dobio relevantno upozorenje o eventualnom odstupanju od predviđenog i potrebi da se isto neutrališe u sledećem sloju asfalta.

3. UGRADNJA ASFALTNIH SLOJEVA

Kao što je pomenuto, ugradnja je kontrolisana već prethodnim radnjama, uz opredelenje istovremene upotrebe jednog ili više finišera, a sve sa ciljem smanjenja tzv. hladnih spojeva i tzv. „flote valjaka“, glatkih i sa gumenim točkovima. (sl.3)

Slika 3. *Grupa valjaka u zajedničkom radu*

Najsloženija je bila početna ugradnja na srednjem delu PSS za sloj AC 22pmb, u širini od 20 m, koji je „pokriven“ sa 4 finišera u istovremenom radu, od kojih je centralni imao tzv. prelomljenu gredu. Srednji deo PSS bio je posle vodilja za nastavak radova. Izvedena visina centralnog dela bila je izuzetno dobra, što je vidno iz priloženog izveštaja geodetske službe. Dnevni učinak je bio od 300 do 3000 t asfaltne mase za habajući sloj. (sl. 4)

Slika 4. *Prikaz grupe finišera u istovremenom radu*

Sledeći slojevi izvedeni su posle prethodnog „korektivnog“ frezovanja starog asfalta kako bi se obezbedile visine za novoprojektovane debljine slojeva. Krajnji sloj na ramenima bio je ograničen betonskom rigolom, prethodno izvedenom. Na delovima korektivnog frezovanja, projektant je predvideo prethodno polaganje termostabilne mreže u trakama širine 5m, za sprečavanje prenošenja-reflektovanja pukotina na postojećim asfaltnim slojevima, za šta je izvođač konstruisao poseban alat za polaganje i lepljenje mreže za niži sloj.

Veoma komplikovan i složen problem javio se prilikom radova na jednoj rulnoj stazi koja se nalazi u pravcu dejstva postojeće antene za privođenje aviona u poslednjoj fazi sletanja i gde su svi radovi izvođeni noću, u vremenu tzv. NOTAM (informacija za sve korisnike aerodroma o privremenom zatvaranju za sletanje aviona). U pomenutom slučaju svi radovi (zemljani, podloge, betonske rigole, kišna kanalizacija) izvođeni su noću, uključujući i asfaltne radove. Ugradnja sva 3 sloja asfalta (ukupno oko 2500 tona) ugrađeni su noću uz svetlost sistema reflektora, u vremenu od 02:00-05:00 h za restriktivni deo rulne staze sa produženjem u dnevnim uslovima. Organizacioni deo (dovoz mase sa oko 30 kamiona) trase prolaska kamiona uz tzv. „pratnju“ zahtevao je od izvođača izuzetnu organizaciju i disciplinu u radu. U toku radova izvršeno je uzimanje kontrolnih uzorana asfaltne mase, radi kontrole u IMS.

Slika 5. *Asfaltiranje u noćnim uslovima*

U toku izvođenja asfaltnih radova na aerodromu postoje i veoma izraženi logistički problemi. Tako veliki broj kamiona (od 50 – 200) za odvoz frezovanog materijala i dovoz asfaltne mase kao i drugih vozila i mašina nisu samo problem na ulasku u aerodrom, nego ništa manje i za kretanje po aerodromu, s obzirom na normalno odvijanje avio saobraćaja, posebno u tzv. špicevima (a što je upravo i građevinski povoljan dnevni period). Na aerodromu se ne dozvoljava kretanje bilo kog transportnog sredstva, uključujući i vozila nadzora i rukovodioca radova, bez tzv. „pratnje“, što znatno usporava sve aktivnosti. Ponekad je čekanje kamiona potrajalo i po nekoliko desetina minuta za prolaz jednog aviona. Posebno može da se istakne veoma otežan uslov uvoza bitumena OMV PmB 25/55-65, što je bila složena logistička zavrzlama.

4. ZAKLJUČAK

U zaključku može se potvrditi dnevnikom radova i dinamičkim planom da su radovi izvedeni u kratkom periodu od 4 meseca, što je obezbedilo nastavak svih ostalih radova: ugradnja Sistema svetlosnog obeležavanja (SSO), izvođenje horizontalne signalizacije, spajanje Glavne PSS „brzim izlaznicama„ sa celokupnim sistemom manevarskih površina aerodroma i obnovom sistema odvoda atmosferskih voda.

Zašto se sve ovo navodi i naglašava? Naše firme su radile u zemlji i van na mnogo aerodroma i imamo tradiciju. No ponuđač radova mora biti svestan ovih gubitaka na vremenu i iste ukalkulisati u cenu radova a svoju organizaciju prilagoditi i pripremiti.

Literatura

(1) Cvetanović A – Kolovozne konstrukcije , Naučna knjiga 1992
(2) Cvetanović, Radojković, Vojnić – Projektovanje fleksibilnih kolovoznih konstrukcija, VIA VITA, 1984

ИЗАЗОВИ ПРЕД УПРАВЉАЧЕМ ОПШТИНСКИХ ПУТЕВА И УЛИЦА

Јелена Кртенић, *ЈП „Путеви Београда“,* **Александар Милентијевић** *ЈП „Путеви Београда“,* **Џафер Џафербеговић**, *ЈП „Путеви Београда“,* **Валбона Самарџија**, *ЈП „Путеви Београда“*

Резиме: *У складу са прописима јавни путеви се деле на државне путеве и општинске путеве и улице, за које су надлежни органи за послове саобраћаја министарство, односно јединице локалне самоуправе, односно управљачи државних путева и управљачи општинских путева и улица. Узимајући у обзир чињеницу да око 50% укупне мреже јавних путева чине општински путеви и улице, одлуке јединице локане самоуправе и управљача општинских путева и улица су значајне, а коначно и кроз допринос безбедности саобраћаја.*
Тема овог рада ће бити приказ специфичности у раду управљача општинских путева и улица, пре свега из разлога што је понуда постојеће путне инфраструктуре, односно мрежа саобраћајница у урбаним насељима наслеђена, у одређеном проценту недовољне пропусне моћи, непланска и функционално нерационална, те су стога већи изазови у реконструкцији, рехабилитацији, одржавању, заштити и модернизацији главних потеза у већим урбаним насељима.
У граду Београду се општине, узимајући њихове географске положаје у простору и величину, мрежу путева из надлежности, навике становништва, њихове садржаје, врсте саобраћаја и саобраћајних средстава, број и положај државиних путева који кроз њих пролазе, недовољан број паркинг места, зоне школа, јавни превоз, процентуално веће учешће пешака и бициклиста и др., као и одлуке које доносе, у великој мери се разликују од општине до општине.
Такође, у раду ће бити дат осврт на прописе, проблеме у примени, као и предлоге за унапређење истих.

Кључне речи: *управљач општинских путева и улица, пут, саобраћајна сигнализација*

CHALLENGES BEFORE THE PUBLIC ENTERPRISE OF MUNICIPAL ROADS AND STREETS

Jelena Krtenic, *Public company „Roads of Belgrade“,* **Aleksandar Milentijevic**, *Public company „Roads of Belgrade“,* **Dzafer Dzaferbegovic**, *Public company „Roads of Belgrade“,* **Valbona Samardzija**, *Public company „Roads of Belgrade“*

Abstract: *In accordance with the regulations, public roads are divided into state roads and municipal roads and streets, for which the competent authorities for traffic affairs are the ministry, i.e. local self-government units, i.e. state road managers and municipal road and street managers. Considering the fact, that about 50% of the total network of public roads are municipal roads and streets, the decisions of the local self-government unit and the manager of municipal roads and streets are significant, and finally as a contribution to traffic safety.*
The topic of this work will be a presentation of the specifics and challenges in the management, construction and maintenance of municipal roads and streets before the management of municipal roads and streets. The offer of existing road infrastructure, i.e. the road network in urban settlements is inherited, which in a certain percentage has insufficient capacity, unplanned and functionally irrational, and therefore there are greater challenges in the reconstruction, rehabilitation, maintenance, protection and modernization of the main roads in urban settlements.
In the city of Belgrade, municipalities, taking into account their geographic position in space and size and type the network of roads within their jurisdiction, the habits of the population, the contents that make it up, the types of traffic and means of transport, the number and position of state roads that pass through them, insufficient number of parking spaces, school zones, public transport, the percentage of pedestrians and cyclist, etc., as well as the decisions they make, different greatly from municipality to municipality and affect traffic safety.
Also, the paper will review the regulations, problems in implementation, as well as proposals for their improvement.

Keywords: *management of municipal roads and streets, road, traffic signals*

1. УВОД

У граду Београду, Секретаријат за саобраћај је орган надлежан за послове саобраћаја и један је од органа надлежан за рад управљача општинских путева и улица ЈП „Путеви Београда“.

Доношењем Одлуке о оснивању јавног предузећа за управљање јавним путевима града Београда „Путеви Београда“ („Сл. лист града Београда“, бр. 04/2017) и Закона о путевима („Сл. гласник РС“, бр. 41/18, 95/18-др.закон и 93/23-др.закон) утемељени су правни основи за управљача јавних путева у граду Београду, на територији од 17 градских општина.

Развојни пут ЈП „Путеви Београда“ је почео слично јуна 2017. године, као што је то био случај давних година са формирањем ЈП „Путеви Србије“ управљача државних јавних путева, трансформацијом Дирекције за путеве Секретаријата за саобраћај, пре свега због обима оперативног посла који је растао.

Оснивањем ЈП „Путеви Београда“, узимајући у обзир чињеницу да исто није било правни следбеник наведене Дирекције, као и ступање на снагу свих законских обавеза за управљача пута од тренутка формирања предузећа, је био велики изазов и задатак у почетку рада.

У протеклих 6 година, повећан је обим саобраћаја и процентуално повећано учешће свих категорија ученика у саобраћају, посебно возила, на општинским путевима и улицама. Повећан је број захтева општина за одржавање путева према управљачу пута, кроз амбициозне годишње Програме радова одобрене од стране градоначелника града Београда на предлог Секретаријата за саобраћај за спровођење и рад ЈП „Путеви Београда“. У граду Београду је велики број примопредаја јавних путева од стране Секретаријата за саобраћај на редовно одржавање ЈП „Путеви Београда“. У протеклим годинама значајно је и повећање обима и модернизације саобраћајне сигнализације и опреме на општинским путевима и улицама, чије одржавање изискује поред већих средстава и повећање оперативног рада управљача путева и извођача радова, посебно када је у питању светлосна саобраћајна сигнализација.

Наведено, као и недостатак адекватне правне основе, а посебно у периоду од две до три године од оснивања ЈП „Путеви Београда“, били су такође изазови пред новооснованим управљачем пута, које се у међувремену формирало функционално и кадровски, пратећи и све остале новине и обавезе у складу са изменама прописа у свим областима рада предузећа.

Битан моменат за рад ЈП „Путеви Београда“ и подршка од органа локалне самоуправе је било доношење Одлука од стране Секретаријата за саобраћај, којима су ближе уређене области од изузетног значаја за рад управљача пута где је у раду на изради истих активно учествовало и ЈП „Путеви Београда“, о којима ће бити речи у раду.

Од оснивања ЈП „Путеви Београда“ учествује и сарађује: у раду са свим јавним комуналним предузећима у граду Београду у реализацији својих пројеката, као и пројекта других комуналних предузећа, у развоју и изградњи друмског, железничког, бициклистичког и пешачког саобраћаја на територији града Београда, на изради и имплементацији прописа на локалном и националном нивоу, на формирању и имплементацији Катастра саобраћајне сигнализације Секретаријата за саобраћај, у доношењу и спровођењу одлука и решења града Београда, Градоначелника, свих сектора Секретаријата за саобраћај и инспекције за путеве, са МУП, комуналном полицијом на пословима у области грађевинарства и саобраћаја, кроз уговоре ЈП „Путеви Београда“ са предузећима и извођачима радова на изради пројектно техничке документације у роковима, коригујући устаљене лоше навике у пројектовању, извођењу и одржавању пута и саобраћајне сигнализације и опреме према одобреној техничкој документацији, у организовању стручног надзора на пословима из надлежности, организовању, праћењу и контроли рада извођача радова у складу са уговорним обавезама, на увођењу и праћењу поштовања интерних процедура у предузећу и екстерних у раду и сарадњи са стручним службама осталих предузећа и органа у вези са реализацијом свих пројеката у граду, у реализацији бројних манифестација и других приредби на путевима у граду, у циљу обезбеђивања безбедног одвијања саобраћаја на мрежи путева из надлежности за које је законом одговорно.

Успостављање делатности управљача општинских путева и улица у најширем смислу, интерно и у привреди у пракси, није био нимало лак задатак за руководство и запослене у ЈП „Путеви Београда“, које је пре свега требало оформити и организовати у сваком смислу и кадровски, са правним оквиром који је недовољно дефинисан и функционалан када је у питању управљач општинских путева и улица.

Данас смо ту, формирани као управљач пута на општинским путевима и улицама и у складу са Одлуком о категоризацији општинских путева и улица („Сл. лист града Београда“, бр. 139/2020), а остале техничке детаље о предузећу могу се видети на сајту предузећа www.putevibeograda.rs.

2. ПРАВНИ ОКВИР

Правни оквир за рад управљача јавних путева, без обзира на категорију јавних путева је једнако обавезујући, а подразумева и прописе којима се ближе уређују области планирања и изградње, грађевинарства и саобраћаја, с тим да су за управљача јавних путева на локалном нивоу обавезујуће и Одлуке донете од стране јединице локалне самоуправе у складу са Законима.

У складу за Законом о планирању и изградњи („Сл. гласник РС“, бр. 72/09, 81/09-испр.…62/23) дефинисано је поступање на локалном нивоу на јавним путевима у поступцима планске документације, обједињене процедуре, грађевинске дозволе, нивоима пројектно техничке документације, одговорног извођача радова, стручног надзора и др.

У складу са Законом о путевима, дефинисано је поступање и на локалном нивоу: категоризација путева из надлежности јединице локалне самоуправе, управљач општинског пута и улице, јавни пут у насељу, одржавање, заштита и финансирање јавног пута, рехабилитација, зимска служба, обавезност пројектно техничке документације и саобраћајног пројекта, алати безбедности саобраћаја и др.

У складу са Законом о безбедности саобраћаја на путу („Сл. гласник РС“, бр. 41/09, 53/10,…76/2023) дефинисани су саобраћајна сигнализација и опрема, техничко регулисање саобраћаја, саобраћајни пројекат, заустављање и паркирање, саобраћај трамваја и других возила на шинама, бициклистички и пешачки саобраћај, саобраћај на прелазу пута преко железничке пруге, спортске и друге приредбе на путу, зоне: пешачка, успореног саобраћаја и школе, техничка средстава за успоравање саобраћаја, обележавање препрека на путу и места на којима се изводе радови и други послови на путу, обавезе управљача јавног пута и извођача радова у вези са привременом саобраћајном сигнализацијом и др.

Поред наведених, за управљача општинских путева и улица у примени су и Закони којима се ближе уређују области: права, економије, комуналне делатности, накнаде за коришћење јавних добара, општи управни поступак, јавно-приватно партнерство и концесије, безбедност и здравље на раду, заштита података о личности, слободни приступ информацијама од јавног значаја, буџетски систем и др.

У граду Београду, за управљача на локалном нивоу, обавезујуће су и следеће Одлуке:

Одлука о заштити општинских путева и улица на територији града Београда („Сл.лист града Београда“, бр. 17/20), Одлука о накнадама за коришћење јавних путева на територији града Београда („Сл.лист града Београда“, бр. 118/18,…120/21), као и Одлуке којима се ближе уређују области: оглашавања, комуналног реда, ванредног превоза и др.

3. ИНФРАСТРУКТУРА ОПШТИНСКИХ ПУТЕВА И УЛИЦА У ГРАДУ БЕОГРАДУ У ФУНКЦИЈИ УРБАНЕ МОБИЛНОСТИ

Планирање саобраћаја на мрежи јавних путева, као јединственог система путева у земљи, кроз ажурну планску документацију са стратешким, циљаним, интердисциплинарним, транспарентним, рационалним и сврсисходним циљевима, мора бити намењено за равноправно коришћење свих категорија учесника у саобраћају са крајњим циљем заштите животне средине. Политика урбаног развоја између осталог, има за циљ успостављање координације на националном и локалном нивоу, кроз мултидисциплинарност и дефинисање приоритета код усаглашавања различитих потреба и интереса.

Град Београд је усвојио бројна документа, а нека од значајнијих су: Стратегија развоја града Београда до 2027. године, Стратегија развоја јавног линијског превоза путника на територији града Београда за период до 2033. године-са пресеком 2027. године, План одрживе урбане

мобилности (ПОУМ) и Акциони план са дефинисаним мерама, надлежностима, изворима финансирања, значајима утицаја мера, временским оквирима за реализације мера и др. ЈП „Путеви Београда“ активно пратити реализацију мера из Акционог плана, сугерише потребе за одговарајућа финансијска средстава у наредном периоду код израде предлога Програма радова Секретаријата за саобраћај за конкретну календарску годину, узимајући у обзир да се Акционим планом предвиђа реализација инвестиција, фазно, све до 2031. године. Циљ (ПОУМ) је управо да пешак добије прво место учешћа у саобраћају, бициклисти друго, јавни градски превоз треће, а да на четвртом месту буде путнички аутомобил. Улице се пре свега третирају по концепту „јавне за све кориснике“. Такође, подразумева: укључивање јавности, приступачност садржајима, праћење развоја града и саобраћајних потреба, препознавање и фаворизовање предности шинског, бициклистичког и пешачког саобраћаја у најширем смислу, стимулисање еколошких превозних средства, тј. е-возила, бицикала на електро погон, давање приоритета масовном јавном превозу путника, примену рестриктивних мера за путничка возила у урбаним зонама, увођење дигитализације у свим системима и њихову повезаност, увођење напредних дигиталних технологија као подршке систему у надзору, контроли и управљању система, развој интелигентних транспортних система, изградњи и уређењу терминуса за преседање путника са једног на други вид превоза, паркинг просторима, а посебно за бициклистички саобраћај, односно местима на којима се могу изнајмити-делити бицикли („city bike sharing system“). Посебну пажњу код пројектовања и одржавања јавних путева у градовима се посвећује инвалидним лицима, слепим и слабовидим и старим лицима и њиховим могућностима кретања.

Град Београд, као и ЈП „Путеви Београда“ очекују бројни одговорни послови из надлежности рада и у реализацији пројекта „EXPO 2027“ у наредном периоду.

ЈП „Путеви Београда“ у складу са предвиђеним, одобреним и расположивим буџетом, одржава мрежу општинских путева, примарних, секундарних и терцијарних улица у дужини преко 4.400 километара у складу са Одлуком о категоризацији општинских путева и улица на територији града Београда, тј. на 17 градских општина, са примарном делатношћу организовања и обављања стручних послова на изградњи, реконструкцији, одржавању и заштити јавних путева, организовању стручног надзора на свим пословима, организовању и контроли наплате накнаде за употребу јавног пута, обављању јавних овлашћења и вођењу евиденције и саобраћајно техничких података о јавним путевима и др.

Годишњи обим улица које ЈП „Путеви Београда“ одржавају у грађевинском и саобраћајном смислу по Програму радова, броји око 200 улица. У овом тренутку, узимајући у обзир доступне податке о саобраћајној сигнализацији, као и чињеницу да се свакодневно издају нова решења за техничко регулисање саобраћаја Секретаријата за саобраћај, на основу којих се мења стање саобраћајне сигнализације на терену, као и све остале измене у вези са обимом саобраћајне сигнализације за Град Београд, у надлежности редовног одржавања сабраћане сигнализације и опреме ЈП „Путеви Београда“ је:

- 685 семафоризованих раскрсница;
- 390,000.00 m2 ознака на путу (хоризонтална сигнализација);
- 100000 саобраћајних знакова (вертикална сигнализација);
- 33000 саобраћајних стубића (свих врста);
- 7600 техничких средстава за успоравање саобраћаја (лежећи полицајци);
- 9000 поља заштитне пешачке ограде.

У току је реализација Пројекта који води Секретаријат за саобраћај у вези са модернизацијом рада семафора у који је активно укључено и ЈП „Путеви Београда“ који укључује 379 постојећих семафоризованих раскрсница са уређајима произвођача „Siemens“ са будућим адаптибилним коридорским управљањем саобраћајем за возила, јавни градски превоз и пешаке. Реч о употреби савремених комуникационих технологија у функцији система адаптибилног управљања светлосном саобраћајном сигнализацијом на уличној мрежи града Београда који треба да омогући модернизацију система управљања саобраћајем и повезивање светлосне саобраћајне сигнализације са Центром за управљање саобраћајем који се налази у Секретаријату за саобраћај, у циљу сталне обраде података са терена и обезбеђивања оптимално потребног трајања зеленог светла према захтевима возила, пешака, дајући приоритет трамвајима. Такође, у току је и Пројекат Секретаријата за саобраћај адаптибилног, односно коридорског управљања светлосном саобраћајном сигнализацијом који укључује 45 постојећих семафоризованих раскрсница са уређајима произвођача „Elcom“ у циљу обезбеђивања вишег нивоа услуге, проточности и безбедности саобраћаја на јавим путевима у који је такође активно укључено ЈП „Путеви Београда“, где се захтеван ниво услуге и безбедност обезбеђује и кроз редовно одржавање пута и саобраћајне сигнализације и опреме од стране ЈП „Путеви Београда“, као и хитно отклањање свих недостатка на саобраћајној сигнализацији и опреми насталих као

последица хаваријских оштећења (саобраћајне незгоде, временске непогоде, вандализам и сл.), а посебно када је у питању опрема као што су детекторске индуктивне петље у коловозу (које броје возила), пешачки тастери, лантерне и носачи семафора и сва остала семафорска опрема.

ЈП „Путеви Београда“ обнављања саобраћајну сигнализацију у 309 зона школа на путевима из надлежности, као и на 47 путних прелаза, 3500 општих паркинг места, а такође посебна пажња се посвећује редовном одржавању саобраћајне сигнализације на инвалидским паркинг местима, као и зонама окупљања рањивих категорија учесника у саобраћају вртићима, домовима здравља, болницама, административним центрима, зонама пијаца и др. Редовним одржавањем саобраћајне сигнализације на бициклистичким и пешачко-бициклистичким стазама, у надлежности одржавања ЈП „Путеви Београда“ даје се допринос безбедности бициклистичког саобраћаја, а и међународном на деоницама међународних бициклистичких рута кроз Београд.

Такође, ЈП „Путеви Београда“ дају допринос безбедности саобраћаја и смањењу броја саобраћајних незгода насталих као последица доприноса пута, применом алата безбедности саобраћаја на путевима кроз реализацију уговора са стручним тимовима, у складу са прописима којима се ближе уређује безбедност саобраћаја.

Стручним и ефикасним редовним одржавањем јавних путева од стране извођача радова по уговорима и налозима ЈП „Путеви Београда“, у доброј сарадњи са стручним надзорним органима ЈП „Путеви Београда“, покретањем даљих иницијатива за формирање кадровски стручних тимова пре свега грађевинске и саобраћајне струке у ЈП „Путеви Београда“ и кроз сарадњу са надлежним органима за послове саобраћаја у граду Београду, ЈП „Путеви Београда“ се успешно позиционирао и представио у односу на остала јавна комунална предузећа у области грађевинарства и саобраћаја.

Посебну пажњу кроз дефинисање уговорних обавеза према извођачима радова ЈП „Путеви Београда“ посвећује унапређењу безбедности саобраћаја код постављања привремене саобраћајне сигнализације на путу у зонама радова, узимајући у обзир да се већина радова у редовном одржавању обавља под саобраћајем. Уколико је то могуће, избегава се затварање деонице пута и преусмеравање саобраћаја, јер се знатно утиче на рад јавног градског превоза, опструише кретање возила и пешака, одвијање саобраћаја у редовним условима у главном граду који је и туристички и административни центар, утиче на устаљене навике становника, онемогућава приступ школама, вртићима, снабдевању и сл. Велика пажња се у извођењу радова поклања и враћању сталне саобраћајне сигнализације на путу након изведених радова у складу са пројектно техничком документацијом, односно првобитним режимом саобраћаја који је био на јавном путу пре радова. У том смислу, ЈП „Путеви Београда“ је код Секретаријата за саобраћај иницирало одобравање на годишњем нивоу, типских начина означавања зона радова на општинским путевима и улицама за све случајеве у којима извођачи радова ЈП „Путеви Београда“ имају налог за примену истих када је то могуће у зони радова, а која се ажурирају и иновирају по потреби.

4. ИЗАЗОВИ И ПРОБЛЕМИ ЗА УПРАВЉАЧА ПУТА КОД ОРГАНИЗОВАЊА ПОСЛОВА НА ОДРЖАВАЊУ И ЗАШТИТИ ОПШТИНСКИХ ПУТЕВА И УЛИЦА У ГРАДУ БЕОГРАДУ

Прописи су дефинисали управљача јавног пута, као и јавне путеве. Постоје сличности, али и бројне разлике у раду управљача пута општинских путева и улица на мрежи путева из надлежности, у односу на рад управљача државног пута на државним путевима и у том смислу би требало допунити прописе када је у питању раду управљач локалних путева.

Сличности су пре свега: поштовање прописаних обавеза у раду и надлежности управљача пута, оперативни рад, поступање по пријавама и жалбама грађана, органа, инспекције за путеве, сарадња са надлежним органима и институцијама надлежним за послове планирања, грађевинарства и саобраћаја, поступање у обједињеној процедури, израда студија, пројектно техничке документације и решења, међусобна сарадња управљача државних и локалних путева у складу са потписаним Протоколима и Споразумима у вези са одржавањем и примопредајом јавних путева, рад у радним групама на изради прописа, организовање и праћење рада извођача радова кроз уговоре, организовање послова стручног надзора, достава извештаја надлежним органима, израда предлога Програма радова на одржавању путева, учествовање и рад на струним скуповима, организовање послова јавних набавки, јасна и недвосмислена саобраћајна сигнализација на путевима домаћим и страним учесницима у саобраћају, организовање и реализација зимске службе, одговорност управљача пута, тј. одговорних лица у правном лицу пред органима у званичним поступцима: СУД, МУП, Тужилаштва, организовање ванредног превоза и бројне друге.

Кључне разлике у раду управљача пута општинских путева и улица ЈП „Путеви Београда“ на мрежи путева из надлежности, у односу на рад управљача државног пута на државним путевима су:

- функционалне карактеристике и класификација путева из надледжности, саобраћајна тежишта, однос пута и окружења, пратећи садржаји, врсте корисника пута, саобраћајно оптерећење, структура саобраћајног тока, осветљење пута, путни објекти, разлике у врсти и обиму одржавања саобраћајне сигнализације и опреме у редовним условима, у зимској служби, брзине на путевима, број укрштаја и др.;
- ЈП „Путеви Београда“ поред обављања делатности управљача општинских путева и улица у складу са Законом о путевима, обавља и комуналну делатност одржавања улица и општинских путева у граду Београду у складу са Законом о комуналним делатностима поверену од стране скупштине јединице локалне самоуправе кроз вршење комуналне делатности од општег интереса, која подразумева пружање комуналних услуга у извођењу радова на одржавању улица и путева у градовима и другим насељима којима се обезбеђује несметано и безбедно одвијање саобраћаја и чува и унапређује употребна вредност улица, путева, тргова, платоа и сл.;
- сва канализација се код државних путева смешта у банкину, а код улица у труп улице и тротоара, због чијег одржавања се ремети коловозни застор, саобраћајна сигнализација и одвијање саобраћаја, што директно утиче на редовно одржавање истих од стране управљача пута и безбедност, посебно што је у трупу локалног пута канализација свих јавних комуналних предузећа у граду Београду;
- у граду Београду јавна комунална предузећа имају посебна овлашћења за рад (зеленило, осветљење, електродистрибуција, водовод и канализација, телеком, заштита споменика културе и сл.), што има и извођач радова ЈКП „Београд пут“ који је и извођач радова у складу са уговором и са ЈП „Путеви Београда“, односно као и управљач пута ЈП „Путеви Београда“, а рад управљача локалних путева подразумева код извођења радова координацију свих наведених субјеката;
- разлике у захтевима код пројектовања сталног, као и привременог режима саобраћаја и код пројектно техничке документације, а посебно ван обједињене процедуре, узимајући у обзир велики број раскрсница на локалним путевима и честе измене;
- организовање радова на раскопавању и заузећу и хитним радовима на јавном путу у складу са Одлуком о заштити општинских путева и улица на територији града Београда („Сл. лист града Београда“, бр. 17/20);
- стално ширење града Београда изградња нових улица, посебно у склопу изградње зграда од стране других инвеститора, ствара и додатно оптерећење код редовног одржавања јавних путева на укрштајима са истим, односно у случајевима када се привремена саобраћајна сигнализација поставља на јавном путу за потребе таквих градилишта;
- значајне разлике су и у дозвољеној брзини на путевима, која је у насељеном месту је 50 км/час, обиму саобраћајне сигнализације и опреме и фреквенцији измене исте, броју семафора, великом и константном порасту броја возила на јавном путу у граду, начину вођења саобраћаја у градовима у односу на ванградске путеве, броју зона школа и успореног саобраћаја на јавним путевима, броју пешачких прелаза на локалним путевима због обимног пешачког саобраћаја свих старосних и других структура, потреба за посвећивањем значајне пажње стационарном саобраћају, различити захтеви корисника за снабдевањем, односно приступу садржајима са масовним накупљањем корисника: пијаце, биоскопи, позоришта, цркве, стадиони, тржни и клинички центри, домови здравља, културни и спортски центри, терминали и сл., а посебно што је и велики број туриста у граду током године, као и значајан број манифестација на путу, међународног и домаћег карактера;
- на локалним путевима су присутни и бициклисти у домаћем и међународном бициклистичком саобраћају, а такође и значајан број лаких електричних возила, односно све већи број бицикала или лаких електричних возила који се возе у професионалне сврхе (достављачи хране, поште и сл.), што је за управљача пута додатна одговорност, а предметна област није у целости уређена прописима;
- организовање јавног превоз путника на локалним путевима, што подразумева и додатне захтеве за омогућавање приоритета код одвијања јавног превоза путника на локалним путевима, су обавеза и за управљача пута, када је у питању редовно одржавање система на којима је организовано адаптибилно управљање радом семафора на коридорима, а посебно и елемената у трамвајима на основу којих им се даје приоритет, као и вођење рачуна код организовања зона радова због којих се привремено укидају, односно мењају трасе јавног превоза путника;
- законска обавеза да се додатно изграде и одржавају тротоари, који се често штите постављањем и одржавањем саобраћајних стубића од могућности непрописног паркирања возила који их често хаваријски оштећују, односно који се обнављају од стране извођача радова

по налозима управљача пута, је тешко спроводљива у условима постојеће инфраструктуре са просторним ограничењима;

- у пракси је чест случај недостатак довољне ширине острва за потребе пешака у разделним острвима која раздвајају коловозе са две и више саобраћајних трака по смеру, а посебно код семафоризованих раскрсница, где се пешачки циклуси пројектују за сваки од коловоза, где се пешаци задржавају након преласка једног коловоза на оству недовољне ширине због просторног ограничења до добијања зеленог светла да пређу и други коловоз, један је од случајева када је додатно одговоран управљач општинских путева и улица код одржавања истих, односно саобраћајне сигнализације и опреме;
- на општинским путевима и улицама као и на деоницама државних путева кроз насељено место се у већем обиму поставља саобраћајна опрема: саобраћајни стубићи, огледала, као и техничка средства за успоравање саобраћаја којима се додатно успорава саобраћај, иако су прописане брзине у насељеном месту, него што је то случај на државним путевима. Уколико наведена саобраћајна опрема недостаје, или је оштећена на путу, представља одговорност управљача пута. Велики број гумених техничких средстава за успоравање саобраћаја се мора обновити након зимске службе, јер често бивају оштећени од соли и раоника када се чисти снег са улица и општинских путева, односно након враћања коловозног застора код извођења грађевинских радова. Такође, несинхронизован рад стручних служби извођача радова на путу, који би требало да подразумева истовремено извођење на локацији саобраћајног знака, као и техничког средстава за успоравање саобраћаја, се одржава се на одговорност управљача пута;
- рад других инвеститора, јавних комуналних предузећа и њихових извођача радова, одражава се на одговорност ЈП „Путеви Београда“ као управљача пута, кроз велики број хитних радова, као и радова на раскопавању и заузећу за које управљач пута издаје сагласност, у случајевима када се након истих пут не врати у целости у исправно и пројектовано стање, а посебно када су у питању коловоз и саобраћајна сигнализација и опрема, што ствара велике проблеме управљачу општинских путева и улица и намеће додатну одговорност, рад и трошкове управљача пута, који их на крају мора о свом трошку хитно обновити ако је последица угрожена безбедност саобраћаја, односно саобраћајна незгода на путу, јер је управљач пута препознат пред законом као коначно одговоран, односно у случајевима када се не утврди починилац, односно радови нису пријављени, односно када су у питању изненадни откази и кварови канализације у трупу улице или тротоара других комуналних предузећа, а нарочито када су улице у гарантном року након радова ЈП „Путеви Београда“;
- чињеница да град „живи 24 часа“, односно да су саобраћајни токови и сви учесници у саобраћају активни све време, као и да је велики број саобраћајних незгода, нажалост и са смртним исходим, а посебно код саобраћајних незгода изазваних због не прилагођене брзине кретања, алкохолисаног стања, великог броја мотоцикала и њиховог непрописног кретања, као и непрописног кретања лаких електричних возила, а посебно у ноћним сатима, додатно оптерећује управљача општинских путева и улица;
- за успешан рад управљача јавног пута на општинским путевима и улицама неопходна је сарадња и организација рада са свим општинама, јавним комуналним предузећима у граду Београду, често и са Заводом за заштиту споменика културе, посебно истичемо и ЈКП „Зеленило Београд“, јер се дешавало пуно пута у пракси да се додатно организују и измене радови, као и рокови за извођење радова и техничка документација, због додатних захтева за заштиту споменика културе и зеленила у граду;
- померање динамике извођења радова управљача пута, односно планова радова и добијања сагласности за извођење радова, дешава се и због разних околности и дешавања у граду, манифестација, званичних државничких посета и сл.;
- примопредаја пута и саобраћајне сигнализације и опреме од стране других инвеститора након истека гарантних рокова на редовно одржавање код ЈП „Путеви Београда“ често изискује додатна средства да се пут и саобраћајна сигнализација пре свега доведу у исправан и пројектован режим рада, односно да се даље настави са редовним одржавањем истих;
- поступање и организовање послова управљача пута у складу са Одлуком о оглашавању на територији града Београда, којом се уређују услови и начин постављања средстава за оглашавање и других видова оглашавања на отвореним површинама на територији града Београда;
- за разлику од државних путева, на општинским путевима и улицама је знатно више пешака, бициклиста и мотоциклиста на путу, те је стога у пројектовању и техничком регулисању саобраћаја, сталног, односно привременог режима саобраћаја, као и на основу примене алата безбедности саобраћаја, неопходно омогућити кроз извођење радова безбедну саобраћајну површину намењену свим различитим захтевима корисника;

- примена саобраћајне сигнализације у градовима на улицама захтева више пројектантског изазова и познавања навика корисника и терена из разлога и потребе да се различити захтеви уваже и помире, као и да честе измене животних ситуација становника утичу на чешћу потребу за пројектовањем, што се одражава на редовно ажурирање и измене у вођењу база управљача пута у вези са подацима који се односе на пут и саобраћајну сигнализацију и опрему;
- развој и примена интелигентних транспортних система, а посебно соларних, као дела саобраћајне сигнализације, односно пута, на саобраћајницама у градовима ће допринети заштити животне средине у истим. ЈП „Путеви Београда“ у складу са уговорима даје допринос безбедности саобраћаја у делу изменљиве саобраћајне сигнализације намењене возачима пре свега у очитавању брине кретања возила у зонама школа, у циљу прилагођавања исте у складу са прописима;
- оперативни рад стручних служби ЈП „Путеви Београда“ подразумева свакодневну обраду великог броја захтева грађана, издавање сагласности на бројне захтеве у складу са прописом, захтеви који су примљени електронском поштом, званичном поштом, захтеви од стране „Беоком сервиса“, органа, инспекције за путеве, поступање по захтевима стручних тимова ангажованих на примени алата безбедности саобраћаја и др., што подразумева издавање великог броја налога ка извођачима радова, праћење њихове реализације и ажурно вођење евиденција реализација уговорних обавеза извођача радова и доставу одговора и одговора о реализацији налога подносиоцима захтева и др.;
- велика медијска свакодневна пажња се посвећује притужбама грађана и у вези са питањима одржавања општинских путева и улица, а нарочито саобраћајне сигнализације, која је такође пут, те је стога потребна хитна реакција ЈП „Путеви Београда“ према извођачима радова која као и све друге ургенције ремети утврђену динамику извођења радова и радне екипе извођача радова на путу;
- измене режима саобраћаја, односно саобраћајне сигнализације у граду се не ретко тешко прихватају од стране грађана, због устаљених навика, а посебно у вршним сатима у одласку и повратку на посао, у зонама школа, болница, установа ка којима гравитира велики број учесника у саобраћају, када се врше измене у саобраћању линија јавног градског превоза путника, такси превоза, уколико се паркинг места за особе са инвалидитетом на општим паркиралиштима не одржавају редовно, као и бициклистичке, односно пешачко-бициклистичке стазе и сл.;
- мрежа путева из надлежности одржавања управљача локалних путева је територијално ближа седишту управљача пута, самим тим је и доступнија за обилазак и праћење реализације свих одлука на терену у вези са надлежностима рада управљача пута, као и обилазак и проверу радова извођача радова и издавање налога за кориговање истих у случајевима када је то потребно, предлагање измена у режиму саобраћаја надлежним органима. Секретаријату за саобраћај, МУП-а, Инспекцији за путеве и Комуналној полицији, Стручним тимовима ангажованим на уговорима са ЈП „Путеви Београда“ у вези са применом алата безбедности саобраћаја, а нарочито у вези са подацима са терена када су у питању саобраћајне незгоде, мрежа путева је такође доступна за обилазак у односу на њихова седишта, а који су у складу са прописима надлежни за режим, реализацију свих решења за техничко регулисање саобраћаја, контролу, надзор, учествовање и асистенцију у раду управљача пута и сл., што доприноси присутности свих наведених субјеката на мрежи путева, безбедности саобраћаја и квалитету рада управљача пута;
- по свим хитним пријавама извођачи радова по уговорним обавезама са ЈП „Путеви Београда“ реагују у оквиру 24-сатних дежурних служби, свакодневно у току календарске године, а посебно када су у питању семафори, односно хаваријска оштећења саобраћајне сигнализације и опреме и успостављање пројектованог и исправног стања саобраћајне сигнализације;
- редовно одржавање и враћање у пројектовано и исправно стање пута, а нарочито саобраћајне сигнализације, пре и након одржаних скупова, бројних манифестација и приредби на путу: маратона, литија, снимања филмова и сл.;
- одржавање саобраћајне сигнализације и опреме као последице вандализма, хаваријских оштећења других лица која нису извођачи радова и друга уништавања у значајној мери оптерећују буџет управљача пута, јер нису у питању планирана средства, а често се не зна починилац јер је мрежа путева велика;
- због обима саобраћаја на појединим деоницама јавног пута, управљач пута је у обавези да обнавља ознаке на путу и пре истека гарантног рока датог извођачу радова, због безбедности саобраћаја, као и да их често, а посебно у летњим месецима изводи у ноћним условима;
- ЈП „Путеви Београда“ су поверени на одржавање и подземни пролази као и лифтови на мостовима за бициклистички саобраћај.

5. ПРЕДЛОЗИ РЕШЕЊА КОЈИМА БИ СЕ ДОПРИНЕЛО ПОБОЉШАЊУ РАДА УПРАВЉАЧА ПУТА У ОДРЖАВАЊУ И ЗАШТИТИ ПУТЕВА

Навешћемо и неке значајније потребе за изменама и допунама прописа које би допринеле смањењу изазова и решавању проблема у раду управљача пута, посебно на локалном нивоу, као и безбедности саобраћаја.

Изменом и допуном *Закона о путевима* потребно и неопходно је ближе дефинисати управљача пута, посебно управљача локалних и некатегорисаних путева, односно одговорност управљача пута. У постојећем пропису је управљач пута „априори одговоран“, без обзира на његов рад, који у крајњем доприноси и безбедности саобраћаја. Уколико би се омогућио систем за праћење рада управљача пута који би подразумевао доказивање радњи које је управљач пута предузимао на путу из надлежности у одређеном периоду, значајно би се умањила одговорност и утицало би се на смањење казни за управљача пута у конкретним случајевима када су у питању саобраћајне незгоде, односно правни поступци, а средства од умањених казни би значајно утицала на расположиви буџет управљача пута.

Поред наведеног, потребно је прописати одговорност извођача радова у вези са путем, а посебно и у вези са сталном и привременом саобраћајном сигнализацијом на путу при извођењу радова извођача радова по уговорима са управљачем пута, са конкретним предлозима новчаних казни које би управљач пута могао да наплати од извођача радова када исти поступа супротно прописима, чиме би смањио износ средства од казни за управљача пута и поделила одговорност.

Такође би требало допунити, изменити и пооштрити казнене мере по питању грађанске одговорности када је у питању уништавање пута и оштећење саобраћајне сигнализације на јавном путу за коју одговара управљач пута са конкретним предлозима новчаних казни које би управљач пута могао да наплати од грађана, односно трећих лица када поступају супротно прописима, а чиме би смањио износ средства од казни за управљача пута и такође поделила одговорност.

У вези са овом темом одговорности управљача пута и казни, потребно је изменити и допунити Кривични законик, Закон о прекршајима (вандализам, хаваријска оштећења саобраћајне сигнализације и опреме као последица саобраћајне незгоде и др.), Закон о заштити података о личности, Закон о облигационим односима и Породични закон који би требало допунити и изменити у вези са обавезама родитеља када су у питању деца у саобраћају (посебно деца бициклисти, кад се возе деца на бициклу и сл.).

Изменом и допуном Закона о путевима би требало прописати процедуру и рок за примопредаје путева од стране инвеститора ка надлежном органу за послове саобраћаја, односно од стране надлежног органа за послове саобраћаја ка управљачу пута, односно између управљача путева. Решење је да процедура мора подразумевати прво измене аката којима се ближе уређује област категоризације јавних, односно некатегорисаних путева (Уредба о категоризацији државних путева, Одлуке о категоризацији општинских путева и улица, Одлуке о категоризацији некатегорисаних путева) и да су саставни делови процедуре примопредаје пројектно техничка документација за путеве и извештај којим се констатује стање пута и саобраћајне сигнализације у тренутку примопредаје у односу на одобрену пројектно техничку документацију. Ово је јако важна област, јер се у пракси врши примопредаја путева на основу Записника, без претходних измена аката којима се ближе уређује област категоризације јавних, односно некатегорисаних путева, без пројектно техничке документације за исте, а често и у хаварисаном стању пута након истека гарантног рока код инвеститора, нарочито је хаварисана и оштећена саобраћајна сигнализација у тим случајевима.

Такође, прописом би требало дефинисати надлежност на хаваријском одржавању пута док је исти код инвеститора у гарантном року, јер се у пракси инвеститор најчешће бави пословима редовног одржавања пута у гарантном року, а за случајеве хаваријског одржавања који подразумевају оштећења трећих лица, више силе, сва оштећења која нису последица рада његових извођача радова, инвеститор се сматра не надлежним, а како је управљач пута одговоран за пут, овакви случајеви надлежности и трошкови се приписују управљачу пута и умањују средстава предвиђена за редовно одржавање и заштиту пута.

У постојећим прописима нису дефинисани укрштаји јавних и некатегорисаних путева, као и потребна саобраћајна сигнализација на истим. Предлог је да се дефинишу надлежности у одржавању укрштаја путева, као и саобраћајне сигнализације на истим за одговарајуће управљаче путева, као и обавезност израде техничке документације од стране надлежних управљача путева, односно одобравање исте од стране надлежних органа, а у складу са категоријама путева.

Потребно је овим прописом ближе уредити област проласка државног пута кроз насељено место, као и надлежности на одржавању пута и саобраћајне сигнализације на путу која је у складу са прописима такође пут. Начин на који је ова област сада дефинисана оставља бројне проблеме у тумачењу и раду управљача пута у одржавању, издавању Решења за техничко регулисање саобраћаја, прибављању сагласности, тумачењу одржавања и инвеститора техничке документације и сл.

Потребно је овим прописом ближе уредити област, надлежност и процедуру у вези постављања и одржавања саобраћајне сигнализације на путевима у зони ловишта, као и процедуру код подношења захтева за одобравање техничке документације на основу које се саобраћајна сигнализација поставља на путу.

У постојећим прописима надлежности на некатегорисаним путевима нису детаљно прописане, у том смислу и сви послови на некатегорисаним путевима, пре свега техничко регулисање саобраћаја, обавезе управљача путева на укрштајима општинских путева и улица и некатегорисаних путева, чије не уређење додатно доприноси одговорности управљача пута на локалном нивоу.

Потребно је ближе уредити обавезе управљача јавног пута у области заштите животне средине (примена савремених материјала у грађевинарству, нова саобраћајна сигнализација за е бицикле и електропуњаче и др.), узимајући у обзир да је наша земља потписница бројних међународних докумената у овој области и да се очекује и имплементација ових докумената у домаћим прописима, којом се већ више деценија баве европске, као и све остале земље.

У измени и допуни *Закона о безбедности саобраћаја на путу*, законом дефинисати приоритет у поступању возача на деоници пута на месту на путу на којем се на истој стационажи пута налази саобраћајни знак и саобраћајни знак са изменљивим садржајем, за који у пракси одговара управљач пута. Предлажемо и прописивање правног основа за нове Правилнике, којима би се допринело безбедности саобраћаја, уредиле области које су у пракси напредовале са развојем савремених технологија у односу на измене прописа, чиме би се смањила одговорност управљача пута:

- Правилник о светлосној сигнализацији;
- Допунити Правилник о саобраћајној сигнализацији у зонама школа са дефинисањем зоне школе, типским начинима означавања зоне школе саобраћајном сигнализацијом у зависности од категорије пута;
- Правилник о саобраћајној сигнализацији којом се обележавају пешачка, бициклистичка и пешачко-бициклистичка стаза;
- Правилник о саобраћајној сигнализацији која се поставља на путу на местима прелаза пута преко пруге;
- Правилник о критеријумима за увођење и означавање пешачких прелаза;
- Правилник о саобраћајној сигнализацији која се поставља на кружним токовима;
- Правилник о туристичкој сигнализацији.

Прописати обавезност постављања бројача саобраћаја на јавном путу како би се омогућило управљачу пута установљавање и доказивање броја прелазака возила, на основу чега би управљач пута захтевао да извођач радова за конкретну локацију користећи материјал за обележавање ознака у складу са прописима обнови исте због броја прелазака који је већи од прописаног стандардом за одговарајућу категорију пута и класу материјала.

Предмет измене Закона и новог Правилника би се односио на критеријуме за увођење и начине обележавања пешачких прелаза и вођења пешачких токова, јер су пешачки прелази посебно важна и „опасна“ места са аспекта безбедности саобраћаја на којима страда велики број рањивих учесника у саобраћају (пешаци, посебно деца, стара и лица са инвалидитетом и сл.) за које је одговоран управљач пута а посебно на локалном нивоу и за које су посебно осетљиви грађани и јавност у градовима, када пријављују управљачу пута потребу за њихово редовно одржавање. На основу критеријума би се одбили често не основани захтеви за увођење нових пешачких прелаза.

Правилником о светлосној сигнализацији-семафорима неопходно је уредити и прописати ову област, процедуре и протоколе о уградњи, замени, програмирању рада и одржавању семафорских уређаја и опреме. Семафори као посебна и сложена област саобраћајне сигнализације као „стална“ саобраћајна сигнализација, односно „привремена“ у зонама радова на путу, још увек немају довољно упориште у прописима, било да се ради о сложености и начину рада уређаја и опреме, односно њиховог извођења на путу, као и режима рада семафора када се сигнални план мења и одређује у фиксном, детекторском раду, односно адаптибилном када се он утврђује обрадом улазних података са терена, односно приказ оваквог начина рада у саобраћајном пројекту.

У измени и допуни Правилника о саобраћајној сигнализацији размотрити могућност дефинисања садржаја саобраћајног пројекта за све случајеве и категорије јавних путева, осим у случају обједињене процедуре и правилника којим се ближе уређује ниво техничке документације када је у питању примена Закона о планирању и изградњи.

Правилник о начину регулисања саобраћаја на путевима у зони радова са типским начинима постављања привремене саобраћајне сигнализације на државним путевима би требало употпунити и са типским решењима постављања привремене саобраћајне сигнализације који би имали примену на општинским путевима и улицама, јер постојећа решења не подразумевају захтеве за означавање зона радова на локалним путевима када се одржава светлосна саобраћајна сигнализација, када су у питању радови у зони раскрснице, припремни радови, радови мањег обима на редовном одржавању саобраћајних знакова, техничких средстава за успоравање саобраћаја и друге саобраћајне опреме, радови у зонама: пешачким, успореног саобраћаја, зонама школа и др., за чиме у граду постоји потреба, односно у свим осталим случајевима за које постојећа решења која имају примену на државном путу, као и обим привремене саобраћајне сигнализације у истим, немају адекватну примену на локалном путу.

6. ЗАКЉУЧАК

Наведене измене прописа би за крајњи циљ имале дефинисан рад и одговорност управљача пута, којима би се омогућио и додатни правни основ на основу којег би јединице локалне самоуправе имале могућност да својим актима ближе уреде област локалних и некатегорисаних путева.

ЈП „Путеви Београда“ се нада да ће овим радом подстаћи и остале управљаче локалних путева да на овом стручном скупу преузму иницијативу у наредном периоду и узму активно учествовање у раду у области локалних и некатегорисаних путева, који како се из рада може стећи утисак заслужују простор за унапређење истих и размену искустава у пракси.

ЛИТЕРАТУРА

1. Закон о путевима („Службени гласник РС“, бр. 41/18, 95/18-др.закон, 92/23-др.закон)
2. Закон о безбедности саобраћаја на путевима ("Сл. гласник РС", бр. 41/2009, 53/2010, 101/2011, 32/2013 - одлука УС, 55/2014, 96/2015 - др. закон, 9/2016 - одлука УС, 24/2018, 41/2018, 41/2018 - др. закон, 87/2018, 23/2019 и 128/20 - др. закон, 76/23)
3. Закон о планирању и изградњи („Сл. гласник РС“, бр. 72/2009, 81/2009 - испр., 64/2010 - одлука УС, 24/2011, 121/2012, 42/2013 - одлука УС, 98/2013 - одлука УС, 132/2014, 145/2014, 83/2018, 31/2019, 37/2019 - др. закон, 9/2020, 52/21, 62/23)
4. Закон о комуналним делатностима („Службени гласник РС“, број 88/11, 104/16 и 95/18)
5. Одлука о заштити општинских путева и улица на територији града Београда („Службени лист града Београда“, број 17/20)
6. Правилник о саобраћајној сигнализацији („Службени гласник РС“, број 86/17 и 14/2021)

MOGUĆNOSTI PRIMENE INSAR TEHNOLOGIJE ZA DALJINSKU DETEKCIJU DEFORMACIJE GEOMETRIJE PUTA

Nikola Milovanović[12], Dejan Gavran[1], Goran Mladenović[1], Sanja Fric[1], Vladan Ilić[1], Filip Trpčevski[1], Stefan Vranjevac[1], Miloš Lukić[1]
[1] Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Bulevar kralja Aleksandra 73, Beograd, Srbija

Rezime: *Primena satelitskih snimaka za daljinsku detekciju pomeranja zemljine kore prisutna je u naučnoj literaturi već više od dve decenije. Analiza je pokazala da takođe postoji mogućnost primene InSAR tehnologije, odnosno interferometrijskog radara sa sintetičkom blendom za ranu detekciju geodinamičkih procesa. Porastom broja javnih i komercijalnih satelita u Zemljinoj orbiti, dostupnost i učestalost prikupljanja potrebnih podataka značajno su porasli poslednjih godina. Sada je moguće prikupiti podatke u vremenskim rasponima od svega nekoliko dana za svaku tačku na površini zemljine kore. Praćenje pomeranja infrastrukturnih objekata tradicionalnim geodetskim metodama je izuzetno skup i neefikasan proces. Sa druge strane, potreba za detekcijom i eventualnom predikcijom i prevencijom geoloških procesa u pojasu putne ili železničke infrastrukture nije upitna. Naučna saznanja u oblasti InSAR tehnologije dostigla su zrelost koja opravdava njenu potencijalnu primenu u infrastrukturi. U okviru ovog rada napravljen je pregled uspešnih primena ove savremene tehnologije u saobraćajnoj infrastrukturi, kao i pregled različitih metoda prostorne i vremenske obrade interferometrijskih podataka. Konačno, izvršena je analiza pomeranja karakterističnih deonica državnih puteva u Srbiji.*

Ključne reči: *InSAR, deformacija, daljinska detekcija, interferometrija*

APPLICATION OF INSAR FOR REMOTE DETECTION OF ROAD GEOMETRY DEFORMATION

Nikola Milovanović[12], Dejan Gavran[1], Goran Mladenović[1], Sanja Fric[1], Vladan Ilić[1], Filip Trpčevski[1], Stefan Vranjevac[1], Miloš Lukić[1]
[1] Faculty of Civil Engineering, University of Belgrade, Bulevar kralja Aleksandra 73, Belgrade, Serbia

Abstract: *The application of satellite images for remote detection of earth's surface movement has been present in the scientific literature for more than two decades. The analysis showed that there is also the possibility of applying InSAR technology for early detection of geodynamic processes. With the increase in the number of public and commercial satellites in Earth's orbit, the availability and frequency of collecting the necessary data has increased significantly in recent years. It is now possible to collect data in time spans of just a few days for every point on the surface of the earth. Monitoring the movement of infrastructure objects using traditional geodetic methods is an extremely expensive and inefficient process. On the other hand, the need for detection and eventual prediction and prevention of geological processes in the road or railway infrastructure is not in doubt. Scientific knowledge in the field of InSAR technology has reached a maturity that justifies its potential application in infrastructure. Within this paper, an overview of successful applications of this modern technology in traffic infrastructure was made, as well as an overview of different methods of spatial and temporal processing of interferometric data. Finally, an analysis of the displacement of characteristic sections of state roads in Serbia was carried out.*

Keywords: *InSAR, deformation, remote sensing, interferometry*

1. UVOD

Putna mreža Republike Srbije sastoji se od preko 16000 kilometara državnih puteva, od čega preko 1000 kilometara autoputeva [1]. U sklopu same putne mreže nalazi se veliki broj različitih tipova građevinskih i geotehničkih konstrukcija (mostovi, nadvožnjaci, natpunjaci, potporni zidovi i stabilisane kosine). Sa ciljem bezbedne eksploatacije putne mreže, neophodno je pratiti stanje svih ovih konstrukcija. Ako uzmemo u obzir još i da putna mreža nije jedini infrastrukturni sistem kod koga deformacija ili ugrožena stabilnost neke od konstrukcija kao posledicu može imati ugrožavanje ljudskih života, nameće se zaključak da postoji jako veliki broj konstrukcija čije je praćenje od velikog značaja. Učestalo praćenje deformacija ili sleganja tako velikog broja konstrukcija tradicionalnim geodetskim metodama bi podrazumevalo ogromne troškove i sa tog aspekta nije realistično, pa se zahteva neki drugi metod koji podrazumeva brzo i efikasno prikupljanje velikog broja podataka sa zadovoljavajućom preciznošću.

[2] Nikola Milovanović: nmilovanovic@grf.bg.ac.rs

U orbiti planete Zemlje trenutno se nalazi veliki broj satelita koji na dnevnoj bazi prikupljaju podatke za različite naučne i privredne svrhe. Podaci prikupljeni satelitima već se uveliko koriste u mnogim privrednim granama kao što su agrikultura, šumarstvo, upravljanje vodnim resursima kao i mnogim drugim [2]. Jula 1991. godine u orbiti se našao prvi satelit sa radarom sa sintetičkom blendom (ERS-1) koji je omogućio merenje deformacija površine zemljine kore sa centimetarskom preciznošću [3]. Od tada, lansiran je veliki broj satelita sa istim ili boljim mogućnostima, sa različitim tipovima talasnih dužina, i tipično sa rastućom preciznošću. Uprkos jasnoj potrebi za praćenjem deformacija objekata putne infrastrukture i rastućim mogućnostima InSAR tehnologije, još uvek ne postoji ustaljeno rešenje koje rešava ovaj problem u oblasti infrastrukture. U okviru rada biće dat pregled same tehnologije, njenih prednosti i mana, uspešnih primena i rešenja, kao i rezultati primene navedene tehnologije na prostoru Srbije.

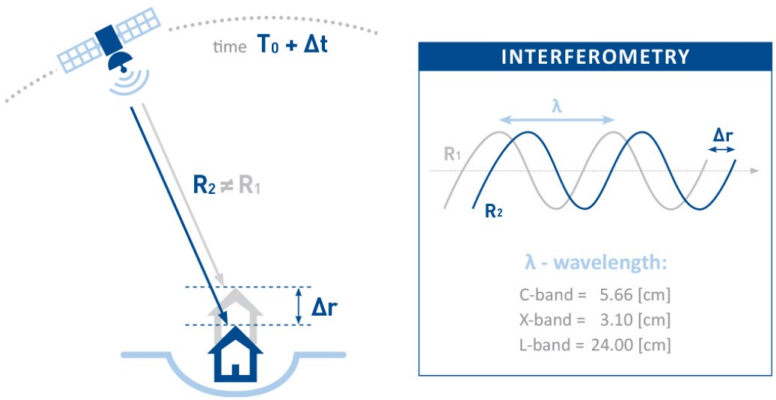
2. PRIMENA INSAR TEHNOLOGIJE

InSAR tehnologija danas se sastoji od prikupljanja podataka različitih grupa satelita sa različitim kategorijama talasnih dužina, dok njena primena takođe podrazumeva različite načine obrade dobijenih podataka. Sa ciljem efikasne i ispravne primene podataka, najpre treba razumeti svaki deo kompleksnog procesa prikupljanja i obrade dobijenih podataka.

2.1. InSAR

Radar sa sintetičkom blendom (**SAR** – *Syntetic Aperature Radar*) podrazumeva tehniku daljinske detekcije u kojoj se emitovani miktrotalasni signali reflektuju od površinu zemlje, i vraćaju ka senzoru [4]. Zbog primene mikrotalasa, ima mogućnost penetracije kroz oblake, odnosno oblaci ne utiču na reflektovani signal. Takođe, predstavlja aktivni sistem (sam emituje signal) i zbog toga može raditi i u noćnim uslovima [3].

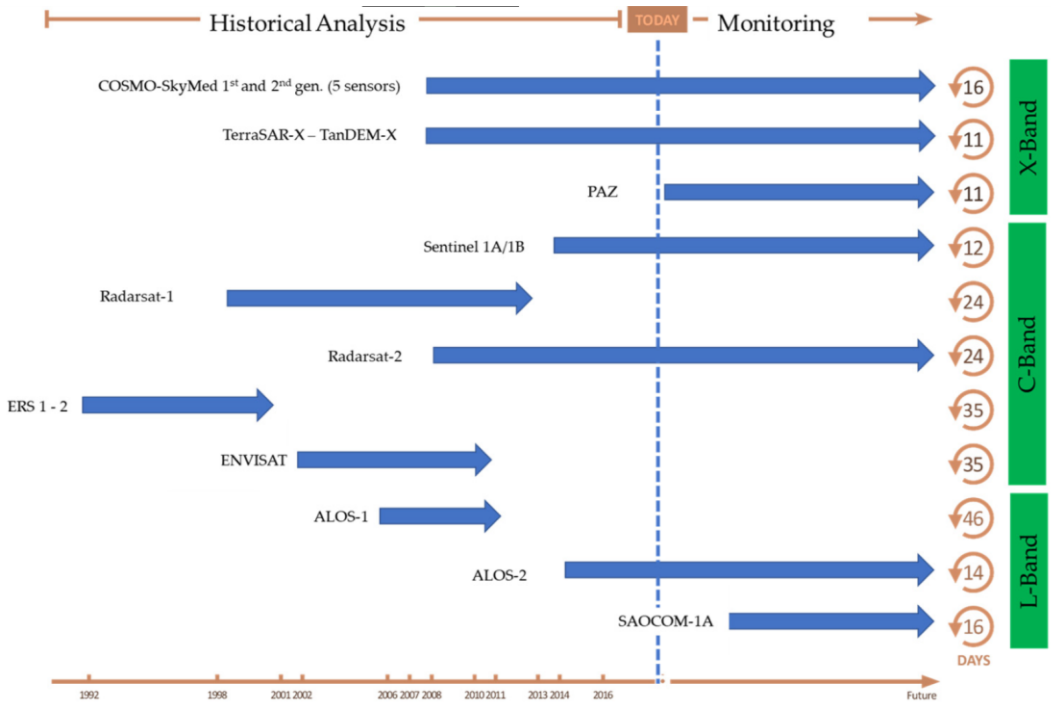
SAR interferometrija, ili ***InSAR*** odnosi se na merenje fazne razlike reflektovanih elektromagnetnih talasa sa istog mesta na površine zemlje, ali u različito vreme (slika 1). Kada se tačka na terenu pomeri, takođe se menja i distanca između senzora i tačke, tako da se može uočiti promena faze u reflektovanom talasu. Visoka preciznost ove tehnike dolazi upravo zbog toga što se ne mere apsolutne pozicije tačaka, već isključivo promene faze. Budući da su dužine emitovanog talasa reda veličine nekoliko centimetara, osetljivost merenja nalazi se u tom rasponu. Ako bi se neka tačka na terenu pomerila u pravcu merenja za distancu jednaku talasnoj dužini, ili umnošku talasne dužine, takvo pomeranje ne bi bilo registrovano ovom tehnikom, jer bi reflektovani talas bio u istoj fazi. Kao rezultat ove tehnike nastaju inteferogrami – fotografije (rasteri) koji pokazuju raspone faznih pomeraja za određeni deo površine zemlje.



Slika 1. *Princip rada SAR interferometrije [6]*

2.2. Izvori podataka

Proračun fazne razlike objašnjene u prethodnom poglavlju najpre zavisi od korišćene talasne dužine emitovanih mikrotalasa. Trenutno su u upotrebi 3 tipa talasnih dužina i to talasi tipa ***C***, tipa ***X*** i tipa ***L***. Od korišćenog tipa talasa posledično zavisi i preciznost merenja. Pored razlika u korišćenom tipu talasne dužine, grupe satelita takođe se razlikuju i po vremenu nakon kog ponovo posećuju istu geografsku zonu. Slika 2 pokazuje istorijski razvoj kao i buduće projekcije za najvažnije grupe *SAR* satelita. Pored toga, na slici su takođe pokazani tipovi talasnih dužina za svaku od grupa satelita, kao i vreme do ponovnog povratka na istu geografsku lokaciju, sa desne strane.



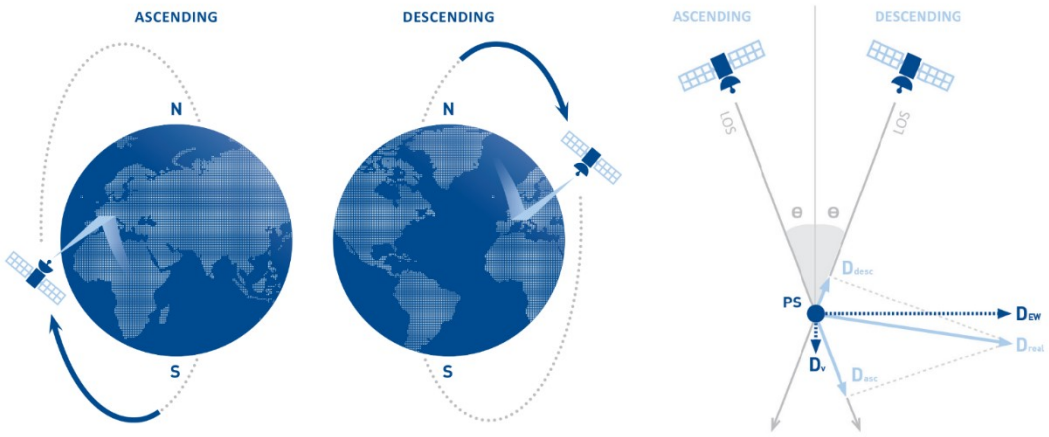
Slika 2. *Pregled grupa SAR satelita u orbiti od 1992. – 2022. godine [5]*

Podaci bazirani na grupi satelita tipa ***X*** predstavljaju najnapredniju grupu koja omogućava veliku rezoluciju (do 1 metar) i vertikalnu tačnost u milimetrima. Ova grupa satelita u vlasništvu je privatnih kompanija, i njihov podaci dostupni su samo komercijalno. ***Copernicus*** program Evropske svemirske agencije (***ESA*** – *European Space Agency)* u vlasništvu je Evropske unije i čini grupu satelita ***Sentinel-1*** tipa ***C***. Uprkos nešto nižoj rezoluciji i preciznosti, podaci ove grupe satelita su javno dostupni i nude široke mogućnosti za različite vrste analiza. Par ***Copernicus*** satelita (***Sentinel-1A*** i ***Sentinel-1B***) omogućavaju prikupljanje *SAR* fotografija sa vremenskim rasponom od 6 dana, nezavisno od vremenskih uslova, te kao rezultat nastaje 30 fotografija godišnje sa rezolucijom 5 x 20 metara [2]. Širina područja koje satelit fotografiše u jedno prolasku je približno 250 kilometara. U okviru *Sentinel-1* grupe, planirano je još 2 satelita (*1C i 1D*). *Sentinel-1C* trebalo je da bude lansiran u decembru 2022., međutim lansiranje je otkazano zbog otkazivanja opreme.

2.3. Obrada podataka

Budući da radar prikuplja fotografije koje se ne nalaze u vidljivom spektru, potrebno je sprovesti kompleksnu obradu podataka kako bi se fotografije mogle tumačiti. Upoređivanje dve uzastopne fotografije koje se odnose na istu geografsku lokaciju, odnosno upoređivanje iste prostorne tačke u različitim vremenskim trenucima dodatno otežava problem obrade podataka, odnosno treba potvrditi da se tačke zaista odnose na iste prostorne lokacije. Iz tog razloga, dekompozicija merenja u referentnom koordinatnom sistemu mora uzeti u obzir inklinacije leta, kao i da li se radi o ulaznoj ili silaznoj putanji (slika 3 levo), *(ascending/descending orbit)* [5].

Postoji nekolicina tehnika za interpretaciju podataka prikupljenih ovom metodom, a primarno se razlikuju po načinu na koji tumače horizontalno pomeranje terena. Podaci, odnosno distance prikupljene jednim satelitom korespondiraju vektorskim pomeranjima paralelnim orjentaciji satelita i u literaturi se najčešće nazivaju ***LOS*** *(Line of Sight)* pomeranja. U slučaju da su dostupni podaci sa dva satelita, jednog u uzlaznoj i jednog u silaznoj putanji, ova vektorska pomeranja mogu se razložiti na horizontalne i vertikalne komponente (slika 3 desno).



Slika 3. Uzlazne i silazne orbite satelita (levo), *Horizontalne i vertikalne komponente pomeranja terena (desno) [6]*

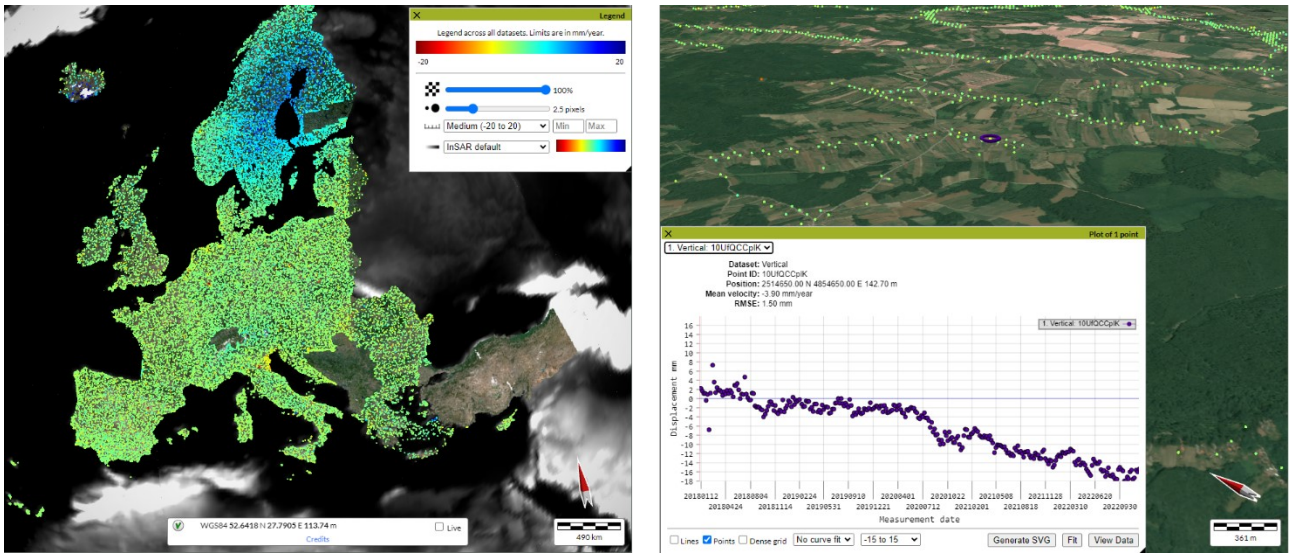
Uzevši u obzir raspoloživost istorijskih podataka, postaje moguće analiziranje razvoja deformacije određenih geografskih područja kroz godine, što omogućava uspostavljanje korelacija i trendova. Sa tim ciljem, podaci iz različitih vremenskih doba moraju se obraditi i porediti, i uz to se mora osigurati da se pomeranja odnose na iste prostorne tačke. Kao jedana od najčešće korišćenih u ove svrhe, izdvaja se metoda sa univerziteta Stanford – ***StaMPS*** *(Stanford Method for Persistent Scatterers)* [7]. ***StaMPS*** se sastoji od kombinacije algoritama koji omogućavaju analizu radarskih podataka za zadatu lokaciju uz ekstrakciju „stabilnih tačaka." Budući da se reflektujuće osobine materijala na terenu tipično ne menjaju, ovaj algoritam ekstrahuje stabilne tačke (*Persistent Scatters* – ***PS***) upravo na bazi refleksija. Na ovaj način, analiziraju se fazne razlike reflektovanih elektromagnetnih talasa, što omogućava merenje deformacija terena i posledično uspostavljanje trendova razvoja deformacije za svaku uspostavljenu tačku. Ova metoda omogućava korišćenje, odnosno analiziranje pomeranja unapred definisanih tačaka na terenu, što kao posledicu ima nešto manju preciznost.

Sa druge strane, metoda ***SBAS*** *(Small Baseline Subset)* oslanja se na prethodno definisane pozicije na terenu (*Distributed Scatters* – ***DS***), odnosno na veliku mrežu upravnih „piksela." U literaturi se navodi da ova metoda daje preciznije rezultate kad su u pitanju površine pokrivene vegetacijom ali i površine kolovoza od asfalt betona. Isti izvor takođe navodi da je moguće uporedo korišćenje obe prethodno pomenute metode, što rezultuje stabilnijim algoritmima i većom preciznošću [8].

3. EGMS

EGMS *(European Ground Motion Service)* [9] predstavlja prvo tehničko rešenje koje nudi praćenje pomeranja terena bazirano na *InSAR* tehnologiji za čitav kontinent u visokoj rezoluciji [10]. Rešenje se oslanja na *Sentinel-1* grupu satalite čije podatke obrađuje u punoj rezoluciji za čitavu površinu Evrope. Kao proizvod, *EGMS* lansiran je 2020. Godine i to sa tri nivoa preciznosti za različite namene (*Basic, Calibrated, Ortho*) [9]. Proizvod se održava na godišnjem nivou, tako da su dostupni podaci za prethodnih 5 godina. Trenutno, mogu se preuzeti merenja od početka 2018. godine, pa do kraja 2022. godine.

Prema radu koji je najavio dolazak *EGMS-a* [9], cilj ovog proizvoda je praćenje pomeranja tla, uključujući i klizišta i sleganja, kao i pomeranja objekata infrastrukture. Kretanja terena izražena kao brzina (u milimetrima godišnje) izvode se iz vremenskih serija na podacima *Copernicus* satelita koristeći paralelno ***PS*** i ***DS*** pristup rasporedu tačaka. U sadejstvu sa ***GNSS*** (*Global Navigation Satellite Systems*) dostupan je vizuelni alat prikazan na slici 4.



Slika 4. European Ground Motion Service [11]

Sa leve strane na slici 4. prikazana je pokrivenost EGMS-a, dok je sa desne strane prikazan dijagram vertikalnih deformacija za nasumično izabranu tačku u okolini Zagreba. Ako izuzmemo Veliku Britaniju, alat trenutno pokriva samo zemlje članice Evropske unije.

Na dijagramu na slici 4. desno prikazan je razvoj deformacije nasumično izabrane tačke za period od početka 2018. godine, pa sve do kraja 2022. godine. Osim nekolicine merenja koje značajno odstupaju, može se uočiti jasan trend razvoja deformacije ovog područja kroz dati vremenski period. Prema ***SRTM-u***[3], ova tačka nalazi se na 142.7 metara nadmorske visine.

EGMS takođe nudi mogućnost uspostavljanja trenda za vremensku seriju svake tačke linearnom regresijom. U slučaju ove tačke, prosečna brzina vertikalne deformacije na bazi linearne regresije iznosi -3.9 milimetara godišnje, dok je prosečno odstupanje od regresione prave (*RMSE*) 1.5 milimetara, što ukazuje na zavidnu preciznost merenja.

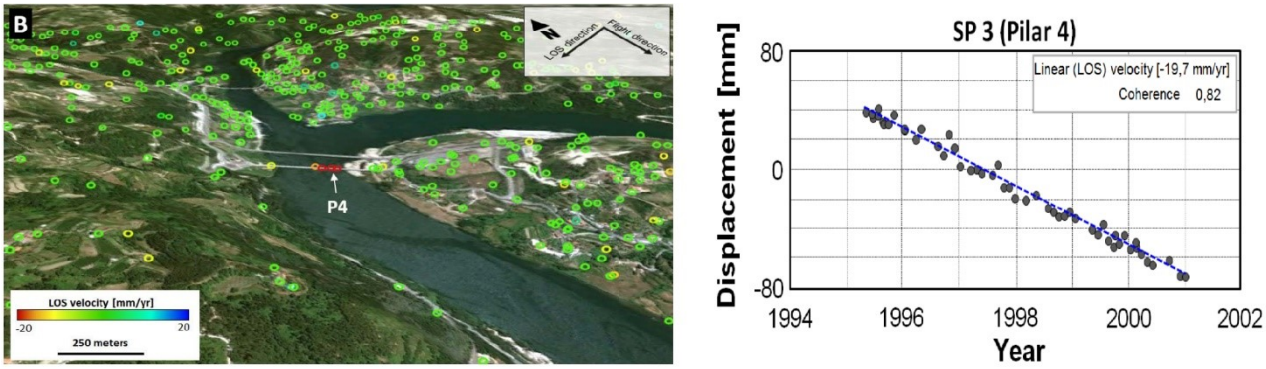
Kad je reč o praćenju deformacija objekata putne infrastrukture, *EGMS* u svom osnovnom obliku ne nudi naročite mogućnosti, primarno iz razloga što su tačke na površini terena već unapred definisane. Pored toga, ovaj alat oslanja se na *SRTM* čija rezolucija od 30 metara često može biti veća od celog putnog pojasa, pa je mogućnost poređenja deformacije objekta i okoline objekta upitna. Konačno, površina Srbije nije pokrivena ovim alatom, što onemogućava potencijalne primene od samog početka.

4. MOST HINTZE RIBEIRO

U noći 4. marta 2001. godine na severu Portugala urušio se most *Hintze Ribeiro* odnevši sa sobom 59 ljudskih života. U trenutku urušavanja, ovaj mostu su prelazila 3 putnička automobila i jedan autobus. Prema putnoj upravi Portugala, do kolapsa mosta došlo je zbog dve decenije nekontrolisanog vađenja peska, što je za posledicu imalo ugrožavanje stabilnosti mostovskih stubova.

2013. godine, sprovedena je retrospektivna studija [13], prikazana na slici 5. Iako u vreme kolapsa mosta metoda korišćena u ovoj studiji nije još bila dostupna, postojale su *SAR* fotografije predmetnog područja za navedeni vremenski period, pa je analiza vertikalnih deformacija urađena naknadno. *InSAR* metodom analizirane su vertikalne deformacije mostovskih stubova za 5 i po godina pre kolapsa, i uočen je jasan trend vertikalne deformacije od -19.7 milimetara godišnje za najugroženiji stub, sa odstupanjem manjim od jednog milimetra (slika 5. desno). Stub je u analiziranom periodu pretrpeo vertikalno sleganje veće od 10 centimetara. Ova informacija bila bi značajno upozorenje putnoj upravi i potencijalna prevencija katastrofalnog ishoda. Nažalost, tehnologija korišćena u ovom radu još uvek nije bila na raspolaganju, ali rad daje jasan dokaz da ova tehnologija ima veliki potencijal za primenu u infrastrukturi.

[3] *Shuttle Radar Topography Mission* – Digitalni model terena čitave površine Zemlje baziran na satelitskim snimcima sa horizontalnom rezolucijom od 30 metara [12].



Slika 5. Pomeranja tačaka u okolini mosta *Hintze Ribeiro* u pravcu *LOS* na bazi InSAR merenja (levo), vremenska serija deformacije stuba 4 (desno) [13]

5. PyGMTSAR

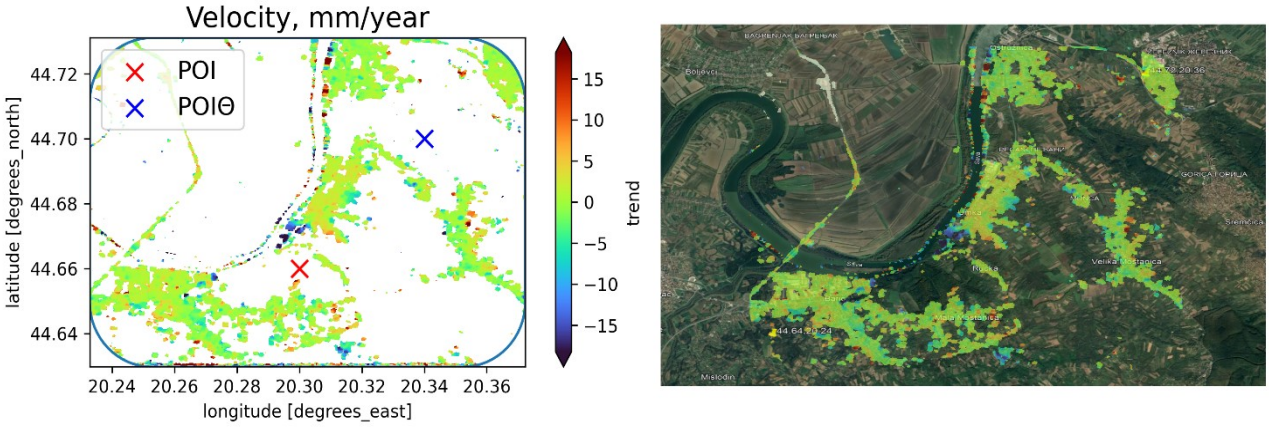
Ruski geofizičar Aleksej Pečnikov autor je ***PyGMTSAR***-a, modernog *Python* rešenja za InSAR analize otvorenog koda. Rešenje uporedo nudi *PS i SBAS* pristup, kao i mogućnost jednostavne upotrebe bez detaljnog poznavanja *Python* programskog jezika [14].

Tehnika SAR interferometrije za duge vremenske periode ili velika geografska područja zahteva izuzetno veliku procesorsku snagu. *Google Colaboratory (ili skraćeno **Colab**)* [16] je alat za analizu podataka u „*Cloud*"-u koji se kroz poslednjih nekoliko godina sve više koristi za različite naučne proračune, a omogućava upotrebu gotovo neograničene procesorske snage uz novčanu naknadu. Najveća prednost ***PyGMTSAR-a,*** u odnosu na slične InSAR alate je upravo ta što je baziran na „*jupyter notebook*"-u [17], i lako se upotrebljava u *Colab* okruženju.

Zbog lakoće primene i relativno visoke brzine proračuna, za potrebe rada izabran je upravo ovaj alat.

5.1. Primena – područje Umke

Kao karakterističnо geografsko područje za InSAR analizu u okviru ovog rada izabrana je okolina gradskog naselja Umka. Budući da sam inteferometrijski proračun traje relativno dugo, čak i kada se uposle računari izuzetne procesorske snage, veličina područja bila je ograničena. Ovo područje je povoljno jer se na maloj površini nalaze most preko Save, deonica autoputa „*Miloš Veliki*" severno od Save, kao i brojne geološke aktivnosti u okolini same Umke. Usvojen je vremenski period od dve godine, od početka 2022. do kraja 2023. godine.



Slika 6. Srednje brzine vertikalne komponente deformacije (u milimetrima godišnje) za odabrano područje (levo), vertikalne deformacije preko *Google Earth* satelistskog snimka (desno) [18]

Na slici 6. prikazani su rezultati InSAR analize za prethodno utvrđeno područje. Bojama su date uprosečene brzine vertikalnih kretanja za period od 2 godine, gde tamno plava boja odgovara tački čija visina opada 15 milimetara godišnje, dok crvena boja odgovara tački čija visina raste 15 milimetara godišnje. Na slici 6. sa desne strane prikazani su isti podaci ali preko *Google Earth* podloge.

Linijski objekat sa leve strane analiziranog područja, gusto pokriven tačkama, jeste autoput *Miloš Veliki*, severno od reke Save. Razlog velikoj pokrivenosti tačkama jeste visoka refleksija asfaltnih slojeva, relativno okolnoj vegetaciji. Rezultat analize pokazao je da na deonici autoputa, kao ni na mostu preko Save, u posmatranom vremenskom periodu nije bilo značajnih vertikalnih pomeranja. Značajnija vertikalna pomeranja primećena su uz obalu reke Save i u neposrednoj blizini samog gradskog naselja *Umka,* što korespondira mogućoj geološkoj aktivnosti u datom periodu.

U okviru svog doktorata [19], docent Građevinskog fakulteta Univerziteta u Beogradu Uroš Đurić, detaljnije se bavio InSAR analizom klizišta na području Umke. Grubo poređenje pokazalo je da postoji izvesna sličnost rezultata iz navedene analize i rezultata nastalih u okviru ovog rada. Ova analiza, međutim, rađena je za vremenski period od 2016. do 2018. godine, tako da nije moguće direktno porediti rezultate.

6. ZAKLJUČAK

Kao zaključak ovog rada nameće se veliki potencijal InSAR tehnologije u sistemima za upravljanje objektima infrastrukture. Za razliku od uobičajenih metoda za praćenja stanja objekata, ova tehnologija omogućava masovno prikupljanje podataka i potencijalno značajne uštede za upravljače putnom odnosno drugim mrežama infrastrukture.

Najveća prepreka masovnijoj upotrebi SAR interferometrije jeste i dalje nejasno definisana preciznost merenja. Budući da InSAR podrazumeva samo relativna merenja, odnosno merenja promena, osnova za ovu metodu je digitalni model terena. Ukoliko je digitalni model terena grub, kao što je to SRTM, ni od InSAR-a se ne može očekivati visoka preciznost. Ova prepreka u budućnosti bi mogla biti savladana snimanjem interesnih zona (u oblasti objekata) nekom od modernih tehnologija koje omogućavaju relativno visoke preciznosti uz brzo prikupljanje velikih količina podataka kao što su to mobilni lidar sistemi ili aerofotogrametrija. Na taj način, mogu se izraditi značajno precizniji digitalni modeli terena koji bi posledično poboljšali i preciznost rezultujućih InSAR deformacija. Preciznost InSAR merenja može se još poboljšati i kombinovanjem merenja, odnosno kalibrisanjem *InSAR* podataka mernim stanicama na samim objektima, odnosno lokacijama od interesa.

Napredak u preciznosti merenja, kao i učestaliji podaci, takođe se mogu očekivati i izlaskom novih satelita u okviru *Sentinel-1* programa. U narednih nekoliko godina, broj satelita u okviru ovog programa dupliraće se dodatkom satelita *1-C* i *1-D*. Jedan od zadataka budućih naučnih istraživanja iz ove oblasti takođe bi bio i analiza isplativosti upotrebe podataka koje pružaju komercijalni *InSAR* sateliti (*TerraSAR-X* ili *COSMO-SkyMed*). Troškove nabavke ovih podataka lako bi mogla da nadomesti poboljšana preciznost koja nastaje kao rezultat primene elektromagnetnih talasa tipa *X*, kraće talasne dužine.

Dosadašnje primene *InSAR* tehnologije u velikoj meri mogu se opisati kao retrospektivne analize. Takve vrste analiza imaju naučni doprinos jer pokazuju mogućnosti tehnologije, ali pravi potencijal ove tehnologije leži u monitoringu, a ne u analizi istorijskih podataka. Monitoring, odnosno prevencija kolapsa građevinskih objekata, krajnji je cilj upotrebe ove tehnologije. Kako bi se ovaj cilj ostvario, najpre je potrebno utvrditi sve interesne zone, odnosno objekte u okviru nekog sistema infrastrukture, a zatim se baviti razvojem alata koji će pri svakom novom objavljivanju SAR snimaka računati interferograme. Na osnovu inteferograma alat bi određivao deformacije interesnih tačaka svakih nekoliko dana i upozoravao ako neka od tačaka ima naglo povećanu brzinu razvoja deformacije.

Literatura

[1] Internet sajt JP „Putevi Srbije“: https://www.putevi-srbije.rs/images/pdf/referentni-sistem/2.1_ukupna_duzina_drzavnih_puteva.pdf (pristupljeno 07.03.2024)
[2] Morgado, J.; Amado, J. (2023). The Applicability of Satellite Monitoring in the Context of Road Asset Management, Asset Management Directorate, Infaestruturas de Portugal, Portugal
[3] European Space Agency – TM19, (2007). InSAR Principles: Guidelines for SAR Interferometry Processing and Interpretation
[4] Sušić Z.; Ninkov, T.; Bulatović V. Primena InSAR tehnologije u postupku detekcije pomeranje terena, Fakultet tehničkih nauka u Novom Sadu, Trg Dositeja Obradovića 6, Novi Sad, Srbija
[5] Gagliardi, V., Tosti, F., Bianchini Ciampoli, L., Battagliere, M.L., D'Amato, L., Alani, A.M. & Benedetto, A. (2023). Satellite Remote Sensing and Non-Destructive Testing Methods for Transport Infrastructure Monitoring: Advances, Challenges and Perspectives. Remote Sens. 2023, 15, 418. doi.org/10.3390/rs15020418
[6] TRE ALTAMIRA (2023). InSAR at a glance. https://site.tre-altamira.com/insar (pristupljeno 08.03.2024)
[7] Hooper, A. (2008). A multi-temporal InSAR method incorporating both persistent scatterer and small baseline approaches. Geophysical Research Letters, 35(16). doi:10.1029/2008GL034654
[8] Even, M. & Schulz, K. (2018). InSAR Deformation Analysis with Distributed Scatterers: A Review Complemented by New Advances. Remote Sensing. 2018;10(5):744. doi.org/10.3390/rs10050744
[9] EU-GMS Task Force (2017), European Ground Motion Service (EU-GMS) – A proposed Copernicus service element, https://land.copernicus.eu/en/products/european-ground-motion-service/egms-white-paper/@@download/file, (pristupljeno 11.03.2024.)
[10] Costantini, M., Minati, F., Trillo, F., Ferretti, A., Novali, F., Passera, E., ... & Andersen, H. S. (2021) European ground motion service (EGMS). In *2021 IEEE international geoscience and remote sensing symposium IGARSS* (pp. 3293-3296). IEEE.
[11] Internet sajt EGMS-a: https://egms.land.copernicus.eu/ (pristupljeno 11.03.2024)
[12] Van Zyl, J. J. (2001). The Shuttle Radar Topography Mission (SRTM): a breakthrough in remote sensing of topography. Acta Astronautica, 48(5-12), 559–565. doi:10.1016/s0094-5765(01)00020-0
[13] Sousa, J. J., & Bastos, L. (2013). Multi-temporal SAR interferometry reveals acceleration of bridge sinking before collapse. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, *13*(3), 659-667.
[14] Pechnikov, A. (2023) PyGMTSAR: Sentinel-1 Python InSAR: An Introduction, *Kindle Edition*
[15] PyGMTSAR GitHub repozitorijum - https://github.com/AlexeyPechnikov/pygmtsar (pristupljeno 12.03.2024)
[16] Bisong, E., & Bisong, E. (2019). Google colaboratory. *Building machine learning and deep learning models on google cloud platform: a comprehensive guide for beginners*, 59-64.
[17] Kluyver, T. et al., 2016. Jupyter Notebooks – a publishing format for reproducible computational workflows. In F. Loizides & B. Schmidt, eds. Positioning and Power in Academic Publishing: Players, Agents and Agendas. pp. 87–90.
[18] Google Earth Satelitski snimak područja gradskog naselja „Umka“, https://earth.google.com/web (pristupljeno 12.03.2024)
[19] Đurić U. (2020). Kvantitativna procena rizika od klizišta Umka kod Beograda, *doktorska disertacije, Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-Geološki fakultet*

USE OF BRIDGE WEIGH-IN-MOTION DATA: A CASE STUDY OF THE REPUBLIC OF SERBIA

Martin Hauptman
[1] Project manager, Cestel
martin.hauptman@cestel.si

Miloš Milosavljević
[1] Chief engineer on the databases on traffic signs, trip railway crossings and crashes, Public Enterprise Roads of Serbia
milos.milosavljevic@putevi-srbije.rs

Abstract: In 2020, bridge weigh-in-motion technology was successfully implemented in the Republic of Serbia as part of the project led by the Public Enterprise Roads of Serbia and the World Bank, where short-term weigh-in-motion measurements were conducted across the Serbian road network. An overview of the project and the data gathered will be presented in the article, as well as possible future uses of bridge WIM systems as part of the larger strategy of infrastructure management. These uses include bridge analysis, monitoring of exceptional transports, use of WIM data in road design and the use of WIM system in preselection. Slovenia will be used as a point of reference where the bridge WIM system has been used for more than 20 years.

Keywords: infrastructure management, weigh-in-motion, bridges

1. INTRODUCTION

The infrastructure around the world is aging rapidly. As stated by Hekič et al. [1], the average age of European and other developed countries' bridges exceeds 50 years. Many bridges before 1970 were designed for a service life of 50 years and are thus approaching the end of their design life. Moreover, once considered long-lasting, reinforced concrete structures have not met these expectations, particularly those built in the 1970s. At the same time, roads today experience much higher traffic loads than in the past. Between 2018 and 2020, traffic loading on the Slovenian motorway network increased on average by 35% when compared to the period from 2014 to 2017 [2]. All of this is happening in the era of global warming, with an increased likelihood of extreme weather events that will cause accelerated material degradation, more frequent flooding, an increase in solar radiation, and other factors that will negatively impact the state of infrastructure [3].

Infrastructure owners are taking different approaches to safeguard their assets. In 2020, Public Enterprise Roads of Serbia (PERS) led a project under the auspices of the World Bank, where 17 two-week bridge weigh-in-motion (B-WIM) measurements were performed on class IA and IB roads on various parts of the road network. A B-WIM system was also installed at a permanent location on the motorway Belgrade-Novi Sad. This project followed a similar strategy that is followed by the infrastructure owners in Slovenia, where portable B-WIM measurements form one of the pillars of asset management.

2. 2020 PROJECT OVERVIEW

The B-WIM measurements were performed between October and December 2020, with the training of the PERS personnel and the installation of the B-WIM system at a permanent location also taking place in this period.

The measurements were performed on 17 bridges located at 13 separate road sections across the territory of the Republic of Serbia (Table 1 and Figure 1). Three of these road sections were located on motorways (IA classification), while the rest were done on state roads (IB classification).

Table 1. *Measurement locations*

Road	Road section	Bridge ID
IA1	Belgrade-Novi Sad	0495/0496
IA2	Obrenovac-UB	0699/0700
IA4	Bela Palanka-Pirot	0599/0600
IB12	Zrenjanin-Novi Sad	Culvert
IB13	Zrenjanin-Kovilovo	3161
IB21	Novi Sad-Irig-Ruma	3191
IB21	Ruma-Sabac	Culvert
IB22	Meljak-Lazarevac	1049
IB22	Usce-Raska	4903
IB23	Pozega-Cacak	2000
IB24	Batocina-Kragujevac	1627
IB26	Sabac-Loznica	1760
IB36	Paracin-Boljevac	2103

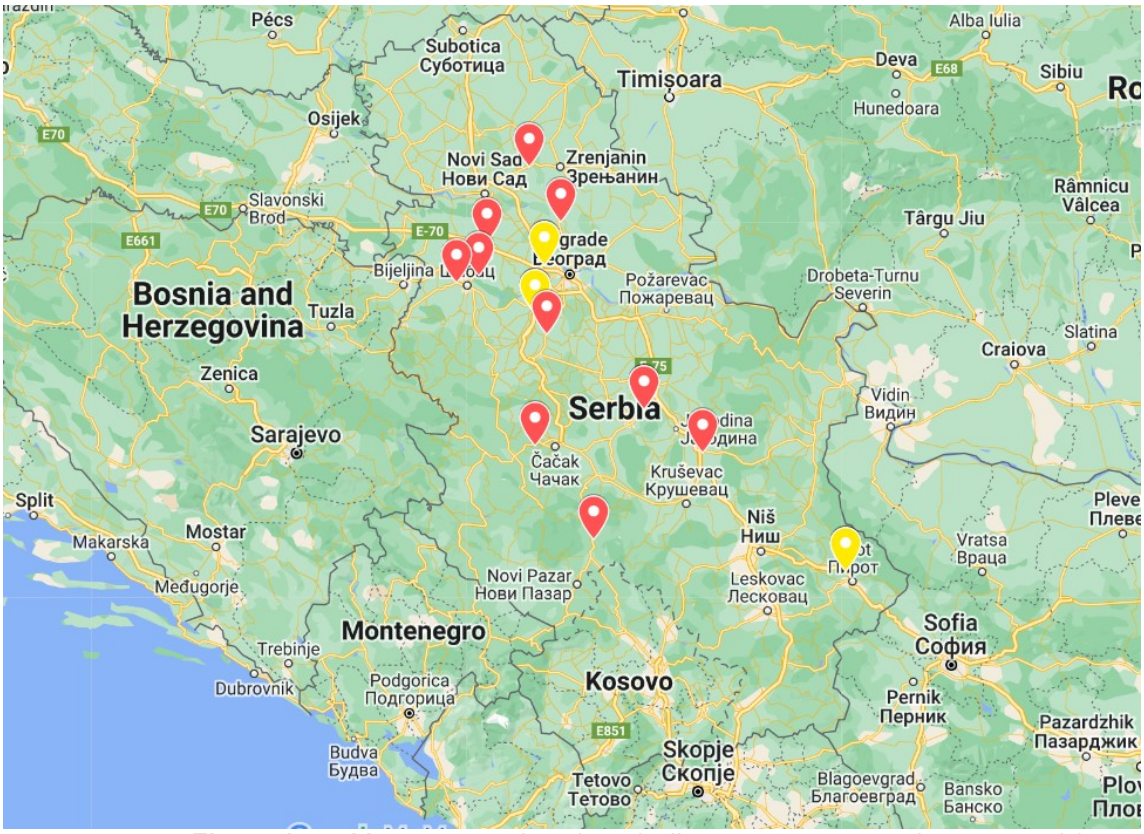


Figure 1. *Measurement locations (yellow - motorways, red - state roads)*
Source: Google Maps, Cestel

The output of each two-week measurement was a site analysis report, which included the following information:

- number of heavy vehicles classified into four categories (busses, medium trucks, heavy trucks, semi-trucks with trailers)
- average daily traffic loading
- average daily overloading
- the structure of overloaded vehicles
- hourly distribution of overloaded vehicles
- calculation of the shortening of the service life of the road section

3. OVERVIEW OF THE MEASURING SITES IN SERBIA

3.1 Motorway

Based on the data from the three two-week B-WIM measurements at measuring sites located on the Serbian motorways, the daily average of overloaded heavy goods vehicles was 15,7%. Looking at the individual measuring sites, the largest percentage of overloaded HGVs was detected in the driving lane at the location of Ub-Obrenovac, 29,3%, while the driving lane at the location Belgrade-Novi Sad had the lowest percentage of overloaded vehicles (10,9%).

Table 2. *The Republic of Serbia, overloaded vehicles, motorway network*

Road section	Overloaded vehicles
Belgrade-Novi Sad (IA1)	10,9%
Novi Sad-Belgrade (IA1)	16,8%
Obrenovac-Ub (IA2)	12,2%
Ub-Obrenovac (IA2)	29,3%
Bela Palanka-Pirot (IA4)	15,8%
Pirot-Bela Palanka (IA4)	12,1%

The impact of heavy vehicles on the roads is expressed through the concept of the equivalent single axle load (ESAL). As stated by Hajek [5], ESAL "attempts to capture the combined influence of the entire traffic mix on pavement damage by converting the pavement damage caused by different axle loads and axle groups to that caused by a standard axle load". In both Serbia and Slovenia, the standard axle is defined as a single axle with double tires and axle load of 100 kN.

While the information on the percentage of overloaded HGVs is of some use in asset management, it does not tell us by how much these vehicles are overloaded, which is crucial information for road design; this is described by the daily traffic loading expressed in ESAL.

Table 3 shows the daily traffic loading and overloading on the measuring sites located on the motorway network.

Table 3. *The Republic of Serbia, daily traffic loading (motorways)*

Road section	Daily legal traffic loading (ESAL)	Daily overloading (ESAL)	Overloading as a percentage of total loading
Belgrade-Novi Sad (IA1)	1322,6	95	6,70%
Novi Sad-Belgrade (IA1)	1580,3	288,5	15,44%
Obrenovac-Ub (IA2)	516,3	18,1	3,39%
Ub-Obrenovac (IA2)	782,4	232,2	22,89%
Bela Palanka-Pirot (IA4)	690,6	14,7	2,08%
Pirot-Bela Palanka (IA4)	584,2	7,2	1,22%

On average, the daily legal traffic loading was 912,7 ESAL, with the average daily overloading being 109,3 ESAL. The motorway road section Ub-Obrenovac saw the largest percentage of overloaded vehicles, while the overloading as a percentage of legal loading was also the highest (22,89%).

3.2 Main roads

There are 16.179 km of main roads in Serbia (classification IB) and during the 2020 project, B-WIM measurements were performed on ten different locations. Since main roads have a lower traffic volume than motorways, 2-week B-WIM measurements, if not repeated on a regular basis, are subject to statistical anomalies.

The largest percentage of overloaded vehicles was observed on the road section Šabac-Ruma (38,3%), while the road section Meljak-Lazarevac saw the lowest percentage of overloaded HGVs (5,8%) (Table 4). When looking at all of the road sections, 17,1% of HGVs were overloaded on average.

Table 4. *The Republic of Serbia, overview of measuring sites, state roads*

Road section	Overloaded vehicles
Zrenjanin-Novi Sad (IB12)	13,9%
Novi Sad-Zrenjanin (IB12)	13,4%
Zrenjanin-Kovilovo (IB13)	10,8%
Kovilovo-Zrenjanin (IB13)	20,3%
Ruma-Šabac (3191) (IB21)	6,1%
Šabac-Ruma (3191) (IB21)	38,3%
Ruma-Šabac (culvert) (IB21)	6,7%

Šabac-Ruma (culvert) (IB21)	25,7%
Meljak-Lazarevac (IB22)	5,8%
Lazarevac-Meljak (IB22)	22,1%
Ušće-Raška (IB22)	17,3%
Raška-Ušće (IB22)	12,8%
Požega-Čačak (IB23)	15,8%
Čačak-Požega (IB23)	15,2%
Batočina-Kragujevac (1627, two lanes) (IB24)	16,1%
Batočina-Kragujevac (1668, two lanes) (IB24)	26,8
Šabac-Loznica (IB26)	9,6%
Loznica-Šabac (IB26)	33,9%
Paračin-Boljevac (IB36)	19,9%
Boljevac-Paračin (IB36)	15,5%

When it comes to daily traffic loading, the values vary greatly depending on the road section. Both measurement locations on the road section Ruma-Šabac (bridge 3191 and culvert) saw high daily traffic loading and overloading (Table 5).

On average, the daily legal traffic loading was 365,3 ESAL, while the average daily overloading was 73,3 ESAL.

Table 5. *The Republic of Serbia, daily traffic loading (main roads)*

Road section	Daily legal traffic loading (ESAL)	Daily overloading (ESAL)	Overloading as a percentage of total loading
Zrenjanin-Novi Sad (IB12)	272,5	18,5	6,36%
Novi Sad-Zrenjanin (IB12)	282,8	30	9,59%
Zrenjanin-Kovilovo (IB13)	281,5	11,9	4,06%
Kovilovo-Zrenjanin (IB13)	287,2	70,7	19,75%
Ruma-Šabac (3191) (IB21)	308,2	5,9	1,88%
Šabac-Ruma (3191) (IB21)	586,3	240,8	29,11%
Ruma-Šabac (culvert) (IB21)	381	20,9	5,20%
Šabac-Ruma (culvert) (IB21)	695,5	178,8	20,45%
Meljak-Lazarevac (IB22)	255	18,3	6,70%
Lazarevac-Meljak (IB22)	339,6	132,4	28,05%
Ušće-Raška (IB22)	346,3	72,3	17,27%
Raška-Ušće (IB22)	226,5	27,5	10,83%
Požega-Čačak (IB23)	393,6	57,3	12,71%
Čačak-Požega (IB23)	439,3	43,7	9,05%
Batočina-Kragujevac (1627, two lanes) (IB24)	305,2	99,1	24,51%
Batočina-Kragujevac (1668, two lanes) (IB24)	496,6	150,9	23,31%
Šabac-Loznica (IB26)	275,5	10,7	3,74%
Loznica-Šabac (IB26)	402,1	110,1	21,50%
Paračin-Boljevac (IB36)	351,3	101,8	22,47%
Boljevac-Paračin (IB36)	381	63,9	14,36%

4. OVERVIEW OF B-WIM MEASUREMENTS IN SLOVENIA (2017-2020)

4.1 Motorway network

Between 2017 and 2020, the Motorway Company in the Republic of Slovenia (DARS) executed 20 B-WIM measurements on the Slovenian motorway network, which comprises 625 km of motorways. These measurements ranged from 1 month to 6 months in duration, with the average measurement lasting 2 months. On average, 13,4% of HGVs were overloaded on the Slovenian motorway network in the aforementioned period, compared to 11,4% of overloaded vehicles detected in the previous period (2014-2017). During January 2018 and August 2020, the Slovenian police stopped and sanctioned 714 overloaded HGVs via the policy of preselection of overloaded vehicles [2].

Daily average traffic loading between 2017 and 2020 was 4.282,2 ESAL, which is 49% higher than in the previous period. When compared to the data from the traffic counters, which are used for road design, the actual traffic loadings are 41% higher.

The average daily overloading on the Slovenian motorway network is 115,1 ESAL. According to the study made by the Slovenian National Civil Engineering Institute (ZAG), in Slovenia, each ESAL of overload causes 2,96 € of damage per ESAL per km [2]. The overloaded vehicles thus cause 52,3 million euros of damage per year.

In Slovenia, B-WIM systems are also used to calculate safety distance between HGVs. On average, 18,1% of all HGVs are violating the 2 second rule, while 17,9% of HGVs transporting dangerous goods violate safety distance regulation.

4.2 Main roads

In Slovenia, there are approximately 6.000 km of main roads, which are managed by the Slovenian Infrastructure Agency. During the period 2017–2020, 140 one-week B-WIM measurements were performed on the Slovenian main roads.

14,1% of HGVs detected during these measurements were overloaded, with the average daily traffic loading being 325,2 ESAL [4]. Compared to the period 2013-2016, the average traffic loading increased by 33%, but the percentage of overloaded vehicles went down by 7,1 percentage points. The actual traffic loading on the Slovenian main roads are 55% higher than the theoretical traffic loads calculated with the data from traffic counters. Using the same methodology as described in chapter 4.1, the damage caused by overloaded vehicles on all of the Slovenian main roads is estimated to be around 200 million euros per year.

5. COMPARISON OF DATA FROM SERBIA AND SLOVENIA

5.1 Motorways

The B-WIM measurements in Slovenia cover the whole motorway network and are also longer in duration, so there is more statistical data available.

On average, 15,7% of HGVs were overloaded during the B-WIM measurements in Serbia compared to 13,4% in Slovenia. The average traffic loading on Slovenian motorways is 4.282,2 ESAL, which is much higher than on the locations measured in Serbia (912,7 ESAL), but the data from Serbia is limited. In order to make the comparison meaningful, we analyzed motorway road sections with similar daily traffic loading (Table 6).

Table 6: *Comparison of motorway sections with similar daily traffic loading*

	Slovenia (A2/0003 Lipce-Lesce)	**Serbia (Novi Sad-Belgrade, IA1)**
Daily average traffic loading	1501 ESAL/day	1580,3 ESAL/day
Daily average overloading	10 ESAL/day	288,5 ESAL/day
Overloaded vehicles	8,4%	16,8%

The percentage of overloaded vehicles is lower on the Slovenian motorway section, with the overloading also being lower. A proper comparison would entail a larger data set of B-WIM measurements in Serbia.

5.2 Main roads

The data from Slovenia and Serbia shows that the percentage of overloaded HGVs on main and local roads varies widely, which is to be expected as the traffic loading on the main roads depends heavily on the local sources of heavy traffic, such as quarries, lumber mills, construction sites, etc. For example, while the average percentage of overloaded HGVs on the Slovenian main roads is 14,1%, the road section Šmartno–Grm saw 62,6% of overloaded vehicles due to the fact that the road section was axle load limited to 6 t [4]. The largest traffic loads detected during the measurements in Serbia were found on the road section Šabac-Ruma where 29,11% of HGVs were overloaded.

Table 7 shows an overall comparison between the B-WIM data from Slovenia and Serbia.

Table 7: *Comparison of main roads, Slovenia and Serbia*

	Slovenia	**Serbia**
Road network	Approx. 6.000 km	16.179 km
Overloaded vehicles	14,1%	17,1%
Daily average total traffic loading (both lanes)	325,2 ESAL/day	438,6 ESAL/day
Max. daily traffic loading	1.627,9 ESAL/day	1076,5 ESAL/day

Daily average total traffic loading in Serbia is 34,8% higher than in Slovenia, with the average percentage of overloaded vehicles also being 3 percentage points higher. As mentioned above, the number of B-WIM measurements on main roads in Slovenia is much higher than in Serbia, which has an effect on these calculations.

6. BRIDGE EVALUATION

In 2023, Goran V. Milutinović and Rade Hajdin used the data gathered by the B-WIM systems during the 2020 project in Serbia and made an evaluation of the bridge traffic load model used by Serbia [6]. They compared the actual traffic loads detected by the B-WIM system with the equivalent load effects found in Eurocode Load Model 1, resulting in the calculation of α coefficients.

As stated by Milutinović and Hajdin, “The use of adequate load model for existing bridges would have significant economic impact for bridge owners (“JP Putevi Srbije”), since the lower α coefficients on the sound scientific basis would safely keep many bridges in service, without the need for their upgrading or demolishing.” [6]

7. CONCLUSION

In 2020, Public Enterprise Roads of Serbia successfully led a state-wide survey of traffic loads using portable B-WIM systems. Although a direct comparison of the data between Slovenia and Serbia is difficult due to the fact that the sample size of measurements in Slovenia is significantly larger as Slovenia has over 20 years of available B-WIM data, nonetheless, we can make a generalized comparison.

When it comes to the percentage of overloaded HGVs, on both motorways and main roads, there is a higher percentage of overloaded vehicles in Serbia. Traffic loads on the Slovenian motorway network are notably higher than in Serbia, while the comparison of motorway road sections with similar traffic loading showed a larger percentage of overloading on the Serbian motorway section.

Data from both countries shows a very large variation in the percentage of overloaded vehicles and traffic loading on main roads. This is mainly due to the fact that local sources of heavy traffic have a large effect on these roads, especially due to the fact that there is usually less monitoring by the law enforcement authorities on such road sections.

Both the Motorway Company in the Republic of Slovenia and the Slovenian Infrastructure Agency perform various analyses of B-WIM data, which were not carried out in the scope of the 2020 project in Serbia:

- Overloading in Slovenia is expressed in monetary terms, which gives infrastructure owners a toll on maintenance and construction costs.
- An analysis of the safety distance between trucks is made.
- Vehicles carrying dangerous goods are analyzed separately.
- On the main roads, special attention is given to vehicles from construction sites, quarries, and other similar local sources of heavy traffic, which are then analyzed separately.
- Data from B-WIM systems is integrated into the traffic information center and used for the monitoring of exceptional transports and preselection.

In Serbia, an innovative approach to the use of B-WIM data in the assessment of bridges was presented by Goran V. Milutinović and Rade Hajdin, which has a large benefit potential for the owners of bridges.

References

[1] Hekič, D.; Ribeiro, D.; Anžlin, A.; Žnidarič, A.; Češarek, P. Improved Finite Element Model Updating of a Highway Viaduct Using Acceleration and Strain Data. Sensors 2024, 24, 2788. https://doi.org/10.3390/s24092788
[2] Kulauzovič, B.; Beširević, T.; Jamnik, J. Končno poročilo št. 0417710-20: tehtanje vozil v prostem prometnem toku 2017-2020. Družba za avtoceste v Republiki Sloveniji, 2020.
[3] Nasr, A.; Kjellström, E.; Björnsson, I.; Honfi, D.; Ivanov, O. L.; Johansson, J. Bridges in a changing climate: a study of the potential impacts of climate change on bridges and their possible adaptations. Structure and Infrastructure Engineering 2024, 16:4, 738-749, DOI: 10.1080/15732479.2019.1670215
[4] Beširević, T.; Kulauzović, B.; Rikanović, K.; Jamnik, J. KONČNO POROČILO št. 3318910-20 O WIM MERITVAH V ŠTIRILETNEM OBDOBJU 2017 – 2020. Direkcija Republike Slovenije za infrastrukturo.
[5] Hajek, J. J. General Axle Load Equivalency Factors. Transportation Research Record. 1995;1482:67.
[6] Milutinovic, G.; Hajdin, R. EVALUATION OF BRIDGE TRAFFIC LOAD MODEL USING B-WIM MEASUREMENTS IN SERBIA. International Conference Synergy of Architecture & Civil Engineering. 2023.

ЕВАЛУАЦИЈА ПОДУЖНЕ РАВНОСТИ КОЛОВОЗА ПРИМЕНОМ ОБЛАКА ТАЧАКА ДОБИЈЕНИХ МОБИЛНИМ ЛИДАР СИСТЕМОМ

Милош Бероња[1][1], Никола Миловановић[1], Милена Милојевић[2], Горан Младеновић[1]
[1] Грађевински факултет, Универзитет у Београду, Булевар краља Александра 73, Београд, Србија
[2] Геопут Д.О.О., сектор Геоделта, Томе Росандића 2, Београд, Србија

Резиме: *Услед интезивиране градње путних објеката као и растућег саобраћајног оптерећења на путним правцима у експлоатацији долази до све веће потребе за модернизованим методама мерења равности коловоза за потребе система за управљање одржавањем путева – PMS (Pavement Management System), олакшаног увида у стање постојећих саобраћајница као и за мониторинг равности током извођења радова. Као један од најзначајнијих показатеља стања коловозне конструкције намеће се индекс подужне равности коловоза – IRI, светски признат стандард који је увела светска банка 1986. Снимање подужне равности на нивоу путне мреже захтева скупу опрему лимитираних могућности, док локализовано, односно ручно снимање захтева изузетне напоре у погледу времена и радне снаге и проблематично је са аспекта безбедности. Мобилно лидар скенирање – MLS је модерна, временски ефикасна технологија која омогућава масовно прикупљање просторних података изузетне прецизности. У модерној инжењерској пракси, све чешће су присутни облаци тачака добијени даљинском детекцијом, фотограметријом или мобилним лидар скенирањем. Овакви облаци тачака могу се користити у различите сврхе, међутим њихова примена у евалуацији стања коловоза је и даље недовољно истражена. У оквиру овог рада дат је преглед примена наведене технологије и извршена је анализа подужне равности карактеристичне деонице градске саобраћајнице у Београду.*

Кључне речи: *PMS, IRI, MLS, коловоз, облак тачака.*

EVALUATION OF ROAD ROUGHNESS USING POINT CLOUDS OBTAINED BY MOBILE LIDAR SYSTEM

Miloš Beronja[1], Nikola Milovanović[1], Milena Milojević[2], Goran Mladenović[1]
[1] Faculty of Civil Engineering, University of Belgrade, Bulevar kralja Aleksandra 73, Belgrade, Serbia
[2] Geoput D.O.O., Geodelta sector, Tome Rosandica 2, Belgrade, Serbia

Abstract: *Due to the intensified construction of road facilities as well as the growing traffic load on road routes in use, there is a growing need for modernized methods of measuring road conditions for the needs of Pavement management system – PMS, easier insight into the condition of existing roads as well as for monitoring of roughness during the execution of works. As one of the most significant indicators of the condition of the roadway structure, the roadway International Roughness Index - IRI, is a globally recognized standard introduced by the World Bank in 1986. Longitudinal flatness recording at the level of the road network requires expensive equipment with limited capabilities, while localized, i.e. manual recording requires exceptional efforts in in terms of time and manpower and it is problematic from the aspect of safety. Mobile LiDAR scanning - MLS is a modern, time-efficient technology that enables mass collection of spatial data with exceptional accuracy. In modern engineering practice, point clouds obtained by remote sensing, photogrammetry or mobile LiDAR scanning are increasingly present. Such point clouds can be used for various purposes, however their application in pavement condition evaluation is still insufficiently researched. As part of this paper, an overview of the application of the mentioned technology was given and an analysis of the longitudinal roughness of a characteristic section of the city road in Belgrade was performed.*

Keywords: *PMS, IRI, MLS, pavement, point cloud.*

1. УВОД

Познавање функционалног стања површине коловозних конструкција је предуслов за дефинисање адекватних третмана периодичног одржавања. Један од најчешће коришћених индекса у системима за управљање одржавањем путева је индекс подужне равности (IRI). Развијен је од стране Светске банке 80-их година, а представља акумулирано вертикално померање вешања аутомобила при кретању по коловозу. Системи за управљање одржавањем путева захтевају ажурне податке о стању коловоза, како би се на основу њих и осталих параметара (саобраћајног оптерећења, климатских услова итд.) дефинисали што реалнији модели пропадања конструкције. На основу ових модела, управљачи путном инфраструктуром могу да дефинишу оптимално време за извођење интервенција, како би са што мање утрошених средстава добили оптималне резултате, односно што дужи век коловозних конструкција. У

[1] Милош Бероња: milos.beronja.bl@gmail.com

Сједињеним Америчким Државама је процењено да се за пораст IRI од 1 m/km трошкови одржавања повећавају за 340 милиона долара годишње [1]. У свакодневној експлоатацији, стање коловоза утиче и на повећање трошкова корисника (потрошња горива и мазива, потрошња пнеуматика, амортизација возила и сл.). Повећање индекса равности од 1 m/km повећава трошкове горива за до 6% [2].

Инерцијални профилометри, који су најчешће коришћени инструменти за снимање равности коловоза на ванградској мрежи, нису адекватни за мерење у градским условима због неуједначене брзине и врло честе потребе за заустављањем уређаја. Обзиром да већи градови имају велику мрежу саобраћајница (мрежа путева и улица у Београду дужине је 3851,64 km.[3]), на којој је такође потребно пратити стање функционалних карактеристика, укључујући и равност, поставља се питање избора оптималне технологије за снимање ових параметара у градским условима.

LiDAR је технологија која помоћу ласерског скенирања долази до широког спектра просторних података са великом тачношћу. Развој ове технологије препознат је широм света, а тако и њена употреба у оцени стања коловоза. Ова метода снимања омогућава мерење подужне равности коловоза, а показало се да може имати и ширу примену у погледу сагледавања стања оштећености коловоза (могуће је класификовати оштећења по типу и интезитету). Снимањем мобилним LiDAR-ом се генерише до 1000 пута више података за 10% времена које би било потребно када би се користиле конвенционалне методе снимања стања [4].

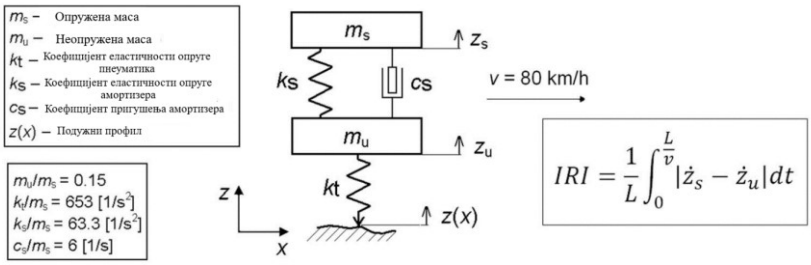
Циљ овог рада је испитивање могућности употребе облака тачака за потребе мерења индекса равности коловоза уз помоћ јавно доступног алгоритма за прорачун индекса равности и стандардних програма за пројектовање путева. У оквиру рада биће обрађен део једне градске саобраћајнице снимљен мобилним мапинг системом.

2. LiDAR технологија и подужна равност коловоза

2.1. Индекс подужне равности IRI International Roughness Index

1982. године у Бразилу спроведен је IRRE (International Road Roughness Experiment) експеримент чији је циљ био успостављање корелације и стандарда калибрације за мерења равности коловоза различитим инструментима. Резултат експеримента био је индекс подужне равности *IRI* (*International Roughness Index*) [5]. Овај индекс данас представља један од најраспрострањенијих показатеља стања коловоза, који је нашао своју примену у системима за управљање одржавањем путева, као и за оцену квалитета изведених радова.

Прорачун индекса *IRI* је заснован на математичком моделу полуосовине (четвртина возила, концепт златног аутомобила „*Golden car*“) и представља одзив таквог модела на подужне неравнине при брзини од 80 km/h [6]. Сумирано вертикално померање вешања модела (узроковано променама у висини подужног профила - неравнинама у трајекторији точка) четвртине возила подељено са пређеном дужином је индекс равности (m/km, mm/m, in/mi).



Слика 1. *Концепт златног аутомобила (четвртина возила) и прорачун индекса равности [6]*

Према смерницама за спровођење и калибрацију мерења равности дефинисане су четири класе тачности уређаја и метода за мерење равности [7].

- Класа 1: прецизни профилометри - Представљају најпрецизније уређаје за мерење равности. Тачност ових инструмената је 0.5 mm у погледу висинске разлике, и користе се за калибрацију осталих уређаја и валидацију резултата
- Класа 2: друге врсте профилометара - У ову класу спадају све остале врсте уређаја за мерење профила као основе за директан прорачун *IRI*-а, али који не задовољавају тачност дефинисану класом 1.

- Класа 3: процена помоћу корелационих једначина - Ова класа обухвата све уређаје за мерење равности који генеришу нумеричке вредности које се могу корелисати са *IRI*.
- Класа 4: субјективне и некалибрисане методе мерења - Овакве методе ослањају се на визуелне инспекције вожњом преко опитне деонице или уређаји 3. класе без калибрације.

Мерење равности, данас, се најчешће врши инерцијалним профилометрима, који спадају у класу 1. Основне компоненте профилометара су акцелометар (за утврђивање референтне висине тј. помоћу њега се елеминишу грешке проузроковане вертикалним померањем возила током мерења), ласерски сензор (за мерење растојања од референтне равни) и одометар (за прецизно мерење подужног растојања). Овај уређај има могућност снимања само једне траке у пролазу, брзином од ~ 30 – 120 km/h, при чему се аутоматски прорачунава индекс равности. Овај распон брзина је пожељан за аутопутеве (и ванградске брзе и магистралне путеве) где се захтевају веће брзине, а саобраћајни ток је континуалан. У условима градских саобраћајница, где је саобраћајни ток испрекидан површинским раскрсницама (семафоризованим и несемафоризованим), пешачким прелазима, аутобуским стајалиштима и сл., скоро да не постоји могућност кретања константном брзином већом од 30 km/h. Поред тога, чињеница да је могуће снимити само једну траку значајно повећава време потребно за снимање и чини овај систем практично неупотребљивим за снимање равности коловоза градских саобраћајница.

2.2. LiDAR (Light Detection And Ranging)

LiDAR технологија је модеран метод за генерисање прецизних и директно георефернцираних просторних информација о површинским карактеристикама објеката. Просторни подаци генеришу се помоћу ласерског сензора који емитује интензивне снопове светлости и мери време потребно да сензор детектује рефлексију, а затим се на основу тога израчунава растојање до објекта [8]. *LiDAR* инструменти емитују око 500,000 импулса у секунди, тако да дају велики обим података. Нарочито су погодни системи са ротирајућим ласером који омогућавају детекцију тачака у свих 360° око осе ротације инструмента.

Ова технологија, осим ласерског сензора, користи и ГПС (Глобални Систем Позиционирања) и инерцијални навигациони систем *ИНС* који омогућавају позиционирање система у координатном систему. *LiDAR* је активни систем даљинске детекције (системи који сами емитују сигнале које очитавају) и омогућава снимање и ноћу [8]. Последњих година дошло је до значајног развоја ласерских система снимања, а новији системи омогућавају снимање и до неколико милиона тачака у секунди.

Резултат мерења *LiDAR*-ом је сет тачака које су дефинисане x, y и z координатама и назива се облак тачака. Снимање *LiDAR*-ом се може спровести на више начина:

- *TLS (Terrestrial LiDAR Scanning)* - терестички или статични систем снимања који омогућава велику тачност, али не и брзину снимања као остале две методе.
- *MLS (Mobile LiDAR Scanning)* - Мобилно скенирање помоћу *LiDAR*-а се обавља са *LiDAR*-ом који је монтиран на возило. Овакви системи омогућавају брзо, ефикасно и веома прецизно прикупљање велике количине података.
- *ALS (Aero LiDAR Scanning)* – ласерски скенер монтиран на летелицу (дрон или слично). За разлику од MLS овај начин снимања обухвата шири спектар мерења, јер ласер сеже ван граница коридора кретања возила. Због удаљености од објеката, овај начин снимања даје мању густину тачака и нешто лошију прецизност мерења. Овакви системи су нашли широку употребу у ваздушном саобраћају за детекцију препрека у условима ниске видљивости.

MMS (Mobile Mapping System) представља систем прикупљања 3D података о околини који осим *LiDAR* ласера и осталих компоненти MLS-а, има и сферне камере које снимају слике високе резолуције. Хардвер мобилног мапинг система за прикупљање података приказан је на слици 2. Мобил мапинг систем омогућава „преклапање“ облака тачака и фотографија. Свака тачка облака је дефинисана x, y и z координатом а позиција сваке фотографије је дефинисана њеним просторним координатама (приликом снимања се креира фајл са подацима о називу фотографије, GPS, времену, координатама и параметрима ротације камере). Фотографије се, поред тога што се користе за преглед подручја и анализу терена, користе и за бојење облака и на тај начин се добија реалистичан модел података.

Овакав систем, чијом применом се добија велики сет података, нашао је своју примену у свим инжењерским струкама. У последњих неколико година препозната је употреба ових система у процени стања коловоза и интензивно се ради на истраживању нових метода евалуације стања коловоза из облака тачака, али и другим анализама путне инфраструктуре.

Доказ применљивости ове технологије је и све чешћа појава комерцијализованих система који су намењени снимању стања коловоза помоћу *LiDAR*-а, као што је *XenoTrack* фирме *Xenomatix*, који, осим специјализованих *LiDAR* скенера, нуде и софтвере за прорачун равности, програме за детекцију, колотрага, ударних рупа и осталих оштећења коловоза [9].

Пун потенцијал овако обимних података у анализи стања коловоза је и даље недовољно истражен. Истраживања која су се бавила могућношћу употребе облака тачака за прорачун равности концентрисала су се првенствено на обраду облака тачака како би се временски ефикасно и аутоматизовано одстраниле непотребне тачке (аутомобили, људи, дрвећа, шумови итд.), па је тако сам процес аутоматизован рачунарским алгоритмима који користе различите начине екстракције тачака на површини коловоза на основу класификације.

Класификација облака тачака се ради у специјализованим софтверима, при чему се користе унапред дефинисане „рутине“. Најчешће рутине које се користе за класификацију облака јесу: класификација шума (exo), аутомобила и људи, класификација чврстих површина, вегетације, зграда, стубова и жица. Поред аутоматске класификације, користи се и мануелна класификација за финије одвајање тачака по групама (класама). За потребе коришћења облака тачака у инспекцији коловоза, довољно је радити класификацију тачака коловоза (HardSurface) и „чишћење“ облака од аутомобила и шума, при чему је могуће користити широк спектар аутоматизованих софтвера који су доступни за коришћење и бесплатни, као што је нпр. „*CloudCompare*“ [10]. Развојем софтвера за обраду података, могуће је јако брзо и ефикасно припремити облак тачака за анализу стања коловоза. На обрађеним подацима облака тачака могу се вршити различити прорачуни, како они везани за индекс равности, тако и нешто компликованији поступци детекције оштећења помоћу неуронских мрежа.

Употребу облака тачака добијених *UAS SFM* (Unmanned Arial System, Structure From Motion) методом фотограметријског снимања беспилотном летелицом испитали су *Erzhuo* и ост. [11] у раду из 2022 год. За обраду података користили су програм „*Cloud Compare*“, профиле коловоза у трајекторијама точкова екстраховали су коришћењем софтвера *ArcGIS* pro, а за прорачун равности користили су *ProVAL* рачунарски програм. Координате тачака и висине генерисани су на интервалима од 0.3 m према *ASTM* (American Society for Testing and Materials) стандарду ASTM E1926 – 08 (2021). Висине су добијене помоћу *DEM*-а (Digital Elevation Model) интерполације на одређеним размацима. За потребе прорачуна користили су *.erd* датотеке. Одељак заглавља садржи основне информације о подацима (нпр. узорци/канал, интервал, формат складиштења, јединица, итд.), док одељак са подацима чува све висине профила. Спроведени експеримент је показао да тамне површине и површине без текстуре (углачан асфалт) могу довести до значајних грешака у погледу кота тачака и рупа у подацима. За валидацију резултата користили су мерења терестичким *LiDAR* скенирањем која спадају у 1. класу тачности. Вредности IRI добијене на основу ALS снимања су веће у поређењу са резултатима добијених помоћу TLS података (углавном унутар 3 m/km). По раније наведеној класификацији, овај метод снимања равности спада у класу 4.

Ashraf и ост. [12] су користили податке о висинама добијене MLS снимањем и закључили да се прорачун равности своди на корелацију индекса равности и стандардне девијације висина коловоза, што значи да би ови поступци спадали у класу 3. У оквиру рада обрађена је деоница пута у дужини од 2 km. Прорачун равности извршен је помоћу две корелационе једначине. Прва је предложена од стране Permanent International Association of Road Congresses—World Road Association (PIARC) [13], а друга је дата у оквиру рада [14]. Вредности индекса равности у овом раду су даље корелисане са *PSR* (Present Serviceability Rating) оценом садашње употребљивости. Недостатак је што није детаљније објашњено на који начин су очитане висине из облака тачака, као и што су добијене јако високе вредности индекса IRI које нису потврђене неком другом методом, чак ни визуелном инспекцијом.

Gao и ост. [2] су обрадили податке из облака тачака и добили прецизне податке о висинама тачака коловоза. Прорачун равности извршен је конвенционалним методама. Мерења су извршена за 6 трајекторија на двотрачном путу (леви и десни колотраг и средина траке). Након експеримента закључено је да значајан утицај на разлике у резултатима има дужина одсека (дужина поддеонице за коју се рачуна вредност индекса). Препоручили су да се дужина поддеонице ограничи на 30 m како би се осигурала поузданост резултата.

У раду [15] Di Benedetto и ост. су предложили методологију која се спроводи у неколико корака. Први корак је обрада облака тачака полуаутоматизованим методама, други корак је моделовање терена у кривини посебним алгоритмима тако да мрежни *DEM* (Digital Elevation Model) прати геометрију пута, а трећи корак је анализа тих података. У раду је извршена врло детаљна анализа података, којом је осим индекса равности обрађена и анализа аутоматске детекције попречних нагиба, интензитета колотрага и анализа кретања воде по коловозу.

Очигледно да овакав сет података нуди могућност за ширу анализу стања коловоза, *Faisal* и *Gargoum* [16] су предложили методу аутоматског детектовања колотрага и њиховог интензитета, из података добијених *MLS*, помоћу разлика у висини између две равни, идеалне равни (са одговарајућим попречним нагибом) добијене *RANSAC* (RANdom SAmple Consensus) методом и реалне равни снимљене на терену. Недостатак ове методе је што она није у могућности да разликује друге неравнине од колотрага, нпр. ударне рупе, локалне депресије и сл.

Ипак модерне методе које на основу фотографија разликују оштећења коловоза користећи неуронске мреже показале су се ефективне. *Barral* и ост. [17] су обрадили детекцију оштећења помоћу неуронских мрежа и сферних фотографија забележених системом *Ladybug*, а *Qiao Dong* са сарадницима [18] је доказао да 2D фотографије сачињене од 3D облака тачака имају већу тачност детекције оштећења помоћу методе „клизајућег прозора“ (метода представљена у овом раду, која комбинује податке из облака тачака и фотографија) него остале методе као што је *YOLOv5* алгоритам (You Only Look Once) који користи само фотографије за детекцију оштећења.

У оквиру овог рада предложена је методологија за процену индекса равности коловоза која је једноставна и блиска пројектантима саобраћајница. Метода се своди на полуаутоматску екстракцију података из облака тачака, креирање подужног профила пута помоћу мреже густих троуглова (TIN), а затим прорачун индекса равности помоћу јавно доступног алгоритма.

3. Експеримент

3.1. Опитна деоница

За потребе овог експеримента снимљена је Радничка улица, која је једна од оптерећенијих саобраћајница у Београду (слика 5). Овом деоницом саобраћа 10 линија јавног градског превоза, од којих неке имају и до десет полазака по сату, те се може закључити да саобраћајно оптерећење на овој деоници спада у групу врло тешког оптерећења.

Опитна деоница је дужине ~200m, а ширина коловоза је променљива и креће се од 9.5 m до 13 m (три возне траке). На опитној деоници налазе се аутобуска стајалишта, и семафоризована раскрсница. Коловозна конструкција на деоници је флексибилна.

3.2. Опрема коришћена за снимање и процес снимања

За потребе снимања коришћен је мобилни систем мапирања произвођача *Teledyne Optech Maverick* [19] (интегрисан систем за мобилно мапирање), који се састоји од:

- ИНС NovAtel система (намењеног за мерење оријентационих параметара за ласер и сферну камеру у сваком тренутку),
- 3D LiDAR сензора произвођача Velodyne (који омогућава снимање 700,000 тачака у секунди, са апсолутном прецизношћу мерења од ± 1 cm),
- Сферне камере Ladybug 5+ (за снимање сферних фотографија високе резолуције од 30 MP, као што је приказано на слици 2) и
- ГПС/ГНСС антене (задужене за одређивање позиције возила у датом тренутку).

Предности оваквог система су његове димензије, што му омогућава монтирање на све врсте возила. За потребе снимања опитне деонице, *ММС* је монтиран на аутомобил и повезан са преносном батеријом (слика 2).

Пре изласка на терен и снимања *ММС-ом* потребно је на терену поставити оријентационе тачке, које се користе за међусобно уклапање трајекторија и позиционирање облака тачака у координатни систем. Оријентационе тачке су маркери постављени на коловозу, на унапред предвиђеним местима, чија је позиција снимљена *ГПС* системом. Оријентационе тачке омогућавају бољу апсолутну тачност.

Поступак самог снимања почиње монтирањем система на возило којим се врши снимање. Пре почетка снимања потребно је калибрисати инструмент како би се припремио за рад. Калибрација инструмента је обавезна када се он први пут пусти у рад, а препоручљива је да се изводи пре сваког снимања 5-10 минута динамичном вожњом. Динамичка вожња стимулише инерцијални систем инструмента како би се поравнали сензори, односно како би се добила тачнија позиција инструмента. Снимање је вршено у више пролаза због геометрије предметне саобраћајнице. На саобраћајницама које имају три или више трака по смеру, пракса је да се снимање врши крајњом левом и крајњом десном возном траком, што омогућава тачније податке. Такође више пролаза омогућује уклањање „сенки“ у облаку тачака (простор заклоњен објектом, а у овом случају то су аутомобили и аутобуси) и већу густину тачака.

Слика 2. *Компоненте система, систем монтиран на возило, облак тачака и сферна фотографија*

Брзина при снимању је била променљива због семафоризоване раскрснице и саобраћајне гужве за време снимања. Максимална брзина при снимању била је 50 km/h, што је и максимална дозвољена брзина на градским саобраћајницама.

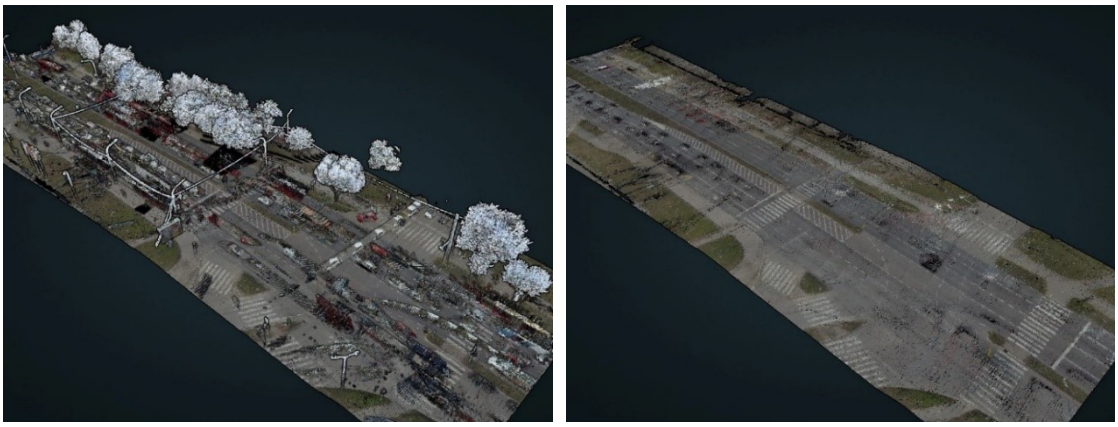
3.3. Обрада облака тачака

Обрада облака се ради у одговарајућим софтверима и подразумева обраду снимљених трајекторија, њихово међусобно релативно позиционирање између пролаза и на крају апсолутно позиционирање у координатном систему. Обрада се обично врши у пројекцији *UTM34* (што је званична пројекција за Републику Србију), а у зависности од захтева пројекта, облак се може трансформисати у другу одговарајућу пројекцију.

Да би се користио облак за анализу стања конструкције, читав облак је класификован. Одвајање облака по класама подразумева класификацију тачака по одређеним карактеристикама (објекти, вегетација, чврст материјал, шум, аутомобили, људи). Класификација облака се ради у одговарајућим софтверима при чему се користе већ предефинисани параметри за класификацију који се мењају у зависности од конфигурације локације за коју се ради анализа. Да би се урадила добра класификација података потребно је детаљно дефинисати параметре класификације како би алгоритам одрадио што бољу аутоматску класификацију и да би се што мање преправљали подаци у мануелној класификацији.

За подручје које је приказано у раду, урађена је аутоматска класификација облака, при чему је фокус био на класификацији тачака чврстог материјала (класификоване су тачке које припадају коловозној конструкцији). За добијање што релевантнијих података, урађена је мануелна екстракција ивичне геометрије коловозне конструкције (ивица асфалта и висина ивичњака). Ивична геометрија се уз помоћ одговарајућих софтвера може исцртати и аутоматском екстракцијом, али због грешака које софтвери знају да праве приликом овакве екстракције података одлучено је да се екстракција врши мануелно. Облак тачака пре и после класификације приказан је на слици 3.

За анализу стања конструкције нису коришћене све тачке из облака тачака коловозне конструкције, већ је аутоматском екстракцијом исцртана геометрија у правилном гриду 0.1mX0.1m. Одлучено је да се користи овакав сет података због редукције количине података које је потребно обрадити за анализу, а да се притом не наруши квалитет података.

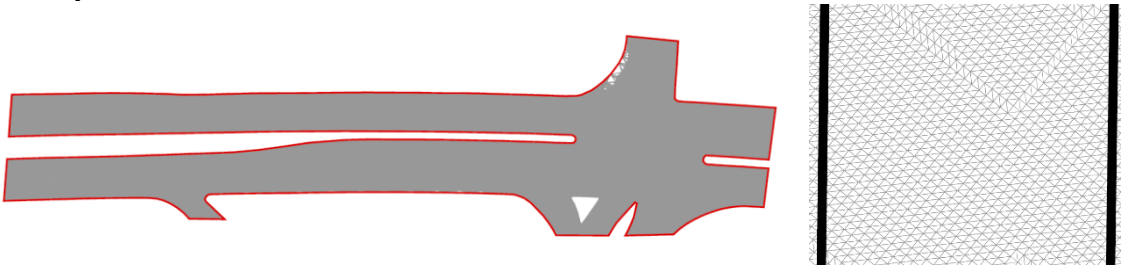


Слика 3. *Облак тачака пре (лево) и после класификације (десно)*

3.4. Прорачун индекса подужне равности

Помоћу тачака генерисаних из облака тачака (448,117 тачака), направљена је густа *TIN* (Triangular Irregular Network) мрежа (сачињена од 896,515 троуглова) програмом *CIVIL 3D [20]*. TIN представља дигитални модел терена представљен помоћу мреже неправилних непреклапајућих троуглова. Претходни радови на тему мерења индекса равности коловоза су интерполацијом долазили до висинских података на једнаким размацима (обично 30 cm према *ASTM* стандардима). Оваква метода показала се као неефикасна са аспекта утрошка времена за прорачун (интерполацију), односно екстракцију података о висини.

У представљеној методи за добијање података о висинама коришћен је програм *GCM++* [21]. Дефинисане су осовине у трајекторијама левог и десног точка за сваку траку (на међусобном размаку од 1.6 m). Програмом је очитан подужни пресек за све осовине, тако што су висине забележене на различитим подужним растојањима, јер је очитан сваки пресек осовине са странама троуглова. На дужини од ~180m очитано је око 5000 пресека. Ситуациони план и једна возна трака са TIN мрежом приказани су на слици 4.



Слика 4. *TIN високе густине*

Датотеке добијене оваквом методом чувају се у.*tcl* формату. За прорачун је било потребно направити *.csv* датотеке, у форми две колоне у којој једна представља раздаљину у метрима *Dist (m)*, а у другој колони се налазе очитане висине, такође у метрима *Elev(m)*.

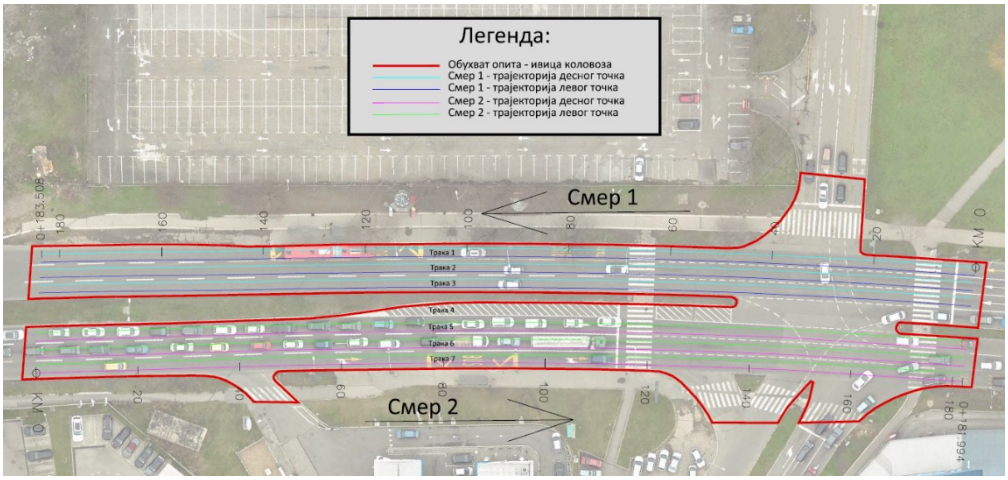
За прорачун индекса *IRI* коришћен је програм, који је дао тим истраживача из Чешке у свом раду из 2021. године [22], а који врши прорачун на бази просторних података из облака тачака добијених *LiDAR*-ом или сличном технологијом. „Алат“ је написан у програмском језику *Python* и може се користити у оквиру *Google Colab Cloud Computing [23]* решења без познавања самог програмског језика. Алат је базиран на нешто старијем, али сличном софтверском решењу *ProVAL* које има широку примену, али представља решење затвореног типа са ограниченим могућностима подешавања самог прорачуна.

За разлику од *ProVAL-a* који за улазне податке најчешће користи затворене фајлове (.pvp) који се експортују директно са мерних уређаја (инерцијални профилометри, статички – ходајући профилометри и *RTRRMS (Response Type Road Roughness Measuring System)* уређаји), овај програм користи датотеке типа .csv које се састоје од низа просторних тачака датих по стационажама, што суштински чини подужни профил по замишљеној осовини. На наведеном подужном профилу алат симулира кретање претходно дефинисане полуосовине (четвртине возила) са карактеристичним параметрима златног аутомобила и даје индекс равности на поддеоницама једнаких дужина (типично 20 или 25 метара).

Аутори су у свом раду [22] показали да је алат једнаке тачности, као и решења у широкој примени, те је због једноставне примене (али и предности у виду могућности прорачуна на подацима мереним на различитим подужним растојањима) управо овај програм коришћен за потребе овог експеримента.

3.5. Резултати

На слици 5 приказан је ситуациони план саобраћајнице на којој је извршено снимање равности, са легендом и стационажама.



Слика 5. *Ситуациони приказ нумерисаних трака и испитаних трајекторија точка*

Обрађено је 6 трака и обе трајекторије точка, извршено је укупно 12 прорачуна. Вредности IRI представљене су на пресецима од 20 m, осим прве и последње вредности које су на размацима од 10 m. Ове раздаљине су усвојене да би се пружио увид у локална оштећења.

Компјутерски „алат“ коришћен за прорачун индекса равности, осим бројчаних вредности, резултат представља и графички исцртавајући подужни профил и дијаграм вредности IRI по стационажама, који су дати за сваку траку у смеру. Такође програм рендерује и видео запис који симулира кретање полуосовине по измереном профилу при стандардној брзини за модел прорачуна од 80 km/h.

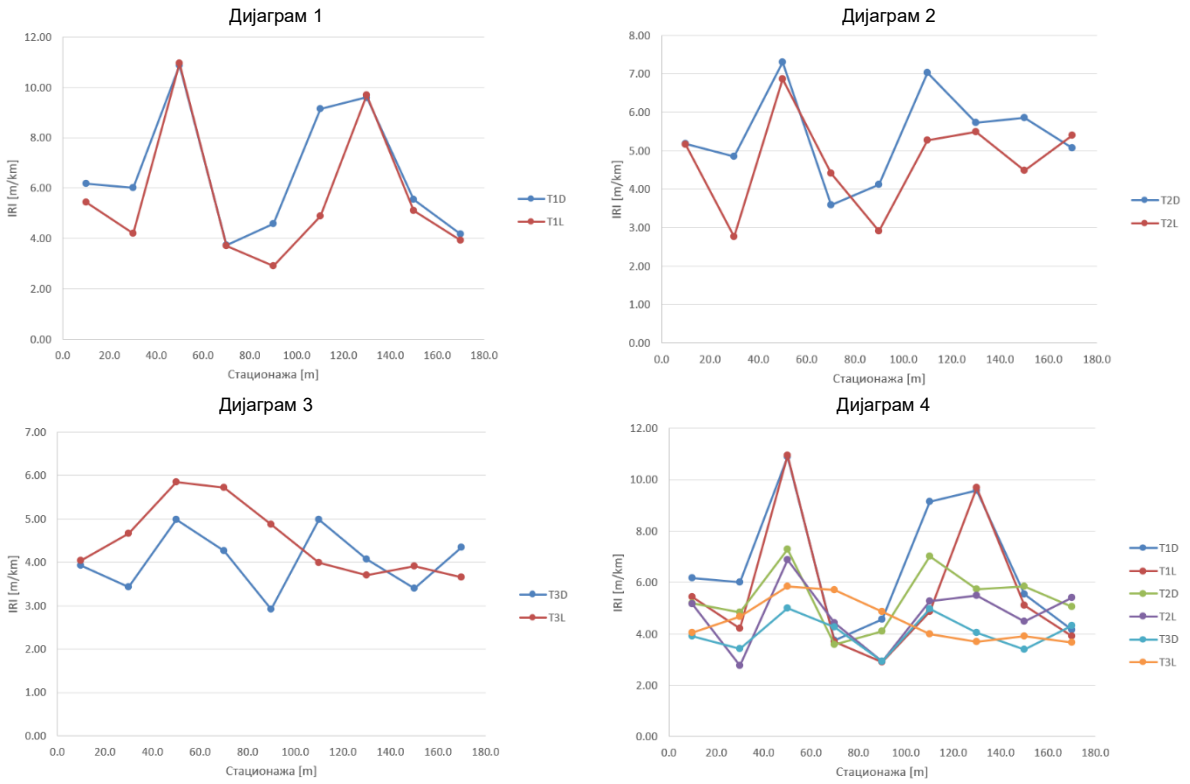
3.5.1 Смер 1

За смер 1, усвојен је смер од центра града према Оструженици односно обилазници око Београда.

У табели 1 приказане су нумеричке вредности индекса подужне равности по тракама за десни и леви колотраг, а на слици 6 дијаграми са вредностима IRI по тракама (дијаграм 1 – трака 1, дијаграм 2 – трака 2, дијаграм 3 – трака 3) и укупно за све трајекторије.

Табела 1. *Вредности индекса равности за смер 1*

Стац. (m)	IRI (m/km)					
	T1D	T1L	T2D	T2L	T3D	T3L
10.0	6.16	5.43	5.18	5.16	3.92	4.04
30.0	6.01	4.20	4.84	2.77	3.42	4.66
50.0	10.87	10.94	7.30	6.87	4.99	5.84
70.0	3.74	3.70	3.59	4.42	4.26	5.71
90.0	4.58	2.90	4.11	2.92	2.92	4.87
110.0	9.15	4.87	7.02	5.27	4.98	3.99
130.0	9.59	9.68	5.72	5.50	4.06	3.70
150.0	5.54	5.12	5.85	4.49	3.40	3.91
170.0	4.16	3.91	5.07	5.41	4.33	3.66



Слика 6. *Дијаграми вредности IRI за леву и десну трајекторију точка у смеру 1*

Највећа вредност индекса равности забележена је у траци 1 у левом колотрагу и износи 10.94 m/km на педесетом метру осовине, а најмања вредност индекса равности *IRI* = 2.77 m/km забележена је у траци 2 у левом колотрагу.

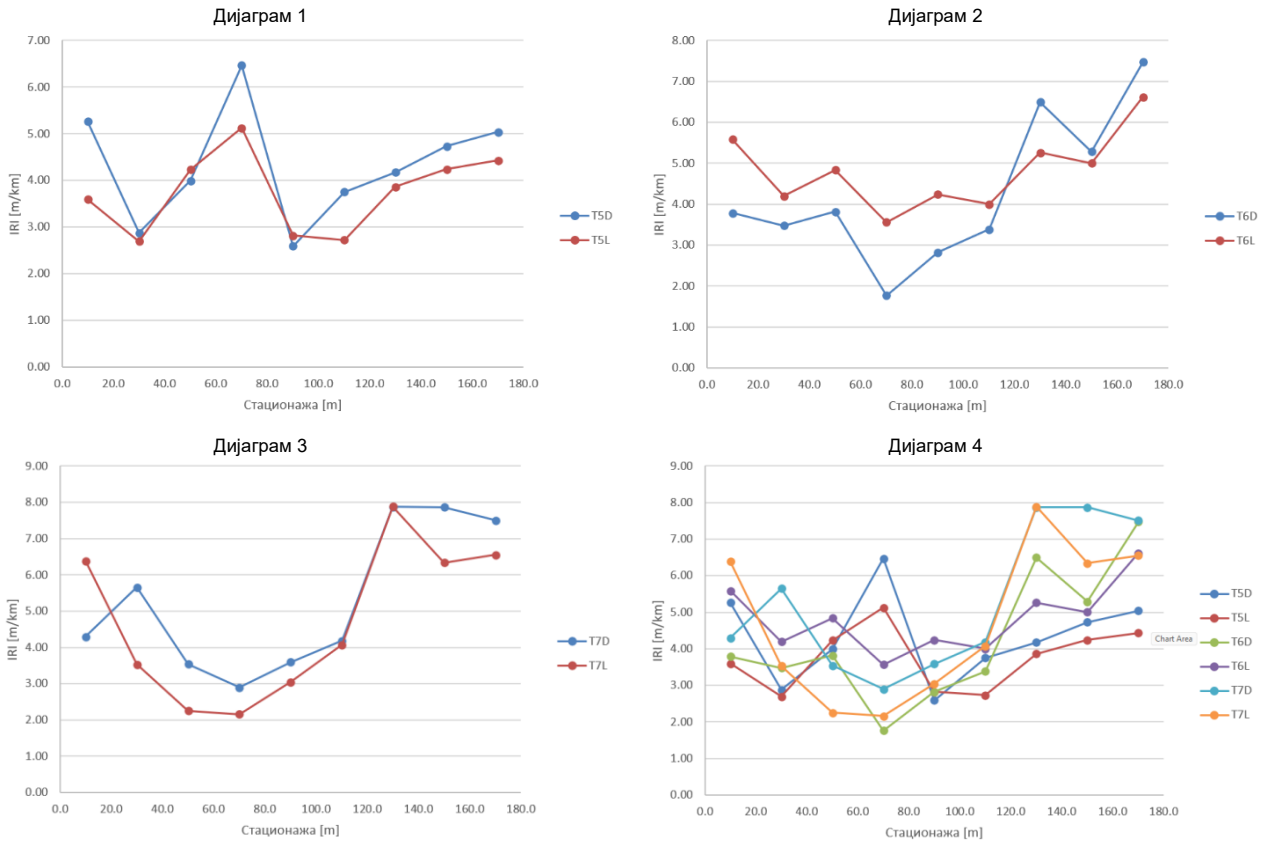
3.5.2. Смер 2

Смер 2 је од Остружнице према према центру града, односно према новом мосту на Ади.

У табели 2 приказане су нумеричке вредности индекса подужне равности по тракама за леви и десни колотраг, а на слици 16 дијаграми са вредностима IRI по тракама (Дијаграм 1 – трака 5, дијаграм 2 – трака 6, дијаграм) и укупно за све трајекторије.

Табела 2. *Вредности индекса равности за смер 2*

Стац.(m)	IRI (m/km)					
	T5D	T5L	T6D	T6L	T7D	T7L
10.0	5.26	3.60	3.79	5.59	4.30	6.38
30.0	2.88	2.69	3.47	4.20	5.65	3.53
50.0	3.99	4.23	3.81	4.84	3.54	2.25
70.0	6.47	5.13	1.77	3.56	2.89	2.16
90.0	2.59	2.82	2.82	4.24	3.59	3.05
110.0	3.76	2.73	3.38	4.00	4.19	4.07
130.0	4.18	3.86	6.50	5.26	7.87	7.89
150.0	4.73	4.24	5.29	5.00	7.87	6.34
170.0	5.04	4.43	7.47	6.62	7.51	6.55



Слика 7. *Дијаграми вредности IRI за леву и десну трајекторију точка у возној траци 5*

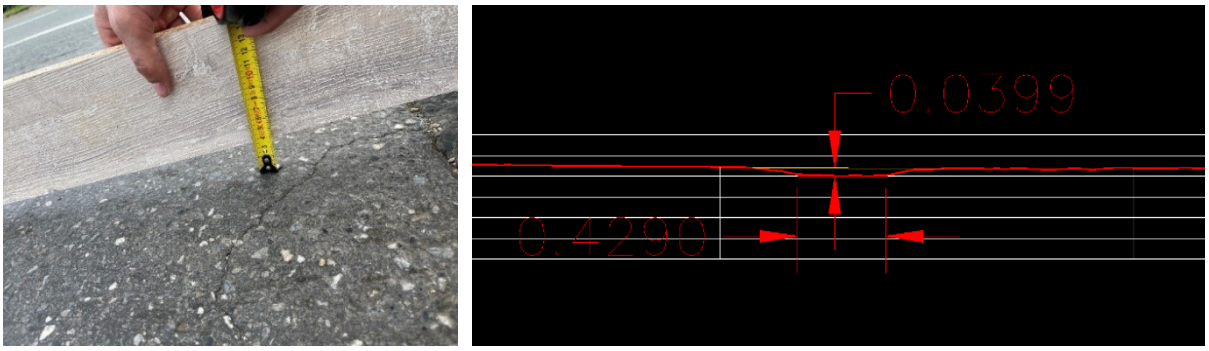
Највећа вредност индекса равности забележена је у траци 7 у левом колотрагу точка и износи 7.89 m/km на стационажи 130 m, најмања вредност равности IRI = 1.77 m/km забележена је у траци 6 у десном колотрагу.

4. Дискусија резултата

На основу резултата снимања обраде добијених података, могу се извести следећи закључци

- Прва карактеристична локација где долази до повећања вредности индекса равности, у смеру 1 је закрпа на стационажи km 0+050,00, односно на стационажи km 0+130,00 у смеру 2.
- Закрпе су оштећења настала услед интервенција на инсталацијама које се налазе испод коловоза. За такве интервенције на коловозу секу се асфалтни слојеви а затим се копају уски канали за инсталације. У таквим условима није могуће извршити адекватно збијање носећих слојева, и често долази до депресије у периоду експлоатације.
- Друга карактеристична локација где долази до повећања вредности IRI је аутобуско стајалиште које се налази на потезу од стационаже km 0+110,00 до km 0+140,00 у смеру 1.
- До оштећења на аутобуским стајалиштима долази због дужег задржавање тешког оптерећења, услед чега настаје трајна деформација асфалтних слојева. Колотрази, као попречна неравност, по правилу, немају утицај на индекс подужне равности. Ипак у случајевима овако интензивних колотрага, јавља се и значајан утицај на подужну равност.
- Очигледна је разлика вредности индекса равности по тракама, што је директна последица неједнаког саобраћајног оптерећења. Разлике су уочљиве и на закрпи - веће саобраћајне оптерећење узрокује оштећења већег интезитета.
- За време експеримента нисмо поседовали потребну опрему за валидацију резултата вредности индекса. Једина провера коју смо могли да спроведемо била је провера тачности измереног подужног профила на некој од карактеристичних локација.
- Уз помоћ програма GCM++ нацртан је подужни профил без вертикалног увеличавања како би се могла сагледати равност коловоза у реалним димензијама. За проверу тачности представе терена измерен је интензитет оштећења где се јавља највећа вредност индекса равности. Резултати мерења у *CAD* (*Computer Aided Design*) окружењу и *in-situ* мерењем (на терену) су били скоро

идентични, чак и са апроксимацијом површине коловоза помоћу *TIN*-а направљеног од тачака на растојању од 10 cm.



Слика 8. *Дубина закрпе на терену и у CAD окружењу*

- Измерене вредности програмом и „in-situ“ су практично идентичне (евентуална разлика је у mm).
- Вредности IRI указују да се ради о старијем коловозу са неравностима (мањим или већим зависи од траке) што одговара визуелној инспекцији пута.

5. Закључак

У оквиру овог рада приказано је снимање индекса равности коловоза у вишетрачној улици у Београду. Прорачун равности коловоза извршен је на основу просторних података из облака тачака добијених мобилним LiDAR скенирањем. Подаци су прикупљени мобилним мапинг системом који, осим LiDAR скенера, поседује и сет камера које снимају сферне фотографије. Ове фотографије показале су се корисне за иницијалну, визуелну, валидацију резултата. Треба напоменути да иако фотографије нису потребне за мерење равности, корисне су за боље схватање резултата и узрока неравности коловоза.

Методологија експеримента се може представити у три најважнија корака:

1) Припреме за снимање и снимање предметне деонице системом монтираним на аутомобил
2) Обрада добијених података, укључујући класификацију облака тачака тако да се изолују тачке коловоза
3) Прорачун индекса равности помоћу компјутерског програма.

Резултати су показали да су највеће вредности индекса неравности измерене у крајњим десним тракама. Такви резултати могу се оправдати чињеницом да се крајњим десним тракама крећу возила јавног градског превоза и могу се очекивати веће неравности и оштећења него у осталим тракама, а нарочито у зонама аутобуских стајалишта, где услед дужег задржавања аутобуса на флексибилној коловозној конструкцији долази до појаве колотрага високог интезитета и подужних неравнина.

Развој LiDAR-а доводи до све веће тачности података. Мана ове методе је цена опреме за снимање, али се очекује се да ће компоненте бити све приступачније због убрзаног развоја технологије.

Ова метода се показала као веома прецизна, иако систем коришћен за снимање није намењен снимању стања коловоза. Резултати добијени овом методом имају високу повезаност са визуелном инспекцијом. Методологија представљена у овом раду своју улогу може наћи у процени индекса равности на нивоу мреже градских саобраћајница. Овај поступак омогућава коришћење сета података који има широку употребу и осим мерења равности подаци се могу користити за бројне инспекције пута и околине.

У даљем раду било би пожељно извршити експеримент на специфичној деоници на којој је могуће користити конвенционалне методе мерења за валидацију тачности. Испитивање могућности мерења попречне равности помоћу података добијеним MLS-ом такође може бити тема даљег рада.

Захвале

Катедра за путеве и аеродроме, Грађевински факултет, Универзитет у Београду за уступање програма GCM++.

Д.О.О. Геопут за уступање података добијених снимањем мобилним мапинг системом и софтвера за обраду података, као и на срдачној сарадњи.

Литература

[1] Delanne, Y. (1994). The influence of pavement evenness and macrotexture on fuel consumption. *ASTM Spec. Tech. Publ.*, *1225*, 240.

[2] Gao, Q.; Fan, L.; Wei, S.; Li, Y.; Du, Y.; Liu, C. (2023) Differences Evaluation of Pavement Roughness Distribution Based on Light Detection and Ranging Data. Appl. Sci. 2023, 13, 8080. https://doi.org/10.3390/app13148080.

[3] Референтни систем града Београда, преузет са сајта https://sprojekt.mycpanel.rs/knjiga-0/ (Приступљено 19.03.2024.)

[4] Сајт фирме Polosoftech, LiDAR for Highway Road Construction https://www.polosoftech.com/industries/lidar-highway-road-corridor/ (Приступљено 19.03.2024.)

[5] Sayers, M.W., Gillespie, T.D., Queiroz, C.A.V. 1986. INTERNATIONAL ROAD ROUGHNESS EXPERIMENT: A BASIS FOR ESTABLISHING A STANDARD SCALE FOR ROAD ROUGHNESS MEASUREMENTS. Transportation Research Record. 76-85.

[6] Múčka, P. (2017) International Roughness Index specifications around the world, Road Materials and Pavement Design, 18:4, 929-965,6.

[7] Michael W. Sayers, Thomas D. Gillespie and William D.O. Paterson (1986). Guidelines for Conducting and Calibrating Road Roughness Measurements, World Bank Technical paper number 46.

[8] National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) Coastal Services Center. 2012. “Lidar 101: An Introduction to Lidar Technology, Data, and Applications.” Revised. Charleston, SC: NOAA Coastal Services Center.

[9] Сајт компаније XenomatiX https://xenomatix.com/our-solutions/road-surveying/ (Приступљено 12.03.2024)

[10] Cloud Compare, 3D point cloud and mesh processing software (https://www.cloudcompare.org).

[11] Erzhuo C., Chase S., Fatih S., (2022). Assesing The Feasibility of Utilizing a UAS-Based Point Cloud in Pavement Smoothness/Roughness Measurement, Pacific Northwest Transportation Consortium (PacTrans) USDOT University Transportation Center for Federal Region 10 University of Washington More Hall 112, Box 352700 Seattle, WA 98195-2700

[12] Ashraf, F., Rabah, M., Ghanem, E. (2023). IRI Analysis of Paved Road using MLS data. Port-Said Engineering Research Journal. 10.21608/pserj.2023.187914.1215.

[13] Schmidt, B. (2001). EVEN Project: Experiment to Compare and Harmonize Methods for Assessment of Longitudinal and Transverse Evenness of Pavement. Transportation Research Record. 1764. 221-231. 10.3141/1764-23.

[14] Farias, M., Souza, R. (2009). Correlations and analyses of longitudinal roughness indices. Road Materials and Pavement Design. 10. 399-415. 10.1080/14680629.2009.9690202.

[15] Di Benedetto, A., Fiani, M., Petti, L. & Repetto, E. (2023). ROAD SURFACE MODELLING AND CHARACTERIZATION FROM TERRESTRIAL LIDAR DATA. The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. XLVIII-1/W1-2023. 113-120. 10.5194/isprs-archives-XLVIII-1-W1-2023-113-2023.

[16] Faisal, A., Gargoum S. (2023). Automated Assessment of Pavement Rutting Using Mobile LiDAR Data, Paper prepared for presentation at the Innovations in Pavement Management, Engineering and Technologies Session, TAC Conference & Exhibition, Ottawa, ON

[17] del Río-Barral, P., Soilán, M., González-Collazo S.M., Arias, P. (2022). "Pavement Crack Detection and Clustering via Region-Growing Algorithm from 3D MLS Point Clouds" *Remote Sensing* 14, no. 22: 5866. https://doi.org/10.3390/rs14225866

[18] Qiao D., Sike W., Xueqin C., Wanqi J., Ruiqi L., Gu X. (2023). Pavement crack detection based on point cloud data and data fusion. Philosophical Transactions of the Royal Society A. 381. 10.1098/rsta.2022.0165.

[19] Teledyne Optech 2019. Optech Maverick Mobile Mapping System User Manual, Ontario, Canada. www.teledyneoptech.com

[20] Civil 3D software application developed by Autodesk that is specifically designed for civil engineering and infrastructure design https://www.autodesk.com/products/civil-3d/features

[21] GCM++ (GAVRAN – Civil Modeller Rel.2013, or GCM2013), рачунарски програм за пројектовање путева, железница и аеродрома у CAD окружењу https://gcm-gavran.com/gavran-gcm-preview.htm

[22] Šroubek, F., Šorel, M. & Žák, J. (2022). Precise International Roughness Index Calculation. Int. J. Pavement Res. Technol. 15, 1413–1419 https://doi.org/10.1007/s42947-021-00097-z

[23] Bisong, E. (2019). Google Colaboratory. In: Building Machine Learning and Deep Learning Models on Google Cloud Platform. Apress, Berkeley, CA. https://doi.org/10.1007/978-1-4842-4470-8_7 (Приступљено 29.02.2024).

PRIMENA ASFALTNE MEŠAVINE AC DUOPAVE 16 ZA IZRADU KOLOVOZNIH ZASTORA

Tatić Uroš, dipl. inž. građ.,
INSTITUT ZA PUTEVE AD, BEOGRAD, u.tatic@highway.rs
Jovan Mladenović, dipl. inž. tehnol.
INSTITUT ZA PUTEVE AD, BEOGRAD, j.mladenovic@highway.rs

Rezime: *Veliki deo putne mreže svake zemlje čine saobraćajnice sa srednjim saobraćajnim opterećenjem za čije održavanje su potrebna značajna ulaganja. Ovo je podstaklo razvoj novih asfaltnih mešavina, poboljšanih performansi u pogledu trajnosti, održivosti i ekonomičnosti. Celulozna vlakna se koriste za poboljšanje svojstava asfaltnih kolovoznih zastora u Srbiji više od dvadeset godina, prvenstveno u mešavinama tipa skeletni mastiks asfalt (SMA) na saobraćajnicama sa teškim saobraćajnim opterećenjem. U radu su prikazana laboratorijska ispitivanja mogućnosti primene asfaltne mešavine AC DUOPAVE 16 sa dodatkom celuloznih vlakana za izradu jednoslojne asfaltne kolovozne konstrukcije koja ima ulogu nosećeg i habajućeg sloja na saobraćajnicama sa srednjim saobraćajnim opterećenjem. Ispitane su fizičko-mehaničke i dinamičke karakteristike asfaltne mešavine spravljene od drobljenog kamenog agregata eruptivnog porekla, bitumena B 50/70, uz dodatak celuloznih vlakana VIATOP premium. Prikazana laboratorijska ispitivanja su osnova za izradu probne deonice, kao i ispitivanje performansi i mogućnosti primene ove vrste asfaltnog zastora u našoj zemlji.*

Ključne reči: *asfaltne mešavine, celulozna vlakna, AC DUOPAVE 16, VIATOP premium, fizičko-mehaničke karakteristike, dinamičke karakteristike*

APPLICATION OF ASPHALT MIXTURE AC DUOPAVE 16 FOR THE CONSTRUCTION OF ROAD PAVEMENTS

Tatić Uroš, B.Sc. C.E.
HIGHWAY INSTITUTE JSC, BELGRADE, u.tatic@highway.rs
Jovan Mladenović, B.Sc. T.E.
HIGHWAY INSTITUTE JSC, BELGRADE, j.mladenovic@highway.rs

Abstract: *A significant portion of the road network in every country consists of roads with medium traffic loads, requiring significant investment for maintenance. This has prompted the development of new asphalt mixtures with improved performance in terms of durability, sustainability, and cost-effectiveness. Cellulose fibers have been used to enhance the properties of asphalt pavements in Serbia for more than twenty years, primarily in mixtures such as Stone Mastic Asphalt (SMA) on roads with heavy traffic loads. This paper presents laboratory testing on the feasibility of using the AC DUOPAVE 16 asphalt mixture with added cellulose fibers to create a single-layer asphalt pavement structure serving as both the base and wearing course on roads with medium traffic loads. The physical-mechanical and dynamic characteristics of the asphalt mixture, made from crushed stone aggregate of volcanic origin and bitumen B 50/70 with the addition of VIATOP premium cellulose fibers, were examined. The laboratory tests presented serve as the basis for constructing a test section and assessing the performance and feasibility of applying this type of asphalt pavement in our country.*

Keywords: *Asphalt mixtures, cellulose fibers, AC DUOPAVE 16, VIATOP premium, physical-mechanical characteristics, dynamic characteristics*

1. UVOD

Porast obima saobraćaja na lokalnim putevima uslovio je i razvoj novih tipova asfaltnih mešavina tipa AC DUOPAVE 16 koje objedinjuju funkciju nosećeg i habajućeg sloja kolovozne konstrukcije. Asfaltna mešavina tipa AC DUOPAVE 16 ugrađuje se u jednom sloju, čime se značajno skraćuje vreme izgradnje puta, kao i angažovanje radne snage i materijalnih resursa vezanih za izvođačke radove, što se pozitivno odražava ne samo na proces ugradnje asfalta već i na cenu kao i ekološki aspekt izgradnje puteva . Povoljni ekološki aspekt primene ovog koncepta ogleda se u smenjenju obima proizvedenog i transportovanog materijala kao i smanjenu količine generisanog otpada. Dodatni doprinos ekološkoj održivosti koncepta daje mogućnost primene do 30% struganog asfalta.

Pored navedenih ekonomskih i ekoloških prednosti mešavina ovog tipa pokazuje izuzetne karakteristike u pogledu fizičko-mehaničkih svojstava i trajnosti. Integracija funkcija dva sloja u jedan, povećava optornost fleksibilne kolovozne konstrukcije na zamor i smanjuje verovatnoću nastanka defekata koji potiču od nedovoljne međusobne prionljivosti asfaltnih slojeva [1]. Prisustvo celuloznih vlakana kao stabilizirajućeg aditiva omogućava učešće relativno visokog sadržaja veziva u mešavini sa niskim sadržajem šupljina, čime se obezbeđuje izražena otpornost asfaltne mešavine prema zamoru, dejstvu vode i oksidativnom starenju. Relativno veliki udeo krupnozrnog drobljenog agregata rezultuje i visokim vrednostima unutrašnjeg trenja mineralne mešavine, što se pozitivno odražava na mehaničku otpornost asfaltne mešavine [2].

Uslovi kvaliteta komponentalnih materijala, asfaltne mešavine i izvedenog sloja AC DUOPAVE 16 prikazani su u tabeli 1.

Tabela 1. *Preporučeni uslovi kvaliteta komponentalnih materijala, asfaltne mešavine i izvedenog sloja [3]*

Vezivo		
Tip i klasa		50/70
Minimalni udeo veziva	%(m/m)	5,2
Stabilizacioni aditiv (celulozna vlakna)	%(m/m)	≥ 0,2
Kameni agregat		
Odnos drobljenih površina		$C_{90/1}$; $C_{95/1}$; $C_{100/0}$
Otpornost na drobljenje		SZ_{22} / LA_{25}
Otpornost na poliranje		$PSV_{specified}(48)$
Minimalni sadržaj finih čestica 0/2 $E_{CS}35$	%	50
Asfaltna mešavina		
Minimalni sadržaj šupljina asfaltnog uzorka	%(v/v)	V_{min} 2,5
Maksimalni sadržaj šupljina asfaltnog uzorka	%(v/v)	V_{max} 3,0
Izvedeni sloj		
Tehnološka debljina asfaltnog sloja	cm	4,0 - 8,0
Stepen zbijenosti	%	98
Sadržaj šupljina	%(v/v)	5,0

Iskustva iz Nemačke i Poljske pokazala su da asfaltne mešavine ovog tipa imaju bolje fizičko-mehaničke i dinamičke karakteristike kao i ugradljivost u odnosu na standardnu mešavinu izvedenu u jednom sloju [2], [4]. Rad prikazuje ispitivanje asfaltne mešavine AC DUOPAVE 16 sa dodatkom vlakana, koja se koristi kao gornji noseći/habajući sloj kolovozne konstrukcije. Asfaltna mešavina je namenjena za saobraćajnice sa srednjim saobraćajnim opterećenjem.

2. EKSPERIMENTALNI DEO

Projektovanje i ispitivanje asfaltne mešavine AC DUOPAVE 16 obavljeno je prema važećim SRPS i SRPS EN standardima kao i preporukama J. RETTENMAIER & SÖHNE GmbH. Kao vezivo za ispitanu asfaltnu mešavinu, upotrebljen je putni bitumen B 50/70, u sastav mineralne mešavine ušli su kameno brašno karbonatnog sastava i drobljeni kameni agregat eruptivnog porekla. Asfaltnoj mešavini su u količini od 0,3 %(m/m) dodata i *VIATOP premium* celulozna vlakna za stabilizaciju mastiksa, prikazana na slici 1.

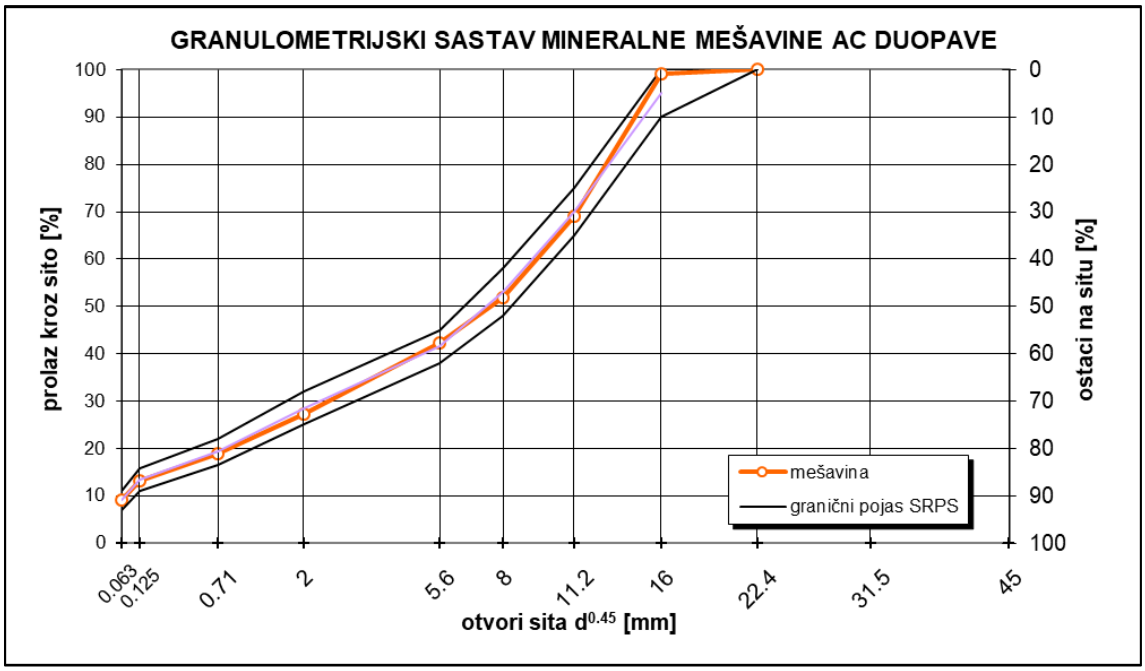
Slika 1. *VIATOP premium celulozna vlakna*

2.1. Optimalni sastav asfaltne mešavine

Granulometrijski sastav mineralne mešavine prikazan je u tabeli 2 i na slici 2.

Tabela 2. *Granulometrijski sastav mineralne mešavine AC DUOPAVE 16*

Veličina kvadratnog otvora sita, mm	**Projektovani granulometrijski sastav, % (m/m)**	**Granični pojas, % (m/m)** J. RETTENMAIER & SÖHNE GmbH
0.063	9,0	8 - 12
0.25	13,1	-
0.71	18,9	-
2	27,2	25 - 32
4	36,5	-
5.6	42,3	38 - 45
8	51,8	48 - 58
11.2	69,1	65 - 75
16	99,1	90 - 100
22.4	100	100



Slika 2. *Granulometrijski sastav mineralne mešavine AC DUOPAVE 16*

Optimalni sadržaj bitumena određen je na osvnovu sadržaja šupljina u asfaltnom uzorku i za datu asfaltnu mešavinu iznosi 5,0%(m/m).

2.2. Priprema uzoraka za laboratorijska ispitivanja

Za ispitivanje fizičko-mehaničkih i dinamičkih karakteristika asfaltne mešavine pripremljene su tri serije asfaltnih uzoraka sa različitim sadržajem bitumena prema odgovarajućim standardima: SRPS EN 12697-33:2022, SRPS EN 12697-34:2020 i SRPS EN 12697-35:2017.

2.3. Fizičko-mehanička svojstva asfaltne mešavine AC DUOPAVE 16

2.3.1. Zapreminske karakteristike asfaltne mešavine

Zapreminske karakteristike asfaltnih uzorka sa različitim sadržajem bitumena određene su prema SRPS EN 12697-8:2019, a rezultati ispitivanja prikazani su u tabeli 3.

Tabela 3. *Zapreminske karakteristike asfaltne mešavine*

Karakteristika	**Sadržaj bitumena u asfaltnoj mešavini, %(m/m)**			**Kriterijum** J. RETTENMAIER & SÖHNE GmbH
	4,5	**5,0**	**5,5**	
Šupljine u asfaltnom uzorku, %(v/v)	4,4	2,8	1,5	2,5 – 3,0
Šupljine u mineralnoj mešavini ispunjene vezivom, %(v/v)	71,7	81,7	90,3	-
Šupljine u mineralnoj mešavini, %(v/v)	15,4	15,2	15,2	-

2.3.2. Stabilnost i tečenje asfaltne mešavine

Stabilnost, tečenje i Maršalov količnik asfaltnih uzoraka sa različitim sadržajem bitumena određeni su u skladu sa SRPS EN 12697-34:2020. Rezultati ispitivanja prikazani su u tabeli 4.

Tabela 4. *Rezultati ispitivanja asfaltne mešavine po Maršalu*

Karakteristika	Sadržaj bitumena u asfaltnoj mešavini, %(m/m)			Kriterijum*
	4,5	5,0	5,5	
Stabilnost S, kN	10,8	11,2	10,1	min. 8,0
Tečenje F, mm	5,0	5,3	5,5	-
Tangencijalno tečenje F_T, mm	3,1	3,2	3,2	-
Ukupno tečenje F_T, mm	5,6	5,8	6,0	-
Maršalov količnik, kN/mm	2,2	2,1	1,8	min. 2,0

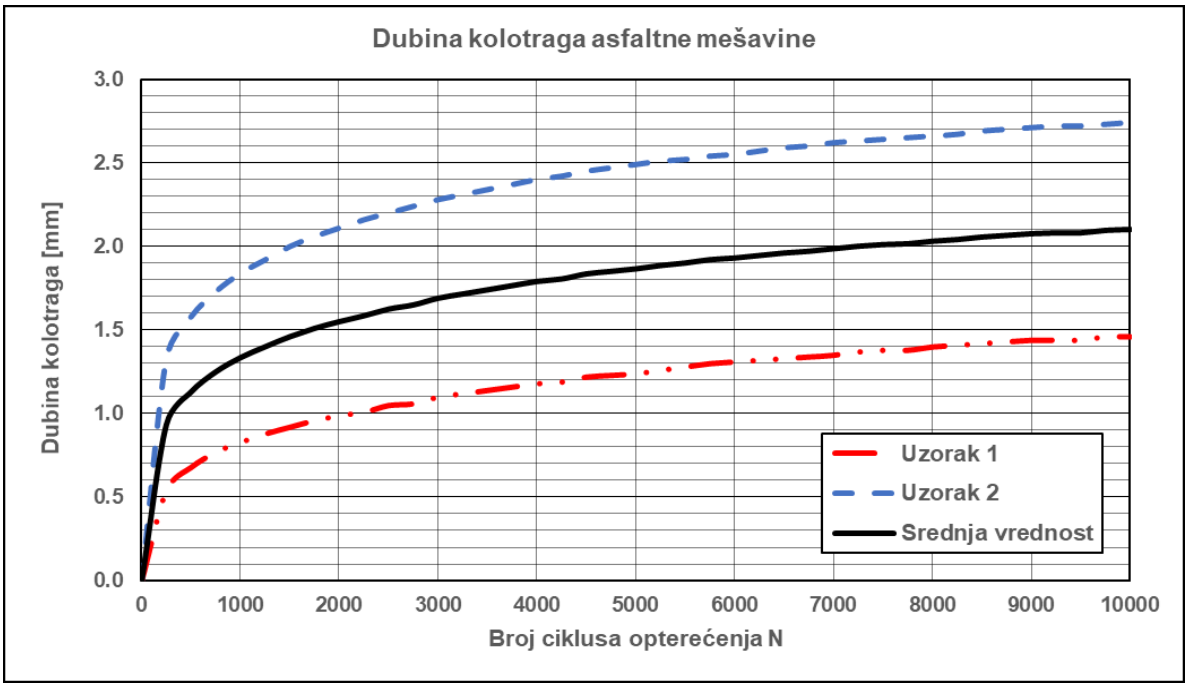
* AB 16, za srednje saobraćajno opterećenje prema SRPS U.E4.014:1990.

2.3.3. Otpornost asfaltne mešavine AC DUOPAVE 16 na plastičnu deformaciju (kolotraženje)

Otpornost asfaltne mešavine AC DUOPAVE16 na pojavu kolotraga određena je pri optimalnom sadržaju veziva, prema SRPS EN 12697-22:2020, mali uređaj, metoda B na vazduhu. Za ispitivanje su upotrebljeni uzorci dimenzija (320x260x60) mm, prethodno kondicionirani 360 min na temperaturi ispitivanja. Opit je vršen na temperaturi od (60±1)°C pri 10000 ciklusa ponavljanja opterećenja, odnosno 20000 prelaza točka. Rezultati ispitivanja prikazani su u tabeli 5 i na dijagramu prikazanom na slici 3.

Tabela 5. *Rezultati određivanja otpornosti asfaltne mešavine na kolotraženje*

Karakteristika	Uzorak 1	Uzorak 2	Srednja vrednost
Debljina uzorka, mm	60,0	60,4	60,2
Dubina kolotraga (RDair), mm	1,5	2,7	2,1
Proporcionalna dubina kolotraga (PRDair), %	2,5	4,5	3,5
Nagib krive (WTSair), mm/10^3 ciklusa opterećenja	0,04	0,05	0,05



Slika 3. *Dijagram razvoja kolotraga asfaltne mešavine AC DUOPAVE 16*

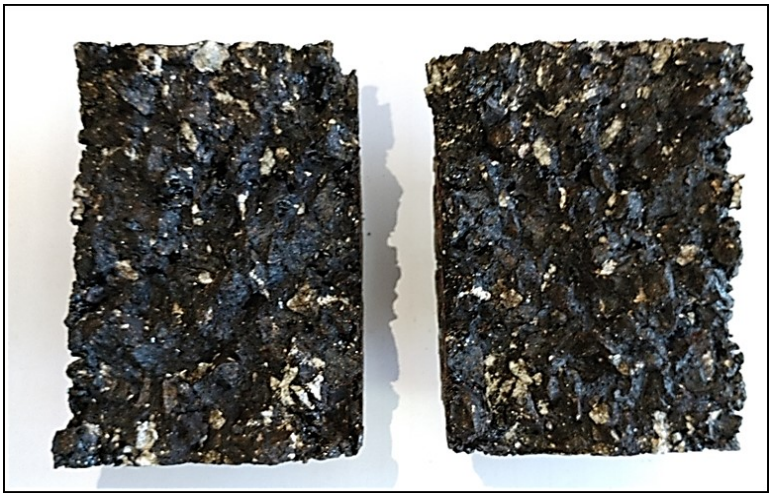
2.3.4. Osetljivost na vodu asfaltne mešavine AC DUOPAVE 16

Osetljivost asfaltne mešavine AC DUOPAVE 16 sa 5,0 %(m/m) bitumena na dejstvo vode određena je prema SRPS EN 12697-12:2018, Metoda A, na cilindričnim uzorcima prečnika 100 mm. Osetljivost na vodu određena je iz odnosa indirektne zatezne čvrstoće (ITS) pre i posle kondicioniranja u vodi na temperaturi od 40 ± 0,5°C u trajanju od 72 časa. Rezultati ispitivanja prikazani su u tabeli 6.

Tabela 6. Rezultati određivanja indirektne zatezne čvrstoće i osetljivosti asfaltne AC DUOPAVE 16 mešavine na vodu

Karakteristika	Metoda	Suvi set uzoraka	Set uzoraka kondicioniranih u vodi
Indirektna zatezna čvrstoća, kPa	SRPS EN 12697-23:2018	1070	910
Tip loma uzoraka		Kombinovani	Kombinovani
Odnos indirektne zatezne čvrstoće (osetljivost na vodu, ITS_R), %	SRPS EN 12697-12:2018	85	

Na slici 4 prikazan je laboratorijski uzorak nakon određivanja otpornosti na dejstvo vode. Na površini loma uočavaju se polomljena zrna agregata i lokalno skidanje veziva sa površine agregata.



Slika 4. *Površina loma laboratorijskog uzorka kondicioniranog u vodi*

2.3.5. Dinamički modul krutosti i otpornost asfaltne mešavine AC DUOPAVE 16 na zamor

Određivanje dinamičkog modula krutosti asfaltne mešavine AC DUOPAVE 16 sa 5,0 %(m/m) bitumena, sprovedeno je u skladu sa SRPS EN 12697-26:2018 Aneks B. Vrednost modula određena je nakon 100-og ciklusa opterećenja, sinusoidalnog oblika i frekvencije 10 Hz pri kojoj se ostvaruje horizontalna dilatacija od (50 ± 3) με, na temperaturi od 20 °C. Pri navedenim eksperimentalnim uslovima vrednost dinamičkog modula krutosti mešavine AC DUOPAVE iznosi 5781 MPa.

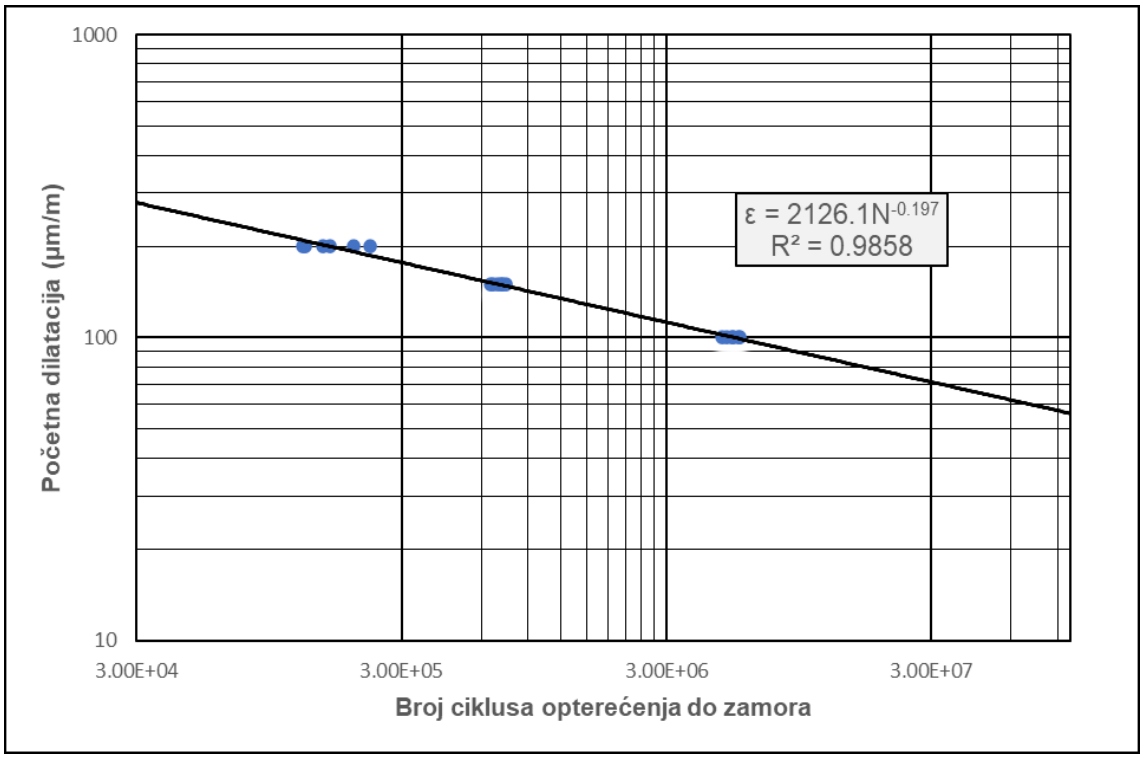
Otpornost na zamor ispitana je skladu sa SRPS EN 12697-24:2018 Aneks D, u uslovima kontrolisane dilatacije, a pri promenljivom naponu. Kao kriterijum za pojavu zamora postavljen je pad modula krutosti na 50% početne vrednosti, određene pri 100-tom ciklusu. Početni nivo dilatacije je tako odabran da broj ciklusa do zamora iznosi 10^4 , 10^5 ,10^6 . Opit je izveden sa tri nivoa dilatacije 100, 150 i 200 μm/m. Uzorci su izloženi sinusoidalnom opterećenju, frekvencije 10 Hz na temperaturi od 20 °C.

Dinamički modul krutosti i otpornost na zamor asfaltne mešavine određena je na uređaju Nottingham Asphalt Tester (slika 5).

Slika 5. *Aparatura za određivanje dinamičkog modula krutosti i otpornosti na zamor asfaltne mešavine savijanjem u četiri tačke*

Zakon zamora dobijen je primenom linearne regresije između prirodnog logaritma početne dilatacije, nakon sto ciklusa opterećenja, kao nezavisne promenljive i broja ciklusa opterećenja koji dovode do zamora, kao zavisne promenljive. Primenom matematičkog modela zakona zamora određena je vrednost dilatacije pri 10^6 ciklusa opterećenja i ona iznosi ε = 139,8 μm/m.

Zavisnost broja ciklusa opterećenja do zamora od vrednosti početne dilatacije, grafički je prikazana na slici 6.



Slika 6. *Zakon zamora asfaltne mešavine AC DUOPAVE 16*

3. ZAKLJUČAK

Rezultati ispitivanja pokazali su da asfaltna mešavina AC DUOPAVE 16 zadovoljava zahtevane uslove kvaliteta za saobraćajnice sa srednjim saobraćajnim opterećenjem. Prednost upotrebe ove vrste asfalta je u načinu izvođenja kolovoznog zastora (dva sloja u jednom), ekonomskim i ekološkim benefitima.

Izradom probne deonice pokazaće se ponašanje asfaltne mešavine u realnim uslovima eksploatacije na saobraćajnicama sa srednjim saobraćajnim opterećenjem.

Literatura

[1] Ramiączek, P. *et al. Influence of the type of recycled asphalt pavement on the properties of the SMA JENA 16 stone mastic asphalt mixture*, Roads and Bridges – Drogi i Mosty, 22, pp. 569–578. doi:10.7409/rabdim.023.037.
[2] Bÿaÿejowski K; Strugaÿa I. 2019. *Nawierzchnie jednowarstwowe z SMA 16 JENA*. RETTENMAIER Polska Sp, z.o.o. Poland
[3] Recommendations for AC Duopave, J. RETTENMAIER & SÖHNE GmbH
[4] Gogolin, D. 2021. *Umsetzung einer optimierter einschichtigen Asphaltbauweise*, Asphalt 56(6): 14–21.

MOTORWAY SPEED LIMITS AS A FUNCTION OF CLIMATE CHANGE

Franc Šoba, Bsc (Traffic Engineering)

Abstract: *This paper presents an analytical model of the impact of vehicle speed on time and energy consumption and consequently on GHG emissions. Using a practical example of a single vehicle at different motorway speeds, the model is used to analyse the impact of speed on time and energy consumption and the impact of the vehicle on the environment in terms of climate change. The model inputs are the technical elements of the road, a passenger vehicle with different types of propulsion (petrol, electric), different speed limits on the motorway (from 100 to 150 km/h) and values for time, fuel, and CO2. The results of the model are compared with the calculations for the motorway network with actual traffic data using the Opcost software tool, which allows detailed calculation of direct and external user costs for road infrastructure projects. All the results of the user cost calculations are shown for the whole year and in detail by cost type and unit per vehicle and per kilometre for all the scenarios considered.*

Keywords: motorway, climate change, speed limits, Opcost software tool, user costs

OGRANIČENJA BRZINE NA AUTO-PUTEVIMA U FUNKCIJI KLIMATSKIH PROMENA

mr Franc Šoba, univ. dipl. inž. tehnol. saob.

Abstract: *Članak prikazuje analitički model uticaja brzine vozila na potrošnju vremena i energije i posledično na emisije gasova staklene bašte. Na praktičnom primeru jednog vozila pri različitim brzinama vožnje na auto-putu je pomoću modela izrađena analiza uticaja brzine na potrošnju vremena i energije, kao i posledica, koje vozilo stvara životnoj sredini sa aspekta klimatskih promena. Ulazni podaci modela su tehnički elementi puta, putničko vozilo sa različitim vrstama pogona (benzin, struja), različita ograničenja brzine na auto-putu (od 100 do 150 km/h) i vrednosti vremena, goriva i CO2. Rezultati modela su poređeni sa kalkulacijama za mrežu auto-puteva sa stvarnim saobraćajnim podacima pomoću programskog alata Opcost, koji omogućava detaljno izračunavanje neposrednih i eksternih troškova korisnika za projekte na drumskoj infrastrukturi. Svi rezultati kalkulacija troškova korisnika prikazani su za celu godinu i detaljno po vrstama troškova i jedinicama po vozilu, kao i po pređenom kilometru za sve razmatrane scenarije..*

Keywords: auto-put, klimatske promene, ograničenja brzine, Opcost programski alat, troškovi korisnika

1. UVOD

Svrha članka je prikazati uticaj brzine vožnje na auto-putevima na klimatske promene i kakav uticaj bi ograničenje brzine na auto-putevima imalo na određene kategorije troškova korisnika. U članku je u prvom delu prikazan model uticaja brzine pri vožnji putničkog vozila na troškove korisnika: gorivo, vreme i CO2. U nastavku u drugom delu je upotrebljen model Opcost za izračunavanje ukupnih neposrednih i eksternih troškova korisnika na primeru deonice auto-puta pri različitim ograničenjima brzine za period od 20 godina.

Cilj je analitički prikaz troškova korisnika pri različitim ograničenjima brzine na auto-putevima u funkciji klimatskih promena. Glavna pitanja su:

- Kakav uticaj na troškove korisnika bi imalo smanjenje brzine vožnje na auto-putu sa 130 na 100 km/h?
- Koja bi bila optimalna brzina putničkih vozila s obzirom na troškove korisnika u funkciji odnos vreme - gorivo. Da li je manja potrošnja goriva vredna utrošenog vremena, koje je posledica manje brzine?
- Pri kojoj brzini vožnje auto-putem bi ukupni troškovi korisnika bili najmanji?
- Da li bi manja brzina vožnje auto-putem doprinela ublažavanju klimatskih promena?

Cilj članka je prikaz optimalne brzine vožnje auto-putem s obzirom na ukupne troškove korisnika i odgovoriti na pitanje da li bi smanjenjem brzine mogli da smanjimo negativan uticaj drumskog saobraćaja na klimatske promene.

2. MODEL OPTIMALNE BRZINE VOŽNJE PUTNIČKIH AUTOMOBILA

2.1. Polazišta i pretpostavke modela

Analitički model predstavlja pojednostavljen način izračunavanja potrošnje goriva, vremena i CO2 u zavisnosti od vrste tehničkih karakteristika vozila, tehničkih elemenata puta, zauzetosti vozila, ekonomske cene goriva, prosečne vrednosti vremena i prosečne vrednosti CO2.

U analitičkom modelu su uzete u obzir sledeće pretpostavke:

- Putničko vozilo Golf: masa 1.400 kg; poprečni presek A=1,9; otpor vazduha Cd=0,38
- Gustina vazduha: 1,225 kg/m3
- Faktor otpora kotrljanja: 0,010
- Uzdužni nagib ose auto-puta: 0,0%
- Horizontalni radijus auto-puta: 2000m
- Energetska vrednost goriva: 10 kWh/litar
- Ekonomska cena goriva: 0,7 EUR/litar
- Vrednost vremena: 8,0 EUR/sat
- Ograničenja brzine: između 100 i 150 km/h

2.2. Opis modela

Analitički model izračunavanja troškova korisnika putničkog vozila čine sledeći sklopovi:

- Izračunavanje potrošnje goriva u zavisnosti od otpora koji nastaju pri vožnji vozila:
  - Otpor vazduha Fa
  - Otpor kotrljanja Fr
  - Otpor nagiba Fg
  - Otpor krivine Fc
- Izračunavanje potrebne snage i energije (kWh) za savladavanje ukupnog otpora vozila i preračunavanje u količinu potrebnog goriva (litre).
- Izračunavanje količina CO2 (kg) na osnovu utrošenog goriva.
- Izračunavanje utrošenog vremena pri vožnji vozila.
- Konverzija izračunatih količina goriva, CO2 i vremena u novčanu jedinicu (EUR).

Za izračunavanje otpora vazduha Fa je upotrebljena jednačina:

Fa = 4 * (0.5 * (gustina_air * povrsina_A * koeff_Cd * brzina ^ 2))

gde je:
gustina_air – gustina vazduha
povrsina_A – poprečni presek vozila
koeff_Cd – otpor vazduha vozila

Za izračunavanje otpora kotrljanja Fr je upotrebljena jednačina:

Fr = 4 * (faktor_otpora * masa_vozila * 9.81 * Cos(Atn((nagib / 100 * (180 / 3.14)))))

Za izračunavanje otpora nagiba Fg je upotrebljena jednačina:

Fg = 4 * (masa_vozila * 9.81 * Tan(nagib / 100))

Za izračunavanje otpora krivine Fc je upotrebljena jednačina:

Fc = 4 * (0.5 * ((0.0772 * brzina ^ 2 * masa_vozila) / radijus))

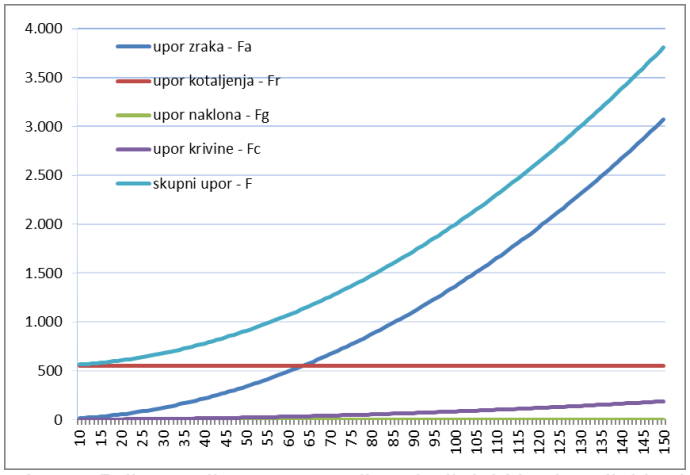
Na osnovu ukupnih vrednosti otpora izračunata je ukupna potrebna snaga P za savladavanje otpora, a iz snage potrebna energija E u kWh. Ukupna potrošnja goriva u litrima je određena na osnovu potrebne energije E.

Na osnovu utrošenog goriva u litrima izračunat je ugljenični otisak CO2 u kg po jednačini: potrošnja goriva * 2,5.

Vrednost vremena je izračunata na osnovu brzine vozila i pređene razdaljine.

2.3. Rezultati analitičkog modela

Analitički model je upotrebljen za izračunavanje troškova korisnika za jedno vozila na razdaljini od 100 km pri različitim brzinama vožnje pri korišćenju jednakih tehničkih parametara auto-puta (nagib, radijus). Cilj je izračunavanje i prikaz ukupnih troškova korisnika (gorivo, vreme, CO2) pri različitim brzinama vožnje, i to između 100 i 150 km/h. Model izračunava i optimalnu (preporučenu) brzinu u zavisnosti od najnižih ekonomskih troškova sa aspekta korisnika.



Grafikon 1. *Prikaz svih otpora vozila u jedinici N pri različitim brzinama*
Source: (obradio autor).

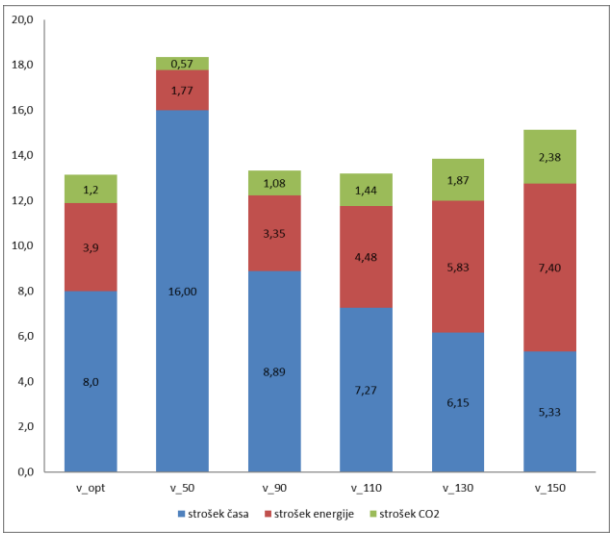
U grafikonu 1 su prikazani otpori u jedinici N pri različitim brzinama vozila uz navedena polazišta. Ukupni otpor vozila snažno zavisi od otpora vazduha koji raste sa brzinom. Otpor kotrljanja je konstantan, otpor krivine zbog radijusa od 2000 metara skoro zanemarljiv, dok je otpor nagiba nula, zbog nagiba od 0%.

U tabeli 1 i grafikonu 2 su dati rezultati izračunavanja troškova korisnika za jedno vozilo na razdaljini od 100 km pri različitim brzinama vožnje. Ukupne troškove korisnika čine trošak vremena, trošak potrošnje goriva (energije) i trošak CO2. Najmanji troškovi su pri optimalnoj brzini koja u ovom slučaju iznosi 100 km/h. Povećanjem brzine snažno se povećava potrošnja goriva, a istovremeno se smanjuje utrošeno vreme vožnje. Optimalna brzina vožnje je ona brzina, gde su ukupni troškovi korisnika najmanji. Razlika pri troškovima korisnika pri brzinama od 90 do 110 km/h praktično ne postoji odn. samo je minimalna (oko 13,2 EUR/100 km).

Tabela 1. *Rezultati izračunavanja troškova korisnika u EUR pri razdaljini 100 km*

Brzina	v_opt	v_50	v_90	v_110	v_130	v_150
trošak vremena	8,0	16,00	8,89	7,27	6,15	5,33
trošak energije	3,9	1,77	3,35	4,48	5,83	7,40
trošak CO2	1,2	0,57	1,08	1,44	1,87	2,38
trošak ukupno	**13,1**	**18,3**	**13,3**	**13,2**	**13,9**	**15,1**

Source: (obradio autor)



Grafikon 2. *Troškovi korisnika u EUR pri različitoj brzini pri razdaljini 100 km*
Source: (obradio autor).

3. MODEL IZRAČUNAVANJA TROŠKOVA KORISNIKA NA DEONICI DOMŽALE-LJUBLJANA

3.1. Polazišta i svrha modela

Za izračunavanje uticaja brzine vožnje na ukupne troškove korisnika izrađen je test kalkulacija za stvarnu deonicu auto-puta između Domžala i Ljubljane. Dužina deonice je 10 km, teren ravnica, uzdužni nagib 1%, auto-put sa 4 trake, gde je ograničenje brzine 130 km/h.

Za izračunavanje neposrednih i posrednih troškova korisnika u drumskom saobraćaju korišćena je metodologija i programski paket OPCOST sa nivoom cena novembar 2021., koji je propisan za Sloveniju od strane Ministarstva infrastrukture (MzI). Kreator programa za MzI je preduzeće Omega consult d. o. o. U metodologiji izračunavanja troškova korisnika u drumskom saobraćaju (neposrednih i posrednih) obuhvaćene su sledeće kategorije troškova:

- Neposredni troškovi korisnika: troškovi potrošnje, vremenski troškovi, režijski troškovi.
- Posredni (eksterni troškovi) korisnika: vazduh, klimatske promene, emisije, buka.
- Troškovi održavanja drumske infrastrukture.
- Troškovi saobraćajnih nezgoda.

Neposredni troškovi korisnika u drumskom saobraćaju zavise od:

- tehničkih karakteristika puteva i
- prosečnih radnih brzina vozila, koje se menjaju s obzirom na vrstu puta, tehničke karakteristike puteva i obim i strukturu saobraćaja na putu.

3.2. Saobraćajni podaci

Saobraćajni podaci su preuzeti iz podataka DRSI za 2022. godinu u jedinici PGDP po strukturi vozila. Prognoza saobraćaja je izrađena do 2042. godine korišćenjem metoda jedinstvenih faktora rasta po vrstama vozila, i to 1,0% za putnička vozila i autobuse i 2% za teretna vozila.

Tabela 2. *Saobraćajni podaci za 2022. i 2042. godinu u jedinici PGDP*

godina	Putnička vozila	Autobusi	Teretna do 3,5 t	Teretna preko 3,5 t	UKUPNO SVA VOZILA
2022	46.110	227	6.640	7.439	**60.416**
2042	56.263	277	9.867	11.054	**77.461**

Source: (obradio autor)

Obim saobraćaja na deonici auto-puta Domžale-Ljubljana u 2022. godini iznosi je 60.416 vozila/dan, od toga je bilo 7.439 teretnih vozila, težih od 3,5 tone.

Na grafikonu 3 je prikazana analiza satnog saobraćaja na toj deonici na osnovu automatskog mesta sa brojačem. Iz podataka je vidljivo da se obim satnog saobraćaja kreće od 0 do 10% PGDP.

Števno mesto: 830 PŠATA AC — **vsa vozila, obe smeri, leto 2022**

PDP obdobja : 60.416 Maks. urni promet obdobja : 6.282 Skupno število vozil obdobja : 22.051.745

% PDP obdobja	Število ur	Kum. št. ur	Ševilo. vozil	Kum. št. vozil	% Kum. št. vozil
10 (več od vklj. 9,5%)	28	28	164.666	164.666	0,75
9 (8,5% - 9,5%)	374	402	2.005.353	2.170.019	9,84
8 (7,5% - 8,5%)	782	1.184	3.778.331	5.948.350	26,97
7 (6,5% - 7,5%)	860	2.044	3.620.059	9.568.409	43,39
6 (5,5% - 6,5%)	1.179	3.223	4.273.277	13.841.686	62,77
5 (4,5% - 5,5%)	1.011	4.234	3.077.459	16.919.145	76,72
4 (3,5% - 4,5%)	880	5.114	2.130.468	19.049.613	86,39
3 (2,5% - 3,5%)	604	5.718	1.094.952	20.144.565	91,35
2 (1,5% - 2,5%)	678	6.396	801.455	20.946.020	94,99
1 (0,5% - 1,5%)	1.859	8.255	979.307	21.925.327	99,43
0 (0,0% - 0,5%)	505	8.760	126.418	22.051.745	100,00

Grafikon 3. *Satna distribucija saobraćaja na deonici auto-puta Domžale-Ljubljana*
Source: DRSI, Saobraćaj 2022.

U programu Opcost su troškovi korisnika izračunati za svaki sat tokom godine na osnovu prikazane satne distribucije saobraćaja. Za svaki sat u godini model izračunava i saobraćajne pokazatelje, kao što su prosečna brzina saobraćajnog toka u određenom satu i kapacitet puta, iskorišćenost i nivo usluga po metodologiji HCM. Na osnovu rezultata programa Opcost je izrađena analiza prosečnih brzina svih vozila za određeni sat s obzirom na satnu distribuciju saobraćaja na mestu sa brojačem na deonici auto-puta Domžale-Šentjakob.

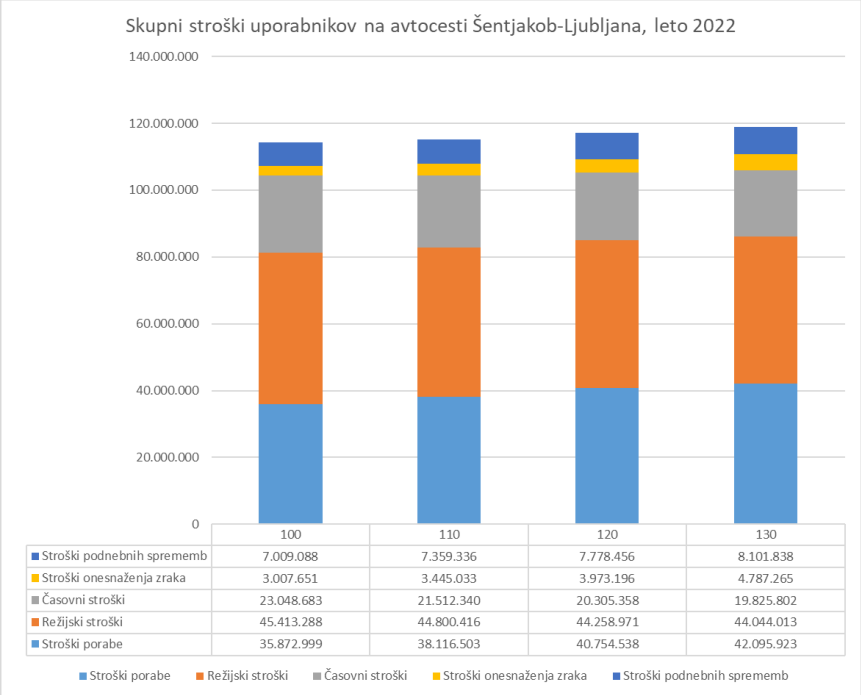
2.5. Izračunavanje koristi korisnika

Za izračunavanje troškova korisnika izrađeno je više scenarija koji se razlikuju samo u brzini vožnje na deonici auto-puta, dok su svi ostali parametri ostali nepromenjeni. Izračunati su sledeći scenariji:

- brzina 100 km/h,
- brzina 110 km/h,
- brzina 120 km/h i
- brzina 130 km/h.

Cilj je utvrditi kako brzina vožnje utiče na određene vrste troškova korisnika i kakav uticaj ima brzina na klimatske promene. Kalkulacije troškova korisnika izrađene su za sva četiri scenarija za godine od 2022. do uključujući 2042. Istovremeno je analizirana i prosečna brzina saobraćajnog toka za sve sate u godini s obzirom na satnu distribuciju. Cilj je utvrditi kako veća saobraćajna opterećenja u satnim špicevima (preko 8% PGDP) utiču na prosečnu brzinu vožnje.

U grafikonu 4 su prikazani ukupni troškovi korisnika za sva četiri scenarija različitih ograničenja brzine na auto-putu za 2022. godinu po vrstama troškova korisnika. Najmanji troškovi korisnika su u slučaju ograničenja brzine na 100km/h i iznose u 2022. godini ukupno 121,0 mil. EUR, a najveći u scenariju 130km/h, gde su troškovi korisnika ukupno 125,5 mil. EUR. Ukupna razlika između ograničenja vožnje na auto-putu na 100 i 130 km/h nije velika i iznosi samo 3,7% odn. 4,5 mil. EUR.

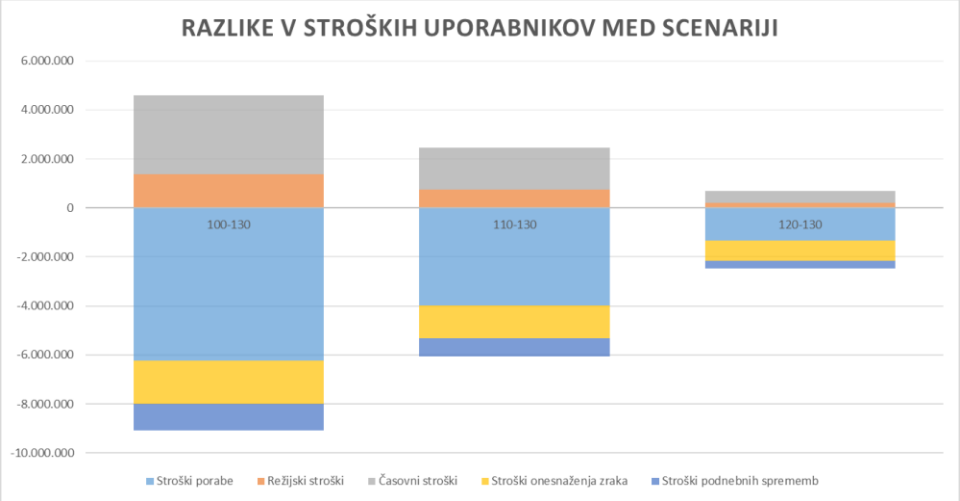


	100	110	120	130
Stroški podnebnih sprememb	7.009.088	7.359.336	7.778.456	8.101.838
Stroški onesnaženja zraka	3.007.651	3.445.033	3.973.196	4.787.265
Časovni stroški	23.048.683	21.512.340	20.305.358	19.825.802
Režijski stroški	45.413.288	44.800.416	44.258.971	44.044.013
Stroški porabe	35.872.999	38.116.503	40.754.538	42.095.923

Grafikon 4. *Ukupni troškovi korisnika pri različitim brzinama vožnje po strukturi za 2022. godinu*
Source: (obradio autor).

Ukoliko poredimo pojedinačne kategorije troškova, primećujemo velike razlike: troškovi potrošnje su pri scenariju 130 km/h u poređenju sa ograničenjem na 100 km/h veći za nešto više od 6 mil. EUR, posledično i troškovi klimatskih promena i zagađenja vazduha, jer zavise od potrošnje goriva. Istovremeno su i vremenski troškovi u scenariju 130 km/h za 3 mil. EUR manji, a manji su i režijski troškovi koji zavise od vremena. Kategorija troškovi klimatskih promena i troškovi zagađenja vazduha su pri brzini 100 km/h manji, a obe kategorije ukupno za oko 22%. Vremenske uštede pri brzini od 130 km/h u celini potiru troškovi klimatskih promena i zagađenja vazduha, a uštede na režijskim troškovima donekle ublažavaju uvećane troškove potrošnje, sa 6 mil. EUR na ukupnu razliku od 4,5 mil. EUR. Poređenje između scenarija 100, 110 i 120 km/h s obzirom na polazni scenario 130 km/h je prikazan na grafikonu 5. Najveća razlika je očekivano kod scenarija 100 km/h, gde su sa negativnim vrednostima prikazane uštede na troškovima potrošnje, troškovima zagađenja

vazduha i troškovima klimatskih promena. Istovremeno pozitivne vrednosti režijskih i vremenskih troškova prikazuju njihovo povećanje u odnosu na scenario 130 km/h.

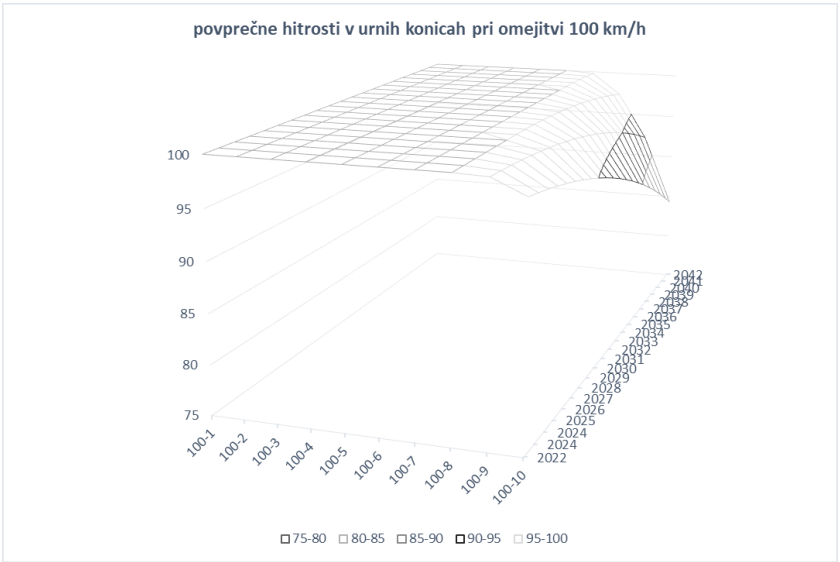


Grafikon 5. *Razlika između troškova korisnika pri različitim brzinama vožnje po strukturi za 2022. godinu*
Source: (obradio autor).

Ukoliko bi želeli da kao društvo smanjimo uticaj na klimatske promene, jedna od mera bi mogla biti i ograničenje brzine na auto-putevima na 100 km/h, kao što je to npr. u Kanadi. Uticaj bi iznosio više od 22% u slučaju prosečnih brzina saobraćajnog toka i modelnih kalkulacija. Istovremeno je u praksi brzina vožnje auto-putem van saobraćajnih špiceva i veća od 130 km/h tako da bi efekat ograničenja brzine mogao biti i veći od 22%. Mana takve mere je vrlo verovatan otpor javnosti i korisnika auto-puteva.

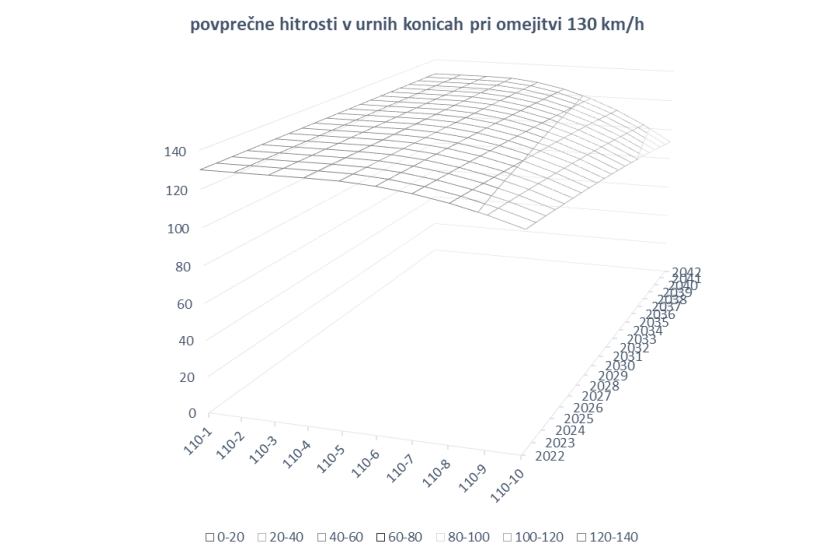
Analiza prosečnih brzina saobraćajnog toka u određenim satima za 2022. godinu je pokazala da je prosečna brzina saobraćajnog toka na razmatranoj deonici auto-puta ograničena otprilike 1.200 sati godišnje odn. 13,7%. To znači da je obim satnog saobraćaja u tim satima 8% ili više od PGDP za određeni smer. U tim satima deonicu auto-puta pređe 27% svih vozila tokom godine.

U grafikonu 6 i 7 su prikazane saobraćajne prilike (prosečne brzine saobraćajnog toka) u slučaju scenarija 100 i 130 km/h. Na x-osi su prikazani satni špicevi s obzirom na % PGDP (100-8 znači saobraćajne prilike u satnom špicu pri 8% satnog saobraćaja od PGDP).



Grafikon 6. *Prosečne brzine u satnim špicevima pri ograničenju 100 km/h*
Source: (obradio autor).

Iz oba grafikona je vidljivo da je modelna prosečna brzina saobraćajnog toka do uključujući satnog špica 7% od PGDP jednaka ograničenju brzine, a pri višim satnim špicevima se prosečna brzina saobraćajnog toka smanjuje, što se odražava u jutarnjem i popodnevnom saobraćajnom špicu.



Grafikon 7. *Prosečne brzine u satnim špicevima pri ograničenju 130 km/h*
Source: (obradio autor).

4. ZAKLJUČCI

Rezultati analiza analitičkog saobraćajnog modela za jedno putničko vozilo pokazuju da je optimalna brzina vožnje auto-putem između 100 i 110 km/h s obzirom na ukupne troškove korisnika, koje čine troškovi goriva, vrednost utrošenog vremena tokom vožnje i trošak CO2. Za korisnike je vrednost vremena veoma rastegljiva kategorija i menja se s obzirom na preference pojedinca. Trošak goriva je pri vožnji 130 km/h za 50% veći od optimalne brzine 100 km/h, a istovremeno je trošak vremena manji za nešto manje od četvrtine. Ipak, ukupni trošak je pri modelno ravnomernoj vožnji pri 130 km/h u odnosu na 100 km/h veći samo za 5,5%. Vrednost vremena vredi veće potrošnje goriva, zato razlika u ukupnim troškovima korisnika nije tako velika.

Pomoću programa Opcost su za deonicu auto-puta između Domžala i Ljubljane izračunati troškovi korisnika za četiri scenarija različitih ograničenja brzine vožnje za period 2020.–2042. Prilikom analize satnog saobraćaja je utvrđeno da je prosečni saobraćajni tok manji od dozvoljene brzine tokom 1200 sati godišnje odn. 13,7% tokom godine. Istovremeno je u tom periodu deonicu prešlo skoro 27% svih vozila tokom godine.

Rezultati izračunavanja troškova korisnika pomoću programa Opcost pokazuju da su pri ograničenju 100 km/h ukupni troškovi korisnika 121,0 mil. EUR u poređenju sa ograničenjem brzine 130 km/h, gde iznose 125,5 mil. EUR. Ušteda ukupnih troškova korisnika u 2022. godini u slučaju scenarija 100 km/h iznosi 4,5 mil. EUR odn. samo 3,7% u odnosu na scenario 130 km/h. Troškovi klimatskih promena i zagađenja vazduha ukupno iznose 2,8 mil. EUR, a ušteda u potrošnji goriva 6,2 mil. EUR. Ipak, manja brzina znači više utrošenog vremena i veće režijske troškove tako da je ukupna ušteda pri manjoj brzini od 100 km/h u odnosu na 130 km/h skoro zanemarljiva. Manja brzina znači za korisnike manje troškove goriva, ali s druge strane znači više utrošenog vremena za vožnju. Optimalna brzina vožnje auto-putem je pomoću analitičkog modela utvrđena na između 100 i 110 km/h, što je potvrđeno i kalkulacijom celokupnih troškova korisnika pomoću programskog alata Opcost. Ukupni troškovi korisnika auto-puteva su najmanji pri 100 km/h, ali ukupna ušteda nije toliko velika da bi ozbiljno razmišljali o smanjenju ograničenja na auto-putu.

Reference

[1] Šoba, F. 2016. *Uticaj savremene saobraćajne infrastrukture u Sloveniji na globalni logistički lanac.* magistarski rad, Univerzitet u Ljubljani, Fakultet za pomorstvo i saobraćaj.

[2] Vodič za analizu troškova i koristi investicionih projekata, Alat za ekonomsku procenu kohezione politike 2014–2020, 2014. (Guide for Cost-Benefit Analysis of Investment Projects, Economic Apprisal

Tool for Cohesion Policy 2014–2020, 2014.)

[3] van Essen et al. 2019. Priručnik o eksternim troškovima transporta (van Essen et al. 2019. Handbook on the external costs of transport.)

[4] Priručnik za kapacitet autoputa 2010 (Highway Capacity Manual 2010.)

[5] MacKay, David J.C. 2013. Održiva energija - bez ugrejane atmosfere Energetika.NET. (MacKay, David J.C. 2013. Trajnostna energija - brez razgretega ozračja. Energetika.NET.)

[6] Programski paket OPCOST. 2022. Republika Slovenija, Ministarstvo infrastrukture & Omegaconsult.

[7] Programski paket OPCOST verzija 17.1:
https://portal.drsc.si/OPCOST/Program/prijava.jsp
(31. 3. 2024.)

SISTEM UPRAVLJANJA INFRASTRUKTUROM AUTOPUTEVA U SLOVENIJI

Mitja Jurgele[1]
DRI upravljanje investicij d.d. mitja.jurgele@dri.si

Rezime: *U članku je predstavljen sistem upravljanja infrastrukturom autoputeva u Sloveniji. Taj sistem koristimo za organizaciju i izvođenje investicionog održavanja autoputeva. Sistem se sastoji od aktivnosti prikupljanja i skladištenja podataka, kao i od aktivnosti donošenja odluka. Primenjuje se na utvrđivanje stanja i trendova promene infrastrukture, kao i za planiranje izvođenja radova na obnovi na nivou celokupne mreže autoputeva.*
Jedan od glavnih rezultata rada sistema je kontinuirani plan mera za obnovu, koji se ažurira na godišnjem nivou i koji je osnov za planiranje mera na infrastrukturnim elementima i opremi. Plan predstavlja osnov za dodeljivanje potrebnih kratkoročnih i srednjoročnih finansijskih sredstava.
Radi lakšeg rada, infrastrukturu autoputeva delimo na pojedinačne sklopove. U prvoj fazi pripreme plana potrebe infrastrukture određujemo zasebno prema pojedinačnim sklopovima. Ti sklopovi su kolovozi, mostovi, tuneli, geotehnički objekti, odvodnjavanje i ostala oprema, elektromašinska oprema u tunelima, saobračajna oprema i odmorišta. U drugoj fazi na osnovu evidentiranih potreba pojedinačnih sklopova infrastrukture vršimo međuresorno usklađivanje. Pomoću njega usklađujemo vreme izvođenja radova na obnovi određenih delova infrastrukture na istim lokacijama. Time izbegavamo zatvaranja saobraćaja na istim deonicama autoputa tokom uzastopnih godina.
U sklopu razvoja sistema razvili smo i alate za skladištenje i prikaz podataka, metodologije za praćenje stanja, ekspertske sisteme za upravljanje kolovozom (PMS-DARS), mostovima (BMS-DARS) i elektromašinskom opremom (ESO-MS-DARS) i formirali ekspertske grupe, koje su dodatna pomoć prilikom odlučivanja.

Ključne reči: *infrastruktura autoputeva, ekspertski sistemi za upravljanje, kontinurani plan mera*

MANAGEMENT SYSTEM FOR HIGHWAY INFRASTRUCTURE IN SLOVENIA

Mitja Jurgele
DRI upravljanje investicij, d.o.o., mitja.jurgele@dri.si

Abstract: *This article presents the system for managing motorway infrastructure in Slovenia. The system comprises data collection, storage activities, and decision-making processes. It is used to determine the condition and trends of infrastructure changes and plan renovation works across the entire motorway network.*
One of the main results of the system's work is a continuous plan of measures for renewal, which is updated annually and serves as the basis for planning measures on infrastructure elements and equipment. The plan provides the basis for allocating the necessary short-term and medium-term financial resources.
For easier operation, we divide the motorway infrastructure into individual components. In the first phase of preparing the plan, we determine the infrastructure needs separately for each individual component. These components include pavements, bridges, tunnels, geotechnical structures, drainage, electromechanical equipment in tunnels, traffic equipment, and rest areas. In the second phase, based on the identified needs of individual infrastructure components, we carry out interdepartmental coordination. Through this coordination, we synchronize the timing of renovation works on certain parts of the infrastructure at the same locations. This helps us avoid traffic closures on the same sections of the motorway during consecutive years.
As part of system development, we have also developed tools for data storage and display, methodologies for monitoring conditions, expert systems for managing pavements (PMS-DARS), bridges (BMS-DARS), and electromechanical equipment (ESO-MS-DARS), and formed expert groups, which provide additional assistance in decision-making.

Keywords: motorway *infrastructure, expert management systems, continuous plan of measures for renewal*

[1] Autor zadužen za korespodenciju: mitja.jurgele@dri.si

1. UVOD

Funkcija puteva je da omoguće prevoz putnika i robe. Dakle, putevi se grade kako bi se zadovoljile potrebe korisnika.
Prilikom odlučivanja o investicijama u putnu infrastrukturu na strani potražnje (Gerardo Flintsch, SURF Milano 2022), utvrdili smo da korisnici puteva žele sledeće funkcionalnosti, nabrojane od osnovnih do dopunskih: mobilnost, obezbeđivanje pristupa, bezbednost, udobnost, brzo i efikasno putovanje, energetsku efikasnost, mali uticaj na životnu sredinu i obnovljivost. U prvoj fazi razvoja putne mreže, očekivanja korisnika su pre svega u oblasti obezbeđivanja mobilnosti i dostupnosti, jer oni omogućavaju ekonomski razvoj – putna infrastruktura donosi napredak u određenu oblast. Kada se ispune osnovna očekivanja korisnika, lepeza očekivanja se širi. Tu spadaju funkcije koje obezbeđuju socijalnu održivost, kao što su bezbednost, udobnost i brzina putovanja, a zatim i funkcije koje obezbeđuju zaštitu životne sredine: energetsku efikasnost, nisku zagađenost vazduha, nizak nivo buke i obnovljivost. Ekonomski razvoj utiče na proširenje spektra očekivanja korisnika, a istovremeno se smanjuje usredsređenost na osnovne funkcije.
Pošto puteve gradimo za korisnike, ta očekivanja vrednujemo kroz nivoe usluga koje putevi nude korisnicima. Investicijama u putnu infrastrukturu s jedne strane pokušavamo da poboljšamo nivoe usluga, a s druge strane da održavamo postojeće već postignute nivoe usluga. U Sloveniji se intervencije koje poboljšavaju nivoe usluga najčešće nazivaju investicije, a intervencije koje održavaju nivoe usluga, nazivaju se održavanje.
Pošto su nam na raspolaganju ograničena sredstva, efikasnost investicija vrednujemo po sistemu troškova i koristi. Prilikom održavanja, glavni kriterijum za vrednovanje je efikasnost analize troškova u životnom ciklusu. Dakle, interesuje nas kako i kada preduzimati mere na obnovi, kako bi obezbeđivanje unapred definisanih nivoa usluga bilo što povoljnije.
U članku razmatramo organizaciju i izvođenje investicionog održavanja puteva koje obavlja Društvo za autoputeve Republike Slovenije (DARS), koji su usmereni na održavanje nivoa usluga postojeće putne infrastrukture i zajednički ih nazivamo upravljanje putnom infrastrukturom.

2. UPRAVLJANJE INFRASTRUKTUROM AUTOPUTEVA – DARS

Za sveobuhvatno upravljanje putnom infrastrukturom na tako obimnoj mreži, kao što je mreža kojom upravlja DARS, a koja obuhvata približno 1400 km kolovoza, 1200 mostova, 23 tunela, 200 km ograda za zaštitu od buke, 750 rezervoara za zadržavanje atmosferske vode i drugu imovinu, potrebne su nam sledeće informacije:

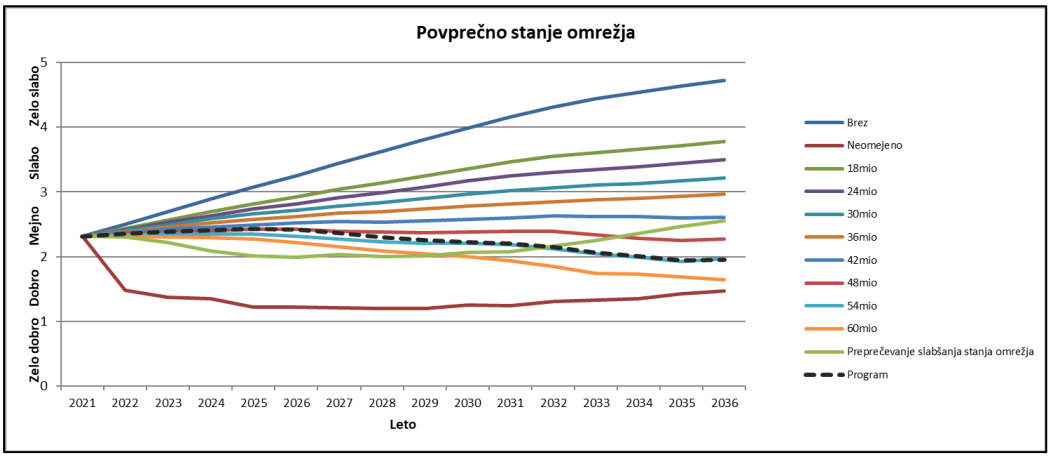
a) Informacije o infrastrukturi kojom upravljamo i njenoj lokaciji. U Sloveniji su te informacije uskladištene u Bazi podataka o putevima (Banka cestnih podatkov, BCP).
b) Podaci o trenutnom stanju infrastrukture kojom upravljamo. To obuhvata procenu da li su različiti delovi infrastrukture u odgovarajućem stanju za pružanje prethodno određenih nivoa usluga. Takođe proveravamo da li stanje određenih delova infrastrukture ugrožava funkcionalnost i/ili bezbednost korisnika. Te informacije dobijamo redovnim praćenjem stanja infrastrukture. Za neke elemente infrastrukture, kao što su na primer mostovi, zakonski je propisano obavezno praćenje stanja, dok odluka o vršenju monitoringa za druge delove infrastrukture zavisi od njihovog upravljača. On donosi odluku koji elementi će se pratiti, na koji način i koliko često. U tu kategoriju spadaju i alati za grafički prikaz stanja infrastrukture.
c) Informacije o tome koje delove infrastrukture treba obnavljati, kada i kako vršiti obnove i koliko sredstava će biti potrebno. Takođe je važno odrediti prioritete, uzimajući u obzir ograničene finansijske resurse. Ovaj deo procesa se naziva sistem donošenja odluka. Pri odlučivanju nam mogu pomoći ekspertski sistemi za upravljanje, alati za grafičko prikazivanje podataka, osnivanje ekspertskih grupa, određivanje ključnih pokazatelja stanja (Key Performance Indicators - KPIs) i definisanje i praćenje ciljeva.

3. UPRAVLJANJE INFRASTRUKTUROM AUTOPUTEVA PO POJEDINAČNIM SKLOPOVIMA

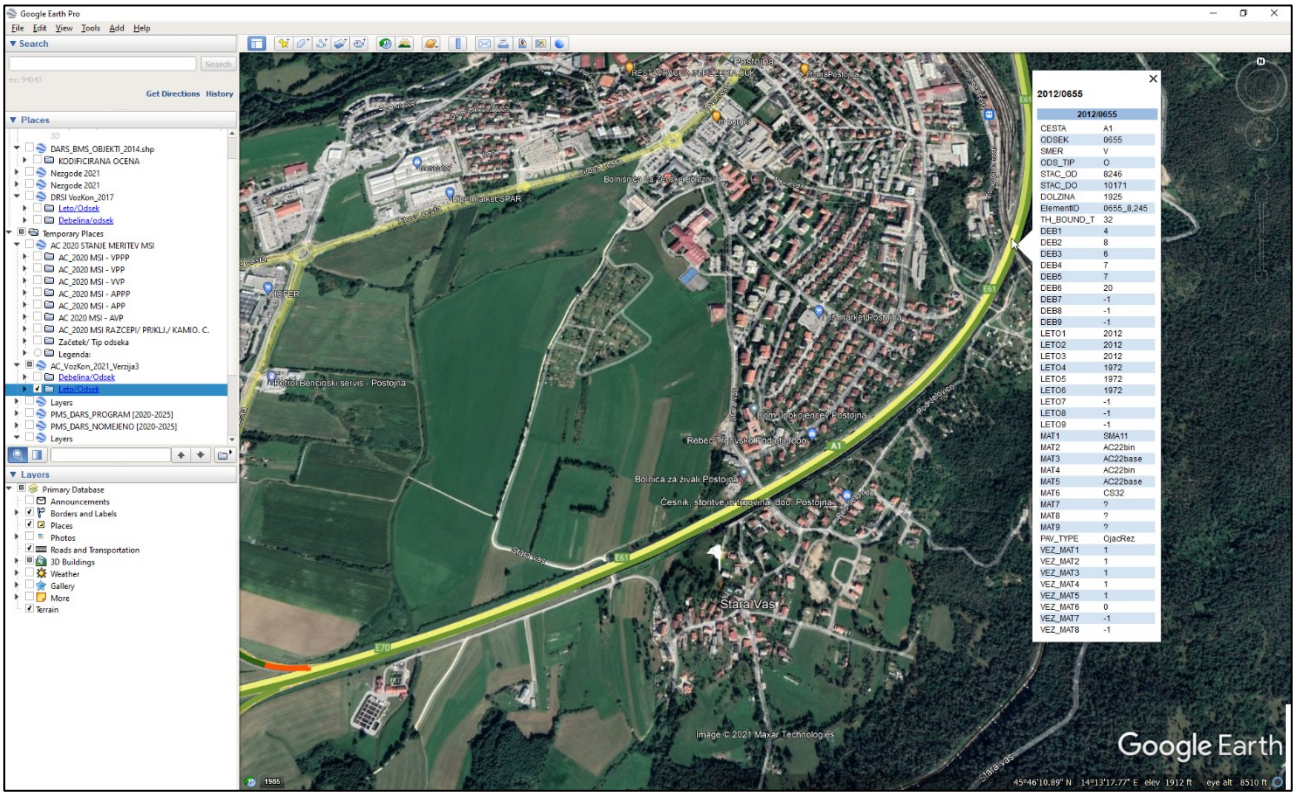
Radi lakšeg rada, putnu infrastrukturu delimo na pojedinačne sklopove: kolovoze, mostove, tunele, geotehničke objekte, odvodnjavanje i ostalu opremu, elektromašinsku opremu u tunelima, saobraćajnu opremu, odmorišta. Podela na pojedinačne sklopove se dopunjuje tokom godina.

3.1. Kolovozi

Za potrebe optimalnog planiranja obnove kolovoza, DARS d.d. je 2004. godine počeo da uvodi ekspertski sistem za upravljanje kolovozima Deighton's Total Infrastructure Management System (dTIMS), koji smo nazvali PMS-DARS. Razvoj i uvođenje ekspertskog sistema je za DARS, d.d. obavilo preduzeće DDC (sada DRI upravljanje investicij).
Svrha upravljanja kolovozima je određivanje kada i pomoću kojih mera je neophodno obnavljanje kolovoza, kako bi odnos troškova upravljača i koristi za korisnika bio što bolji. Aktivnost obuhvata praćenje stanja kolovoza posle izgradnje, vremensko planiranje preventivnih mera i mera obnavljanja i ekonomske analize alternativnih mera. Sistem PMS-DARS omogućava i prognoze budućeg stanja kolovoza u zavisnosti od raspoloživih sredstava (slika 4) i analizanje pomoću različitih vrsta podataka o kolovozima (slika 1).



Slika 1. *Prosečno stanje mreže kolovoza, u zavisnosti od visine ulaganja, u sistemu PMS-DARS*
Izvor: Sistem PMS-DARS



Slika 2. *Primer izvoda podataka iz sistema PMS-DARS, podaci o kolovoznoj konstrukciji*
Izvor: Google Earth

Stanje kolovoza pratimo na osnovu prihvaćene metodologije praćenja stanja kolovoza korišćenjem specijalnih mernih vozila, koja jednim prelazom mere stanje jednog tehničkog parametra ili više njih:

- oštećenje kolovozne površine prema vizuelnoj proceni (MSI),
- kolotrazi,
- podužna ravnost,
- karakteristike smicanja,
- vrste, debljina i starost slojeva.

Obnove kolovoza su se do 2015. godine planirale i izvodile na starijim deonicama mreže autoputeva i to tamo gde je po metodi modifikovanog švajcarskog indeksa (MSI) stanje kolovoza bilo procenjeno kao „veoma loše“ i „loše“. Odabrane deonice su dodatno potvrđene pomoću sistema PMS DARS.
Godine 2015. smo prvi put pripremili predlog plana mera isključivo pomoću korišćenja sistema PMS-DARS. Na osnovu rezultata i inženjerskih ograničenja, kao što su dužina zatvaranja, mogućnost izvođenja obnove na jednoj ili obe polovine autoputa, geografska disperzija obnova, povezanost obnovljenih delova, istovremena sanacija ostalih tipova objekata, formirali smo predloge projekata. Tako je formirano 28 „projekata“, ukupne dužine 255 km za obnovu kolovoznih traka, čija vrednost je iznosila približno 52 miliona EUR/godišnje (za period 2016–2018. godine).
Do 2024. godine smo DPU dodatno razradili i proširili. U DPU je trenutno formiran 41 projekat koji je podeljen na:

- glavne,
- rezervne,
- preventivne i
- predloge dodatnih projekata.

Projekti su podeljeni na faze izvođenja koje su poređane redom prema godinama predviđenog izvođenja. Ukupan obim projekata je određen na osnovu potreba koje pokazuje njihovo stanje. Prilikom izbora razmatraju se sve deonice koje će s obzirom na stanje kolovozne konstrukcije u srednjoročnom vremenskom periodu (približno 6 godina) biti odgovarajuće za obnovu.
Pošto zbog ograničenih finansijskih sredstava nije moguće realizovati obnovu na svim takvim deonicama, određeni su glavni projekti. Oni su određeni tako da njihova dužina ispunjava strateške ciljeve da se stanje mreže dugoročno ne pogoršava, a ukupna vrednost odgovara finansijskim ograničenjima.

U okviru glavnih projekata razlikujemo tri tipa mera za obnovu:

1. Rekonstrukcija (REKO): obnovljene delove mreže prilagođavamo najnovijim zahtevima. Najčešće to znači proširenje zaustavne trake, strukturnu obnovu kolovozne konstrukcije za planski period od 20 godina, izvođenje odgovarajuće saobraćajno-bezbednosne opreme uz uređenje centralnog pojasa za razdvajanje bez zelenila i sve ostale radove koje treba izvesti na deonici, kako bi na svim elementima puta bio ostvaren jednak planski period. Gruba cenovna procena takvih mera iznosi između 1.250.000 i 1.750.000 EUR/km za određenu kolovoznu traku.
   Te mere najčešće predviđamo na najopterećenijim delovima mreže, gde osim obnove kolovozne konstrukcije treba poboljšati i funkcionalnost autoputa, bilo izgradnjom dodatnih kapaciteta, bilo obavljanjem saobraćaja u vreme izvođenja radova po nesmanjenom broju kolovoznih traka.

2. Obnova kolovozne konstrukcije (OVK): obnovljene delove mreže prilagođavamo najnovijim zahtevima, ali bez promene širine ili broja kolovoznih traka. Najčešće to znači strukturnu obnovu kolovozne konstrukcije za planski period od 20 godina, izvođenje odgovarajuće saobraćajno-bezbednosne opreme i sve ostale radove koje treba izvesti na deonici, kako bi na svim elementima puta bio ostvaren jednak planski period. Gruba cenovna procena takvih mera iznosi između 700.000 i 1.000.000 EUR/km za određenu kolovoznu traku.
   Te mere najčešće predviđamo na delovima mreže, gde proširenje kolovoznih traka nije ekonomski opravdano i na deonicama koje nemaju zaustavne trake, ali je stanje kolovozne konstrukcije toliko loše da zahteva temeljitiju obnovu (deblja nadgradnja ili zamena kolovozne konstrukcije u celini).

3. Preslojavanje (PREPL): kolovoznu konstrukciju saniramo za planski period od bar 10 godina, pomoću novih sigurnosnih ograda štitimo posebno opasna mesta, a elemente KPP zadržavamo. Gruba cenovna procena takvih mera iznosi između 400.000 i 600.000 EUR/km za određenu kolovoznu traku. Te mere obično predviđamo na delovima mreže, gde kolovozna konstrukcija još nije u potpunosti strukturno istrošena, a saobraćajno opterećenje je umereno.

Izbor deonica i podelu na pojedinačne tipove mera određujemo na osnovu potreba koje zahteva stanje kolovozne konstrukcije, vremenske mogućnosti izvođenja (primer: preslojavanje se može brzo uraditi, izvođenje rekonstrukcije zahteva duži period) i finansijskih ograničenja.

Rezervni projekti su formirani kao dodatni izbor potreba. U osnovi polaze od stanja kolovoza koje se godinama pogoršava, a ne predstavljaju najviši prioritet. Kroz njih donosimo dodatan izbor projekata, za koje počinjemo sa pripremom projektne dokumentacije. Mogu da se izvode ako se izvođenje nekog od glavnih projekata vremenski pomeri. Pomeranja izvođenja su uglavnom posledica kašnjenja u izradi projektne dokumentacije. Paralelnom pripremom rezervnih projekata obezbeđujemo dovoljnu realizaciju u slučaju komplikacija u pripremi glavnih projekata. Kad se prioriteti povećaju, rezervni projekti se prekategorišu u glavne projekte.
U sklopu rezervnih projekata najčešće predviđamo meru tipa PREPL, jer je priprema projektne dokumentacije za taj tip mere jednostavna i brza.

Preventivne projekte čine cenovno povoljne mere (cena po jedinici), koje predviđamo na deonicama koje su već evidentirane u sistemu PMS-DARS kao potrebne, ali zbog ograničenih finansijskih sredstava nisu uključeni u glavne ili rezervne projekte. Svrha mera je usporavanje propadanja kolovoza. Kao mere najčešće predviđamo zaštitu kolovozne konstrukcije tankoslojnom presvlakom ili zamenom habajućeg sloja. Mere izvan kolovozne konstrukcije, kao što je npr. zamena sigurnosnih ograda, u sklopu preventivnih projekata se po pravilu ne izvode. Troškovi preventivnih projekata su 100.000 i 200.000 EUR/km za kolovoznu traku.

Na deonicama, gde gore razmatrane mere nisu predviđene, a zbog lošeg stanja kolovozne konstrukcije treba izvesti sanaciju kolovozne konstrukcije, izvode se **investicioni radovi na održavanju**. Uglavnom su to zamene habajućeg-zatvarajućeg i veznog sloja kolovozne konstrukcije na određenoj kolovoznoj traci debljine 4 + 9 cm na lokacijama gde oštećenja to zahtevaju. Izvodimo ih pre svega sa namerom omogućavanja bezbednog i udobnog odvijanja saobraćaja u vremenu do sveobuhvatne obnove kroz dnevna radna zatvaranja u dužini do 300 m.

3.2. Mostovi

U skladu sa Zakonom o putevima (ZCes-1C) i Pravilnikom o redovnom održavanju javnih puteva, DARS, d.d. je dužan da izvodi periodične preglede mostova. Oni se neprekidno izvode duže od 25 godina, pri čemu se svaki objekat pregleda najmanje jednom u tri godine. Periodičnim pregledima primarno obezbeđujemo odgovarajući nivo bezbednosti pri korišćenju putne infrastrukture, a istovremeno dobijamo podatke kako o stanju objekata kao celini, tako i njihovih pojedinačnih konstruktivnih sklopova. Za potrebe uvođenja sistema BMS smo 2021. godine usvojili Metodologiju za praćenje stanja objekata za premošćavanje, koja nadograđuje rezultate pregleda pomoću postupka određivanja indikatora oštećenosti i obuhvata spisak parametara za opis oštećenja objekata za premošćavanje.

Stanje objekata procenitelji vrednuju kodifikovanom ocenom stanja od 5 (vrlo dobro) do 1 (vrlo loše), a njihovih pojedinačnih konstrukcionih sklopovima ocenom oštećenosti, koja se zasniva na kvantitativnom opisu oštećenja. Procenitelji za svako evidentirano oštećenje daju sledeće parametre: 1. vrsta oštećenja, 2. lokacija, 3. intenzitet oštećenja, 4. veličina oštećenja i 5. predložene mere za njegovu sanaciju. Zbog sistematskog i nepromenjenog načina prikupljanja podataka o stanju objekata u 25-godišnjem periodu, danas možemo na osnovu njih uz zadovoljavajuću preciznost da prognoziramo i njihovo očekivano stanje u narednim godinama.

U sklopu izrade zapisnika, pre svega za veća evidentirana oštećenja, procenitelji moraju da propišu sanacione mere, koje se zatim primenjuju na izradu kratkoročnih planova (do tri godine). Za srednjoročne (do šest godina) i dugoročne (do 25 godina) planove koristi se sistem BMS-DARS, koji se isto kao i PMS-DARS zasniva na softveru dTIMS. Ulazne podatke sistema predstavljaju ocene oštećenosti pojedinačnih konstrukcionih sklopova svih objekata za premošćavanje u mreži. Ocene opisuju trenutno stanje objekata, a sistem BMS-DARS podatke zatim obrađuje i prognozira očekivano buduće stanje objekata za premošćavanje, što predstavlja osnov za dalju analizu.

Sistem na osnovu izračunatih budućih stanja omogućava određivanje troškova i vreme sanacije za određeni objekat (tabela 1), poređenje stanja svih objekata za premošćavanje u mreži, analizu različitih strategija održavanja, određivanje minimalnih finansijskih sredstava za održavanje fonda objekata u postojećem stanju i godišnju i periodičnu optimizaciju korišćenja raspoloživih finansijskih sredstava.

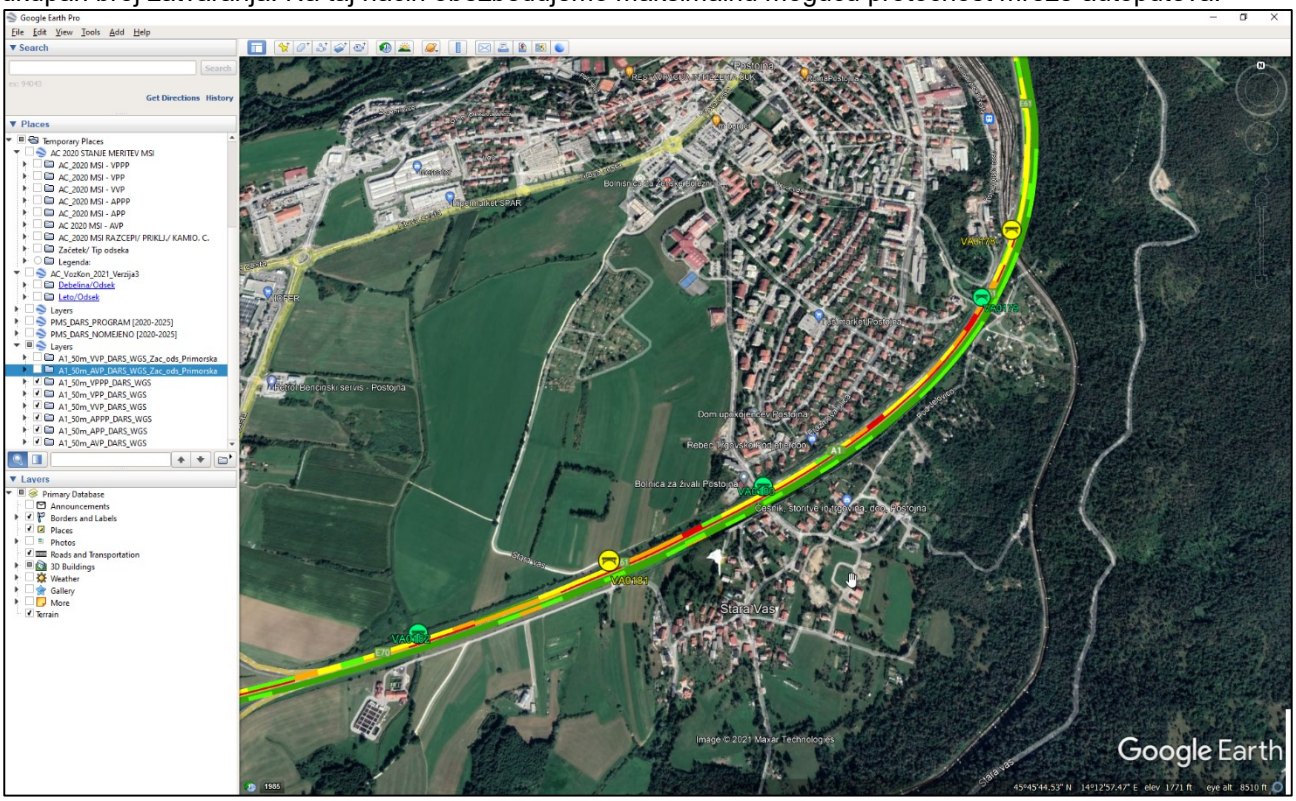
Tabela 1. *Primer proračuna troškova sanacije za izabrani objekat po pojedinačnim konstrukcionim sklopovima*

Objekat	Vrsta	God. izgradnje	Sklop	Plan	Troškovi
VA0113	nadvožnjak	1976.	kolov. konstr.	2024.	668.800,00 €
			trotoar	2024.	107.008,00 €
			dilatacija	2024.	76.000,00 €
			zašt. ograda	2024.	53.504,00 €
			odvodnjavanje	2024.	32.102,40 €

Objekt	Vrsta	Leto gradnje	Sklop	Plan	Strošek
VA0113	nadvoz	1976	prekladna k.	2024	668,800.00 €
			cestišče	2024	107,008.00 €
			dilatacija	2024	76,000.00 €
			v. ograja	2024	53,504.00 €
			odvodnjavanje	2024	32,102.40 €

Izvor: Eskpertski sistem BMS-DARS

U DPU obuhvatamo sve mostove, za koje nam sistem u izabranom periodu predlaže izvođenje sanacionih radova, bilo na celokupnom objektu, bilo na određenom konstrukcionom sklopu. Dodatno proveravamo i stanje mostova, za koje nam sistem u izabranom periodu nije predložio izvođenje mera, ali se nalaze na deonicama, na kojima je predviđena obnova kolovoza (slika 6). Ukoliko se pokaže da su ti objekti delimično oštećeni, njihovu sanaciju takođe uključujemo u DPU, jer time koristimo već predviđena zatvaranja puteva i smanjujemo ukupan broj zatvaranja. Na taj način obezbeđujemo maksimalnu moguću protočnost mreže autoputeva.



Slika 3. *Primer izvoda podataka iz sistema PMS-DARS, podaci o kolovoznoj konstrukciji*
Izvor: Google Earth

Posebna pažnja se u poslednje vreme posvećuje mostovima u zajedničkom upravljanju. To su nadvožnjaci, preko kojih prolaze državni, lokalni i šumski putevi, i javni putevi. Održavanje noseće konstrukcije tih mostova je u nadležnosti DARS, d.d. a u nadležnosti zajedničkih upravljača je održavanje kolovoza, površina za pešake i bicikliste, postrojenja za odvodnjavanje, ograda i ostale opreme. Planiranje sanacija tih mostova je po pravilu dugotrajno, jer se zajednički upravljači i pre izvođenja moraju dogovoriti o obimu sanacije, razgraničiti troškove i potpisati sporazum o saradnji. Lokalna zajednica zatim mora da rezerviše finansijska sredstva u svom budžetu, što pre svega za manje opštine predstavlja priličan teret.
U DPU je predlog ulaganja u obnavljanje mostova zato podeljen na samostalne projekte i obnovu mostova u sklopu obnove kolovoza.

3.3. Tuneli

Slično kao i za mostove, periodične preglede obavljamo i za tunele. Cilj praćenja je utvrđivanje stanja tunela, a rezultati su osnov za planiranje održavanja, obnavljanja i modernizacije.
Praćenje stanja tunela obuhvata vizuelnu procenu stanja određenih segmenata odnosno parametara i izvođenje različitih merenja. Pregledaju se unutrašnje obloge po svim kosinama, kolovoz i hodnici, sistem odvodnjavanja, nosači teže elektro-mašinske opreme (ventilatori, putokazi, znakovi sa promenljivim sadržajem...), portalne oblasti i površina iznad tunela. Izvode se geodetska merenja, merenja inklinometrom i piezometrom i snimanje sistema odvodnjavanja. Na osnovu dobijenih rezultata procenjuje se uticaj praćenih parametara na stabilnost, funkcionalnost, bezbednost ili protočnost objekata po unapred određenim kriterijumima. To je ulazni podatak za procenu stanja celokupnog objekta i osnov za prepoznavanje potreba u pogledu izvođenja sanacionih i drugih mera.
Sanacione mere prvi predlaže izvođač pregleda, jer mora za evidentirana oštećenja i druge anomalije da predlaže sanacione mere. Na osnovu nalaza pregleda i vrednovanja rezultata zatim planiramo mere obnove u DPU.

3.4. Geotehnički objekti

Geotehnički objekti obuhvataju potporne konstrukcije, drumske ukope, nasipe sa zaravnima, padinama, jarkovima i bankinama. Primarna svrha praćenja stanja geotehničkih objekata je ista kao i kod prethodno razmatranih vrsta objekata, a to je obezbeđivanje odgovarajuće bezbednosti za korisnike. Cilj praćenja stanja geotehničkih objekata je obezbeđivanje aktuelne informacije o njihovom stanju. Ona služi kao kriterijum za određivanje prioriteta za izvođenje hitnih radova na održavanju, dugoročnih investicionih mera i radova na redovnom održavanju.
Praćenje stanja izvodimo u okviru periodičnih i vanrednih pregleda. Pomoću glavnih i redovnih pregleda proveravamo stanje geotehničkih objekata sa trogodišnjom periodikom, a vanredni pregledi se izvode samo u slučaju nastale potrebe. Rezultati obe vrste pregleda je opšti opis stanja objekta, evidentiranje oštećenja, određivanje procene stanja objekta i predlog sanacionih mera.
Na osnovu podataka izvedenih pregleda priprema se DPU za geotehničke objekte. U obzir su uzeti utvrđeni nedostaci, oštećenja i vanredni događaji, koji zahtevaju određene privremene ili konačne mere. Izvodi se i analiza gradnje i pregled nalaza tokom gradnje. U nekim slučajevima se vrše i dodatna ispitivanja odnosno uspostavlja se obimniji monitoring. U DPU smo zbog zaštite od erozije i padanja kamenja obuhvatili i sanacije problematičnih padina i zamenu postojeće dotrajale zaštite kosina izloženih eroziji.

3.5. Odvođenje vode i ostala oprema (zaštita od buke)

Praćenje stanja objekata za prikupljanje izvodi se na osnovu Metodologije praćenja stanja objekata i uređaja za odvodnjavanje sa naglaskom na kolektorima za prikupljanje, koja je usvojena 2019. godine. Kolektori za prikupljanje su podeljeni na više sklopova: prikupljanje oticaja, dovodni deo, deo za prikupljanje i sleganje – betonski radovi, deo za prikupljanje i sleganje – zemljani radovi, deo za čišćenje, odvodni deo – ispuštanje u prirodni vodotok i odvodni deo – oticanje u zemlju. Za pojedinačne sklopove svakog objekta evidentiramo oštećenja i nedostatke, određujemo njihov uticaj na funkcionalnost i/ili stabilnost i hitnost preduzimanja mera. Na osnovu navedenih podataka se određuje i procena stanja objekta kao celine. Nalazi pregleda su osnov za planiranje sanacionih mera u DPU.
I za potrebno planiranje obnove postojećih ograda za zaštitu od buke (PHO) usvojili smo Metodologiju praćenja stanja zaštite od buke na autoputevima i moto-putevima. Na slici 7 je prikazan sadržaj terenskih pregleda

PHO. Na osnovu stanja i funkcionalnosti PHO (na nekih deonicama zbog povećanja saobraćaja ili starosti PHO one više nisu odgovarajuće za efikasno smanjivanje nivoa buke u okolini autoputa) pripremili smo stručne osnove za sanaciju oštećenih i dotrajalih PHO.

TERENSKI PREGLED PROTIHRUPNIH OGRAJ - PHO		
	Objekt se detajlno pregleda z obeh strani (v kolikor je to izvedljivo) in obsega:	
	Element pregleda:	*Predmet pregleda:*
OCENJEVANJE POŠKODB Lestvica: 0 ni poškodb 1 poškodbe so majhne 2 poškodbe so srednje 3 poškodbe so velike	**1. ABSORPCIJSKE POVRŠINE IN ELEMENTI /PANELI**	Poškodovanost panelov, ocena poškodovane površine v m^2, splošno stanje absorpcijskih površin.
	2. KONSTRUKCIJSKI ELEMENTI - PHO	Nosilna konstrukcija, pritrditev nosilne konstrukcije, antikorozijska zaščita kovinskih elementov, temeljenje.
	3. ZASILNI IZHODI	Funkcioniranje vrat, urejenost evakuacijskih poti, dostopnost, konstrukcija…
	Vrsta vpliva	*Vsebina vpliva*
OCENJEVANJE VPLIVOV Lestvica: 0 ni vpliva 1 majhen vpliv 2 srednji vpliv 3 velik vpliv	**1. VPLIV NA FUNKCIONALNOST**	- varstvo pred hrupom, - v primeru zasilnih izhodov: na odpiranje vrat, na varnost izhoda, na površine potrebne za evakuacijo,…
	2. VPLIV NA STABILNOST IN VARNOST	- mehanska odpornost in stabilnost, - prometna varnost.
NUJNOST UKREPANJA Lestvica: 1-Ukrep ni nujen in se ga načrtuje s planom rednega letnega vzdrževanja. 2- Ukrep je nujen in ga je potrebno izvesti v čim krajšem času. 3- Potrebno je takojšnje ukrepanje.	**OCENI SE NUJNOST IN HITROST IZVEDBE UKREPA**	Ocena po lestvici.

Slika 4. *Primer izvoda podataka iz sistema PMS-DARS, podaci o kolovoznoj konstrukciji*
Izvor: Metodologija za pregled ograda za zaštitu od buke DARS

U DPU smo na osnovu Stručnih osnova za program obnove ograda za zaštitu od buke uz autoputeve i moto-puteve u Republici Sloveniji kojima upravlja preduzeće DARS d.d., odredili tri vrste sanacija postojećih PHO:

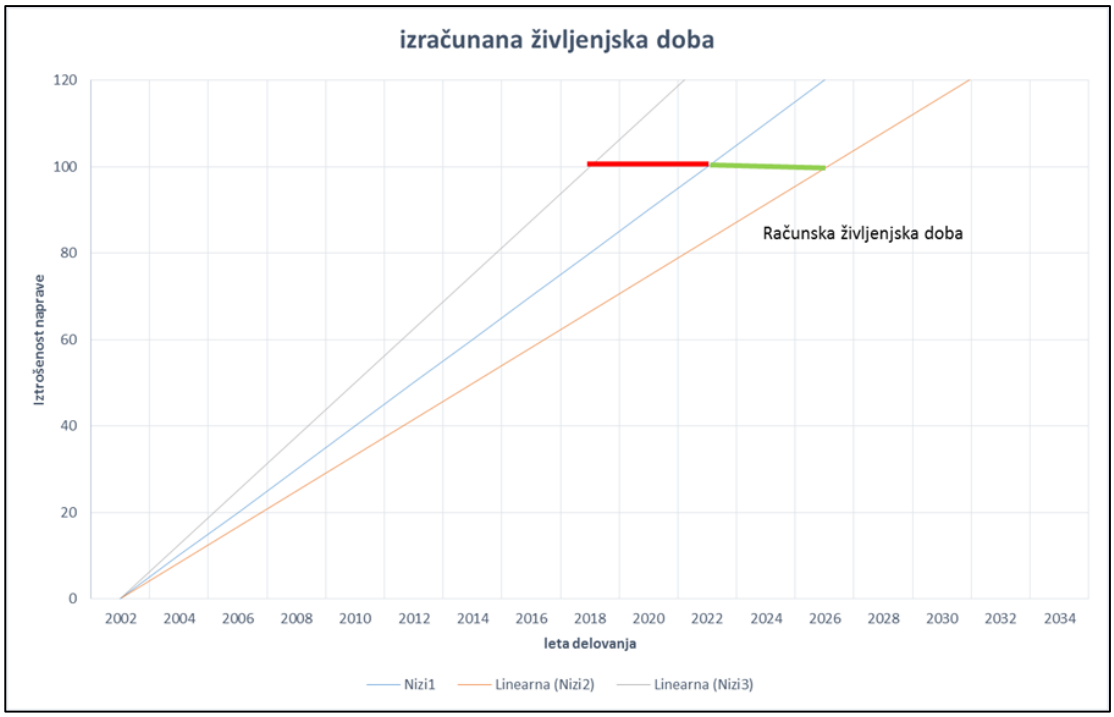
- obnovu,
- obnovu i nadogradnju i
- rekonstrukciju.

Prioritetna područja za sanaciju uticaja buke, na kojima planiramo izvođenje dodatnih mera za zaštitu od buke, su na osnovu rezultata sprovedenog radnog monitoringa buke tokom 2018. i 2019. godine definisana u Stručnim osnovama za operativni program zaštite od buke pored autoputeva u Republici Sloveniji. U tim stručnim osnovama su za potrebe planiranja mera zaštite od buke definisana područja, na kojima treba izvesti mere, uz definisanje prioriteta i ključna usmerenja za planiranje mera zaštite od buke, sa namerom da mere budu što efikasnije s obzirom na uložena sredstva. Predložene mere se unose u DPU.

3.6. Elektromašinska oprema u tunelima

Stanje elektromašinske opreme procenjujemo pomoću pripremljene metodologije, koja za određeni sklop uređaja obuhvata starost, očekivani životni vek, stvarno stanje, raspoloživost rezervnih delova, stepen otkazivanja, funkcionalnost, kritičnost i raspoloživost rezervnih delova.

Stanje se zatim integriše u ekspertski sistem ESO-MS-DARS, razvijen u softveru dTIMS. Pomoću njega na osnovu karakteristika i stanja određenog sklopa uređaja izračunavamo modifikovani životni vek određenog sklopa (slika 9). Na osnovu modifikovanog životnog veka, raspoloživih finansijskih sredstava i kritičnosti određenog uređaja pomoću sistema prognoziramo buduće stanje ESO uređaja i određujemo prioritete za zamenu određenih uređaja.



Slika 5. *Princip funkcionisanja sistema ESO-MS-DARS: ako se uređaj ponaša bolje od očekivanja, sistem produžava životni vek i obrnuto*
Izvor: Eskpertski sistem ESO-MS-DARS

Na osnovu rezultata sistema i usklađivanja između pojedinačnih sklopova infrastrukture predviđamo zamenu ESO opreme, koja se u skladu sa DPU može vršiti u sklopu sveobuhvatnih obnova, u sklopu objedinjenih sklopova ESO uređaja ili parcijalno po pojedinačnim sklopovima opreme.

3.7. Saobraćajna oprema

Mere za poboljšanje saobraćajne bezbednosti podeljene su u tri sklopa, i to zamena putokazne signalizacije, preuređenje područja priključaka i postavljanje saobraćajne opreme sa namerom poboljšanja bezbednosti saobraćaja. Pregledi saobraćajne signalizacije vrše se u skladu sa Metodologijom praćenja stanja saobraćajne signalizacije.
Zamena putokazne signalizacije obuhvata zamenu saobraćajne signalizacije koja je dotrajala (stara bar 20 godina) ili je neodgovarajućeg kvaliteta s obzirom na najnovije propise merenja koeficijenta retrorefleksije, merenja koeficijenta hromatičnosti pri dnevnoj svetlosti ili svetlosnog faktora. Horizontalna saobraćajna signalizacija se obnavlja, ukoliko se utvrdi da ne odgovara karakteristikama, zahtevanim u sklopu merenja koeficijenta retrorefleksije (noćna, dnevna, mokri i suvi uslovi), merenja klizanja (SRT), merenja svetlosnog faktora (p) i karakteristika hromatskih koordinata x i y ili nije odgovarajućeg oblika i dimenzija.
U slučaju preuređenja područja priključaka u pitanju je uređenje takozvanih zona izletanja. U pitanju je pristup saobraćajno-sigurnosnim rešenjima u slučaju nekontrolisanog ili kontrolisanog izletanja vozila u područje, koje je trenutno zatvoreno čeličnom sigurnosnom ogradom. S obzirom na pozitivnu praksu izvođenja takvih rešenja njih izvodimo na priključcima gde konfiguracija terena i ostala infrastruktura to dozvoljava.
Postavljanje saobraćajne opreme sa namerom poboljšanja bezbednosti saobraćaja delimo u više sklopova. Postavljanjem betonskih sigurnosnih ograda u centralnom pojasu za odvajanje zamenjujemo postojeće čelične sigurnosne ograde. Njihova prednost je da zbog načina postavljanja otklanjaju potrebu u pogledu radova na održavanju na pojasu za odvajanje, a po karakteristikama mogu da izdrže nalet znatno težih vozila.
Zamenom postojećih sigurnosnih ograda uz zaustavne trake i na opasnim mestima (stubovi nadvožnjaka, portala i slično) novim i višim nivoom zadržavanja smanjujemo broj mrtvih i teško povređenih u saobraćajnim nezgodama. Sa istim razlogom ukopane udarne završne elemente, postavljene na početku sigurnosnih ograda u smeru vožnje, zamenjujemo završnim elementima, ispitanim po sistemu SIST EN 1317, a izlaze s autoputa ili moto-puta opremamo ublaživačima udara.
Sve navedene mere za poboljšanje saobraćajne bezbednosti se unose u DPU.

4 USKLAĐIVANJE IZMEĐU POJEDINAČNIH SKLOPOVA INFRASTRUKTURE

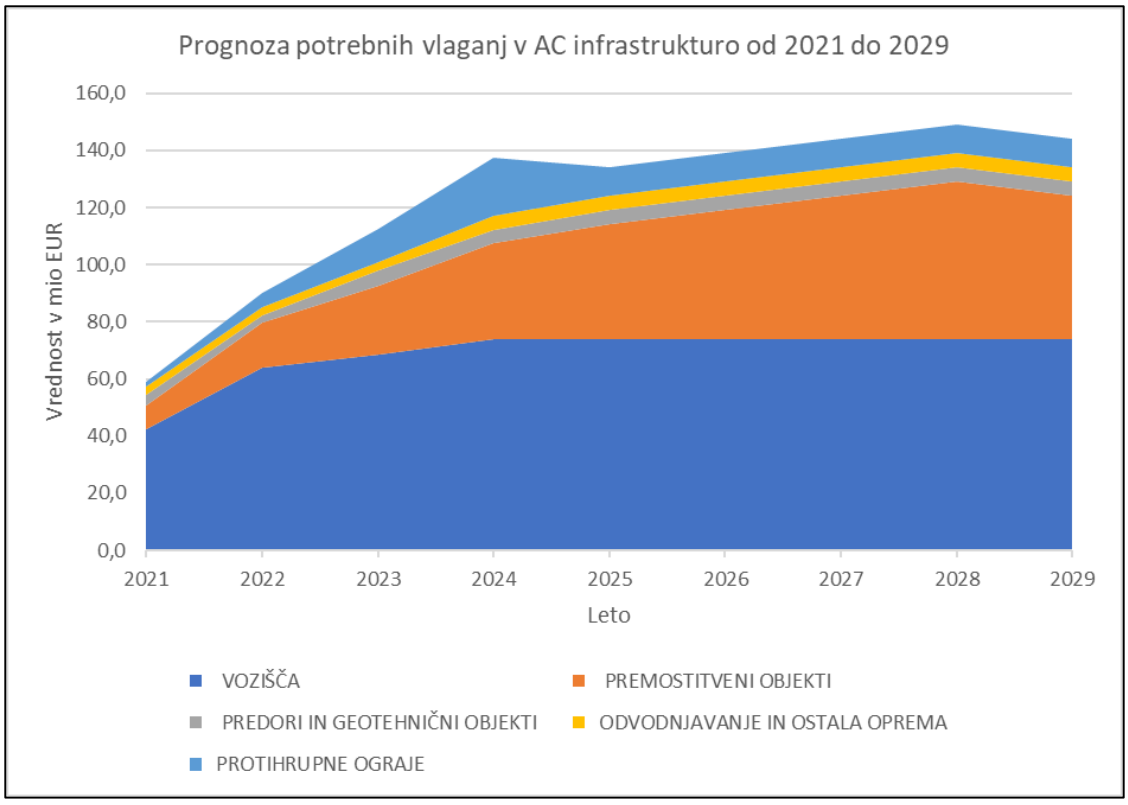
Na osnovu evidentiranih potreba pojedinačnih sklopova infrastrukture obavlja se međuresorno usklađivanje. Pomoću njega usklađujemo vreme izvođenja obnove određenih delova infrastrukture na istim lokacijama. Time izbegavamo zatvaranja saobraćaja na istim deonicama autoputa tokom uzastopnih godina.
Nosilac intervencije može biti finansijski najobimniji ili tehnički najzahtevniji infrastrukturni sklop. Najčešće su to kolovozi, a u određenim slučajevima, pre svega u slučaju dužih ili zahtevnijih objekata, to su i objekti za premošćavanje ili tuneli. Ukoliko je određeni infrastrukturni sklop na nekoj lokaciji znatno lošiji od drugih, saniramo samo taj sklop.
Usklađivanje se obavlja tako što najpre obezbeđujemo podatke o potrebama u pogledu određenih sklopova infrastrukture na predmetnom koridoru. Zatim, uz uzimanje u obzir izvodljivosti određenog projekta, definišemo etape (slika 10). Za projekte rekonstrukcija to je obično 7 do 15 km kolovozne trake po etapi, a za projekte preslojavanja, 10 do 20 km kolovozne trake. Za veće sanacije objekata za premošćavanje i sanacije tunela to su obično jedan do dva objekta u određenoj etapi. Prilikom određivanja etapa uzimamo u obzir i mogućnosti zatvaranja određenih priključaka. Pri tom izbegavamo istovremena zatvaranja dva uzastopna priključka, prilaza odmorištima i već obnovljenih delova infrastrukture.
Takođe izbegavamo da određeni kraći delovi, koji u kratkoročnom periodu još ne zahtevaju radove na obnovi, ostanu neobnovljeni. U srednjoročnom periodu bi te deonice zahtevale izvođenje dodatnog projekta, što je nepovoljno sa aspekta čestog ometanja toka saobraćaja. To je naročito neuralgično na opterećenijim drumskim deonicama sa zahtevnim zatvaranjima tipa 2+1+1. Dodatno su obnove kraćih delova problematične i sa aspekta tendera za radove, jer zahtevaju izvođenje dodatnih tendera za projektovanje i izvođenje radova, što predstavlja dodatna troškovna i kadrovska opterećenja.

BCP odsek	ime BCP odseka	stac. od	stac. do	dolžina	Tip odseka	PROJEKT	PLAN 2021 [brez DDV]	PLAN 2022 [brez DDV]	PLAN 2023 [brez DDV]	PLAN 2024 [brez DDV]	PLAN 2025 [brez DDV]	PLAN 2026 [brez DDV]	PLAN 2027 [brez DDV]
Planirani ukrepi na voziščih po prioritetah (projekti)													
						2. Primorski krak po etapah							
0053	Vrhnika - Logatec	0.500	7.800	7.300	T	2/5							2026
0653	Vrhnika - Logatec	0.500	7.800	7.300	T	2/5							2026
0053	Vrhnika - Logatec	7.800	8.279	0.479	T	2/6							
0653	Vrhnika - Logatec	7.800	8.283	0.483	T	2/6							
0054	Logatec - Unec	0.000	8.650	8.650	T	2/6							
0654	Logatec - Unec	0.000	8.650	8.650	T	2/6							
0054	Logatec - Unec	8.650	10.422	1.772	T	2/4-1							
0654	Logatec - Unec	8.650	10.431	1.781	T	2/4-2							
0055	Unec - Postojna	0.000	0.720	0.720	T	2/4-1							
0655	Unec - Postojna	0.000	0.720	0.720	T	2/4-2							
0055	Unec - Postojna	7.035	11.375	4.340	T	2/1			Se projektira				
0056	Postojna - Razdrto	0.000	1.060	1.060	T	2/1							
0153	priključek Postojna	0.000	0.364	0.364	P	2/1 - kraka A in B							
0655	Unec - Postojna	7.035	7.890	0.855	T	2/1							
0655	Unec - Postojna	7.890	10.361	2.471	T	2/1 - na tem delu manjši ukrep							
0655	Unec - Postojna	10.361	11.382	1.021	T	2/1							
0656	Postojna - Razdrto	0.000	1.060	1.060	T	2/1							
0056	Postojna - Razdrto	1.060	10.990	9.930	T	2/3							
0656	Postojna - Razdrto	1.060	10.990	9.930	T	2/3							

Slika 5. *Primer određivanja etapa za zahtevni koridor na primorskom kraku autoputa A1*
Izvor: Plan mera na putnoj infrastrukturi kojom upravlja DARS d.d. za period 2021–-2023. godina

U obzir uzimamo i regionalnu disperziju. Poželjno je da projekte u određenoj godini izvodimo na većini krakova autoputeva, a ne na primer zgusnuto na određenom kraku. Glavni razlog za to je ograničenje kašnjenja saobraćaja, koja bi se u slučaju prevelikog broja zatvorenih deonica na određenoj deonici bitno povećala. Dodatni razlog je ravnomerna opterećenost građevinske operative. Ona donosi veću stabilnost cena i bolji kvalitet izvedenih radova.
Na slici 10 je prikazano određivanje etapa za projekat na veoma zahtevnom koridoru na autoputu A1. Fazu 2/1 smo zbog kompleksnosti izvođenja počeli da projektujemo više od tri godine pre predviđenog izvođenja radova. Za faze 2/1, 2/4-1, 2/4-2, 2/6 su nosioci projekta duži objekti za premošćavanje. Faza 2/4 je dodatno podeljena u dve podfaze (2/4-1 i 2/4-2), jer obnova dva paralelna vijadukta tokom jedne godine nije moguća. Etapa 2/5 je predviđena tek posle 2027. godine, jer bi ranije izvođenje zbog projekta izgradnje treće kolovozne trake na deonici Brezovica – Vrhnika dovelo do previše građevinskih radova na primorskom kraku autoputa A1.
Među najvažnijim kriterijumima je ukupna vrednost mera za obnavljanje u okviru određene godine. Ona mora biti što konstantnija, jer time ne stvaramo poremećaje na tržištu inženjerskih i građevinskih usluga. S obzirom

na potrebe putne mreže kojom upravlja DARS d.d, konstatujemo da će ista tokom narednih godina konstantno rasti (slika 11).



Slika 5. *Prognoza potrebnih ulaganja u infrastrukturu autoputeva, po delovima infrastrukture*
Izvor: Interni materijal DARS

U slučajevima kad u određenoj godini ukupna vrednost projekata prevazilazi raspoloživa sredstva, projekte moramo da pomerimo u budućnost ili da prilagodimo redosled u okviru prioriteta istog ranga. U fazi pripreme DPU se racionalizacija po pravilu vrši smanjivanjem nivoa nadogradnji na mreži (poboljšanje funkcionalnosti infrastrukture) i očuvanjem mera obnove (vraćanje stanja infrastrukture u odgovarajuće).
Racionalizaciju možemo na primer da izvedemo povećanjem broja obnova na račun zamena objekata za premošćavanje, otvaranjem tendera za obnovu kolovozne konstrukcije tipa PREPL ili OVK umesto REKO, očuvanjem postojećih sigurnosnih ograda i zaštitom novim ogradama samo na opasnim mestima i slično. Racionalizacija mera u većini slučajeva utiče na buduće stanje mreže povoljnije od pomeranja projekata u budućnost, zato ovu poslednju meru koristimo samo kada je to neophodno.

5. ZAKLJUČAK

DPU, koji smo 2018. godine prvi put koncipirali u novom obliku, osnovni je dokument za planiranje investicija u obnovu svih delova infrastrukture i opreme za period od narednih šest godina. Potvrđen je u dokumentu „Plan mera“ (PU), koji važi za period od tri godine. U fazi pripreme dokumenta potrebna je saradnja stručnjaka iz različitih stručnih oblasti DARS d.d. inženjera, instituta i drugih stručnih saradnika, koji su uključeni u ceo proces utvrđivanja i analiziranja stanja drumske infrastrukture. Razmatranja i usklađivanja se moraju završiti do usvajanja PU. PU se posle usklađivanja usvaja i potvrđuje na nivou rukovodstva preduzeća.
Usvojeni PU se koristi kao osnova za sve tekuće aktivnosti prilikom izvođenja investicija u postojeću mrežu.
Pošto se stanje infrastrukture i opreme menja iz godine u godinu, svake godine prikupljamo nove informacije o stanju. PU se ažurira na godišnjem nivou, pri čemu se pored novih konstatacija u pogledu stanja u obzir uzima i faktička realizacija predviđenih investicija.
Kao što je već navedeno u uvodu, DPU se priprema na osnovu potreba, utvrđenih pomoću analiza. Obim izvedenih mera zavisi od obezbeđivanja finansijskih sredstava, blagovremene pripreme potrebne tehničke

dokumentacije za izvođenje radova, uspešnosti postupaka javnih nabavki i vremenskog usklađivanja svih predviđenih radova obnove na mreži.
Glavna prednost tako koncipiranog DPU je prelaz sa projektnog razmatranja sklopova infrastrukture na mrežno razmatranje sklopova infrastrukture. To predstavlja prelaz sa reaktivnog modela ulaganja, gde su mere obnove posledica stanja infrastrukture (sistem u kome najlošije stanje ima prioritet), na optimalno ulaganje, gde su mere odabrane po kriterijumu vrednovanja koristi i troškova (tzv. sistem troškova i koristi). Prednosti takvog sistema su kako niži troškovi za obnovu infrastrukture, tako i veće koristi za korisnike, između ostalog zbog manjeg broja zatvaranja.
Opisani način rada omogućava i lakše planiranje i opravdavanje potrebnih budućih izdataka za održavanje saobraćajne infrastrukture. Pripremu projektne dokumentacije možemo da počnemo blagovremeno, a u znatnoj većoj meri možemo da izbegnemo i neprijatna iznenađenja, kad bi određeni sklopovi u veoma lošem stanju zahtevali interventne mere i ograničenja saobraćaja.

Literatura

[1] PIARC, 2022. *Asset Management Manual a Guide for Practitioners*
[2] Ralph Haas, W. Ronald Hudson; *Pavement Asset Managament*, Scrivener Publishing L.L.C, 2015
[3] DARS, *Obnavljanje in prilagajanje izhodišč v sistemu za gospodarjenje z vozišči PMS-DARS in vpeljava poenostavljenega sistema za gospodarjenje s cestami v PMS-DARS končno poročilo o delu v obdobju od 21. 4. 2011 do 30.10.2021*, DRI, 2021
[4] Gerardo Flintsch, Richard Wix: *Plenary Workshop – Sufrace Characteristics*, SURF Milano, 2022
[5] Jurgele, M., Poznič, M., Zajec, A., Zavec, M., Kušar, M., *Drsni plan obnovitvenih ukrepov na avtocestni infrastrukturi*, Kolokvij o asfaltih in bitumnih 2021, Bled 2021
[6] Jurgele, M., Marinko, B., *Gospodarjenje z infrastrukturo na državnih cestah*, Kolokvij o asfaltih in bitumnih 2023, Bled 2023

ПРИМЕНА HCM МОДЕЛА УТВРЂИВАЊА НИВОА УСЛУГЕ НА „МОРАВСКОМ КОРИДОРУ“

Александар Цанић[1]
[1] *ЈП Путеви Србије, aleksandar.canic@putevi-srbije.rs*

Резиме: *На новоотвореној деоници „Моравског коридора“ сектор 1 (НС Појате – НС Кошеви) инсталирано је 7 бројача саобраћаја који континуално, у реалном времену, врше прикупљање података о протоку возила у оба смера. Прикупљени подаци о протоку прослеђују се ка Систему за мониторинг нивоа услуге на ауто-путу, где се обрађују по међународно признатој HCM-овој методологији и у реалном времену добија се информација о тренутној густини тока на појединим деоницама, односно стању саобраћајног тока на тим деоницама и као такав Систем може да детектује интензивнији саобраћај, колону возила, загушење итд. Са друге стране коришћењем измењиве саобраћајне сигнализације и покретањем одговарајућих саобраћајних сценарија, та информација се прослеђује ка корисницима пута. Такође, информација о повећаном интензитету саобраћаја, односно колони возила, може бити прослеђена и одговарајућим наплатним станицама како би се њихове посаде благовремено припремиле, али и управи саобраћајне полиције, односно сектору за ванредне ситуације.*

Кључне речи: ITS, HCM, проток саобраћаја, густина тока, колона возила

APPLICATION OF THE HCM MODEL FOR DETERMINING THE LEVEL OF SERVICE ON THE "MORAVIAN CORRIDOR"

Aleksandar Canić
[1] *PE Roads of Serbia, aleksandar.canic@putevi-srbije.rs*

Abstract: *On the newly opened section of the "Moravian Corridor" sector 1 (NS Pojate - NS Koševi), 7 traffic counters have been installed that continuously, in real time, collect data on the flow of vehicles in both directions. The collected flow data is forwarded to the Highway Service Level Monitoring System, where it is processed according to the internationally recognized HCM methodology, and real-time information is obtained on the current flow density on certain sections, i.e. the state of the traffic flow on those sections and as such, the System can detect more intense traffic, a line of vehicles, congestion, etc. On the other hand, by using changeable traffic signals and starting appropriate traffic scenarios, that information is forwarded to road users. Also, information about the increased intensity of traffic, that is, the convoy of vehicles, can be forwarded to the corresponding toll stations so that their crews can be prepared in a timely manner, as well as to the traffic police administration, that is, the department for emergency situations.*

Keywords: ITS, HCM, traffic flow, flow density, vehicle queue

1. УВОД

Отворене деонице ауто-путева како у свету, тако и све чешће код нас опремљене су различитим ITS елементима као што су: саобраћајни знакови са измењивим садржајем (у даљем тексту VMS), бројачима саобраћаја у виду индуктивних петљи, метеоролошких станица, разних врста камера (AID, PTZ, опште намене), станицама за помоћ, V2X технологијом и многим другим садржајима. Сви ови елементи опреме пута остварују свој пун капацитет тек када су обједињени кроз централизован систем (Централни систем за надзор и управљање – у даљем тексту ЦСНУ) у коме се сливају сви прикупљени подаци и који кроз своју унутрашњу архитектуру, аритметику и логику обрађује све те податке и даје излазне резултате у виду предложених одговарајућих мера.

У овом раду биће представљен управо један такав систем који користи прикупљене податке са деонице, обрађује их кроз унутрашњу методологију и након обраде даје сет мера које је потребно предузети првенствено ради безбедности учесника у саобраћају, али и њиховог конфора и ужитка у вожњи.

Систем за мониторинг нивоа услуге на ауто-путу (у даљем тексту Систем) прикупља податке о проласку возила са инсталираних бројача саобраћаја у виду индуктивних петљи у реалном времену (резолуција на нивоу од 1 минута), након чега их обрађује према HCM методологији утврђивања нивоа услуге, а као излазни податак израчунава се просечна густина тока на појединим деоницама, односно

[1] Александар Цанић; aleksandar.canic@putevi-srbije.rs

предлаже покретање одређених дефинисаних сценарија који имају извршну функцију првенствено над измењивом саобраћајном сигнализацијом, чиме се информацију прослеђују крајњим корисницима.

Дакле, циљ овог рада јесте да представи могућности за примену једног теоријског модела (HCM модел) у пракси, односно на изграђеној и за саобраћај отвореној деоници ауто-пута А5 од НС „Појате“ до НС „Кошеви“. Рад је концептиран да у свему прати кораке представљене у *Highway Capacity Manual 6th edition* из 2016. године са пригодним коментарима на који начин је представљени корак имплементиран у пракси. Такође, у дискусији рада представљене су мере које Систем предлаже, односно могућности за даље усавршавање.

2. ПРИМЕНА HCM МЕТОДОЛОГИЈЕ У РЕАЛНИМ УСЛОВИМА

2.1. Основни концепти из HCM који су коришћени у овом раду

Односи између протока, брзине и густине су међу основним у транспортном инжењерству и могу се користити за описивање саобраћајних операција на било ком путу. Примењивост приручника Highway Capacity Manual (HCM) креће се од високо детаљних до високо генерализованих. HCM се може применити на систем елемената саобраћајница који варирају од појединачних тачака до целокупног транспортног система, односно на различите начине путовања који се могу разматрати одвојено или у комбинацији, и на више типова коловоза и услова функционисања саобраћаја на објекту.

Било која анализа одвијања саобраћајног тока на путу може се извршити на различитим нивоима детаљности, у зависности од сврхе анализе и количине доступних информација. Обично, како анализа постаје детаљнија, њени захтеви за подацима се повећавају, област анализе се смањује, временски захтеви се повећавају, а степен прецизности у процењеним перформансама се побољшава.

Како је циљ овог Система да се у реалном времену генерише информација о густини тока, односно услова у одвијању саобраћајног тока неопходно је применити постулате *Оперативне анализе* HCM методологије која се обично фокусира на тренутне или краткорочне услове. То укључује детаљне уносе података у HCM процедуре у реалном времену (ниво резолуције која је примењена износи 1 минут), без употребе или са минималном употребом предефинисаних вредности.

Сваки објекат односно део ауто-пута (или цео ауто-пут) који се анализира потребно је поделити на *сегменте*. Сегмент је дужина коловоза између две тачке. Обим саобраћаја и физичке карактеристике углавном остају исте током дужине сегмента, иако се могу јавити мале варијације. HCM дефинише основне сегменте ауто-пута, сегменти преплитања на ауто-путу, улазни односно излазни сегменти на ауто-путу [1].

Саобраћајни ток на коме се може применити HCM методологија обухвата моторизована возила која се састоје од аутомобила, лаких и тешких камиона, рекреативних возила, аутобуса и мотоцикала. Имајући у виду да различити типови моторних возила имају различите радне карактеристике, HCM користи путничке аутомобиле као заједничку основу за поређења. На пример, камиони заузимају више простора од путничких аутомобила и спорије убрзавају, посебно на успонима. Стога, у неким случајевима, HCM „претвара“ камионе у *еквиваленте путничких аутомобила* (нпр., просечан камион заузима исти простор на путу као два путничка аутомобила на равном ауто-путу). HCM користи концепт еквивалената путничких аутомобила за претварање коловоза, простора и времена које користи дати тип тешког возила у еквивалентан број путничких аутомобила који су га могли користити, с обзиром на идентичан коловоз, саобраћај и услове контроле.

Меродавни проток – представља проток који је добијен трансформацијом броја возила која пролазе преко инсталираних бројача саобраћаја дуж деонице у једном минуту у једночасовни проток. На тај начин се обезбеђује да се добијају вредности који су упоредиви на часовном нивоу, али задржава се осетљивост Система на варијације у току на врло високом нивоу.

Густина тока је број возила која заузимају дату дужину траке или коловоза у одређеном тренутку [4]. За прорачуне у овом раду густина је просечна током времена и изражава као возила по километру по траци (voz/km/tr) или путничких аутомобила по километру по траци (pa/km/tr).

ИТС стратегије управљања саобраћајем за које се показало да побољшавају пропусност возила или смањују кашњења возила су прилагодљива контрола сигнала и сигнална интерконекција. ИТС стратегија ауто-пута као што је контрола возила на улазу има за циљ побољшану пропусност и брзину на ауто-путу, док технике управљања инцидентима смањују време потребно за идентификацију и рашчишћавање инцидената и на тај начин сведу на минимум време током којег се капацитет смањује као и повезано кашњење. Променљива ограничења брзине на ауто-путу, у комбинацији са аутоматизованим спровођењем ограничења брзине, такође обећавају, али захтевају додатно проучавање [1].

Квалитет услуге описује колико добро транспортни објекат или услуга делује из перспективе путника. *Ниво услуге (LOS)* је квантитативна мера учинка или мера која представља квалитет услуге. LOS концепт олакшава презентацију резултата коришћењем познате скале од A (најбоља) до F (најгора) [5]. LOS за дати режим на датом елементу транспортног система дефинисан је једном или са више мера услуге. Иако је брзина путовања главна преокупација возача која се односи на квалитет услуге, слобода маневрисања унутар саобраћајног тока и близина других возила су подједнако важни. Ови квалитети су повезани са густином саобраћајног тока. За разлику од брзине, густина расте како се проток повећава до капацитета, што резултира мером услуге коју возачи могу приметити и осетљива је на широк спектар густине тока. Густина се користи као мера услуге за објекте ауто-пута и то на сегментима: основни сегменти ауто-пута, узлазно/излазне сегменти и сегменти преплитања.

2.2. Сегментација „Моравског коридора“

Како је већ речено, сваки објекат ауто-пута састоји се од три типа сегмената:

- **Основни сегменти** ауто-пута су сви сегменти који нису улазни, излазни или сегменти преплитања [2] – на овом типу сегмената инсталирани су бројачи саобраћаја и на њима се врши мерење протока и просечне брзине саобраћајног тока, другим речима на овим сегментима се добијају улазни подаци за процену нивоа услуге.
- **Сегменти преплитања** ауто-пута су сегменти на којима се два или више саобраћајна тока, који се крећу у истом општем правцу, укрштају дуж значајне дужине ауто-пута без помоћи уређаја за контролу саобраћаја (осим саобраћајних знакова). Преплитани сегменти се формирају када дуж ауто-пута се наиђе улазни сегмент, а блиско након њега наставља се излазни сегмент и ова два сегмента су повезана континуираном помоћном траком [2] – на анализираној деоници „Моравског коридора“ нема таквих решења петљи, па се самим тим овакви сегменти и не појављују.
- **Улазно/излазни сегменти** на ауто-путу су сегменти у којима два или више саобраћајна тока се комбинују како би формирали један саобраћајни ток (улазни) или један саобраћајни ток се дели тако да формира два или више одвојених саобраћајних токова (излазни) [2]. У почетном решењу Система за мониторинг нивоа услуге на ауто-путу, анализа нивоа услуге на овим сегментима је изостављена. Са даљом интеграцијом система, а овде се првенствено мисли на добијање података о оптерећености улазних/излазних канала на наплатним станицама могуће је извршити интеграцију и ових сегмената у Систем.

Сегментација објеката је само мали део целокупне методологије, али је веома важна у обезбеђивању правилне примене методологије. Сегментација мора бити завршена пре него што се изврши било какав прорачун.

Следећа општа правила сегментације важе за дељење објекта у HCM сегменте [2]:

- Препоручује се да се први и последњи сегмент дефинисаног објекта буде основни сегмент ауто-пута – примењено у Систему.
- Нови сегмент треба започети сваки пут када се промени обим потражње тј. на улазним и излазним рампама код наплатних станица – примењено у Систему, наиме на свакој деоници

између НС Појате, НС Ћићевац, НС Крушевац исток и НС Крушевац запад обезбеђено је у оба смера по један бројач саобраћаја, тако да се на сваком сегменту истовремено врши мерење неопходних података.
- Нови сегмент треба отпочети сваки пут када се капацитет промени (нпр. када се додаје још једна саобраћајна трака или се постојећа затвара, када се терен значајно промени, или где ширине трака или размак од бочних сметњи се мења на начин који утиче на капацитет) – нема таквих сегмената на анализираном објекту.
- Подручје утицаја улазне/излазних сегмената се сматра на 450m низводно од тачке спајања за улазне рампе и узводно од тачке раздвајања за излазне рампе – о овоме се водило рачуна при позиционирању бројача саобраћаја.

У самом концепту Система који је представљен у овом раду претпоставља се да је саобраћајни ток неометан, односно да нема других раскрсница сем денивелисаних раскрсница, као и да се ради првенствено о незасићеном току, односно да је однос вредности потражње (меродавног тока) и капацитета деонице мањи или једнак 1.0.

Такође, даље се претпоставља, односно обезбеђено је да су ограничења брзине у редовним условима одвијања саобраћаја између 80 и 130 km/h, да су сегменти уједначених геометријских и саобраћајних карактеристика укључујући константне токове потражње.

2.3. Капацитет анализиране саобраћајнице при основним условима

Практично идеални услови под којима се постиже пун капацитет основног сегмента ауто-пута су добро време, добра видљивост, без инцидената или незгода, без активности у зони радова и без оштећења коловоза довољно озбиљних да утичу на ток. Термин „практично идеални услови " претпоставља постојање ових услова. Ако било који од ових услова не постоји, брзина и капацитет сегмента ауто-пута може се израчунати кроз HCM методологију која одражава преовлађујуће услове. У Основне услове се убрајају и:
- Нема тешких возила у саобраћајном току,
- Популација возача углавном састављена од уобичајених корисника који су упознати са објектом, и
- Ширина траке од 3,7m и одговарајућих удаљености бочних сметњи.

Капацитет основног сегмента ауто-пута у основним условима варира са брзином слободног тока (V_{ST}). Табела 1. даје вредности капацитета у основним условима у односу на вредности V_{ST}. Интерполација између вредности V_{ST} је дозвољена.

Табела 1. *Капацитет основних сегмената ауто-пута при основним условима*

Брзина слободног тока V_{ST} (km/h)	**Капацитет основног сегмента ауто-пута (pa/h/tr)**
120	2400
110	2400
100	2400
90	2300
80	2200
70	2100

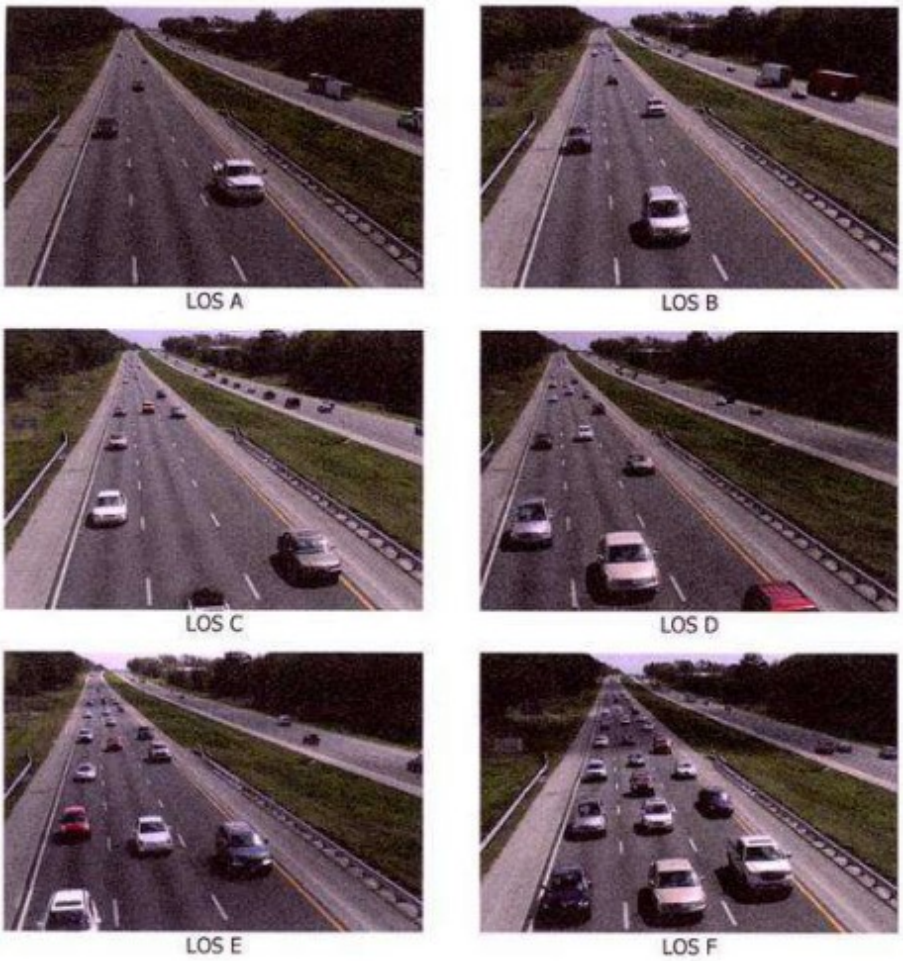
Извор: Highway Capacity Manual 6th edition из 2016.

Основни сегменти ауто-пута достижу свој капацитет при густини од приближно 28 pa/km/tr, иако ова вредност донекле варира од локације до локације. При овој густини, возила су распоређена преблизу да би се пригушио утицај било које промене у протоку, као што је промена траке или улазак додатних возила, без изазивања поремећаја у протоку који се шири узводно.

2.4. Ниво услуге на основним сегментима објекта

LOS на основним сегментима ауто-пута дефинисана је густином тока. Густина описује близину возила другим возилима и повезана је са слободом возача да маневрише унутар саобраћајног тока. За разлику

од брзине, густина је осетљива на промену протока у читавом опсегу протока. Слика 1. илуструје шест нивоа услуге дефинисаних за основне сегменте ауто-пута.



Слика 1. *Примери нивоа услуге на основном сегменту ауто-пута*
Извор: Highway Capacity Manual 6th edition из 2016.

Описи различитих нивоа услуге [1]:
LOS A описује функционисање слободног тока. V_{ST} преовлађује на ауто-путу и возила су скоро потпуно неометана на својој путањи маневрисања унутар саобраћајног тока. Ефекти инцидената или кратких застоја се лако апсорбују.
LOS B представља разумно слободан проток, а V_{ST} на ауто-путу се одржава. Способност маневрисања у саобраћајном току је само мало ограничена, а општи ниво физичког и психичког комфора који се пружа возачима је и даље висок. Ефекти мањих инцидената се и даље лако апсорбују.
LOS C обезбеђује саобраћајни ток са брзинама возила близу V_{ST} на ауто-путу. Слобода маневрисања унутар саобраћајног тока је приметно ограничена, а промене траке захтевају више пажње и будности од стране возача. Мањи инциденти се и даље могу апсорбовати, али ће локално погоршање квалитета услуга бити значајано. Може се очекивати да ће се иза значајних блокада формирати колоне.
LOS D је ниво на којем брзине почињу да опадају са повећањем протока, при чему се густина брже повећава. Слобода маневрисања у саобраћајном току је озбиљно ограничена, а возачи доживљавају смањен ниво физичке и психолошке удобности. Чак и при мањим инцидентима може се очекивати формирање колона, јер саобраћајни ток има мало простора да апсорбује сметње.
LOS E описује саобраћајни ток на или близу капацитета. Операције на ауто-путу на овом нивоу су веома нестабилне јер практично нема употребљиве празнине унутар саобраћајног тока, остављене за маневрисање. Сваки поремећај саобраћајног тока, као што су возила која улазе на петљама или возило које мења траке, може да изазове ударни талас који се шири узводним саобраћајним током. Према горњим границама LOS E, саобраћајни ток нема способност да апсорбује чак ни најмањи поремећај, и

може се очекивати да ће сваки инцидент довести до озбиљног застоја и значајно формирање колона. Физички и психички комфор који се даје возачима је лош.

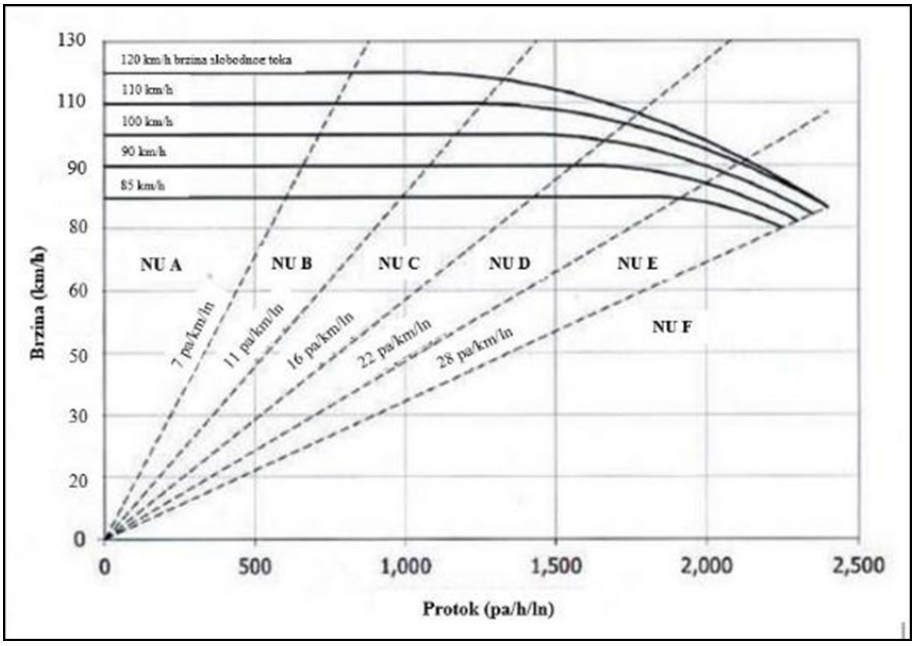
LOS F описује нестабилан ток. Такви услови постоје у колонама које се формирају иза уских грла. До застоја долази из више разлога:

- Саобраћајни инциденти могу привремено смањити капацитет кратког сегмента, тако да је број возила која стижу у ту тачку већи од броја возила која се кроз њега могу кретати.
- На тачкама понављајућег загушења, као што су улазни сегменти или сегменти преплитања и смањења броја трака, који доживљавају веома велику потражњу у којој се број возила у доласку већи од броја возила која могу отићи.
- У анализама које користе предвиђене потражње, пројектовани проток може премашити процењени капацитет дате локације.

Табела 2. *Критеријум нивоа услуге на основном сегменту ауто-пута*

LOS	Густина тока (pa/km/tr)
A	≤7
B	>7-11
C	>11-16
D	>16-22
E	>22-28
F	>28

Извор: Highway Capacity Manual 6th edition из 2016.



Слика 2. *График односа брзине и протока са уцртаним густинама као границама нивоа услуге на основном сегменту ауто-пута*

Извор: Highway Capacity Manual 6th edition из 2016.

2.5. Методологија за процену нивоа услуге на основном сегменту ауто-пута

Након што је извршена сегментација објекта ауто-пута неопходно је за сваки сегмент проценити густину тока, односно придодати одређени ниво услуге. HCM методологија за процену нивоа услуге на основном сегменту ауто-пута састоји се из 6 корака представљених на Слици 3.

Корак 1: Улазни подаци

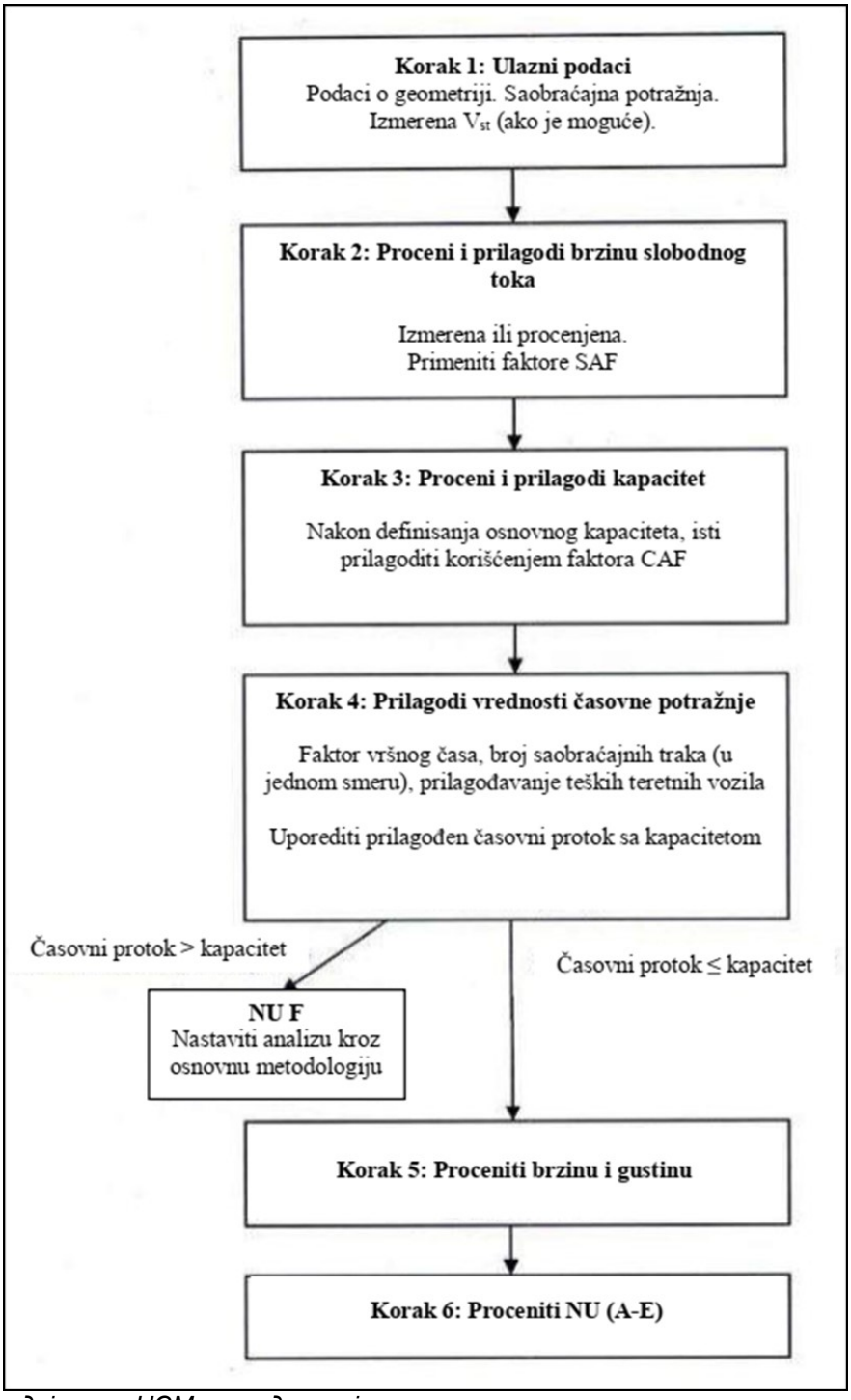
За типичну анализу, као што је раније наведено, истраживач би морао имати у виду (са измереним или подразумеваним вредностима) обим потражње; број и ширина трака; десни или укупне удаљености

бочних сметњи; укупна густина петљи или приступних тачака; проценат тешких возила; f_H; геометрију терена; и факторе прилагођавања у вези возачке популације, брзине и капацитета (ако је потребно).

Корак 2: Процени и прилагоди брзину слободног тока

V_{ST} је одређена директно из мерења на самој деоници у условима ниског тока (мање од 500 voz/h) при чему је утврђено да брзина слободног тока приближно одговара општем ограничењу брзине на аутопуту, односно око 130 km/h.

За потребе одређивања нивоа услуге (густине тока) користи се просечна брзина свих возила која су прошла преко бројача саобраћаја у појединачном временском интервалу (1 мин).



Слика 3. *Ток дијаграм HCM методологије за процену нивоа услуге на основним сегментима*
Извор: Highway Capacity Manual 6th edition из 2016.

Методологија из Приручника предвиђа прилагођавање брзине слободног тока за основне сегменте ауто-пута тако што ће се прилагодити ефектима лошег времена или популацији возача. У тим случајевима, прилагођена брзина слободног тока $V_{ST\ ADJ}$ се израчунава множењем V_{ST} са SAF (коефицијенти прилагођавања брзине слободног тока) [2].
Међутим, Систем за мониторинг нивоа услуге који је имплементиран на „Моравском коридору“ као улазни податак прикупља вредност брзине сваког возила, израчунава просечну брзину свих возила и на тај начин остварује реалну слику саобраћајног тока у свакој појединачној итерацији. Имајући претходно у виду није вршена додатна калибрација брзине слободног тока путем коефицијената SAF.

Корак 3: Процени и прилагоди капацитет
У овом кораку се процењује базни капацитет за основни сегмент ауто-пута. Капацитет сегмента је углавном функција V_{ST} сегмента, али се може калибрисати за локалне услове или да одражава утицаје неповољних временских услова, инцидената или других фактора [2]. Базне вредности капацитета за основне сегменте ауто-пута су наведене у Табели 1 за различите вредности V_{ST}. Дакле, капацитет сваког сегмента износи 2400 pa/h/tr.
Такође, као и у претходном кораку, тако и у овом, према Методологији из Приручника овако израчунат базни капацитет потребно је даље калибрисати путем коефицијента CAF који се односе на ефекте неповољних временских услова, популације возача, појаве инцидента у саобраћају.

Међутим, иако централни систем прикупља податке са пет метеоролошких станица дуж деонице, као и могућност детекције саобраћајних инцидената (заустављено возило), систем у овом стадијуму развоја није интегрисао ове податке у сам Систем за мониторинг нивоа услуге, већ овакви инциденти иницирају покретање других специфичних саобраћаних сценарија који имају већи приоритет у односну на ниво услуге. Наравно, један од праваца даљег развоја Система био би интеграција и овог сегмента Методологије првенствено на ширем делу ауто-пута у односу на саму позицију инцидента, односно на оне елементе измењиве саобраћајне сигнализације који нису обухваћени сценаријима вишег приоритета.

Корак 4: Прилагоди вредности часовне потражње – одреди меродавни проток
Пошто су криве брзина-проток и нивои услуге у Табели 2 засновани на протоку у еквивалентним путничким аутомобилима по часу на основном сегменту ауто-пута, обим потражње изражен као возила по часу у преовлађујућим условима мора се конвертовати на ову основу коришћењем једначине 1 [2].

$$q_m = \frac{60 \cdot q_{min}}{f_h \cdot N \cdot f_{HV}} \quad (1)$$

где је:

- q_m – меродавни часовни проток (pa/h/tr),
- q_{min} – измерен проток у једноминутном интервалу (путничка и комерцијална возила) (voz/h),
- f_h – фактор вршног часа (имајући у виду да се мерење понавља сваког минута овај фактор има вредност 1),
- N – број саобраћајних трака у анализираном смеру (на свим основним сегментима анализираног објекта број саобраћајних трака износи 2),
- f_{HV} – фактор прилагођавања за комерцијална возила.

Прилагођавање за комерцијална возила
Сва комерцијална возила су класификована као SUT или TT. Рекреативна возила и аутобуси се третирају као SUT. Фактор прилагођавања за комерцијална возила f_{HV} израчунава се из комбинације две класе комерцијалних возила, које се сабирају да би се добило укупан проценат камиона P_T [2].

$$f_{HV} = \frac{1}{1 + P_T(E_T - 1)} \quad (2)$$

где је:

- f_{HV} – фактор прилагођавања за комерцијална возила,
- P_T – проценат SUT и TT возила у саобраћајном току (израчунава се аутоматски за свако мерење с обзиром да бројачи саобраћаја разликују 10+1 категорију возила),
- E_T – еквивалент путничких аутомобила једном тешком возилу у саобраћајном току (PAJ).

Овај фактор прилагођавања добија се кроз два корака. Прво, се дефинише PAJ за сва тешка возила у преовлађујућим условима који се проучавају. Ове еквивалентне вредности представљају број путничких аутомобила који би користили исту количину капацитета ауто-пута као један камион под преовлађујућим условима. Друго, једначина 2 се користи за претварање PAJ вредности у фактор прилагођавања.

Утицај тешких возила на саобраћајни ток зависи од услова терена и нагиба на сегменту као и састав саобраћаја. ПАЈ се може изабрати на два начина:

- Сегменти ауто-пута на терену генерално уједначених карактеристика – за анализу искоришћен је овај начин,
- Специфицирани успони и падови.

Еквиваленти за сегменте ауто-пута на терену генерално уједначених карактеристика
Општи терен се односи на продужене дужине ауто-пута који садржи низ успона или падова где ниједан није довољно дуг или довољно стрм да има значајан утицај на функционисање тока дуж сегмента. Општи терен може бити раван или брдовит. Како би одредили који од ових типова терена се примењује, сваки успон или пад треба да се сматра једним успоном, чак и ако успон није уједначен. Укупна дужина успона или пада повезује се са најстрмијим успоном који садржи:

- *Раван терен:* Било која комбинација хоризонталног или вертикалног нагиба која дозвољава тешким возилима да одржавају исту брзину као путничка возила. Овај тип терена обично садржи кратке успоне са не више од 2% - одговара условима „Моравског коридора“ на деоници од НС Појате до НС Кошеви. Дакле, усвојени E_T из Табеле 3. за све сегменте анализираног објекта износи 2,0.
- *Брдовит терен:* Било која комбинација хоризонталног или вертикалног нагиба која узрокује да тешка возила смање брзину испод оне код путничких аутомобила, али то не доводи до тога да се тешка возила успорено крећу дуж трасе било коју значајну дужину [2].

Табела 3 даје PAJ вредности за подразумевану комбинацију камиона под равном и брдовитом терену.

Табела 3. *PAJ јединице за генерално уједначен терен*

Еквивалент путничких аутомобила	Тип терена	
	Раван	Брдовит
E_T	2.0	3.0

Извор: Highway Capacity Manual 6th edition из 2016.

Корак 5: Проценити брзину и густину
Како је у овом кораку израчунат меродавни проток возила, неопходно је још одредити средњу просторну брзину саобраћајног тока. Средња просторна брзина саобраћајног тока представља аритметичку средину брзина свих возила која су прешла преко бројача саобраћаја у одређеном интервалу (1 минут). Након израчунавања средње просторне брзине, једначина 3 се користи за процену густине тока саобраћаја:

$$g = \frac{q_m}{V_s} \quad (3)$$

где је:

- g – густина (pa/km/tr),
- q_m – меродавни проток саобраћаја (pa/h/tr),
- V_s – средња просторна брзина саобраћајног тока која представља просечну брзину свих возила која су прешла преко бројача саобраћаја у одређеном интервалу (km/h).

Корак 6: Одредити ниво услуге (LOS)
Из табеле 2 се очита густина добијена из једначине 3 да би се одредио очекивани преовлађујући ниво услуге.

2.6. Извршне функције Система за мониторинг нивоа услуге на ауто-путу

Имајући у виду да предлог заснован на HCM методологији врши градацију квалитета саобраћајног тока путем шестостепене скале (A-F), став пројектанта је такав да би у реалним условима било сложено осмислити шестостепени ниво информисања корисника. Због тога, усвојено је одређено поједностављење извршних функција Система и то на начин да су осмишљене тростепене извршне

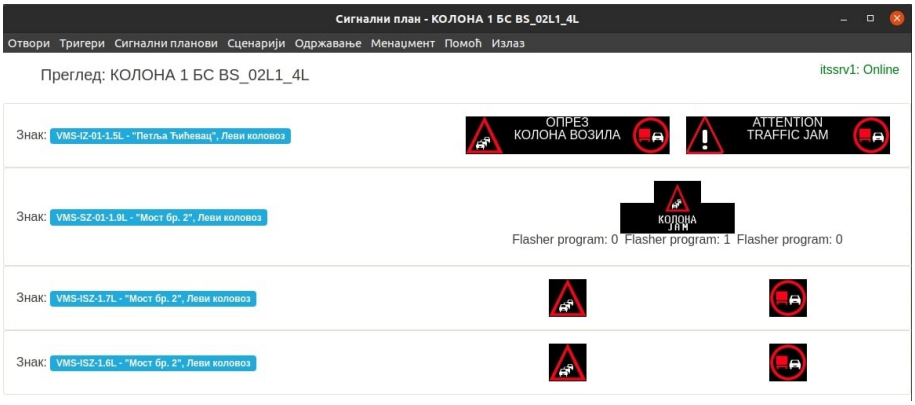
функције у виду саобраћајних сценарија које систем предлаже оператеру, а на основу излазних вредности израчунате просечне густине тока на појединим сегментима објекта. У Табели 4. представљене су границе тростепених извршних функција.

Табела 4. *Извршне функције Система за поједине нивое услуга*

LOS	Густина тока (pa/km/tr)	Предложени саобраћајни сценарио	Додељена боја
A	≤7	Редовни услови у одвијању саобраћаја	
B	>7-11		
C	>11-16	Колона 1	
D	>16-22		
E	>22-28	Колона 2	
F	>28		

Имајући у виду услове одвијања саобраћаја при одређеним нивоима услуге, одлука пројектанта је да задржи редовне услове у одвијању саобраћаја, односно да Систем не предлаже реаговање оператера докле год се брзина слободног тока може одржавати, а то су LOS A и LOS B.

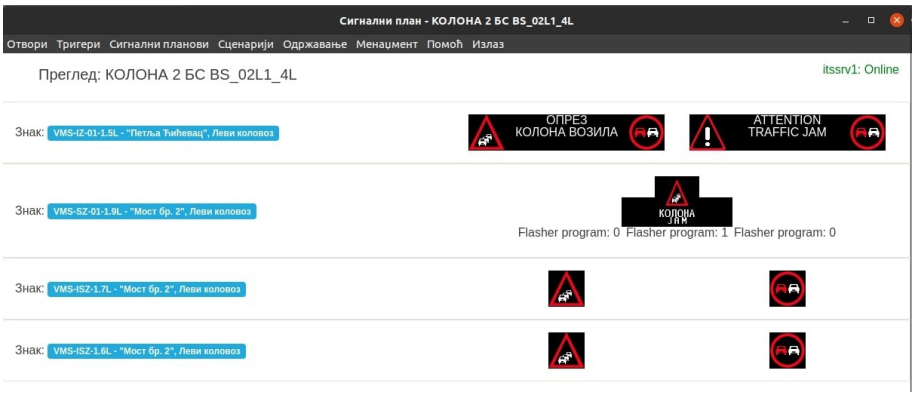
Са повећањем густине тока преко 11 pa/km/tr, односно нивоом услуге LOS C и LOS D долази до појачане потешкоће маневрисања у саобраћајном току, уз могућност формирања загушења и могућности стварања колона, док је при вишим вредностима густине и сама преовлађујућа брзина значајно мања од брзине слободног тока. У овим условима Систем предлаже активирање саобраћајног сценарија: „Колона 1“ на одговарајућем сегменту где су такве густине и забележене.



Слика 4. *Пример саобраћајног сценарија „Колона 1“*
Извор: Сигнални планови Путно-информационог система

Додатно, након покретања предложеног сценарија оператери могу о појачаном интензитету саобраћаја обавестити Информативни центар ЈП Путева Србије као и наплатне станице дуж деонице.

Када густина тока пређе 22 pa/km/tr, односно нивои услуге буду LOS E и LOS F подразумева да се саобраћајни ток одвија на или близу капацитета, маневрисање у саобраћајном току није могуће уз високу вероватноћу формирања загушења и стварања колона, док преовлађујућа брзина возила је значајно мања од нивоа брзине слободног тока. Са даљим повећањем густине тока на макар једном сегменту дошло је до прекорачења капацитета, односно дошло је до формирања колоне заустављених возила или возила која се јако споро крећу. У овим условима Систем предлаже активирање саобраћајног сценарија: „Колона 2“ на одговарајућем сегменту где су такве густине и забележене.



Слика 5. *Пример саобраћајног сценарија „Колона 2“*
Извор: Сигнални планови Путно-информационог система

Додатне активности оператера у случају покретања саобраћајног сценарија „Колона 2“, поред информисања Информативног центра ЈППС и наплатне станице дуж деонице, јесте и информисање дежурних служби хитне помоћи, саобраћајне полиције и ватрогасних јединица. Такође, потребно је дефинисати алтернативне правце на којима би се могло преусмерити део надолазећег саобраћаја.

2.7. Могућности за даље унапређење Система за мониторинг нивоа услуге на ауто-путу

Као и у сваком систему, тако и у овде представљеном Систему на мониторинг нивоа услуге постоји простор за унапређење.
Могућности за унапређење система пре свега огледају се кроз интеграцију улазно/излазних сегмената на ауто-путу, тако што би систем прикупљао податке са наплатних станица (интензитет улазног/излазног саобраћаја, брзина возила и друго). На овај начин омогућило би се свеобухватније сагледавање нивоа услуге дуже целе деонице, али и још важније омогућило би се предвиђање формирања застоја на излазним рампама (где су задржавања већа), па би уз примену постулата размене информација у троуглу: центар за надзор над саобраћајем, наплатне станице и корисници омогућило управљање потражњом и понудом капацитета тако што би се са једне стране повећао број излазних рампи на оптерећеној наплатној рампи, а са друге стране сугерисало корисницима да користе алтернативне наплатне рампе како би избегли „чекање у реду“.
Други правац унапређења тренутног нивоа развоја Система огледао би се у даљој интеграцији појединачних система (метеоролошке станице, аутоматске детекције инцидената, уношење података у систем о тренутним радовима на теретну, односно на други начин заузеће саобраћајне, односно зауставне траке). Са овим подацима било би могуће у реалном времену прорачунавати тренутни реални капацитет појединих сегмената применом CAF коефицијената, односно могуће формирање застоја, што би свакако захтевало неку врсту интервенције оператера у центру.
Како је тренутно у фази тестирања Систем V2X који представља најсавременију технологију преноса информација како возило-возило, тако и возило-инфраструктура, очекује се интегрисање овог система са Системом за мониторинг нивоа услуге и на тај начин још ефикасније пренети информације крајњим корисницима о стању саобраћајног тока, могућим застојима, формираним колонама, проходности појединих наплатних станица и друго.

3. ЗАКЉУЧАК

Писањем овог рада описан је Систем за мониторинг нивоа услуге на ауто-путу, чија функција и суштина се огледа у надзору и управљању саобраћајним токовима на посматраној деоници ауто-пута првог „А“ реда број 5. Такође, у оквиру самог Система дефинисане су и извршне функције чији је задатак да се пренесе информација крајњим корисницима – возачима који се крећу посматраном деоницом.
Овај рад може да послужи као основа за развој и имплементацију таквих система који се баве целокупном ауто-путном мрежом на територији Републике Србије.
Систем јасно постиже такве резултате који показују да је управљањем саобраћајним токовима на ауто-путу у реалном времену могуће и пре свега корисно како за возаче (избегавање гужви) тако и за самог управљача с обзиром да има јасну и у реалном времену тачну информацију о стању у саобраћајном току дуж целе посматране деонице, или бар на оним деоницама које су покривене овим системом.

Захвале

Аутор рада је захвалан компанији Коридори Србије д.о.о на дозволи да се Систем за мониторинг нивоа услуге на ауто-путу представи на 5. Српском конгресу о путевима.

Литература

[1] National Academies of Sciences, Engineering, Medicine, Transportation Research Bord, *Highway Capacity Manual 6th edition: a guide for multimodal mobility analysis – Volume 1: Concepts*, Washington DC, 2016.

[2] National Academies of Sciences, Engineering, Medicine, Transportation Research Bord, *Highway Capacity Manual 6th edition: a guide for multimodal mobility analysis – Volume 2: Uninterrupted flow,* Washington DC, 2016.

[3] National Academies of Sciences, Engineering, Medicine, Transportation Research Bord, *Highway Capacity Manual 6th edition: a guide for multimodal mobility analysis – Volume 4: Application guide,* Washington DC, 2016., https://hcmvolume4.org/forum.

[4] Љ. Кузовић, *Теорија саобраћајног тока*, Београд, 1987.

[5] Љ. Кузовић, *Капацитет и ниво услуге друмских саобраћајница*, Београд, 2000.

[6] А. Цанић, *Могућности примене HCM методологије у циљу континуираног праћења нивоа услуге на ауто-путу – пример државног пута IA4*, мастер рад, Ниш, 2022.

DEVELOPMENT AND IMPLEMENTATION OF DATA-DRIVEN TOOLS FOR ENHANCING TRAFFIC SIGNAL MANAGEMENT EFFICIENCY: CASE STUDIES FROM PENNSYLVANIA AND OHIO - 009-T4-0126

Nemanja Dobrota[1] and Burak Cesme[1]
[1] Kittelson and Associates, Inc.

Abstract: *Efficient traffic signal management is crucial for smooth traffic flow and congestion reduction. We present two studies addressing key challenges faced by transportation agencies. Firstly, we developed a Traffic Signal Systems Solutions Toolbox, by integrating various data sources to recommend signal control strategies tailored to corridor conditions and agency constraints. Applied in the Commonwealth of Pennsylvania, US, the developed toolbox improved signal system selection processes. Secondly, we propose a data-driven prioritization method for signal retiming projects, by considering various factors such as delay, travel time reliability, traffic volume, and years since the last retiming effort. Applied in the State of Ohio, US, our approach effectively identified corridors for retiming, leading to significant improvements. These studies highlight the importance of data-driven approaches in traffic signal management, enabling agencies to enhance operational efficiency and overall traffic flow.*

Keywords: *traffic signal systems, probe vehicle data, decision-making, delay*

1. INTRODUCTION

Efficient traffic signal operations are crucial for efficient traffic operations in urban environments. Transportation agencies worldwide are deploying various policies, strategies, and technologies to alleviate traffic congestion along arterials and in networks, and signalized intersections are typically the primary capacity bottlenecks on these facilities. The extent of traffic congestion is largely dependent on the implemented traffic signal systems solution and quality of signal timing as inefficiency of these will lead to unnecessary delays and stops. In this study, authors focus on both of these aspects of traffic signal control, i.e., proper selection of traffic signal systems for prevailing field conditions and operating agency capabilities and proper prioritization of corridors for signal retiming projects.

In urban environments, different signal control systems, such as fully actuated, coordinated-actuated, adaptive traffic signal control (ATCS), and traffic responsive control, are utilized based on corridor characteristics and operational objectives [1]. The process of selecting an appropriate signal control strategy has been tackled from several perspectives in the past. In some cases, agencies have relied on the use of guidance documents [2], which provide insights into the selection, but usually do not account for agency capabilities as well as the prevailing operational conditions on the network. Other researchers used microsimulation to evaluate the benefits of certain strategies during the selection process [3, 4]. Although beneficial, simulation also tends to focus exclusively on the operational elements and does not consider agency capabilities or funding constraints. Additionally, such an approach is typically labor-intensive and is not scalable to larger corridors or networks. Decision-making tools were also introduced in the past, as these can help agencies decide whether a certain solution is a “go” or “no go” [6]. However, existing tools and platforms are usually focused on a single specific control strategy, such as ATCS [7, 8]. Therefore, current practice appears to be lacking tools that can comprehensively examine different control solutions and incorporate the previous factors to help agencies in selecting the most appropriate traffic signal control solution. The objective of the first study is to develop a comprehensive traffic signal systems solutions toolbox (Ts3T) that can incorporate corridor characteristics, operational objectives, agency capabilities, and agency constraints and offer a broad range of signal control strategies as solutions.

When an agency operates a moderate to large number of corridors controlled with traffic signals, there is a question of which ones should be retimed each year to ensure that resources are properly allocated and that traffic operations and supported in the best possible manner. Most agencies still rely on the traditional approach of signal retiming, which is typically initiated by a “trigger” event. The trigger events can start in many ways such as a scheduled activity to retime the signals every few years (typically 3 to 5 years) [8, 9], requests or complaints from the public [8], a major change in land use [8] or in roadway geometry, and sustained oversaturation [8]. Some other “trigger” events found in the literature note that retiming might occur due to safety concerns [10], or even based on engineering judgment [11]. Alternatively, recently proposed data-driven approaches for corridor ranking either rely on datasets that are not widely available [12, 13] or only account for corridor performance (e.g., speed) without considering other relevant factors that can be important during prioritization [14-16]. Considering the limitations of some of the existing methods that use data sources that are not commonly available or overlook the parameters that are important for corridor ranking, the goal of this

study is to provide a comprehensive prioritization method of corridors for signal retiming by utilizing several data sources that are readily available to most agencies.

The following section outlines the methodological steps taken to develop the Traffic Signal Systems Solutions Toolbox (Ts3T) and data-driven corridor prioritization methods. The Ts3T was developed for the Pennsylvania Department of Transportation (PennDOT), whereas the data-driven corridor prioritization method was developed for the Ohio Department of Transportation (ODOT). The results section presents the application of the proposed methods and the results obtained, followed by an overall conclusion section.

2. METHODOLOGY

This section consists of two subsections, each outlining important methodological steps undertaken to develop tools for the enhancement of traffic signal management systems.

2.1. Traffic Signal Systems Solutions Toolbox Architecture

The proposed toolbox uses a two-stage process for identifying the most appropriate signal system solution. The first stage uses basic informational elements related to signal systems that are readily available to agencies and is intended to conduct high-level screening of various signal systems solutions. If more than one feasible solution emerges from Stage I (e.g., adaptive traffic signal control, responsive traffic control), then the process takes the user to Stage II for more detailed information, that is still usually available to agencies.

2.1.1. Description of Stage I Elements

Stage I starts with the general premise of using data from widely available sources to eliminate the need for an extensive project-specific data collection effort to conduct a preliminary analysis of the corridor characteristics. Stage I of the developed toolbox uses four informational elements and modules for identifying the most appropriate solution: (1) network characteristics, (2) traffic congestion level, (3) maintenance considerations, and (4) pedestrian activity. Figure 1 displays these informational elements and the proposed flow chart and decision-making process in Stage I.

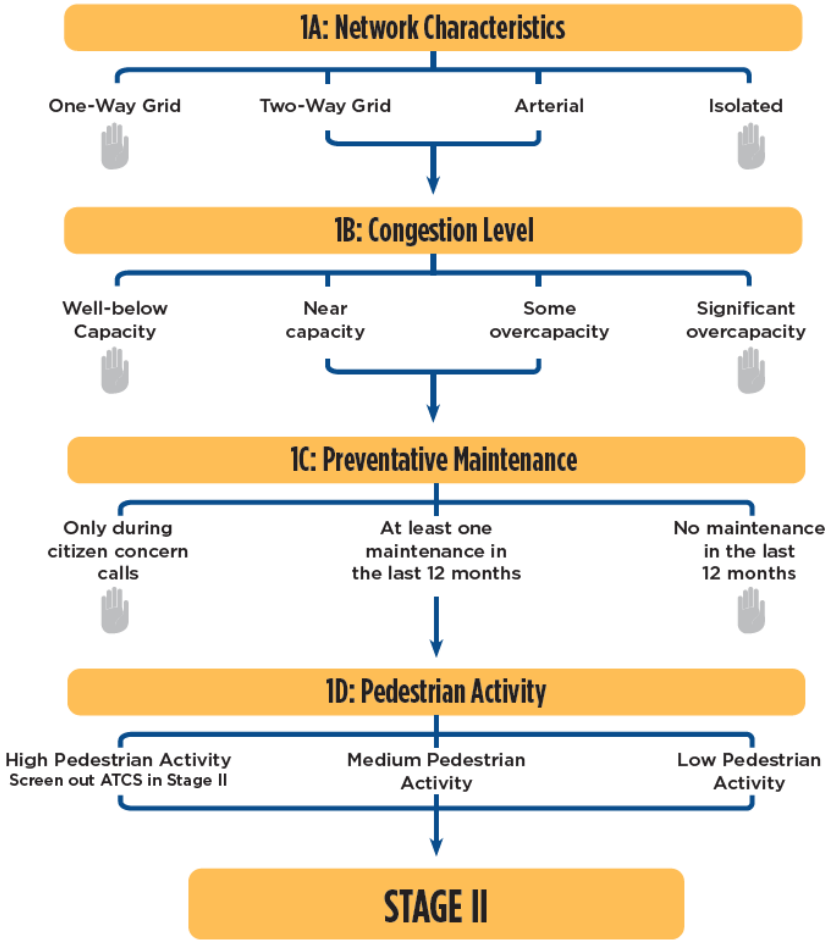


Figure 1. *Stage I Elements and Proposed Chart Flow*

For the sake of brevity, the authors provide details on underlying decision-making logic for sections 1B and 1C.

Section 1B. Traffic Congestion Level: This module conducts a preliminary analysis of the congestion state at the critical intersection. The critical intersection is likely to govern control decisions for the signal system because it has the least green time available based on its combination of volume, geometry, and signal phasing. For example, the critical intersection may have the highest minor street traffic volume, longest pedestrian crossings, more left-turn phases, or more phases due to additional approach legs. The tool comprises one input module, two default data modules, and a computational module. A description of each module follows.

User Input: The analyst must provide the road's annual average daily traffic (AADT) at the critical intersection, along with their functional description (major/minor arterial, major collector, and minor road), and the peak directional factor (D) occurring in each AM and PM peak periods. The start and end hour of each peak must be specified. In addition, the user must enter the lane configuration on each road. The tool assumes that an exclusive left turn lane is present on each approach (which is often the case at the critical intersection). Finally, the user can enter the maximum desirable critical lane volume (or capacity). A default capacity value is also available to the user.

Traffic Pattern Groups Defaults: PennDOT specifies a series of ten Traffic Pattern Groups (TPGs) [17]. A TPG depends on site location (urban/rural) and the roads' functional classification (interstate, arterials, etc.). By selecting a TPG number, the tool automatically extracts its default hourly volume distribution. The tool can also accept any other desired hourly volume distribution as well.

Turning Movement Percent Defaults: A turning movement percent (TMP) table is borrowed from the work of Iroanya [18], where the author developed multiple tables for estimating turning movement counts based on the two roads' functional class, the approach lane configuration, number of legs and other parameters. In the Stage I tool, the functional road class of both roads determines the fraction of left and right turns. Thus, at the completion of this module, each turning movement in each hour of the day is specified.

Capacity Rating: Here, the tool compares each hourly critical lane volume (v) to the desired input capacity (c). Then, in each hour, the capacity rating is categorized as "well below" capacity (when $v/c \leq 0.60$), "near capacity" ($0.60 < v/c \leq 0.98$), "some over capacity" ($v/c > 0.98$, but for less than 2 hours), and "significant over capacity" ($v/c > 0.98$ for 2 hours or more). Under certain capacity ratings, the signal timing objective may be best achieved with a single strategy, and the tool provides an early exit by recommending that strategy.

Once the capacity rating is computed, if the module estimates that the critical intersection is well below capacity, then the tool provides an early-exit, illustrated by the stop hand sign in Figure 1, and proposes revisiting timing plans to reallocate green times more efficiently as there is available green time at the critical intersection. If the tool estimates significant over capacity, the tool also gives an early-exit. In this case, the tool proposes fully-actuated control as the solution along with actuated control features such as volume-density control, dynamic max, phase reservice (if queue spillback is an issue), and proposes omitting some phases/movements in some plans or increasing cycle length with the caveat that very long cycles can increase queue interactions and negate the benefit of long cycles [19]. This is because, in an over capacity situation, the signal timing objectives shift to managing queues and throughput, and commercially available optimization algorithms are typically not designed for those objectives.

Section 1C. Preventive Maintenance Considerations: This module seeks to assess the way an agency performs preventive maintenance by identifying the time interval between the last two maintenance conducted. For agencies that have not conducted preventive maintenance in the last 12 months or only conduct during citizen concern calls, the tool proposes signal control strategies that do not require proactive maintenance of signal infrastructure (e.g., pretimed coordination or coordinated-actuated coordination with only stop bar detection on non-coordinated movements). For agencies that perform regular and proactive preventive maintenance, the tool suggests proceeding with the last informational element for Stage I.

2.1.2. Description of Stage II Elements

Analysis within Stage II is designed to analyze the study network in greater detail with the goal of identifying the most suitable signal systems solution that passed the Stage I screening. To ensure the proposed solution is not only based on operational conditions but can incorporate other constraints, as previously noted, Stage

II considers both agency capabilities (section 2A), operational objective (section 2B), and corridor characteristics (sections 2C-2F). The flowchart presented in Figure 2, shows the relationship between these elements within Stage II.

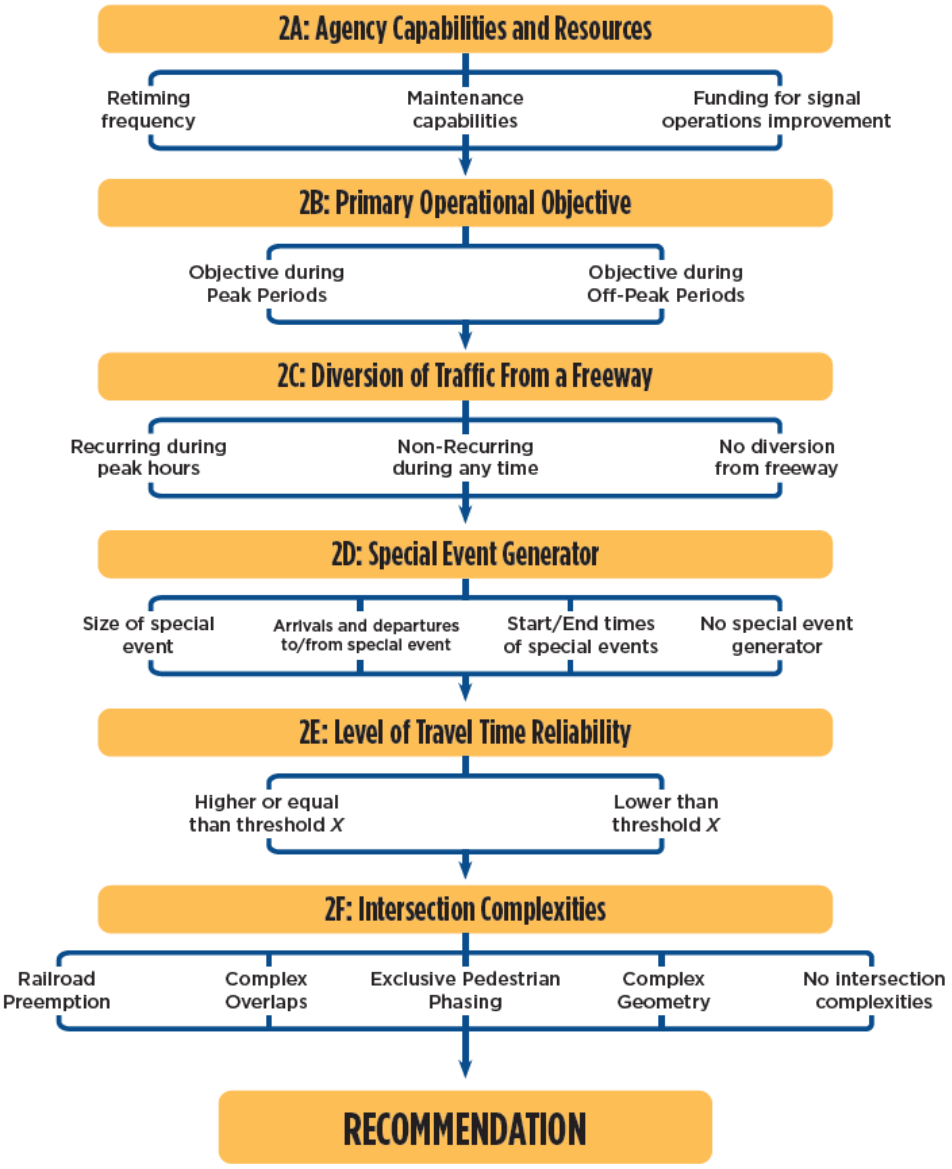


Figure 2. *Stage II Elements and Proposed Chart Flow*

Similarly to the description of Stage I elements, due to the sake of brevity, authors will discuss in greater detail sections 2A, 2B, 2D, and 2E.

Section 2A. Agency Capabilities and Resources: In a relevant publication sponsored by the Federal Highway Administration (FHWA), it was recognized that rather than using quantitative variables (e.g., number of employees in the agency, education level, amount of budget) to describe agency capabilities, a more efficient way is to use archetypes [20]. Generally, archetypes are defined based on multiple scenarios (e.g., "the agency has a proactive approach to traffic operations management", "insufficient operations staff resources are compensated by effective capital expenditure on systems that work effectively for long periods without frequent systematic retiming"). For the proposed toolbox, we defined three archetypes (based on definitions found in the original study) to assess agency capabilities and resources which are then used to tailor the proposed solutions to meet agencies' unique needs and circumstances. Definitions of archetypes are:

- Archetype 1: The staff undertakes signal timing reviews by hiring outside consultants to collect turning movement counts at all intersections, reviewing all fixed intervals at each intersection, developing and programming signal optimization software for calculating optimized signal timings, evaluating signal timings using micro-simulation, and providing revised signal timings to the agency.

- Archetype 2: Operations staff is limited but maintenance capabilities are good and capital programs are well funded. The limited operations staff are used to performing travel time analysis and systematically reviewing the network for unexpected queuing.
- Archetype 3: Has limited operations and maintenance staffing and limited capital resources. The operations staff is small, but the agency has a well-developed operational objective of providing free-flow travel time or equitable operation when that is not possible, as stated in a mission.

In this toolbox section, users are asked to provide an answer on the frequency of retiming, dedicated staff for monitoring equipment health, and funding streams to improve signal operations (e.g., annual operating budget, capital funding, grants). The answers to these questions are then used in tool's backend to correlate answers with specific archetypes. It needs to be noted here that information about staff knowledge was purposely omitted as it is very subjective, and it might encourage tool users to provide ingenious answers.

Section 2B. Primary Operational Objective: The purpose of this module is to ensure the selection process is objectives-driven. Users are asked to identify the primary operational objective for the corridor and the tool's backend will (in addition to other factors) recommend solutions that help achieve this objective. Considering that operational objectives can be different for peak versus non-peak periods, users can also define different objective for non-peak periods. There are several objectives identified for users to choose from such as "Serve all vehicle movements as efficiently as possible, including side streets and left turns", "Reduce pedestrian and/or cyclist delay", "Improve transit service and reduce person delay", "Prioritize mainline movements to reduce mainline vehicle delay and stops", among others.

Section 2D. Special Event Generators: Special event generators can create a significant impact on traffic operations in the nearby area. Special events can also vary in terms of their characteristics such as the size of the special event, whether arrivals and departures occur at the same time, and whether the start and end time of these events is generally known to allow agencies to respond to the changes in traffic conditions. This module uses these characteristics of special events to better tailor recommended traffic signal solutions. Figure 3 shows a proposed set of solutions based on the characteristics of special events (after relaxing other conditions in Stage II).

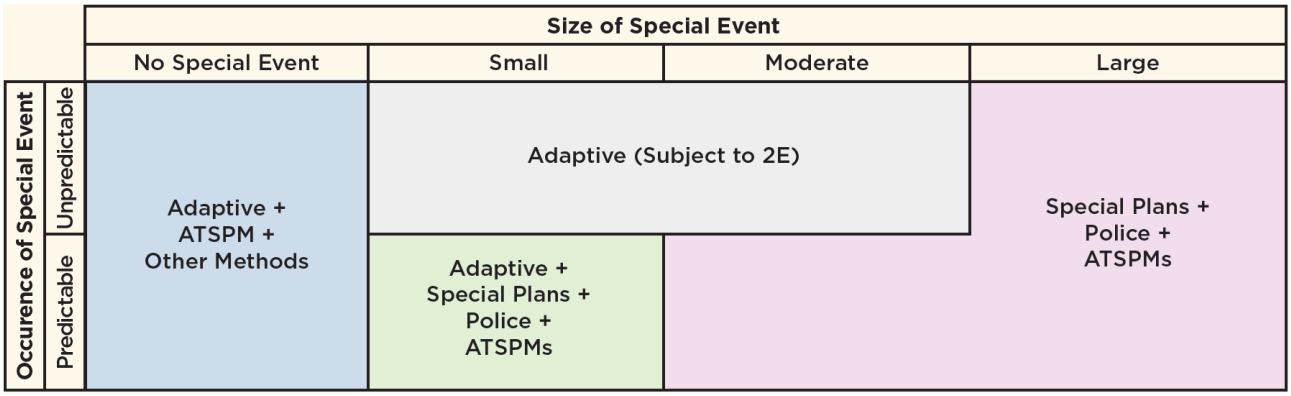


Figure 3. *Special Events & Feasible Solutions*

Section 2E. Level of Travel Time Reliability (LOTTR): This module calculates the Level of Travel Time Reliability (LOTTR) metric by calculating the ratio of longer travel times to a "normal" travel time using probe vehicle data. For this study, probe vehicle data are obtained from the Regional Integrated Transportation Information System (RITIS), a data source that is readily available to transportation agencies across the US [21]. The LOTTR metric is used in this module as a proxy to demand fluctuations in the study area since variations in demand is an important factor in the selection of the appropriate signal system solution. While direct calculation of demand fluctuations would be more ideal to determine the most feasible solution, most agencies do not have access to continuous count stations on arterials (or systems such as ATSPMs with count detection) to obtain yearly volumes. Therefore, we proposed using the LOTTR metric as a proxy since vehicle probe data is available to most agencies on corridors. Additionally, FHWA recommends using the ratio of the 80th percentile travel time to the 50th percentile travel time to calculate LOTTR and suggests using a threshold of 1.50 to determine whether a facility is reliable or not (uses the same threshold both for freeways and arterials) [22]. In this research, we initially followed the same methodology and the threshold provided by FHWA. However, based on the testing of the LOTTR on several corridors that are known to have reliability issues, the LOTTR results were generally much lower than 1.50. Based on these findings, we revised the

calculation and used the 90th percentile instead of the 80th percentile and reduced the threshold from 1.50 to 1.30.

2.1.3. Traffic Signal Systems Solutions Toolbox Development

The tool was developed in MS Excel and is readily available software for agencies. The decision-making logic was coded using VBA scripting. For LOTTR calculation using probe data, an additional module is developed using Python. As shown in Figure 4, this component of the tool connects to the Regional Integrated Transportation Information System (RITIS) [21] application programming interface (API) and calculates the LOTTR metric. LOTTR is calculated for a year worth of data, during four distinctive periods, AM, Midday, PM peak hours (for typical weekdays, Tuesday, Wednesday, and Thursday) and Saturday Midday peak. This information is then used to assess the reliability of the facility in the decision-making process as previously discussed. Lastly, a set of recommendations is generated and reported to the user. Figure 4 shows the general tool workflow.

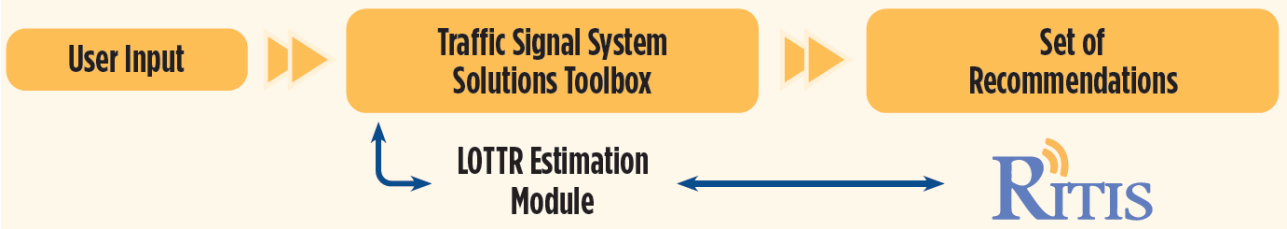


Figure 4. *External RITIS API for Level of Travel Time Reliability (LOTTR) Calculation*

An excerpt of the tool's interface, Stage I (left) and Stage II (right) are also presented in Figure 5. Once users provide input for all sections within a certain stage, the developed tool provides a list of recommendations.

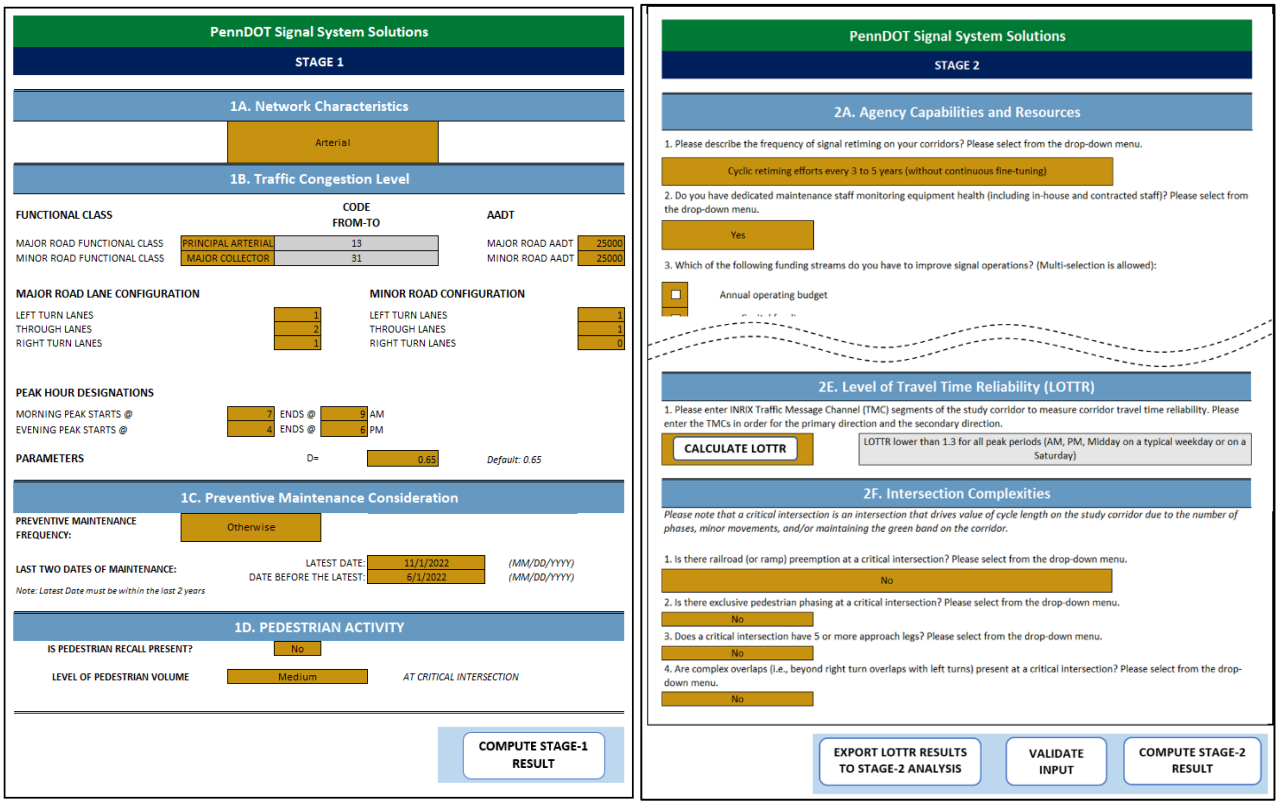


Figure 5. *Excerpt from the Traffic Signal Systems Solution Toolbox Interface, Stage I (left) & Stage II (right)*

2.2. Data-Driven Statewide Prioritization of Corridors for Signal Retiming Projects

This section first discusses the data used and the way it is processed for the corridor prioritization methodology. It should be noted that the proposed methodology places the highest signal timing outcome objective on mainline smooth flow / mainline coordination. The proposed methodology is most relevant for agencies trying to achieve end-to-end corridor progression, as such a goal was defined in the early stages of research.

2.2.1 Data Availability

Ohio Department of Transportation (ODOT) hosts several databases that can be leveraged for the management of traffic signal systems. The following describes the most relevant datasets used for methodology development.

Traffic volumes and average annual daily traffic (AADT): Data are recorded state-wide on traffic counting stations (TCS). These counts are processed, reported, and stored at the Traffic Information Mapping System (TIMS) hosted by ODOT [23]. While data are reported for each counting location and various types of facilities (e.g., freeways, rural roads, signalized arterials), additional data processing is needed to relate these counts to particular corridors that are under consideration for ranking. Unique corridor AADT is found as:

$$Corridor\ AADT = \max(AADT_{tcs_1}, AADT_{tcs_2}, .., AADT_{tcs_m}) \quad (1)$$

where:
$AADT_{tcs_m}$ represents the AADT recorded at the *m*-th TCS along a particular corridor.

Corridor Characteristics: A unique database, hosted by the Office of Traffic Operations, contains information about the number of traffic signals, the total length of the corridor, and coordinates (latitude and longitude) for corridor start and end points. Additionally, the time when the corridor was last retimed is tracked and updated in this database. Time since last retiming (T_{lr}) is an important metric in the prioritization of corridors for signal retiming projects, as it directly indicates whether a specific corridor has undergone recent retiming. In cases where corridors have not been retimed for several years, considering this metric, along with the corridor's performance (as detailed in the following), could result in the identification of corridors with a higher priority for retiming compared to scenarios where the ranking is based without accounting for this metric.

Third-Party Probe Vehicle Data: This data set Includes segment-level travel speeds and travel times. ODOT maintains a contract with a third-party vendor, i.e., RITIS [21], that allows accessing probe vehicle data for the entire state to assist with the continuous monitoring of their roadway performance. Generally, one segment spans between two signalized intersections. Data are available for multiple aggregation intervals (e.g., 5-, 10-, 15 minutes) and can go back to more than ten years. Speed and travel time data are reported per unique segment IDs for which additional data processing was conducted to appropriately assign these segments to ODOT corridors used for ranking. In total, 1,650 probe vehicle-based segments were assigned to 120 ODOT corridors that consist of approximately 760 signalized intersections. Traffic data (i.e., speed, travel time) for the study network were aggregated to a time interval of 15 minutes. The proposed aggregation interval was in alignment with previous relevant studies [12, 24] and with the methodologies outlined in HCM7 [25]. Lastly, data are downloaded for 365 days and 1,847 segments, leading to over 64 million recordings.

2.2.2. Ranking Methodology

During the development of the ranking methodology for corridor signal retiming, the following metrics were used: *average vehicle delay, travel time reliability, annual average daily traffic,* and *the last time corridor was retimed*.

Delay Estimation: The delay estimation methodology focuses on the corridor mainline movements and does not consider side (cross) streets (except for those corridors that consist of two intersecting corridors) due to data availability. *Equation 2* shows the proposed delay estimation method for each segment *i* on a given corridor:

$$d_i = TT_{i,median} - TT_{i,FF} \quad (2)$$

where:
d_i is the delay for segment i for a given analysis period (e.g., AM peak),
$TT_{i,median}$ is the median travel time for a given analysis period, and
$TT_{i,FF}$ is the estimated free-flow travel time during free-flow conditions.

Although each corridor consists of several segments, a single free-flow speed should be selected for the corridor (for corridors with one prevailing speed limit for both directions) rather than a different free-flow speed for each segment. Authors estimate the corridor free flow speed limit as:

$$Estimated\ Free\ Flow\ Speed_{corridor} = \frac{\sum_{i=1}^{n} TT_{i-dir1,25th-night} + \sum_{i=1}^{m} TT_{i-dir2,25th-night}}{\sum_{i=1}^{n} l_{i-dir1} + \sum_{i=1}^{m} l_{i-dir2}}\ (mph) \quad 3$$

where:
$TT_{i-dir1,25th-night}$ is the 25th percentile travel time during night traffic for segment *i* in direction 1, and
l_{i-dir1} is the length of segment *i* in direction 2 of the corridor.

Once the estimated free-flow speed for the corridor is calculated, the free-flow travel time for segment *i* is calculated as follows:

$$TT_{i,FF} = \frac{l_i}{Estimated\ Free\ Flow\ Speed_{corridor}} * 3600\ (sec) \quad 4$$

Once vehicle delay is estimated for each segment *i* using *Equation 2*, the average corridor vehicle delay for a given peak period is calculated as follows:

$$D_{avg,PP} = \frac{\sqrt{\frac{1}{k} * \sum_{i=1}^{n} d_{i-dir1,PP}^2} + \sqrt{\frac{1}{k} * \sum_{i=1-dir2}^{m} d_{i-dir2,PP}^2}}{2} \quad 5$$

where:
$D_{avg,PP}$ represents the average delay per intersection for a certain corridor for a given peak period (*PP*),
$d_{i-dir1,PP}$ is the estimated delay per segment *i* in direction 1,
n is the number of segments on the subject corridor in direction 1,
m is the number of segments on the subject corridor in direction 2, and
k is the number of signals on the subject corridor.

Note that during the calculation of average corridor delay, root mean square (RMS) is used rather than the simple average to more heavily weight intersections that experience large delays during the prioritization. Additionally, note that directions 1 and 2 do not indicate peak and off-peak directions along a corridor. They are simply notations for the delay estimation calculations that remain the same regardless of the analysis peak period. Finally, the average corridor delay for the observed analysis period (AP) that consists of multiple peak periods is calculated using *Equation 6.*

$$D_{avg,corridor,AP} = \frac{\sum_{r=1}^{R} D_{avg,PP_r}}{R} \quad 6$$

Where:
the number of considered peak periods, *r,* ranges from 1 to *R*.

Travel Time Reliability: Travel time reliability is estimated using the normalized interquartile range (IQR) metrics recognized in earlier studies [15]. *Equation 7* is used to calculate normalized IQR for each corridor direction for the observed peak period:

$$NormalizedIQR_{dir1(dir2),PP} = \frac{\sum_{i=1}^{n} TT_{i-dir1,75th} - \sum_{i=1}^{n} TT_{i-dir1,25th}}{TT_{dir1(dir2),estimated\ free\ flow\ speed}} \quad 7$$

where:
$NormalizedIQR_{dir1(dir2),PP}$ is the normalized interquartile range for the corridor's direction 1 (direction 2) during the peak period.

Please note that the 75th and 25th travel times are estimated for the respective peak period. Calculation of the normalized IQR for corridor level is estimated as a simple average between both corridor's directions:

$$AvgNormalizedIQR_{PP} = \frac{NormalizedIQR_{dir1,PP} + NormalizedIQR_{dir2,PP}}{2} \quad 8$$

Finally, the normalized average IQR for each study corridor during the analysis periods is then calculated as:

$$\boldsymbol{AvgNormalizedIQR_{corridor,AP}} = \frac{\sum_{r=1}^{R} \boldsymbol{AvgNormalizedIQR_{PP_r}}}{\boldsymbol{R}} \quad 9$$

Ranking Score Function: The authors proposed the use of a scoring function for corridor prioritization as such allows for the assignment of different variables and weights for each of the considered variables. The scoring function consists of previously introduced variables, that is, *average corridor delay* and *normalized IQR* for the analysis period, as well as *AADT* and *last time retimed*. Because one of the primary objectives of signal retiming projects is typically to improve operations, a higher weight is provided to delay and travel time reliability by using the square root of the AADT and last time retimed. The proposed scoring function is shown as follows:

$$Score_{corridor} = D_{avg,corridor,AP} * \sqrt{\frac{Corridor\ AADT}{1{,}000}} * AvgNormalizedIQR_{corridor,AP} * \sqrt{T_{lr}} \quad 10$$

3. RESULTS

3.1. Application of Traffic Signal Systems Solutions Toolbox to Case Studies

To test the developed toolbox and ensure that the tool offers reasonable solutions under varying conditions, we developed case studies by applying the Ts3T to several real-world corridors in the Commonwealth of Pennsylvania. This section demonstrates the way the toolbox is utilized and the solutions it offers under varying conditions (please note that presenting an exhaustive list of Stage II solutions in this paper is beyond its scope). These corridors were selected by State DOT representatives, due to various operational conditions observed. Note that maintenance-related constraints were relaxed in the tool both for Stage I and II to be able to test the responsiveness of the tool based on the operational conditions. Figure 6 shows the network topology and geometry layout of critical intersections for three examined case studies.

Figure 6. *Network topology and geometrical layout for critical intersections of each Case Study*

Table 1 summarizes the key input parameters used within these case studies as well as the recommendations proposed by the toolbox. More importantly, results were presented to agency representatives in an attempt to validate Ts3T's outputs. It was found that for all proposed case studies, the recommended solutions are in alignment with the agency's representatives based on their local knowledge. In some instances, agency representatives provided more insights into corridor operations to select the most appropriate input parameters. Those were primarily related to the diversion of traffic from nearby facilities and types of special events.

Table 1. *Summary of Ts3T Application Results for the Case Studies*

Case Study	Input parameters	Recommendation	In line with agency staff
1. McKnight Rd*	▪ Arterial ▪ Frequent maintenance (assumed) ▪ Low pedestrian activity ▪ Principal arterial (AADT 26,000) / Major collector (AADT 12,000) -> V/C < 0.6 at all times	▪ Revisit timing plans for more efficient green allocation ▪ If coordinated, review the controller clock and drift ▪ Review ATSPMs (if applicable)	Yes

Case Study	Input parameters	Recommendation	In line with agency staff
2. US 15	▪ Arterial ▪ Frequent maintenance (assumed) ▪ No pedestrian activity ▪ Principal arterial (AADT 35,000) / Minor arterial (AADT 8,500) -> 0.6 < V/C < 0.98 at all times ▪ Agency capabilities and resources are substantial ▪ The operational goal is prioritization of mainline movements (during peak and off-peak) ▪ Without diversion of traffic from a freeway ▪ Without a special event generator ▪ LOTTR < 1.3 for all peak periods ▪ Presence of preemption	▪ Cyclic (3-5 years) signals retiming ▪ Consider reallocation of split time to better serve mainline movements ▪ Use floating force-off if the corridor is coordinated-actuated ▪ Consider using lead-lag to increase mainline progression bandwidth (ensure to avoid “yellow trap”) ▪ Consider increasing cycle length while managing queues ▪ Review ATSPMs (if applicable) ▪ Use ATSPMs for signal retiming such as reallocation of split times and offset adjustments	Yes
3. US 30	▪ Arterial ▪ Frequent maintenance (assumed) ▪ Medium pedestrian activity ▪ Principal arterial (AADT 26,850) / Minor arterial (AADT 9,450) -> V/C > 0.98 for less than two hours ▪ Agency capabilities and resources are substantial ▪ The operational goal is prioritization of mainline movements (during peak and off-peak) ▪ With the periodic diversion of traffic from a freeway ▪ With unpredictable special event generators ▪ LOTTR > 1.3 for some peak periods ▪ Without complex operations	▪ An adaptive signal system is recommended based on the expected traffic fluctuations and selected operational objectives. ▪ Please refer to system requirements to make sure that the selected adaptive system can serve all movements efficiently.	Yes

*****Case study 1 required fewer inputs as Stage I provided an “early exit” due to very low v/c ratio observed at the critical intersection. Therefore, Stage II parameters are not shown in the table.

3.2. Application of Corridor Prioritization Method

The proposed methodology was applied to 120 signalized corridors with 765 signalized intersections across the state of Ohio that are currently under Ohio DOT jurisdiction. The locations of the studied corridors are shown in Figure 7. Probe vehicle data from RITIS for the entire 2021 were used for the analysis. AM (06:00 AM - 09:00 AM), Midday (11:00 AM - 01:00 PM), and PM (03:00 PM - 07:00 PM) peak periods during typical weekdays (Tuesday, Wednesday, Thursday) were analyzed.

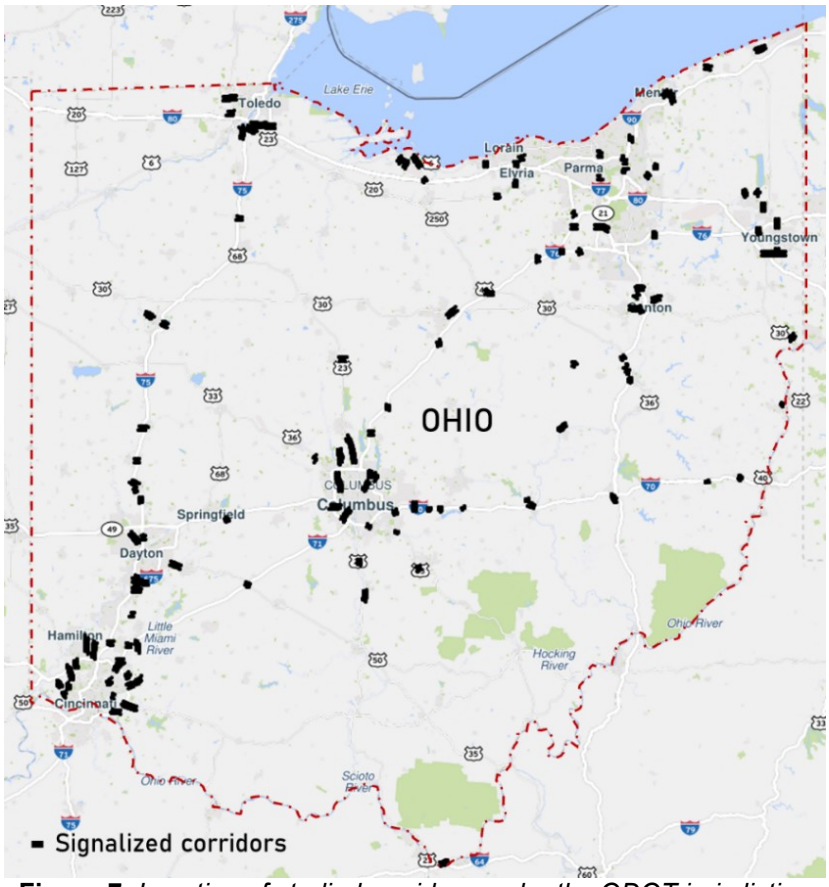


Figure 7. *Location of studied corridors under the ODOT jurisdiction*

Each corridor, or signalized system, varies in number of signals, length, AADT, and the number of years since the last time retimed. **Table 2** shows descriptive statistics of examined corridors to provide better understanding of network characteristics. It can generally be observed that while there are variations, on average, ODOT operates corridors with about 6 signals, that are about 1.3 miles long, that were last time retimed 8.6 years ago, and with approximately 24,000 AADT.

Table 2. *Descriptive statistics of studied 120 corridors in Ohio*

Statistics	Number of signals (#)	Corridor length (miles)	Last time retimed (years)	AADT
Average	6.2	1.3	8.6	24,280
Median	4.5	0.9	6.5	21,945
St. Deviation	4.6	1.1	6.8	12,780
Range	20	4.6	22.8	51,089
Minimum	2	0.1	0.8	6,475
Maximum	22	4.6	23.6	57,564
Total	**756**	**164.6**	**Not Applicable**	**Not Applicable**

Table 3 shows results from ranking for the top and bottom 10 corridors. Generally, a higher score corresponds to a higher corridor ranking for retiming. Color coding was used within a table to illustrate where each value of the cell belongs to entire range of values within same category (i.e., column).

Table 3. *Ranking results for top and bottom 10 corridors*

System Name	Avg. Delay AM Peak	Avg. Delay Midday Peak	Avg. Delay PM Peak	Corridor Avg. Delay	IQR AM Peak	IQR Midday Peak	IQR PM Peak	Corridor Norm. IQR	AADT	LTR	SCORE	RANK
SR-32	21.8	24.1	25.8	23.9	0.24	0.19	0.20	0.21	54,950	10.5	120	**1**
US-62 Berlin	19.2	40.5	34.1	31.3	0.15	0.27	0.26	0.23	10,180	11.1	76	**2**
Portage Street	11.5	18.3	18.3	16.0	0.20	0.20	0.21	0.20	22,988	20.5	70	**3**
IR-74 @ Harrison Rd.	7.5	14.6	14.6	12.3	0.20	0.32	0.40	0.31	25,482	8.5	55	**4**
SR-256	4.8	10.5	13.2	9.5	0.18	0.22	0.28	0.23	49,114	12.2	53	**5**
SR-264 @ Westbourne	9.3	23.0	24.5	18.9	0.16	0.17	0.20	0.18	23,541	10.5	53	**6**
SR-41 at I-75 (D7-Troy)	7.4	15.3	13.8	12.2	0.14	0.16	0.17	0.15	32,348	23.5	52	**7**
SR-149 at I-70	11.7	12.6	10.3	11.6	0.31	0.27	0.28	0.29	9,595	23.5	50	**8**
SR-250 at I-77 Strasburg	12.4	14.3	17.6	14.8	0.19	0.19	0.26	0.21	9,910	23.5	48	**9**
SR-47 at I-75 (D7-Sidney)	8.0	14.3	13.8	12.0	0.16	0.17	0.18	0.17	22,452	23.5	47	**10**
…	…	…	…	…	…	…	…	…	…	…	…	…
RIC-42 (south of US-30)	4.7	9.1	10.6	8.2	0.14	0.16	0.17	0.16	10,754	1.6	5	**110**
SR-45 (Champion Twp)	4.2	9.1	10.3	7.9	0.12	0.13	0.13	0.13	11,691	2.2	5	**111**
SR-43	0.6	5.6	4.6	3.6	0.08	0.11	0.11	0.10	15,867	11.5	5	**112**
I-77 (Grant Ave)	2.8	2.8	2.5	2.7	0.20	0.19	0.22	0.20	7,449	11.5	5	**113**
US-22/33 Interchange	2.8	3.1	4.3	3.4	0.12	0.12	0.13	0.12	11,195	13	5	**114**
US-50	1.8	3.2	4.1	3.0	0.11	0.13	0.15	0.13	20,204	4.5	4	**115**
RIC-97 @ IR-71	4.7	6.1	7.1	6.0	0.14	0.14	0.15	0.14	10,619	1.8	4	**116**
LOR-301 @ US-20	4.9	5.5	8.3	6.2	0.10	0.10	0.11	0.10	11,567	1.8	3	**117**
US-250 (Avery)	2.7	3.1	3.3	3.1	0.09	0.09	0.09	0.09	15,114	5.7	3	**118**
ERI-101 @ SR 2	3.6	4.2	2.8	3.5	0.12	0.12	0.11	0.11	8,428	4.4	2	**119**
Benchwood Wyse	0.4	0.4	0.5	0.4	0.18	0.15	0.18	0.17	10,197	23.5	1	**120**

Results indicate that due to the nature of the scoring function, not all corridors with high ranking experience the highest delays or IQRs. For instance, corridors US-62 Berlin and Portage Street (ranked #2 and #3, respectively) have considerably different AADTs (10,180 and 22,988), but due to higher experienced delays for the US-62 Berlin corridor (31.3 seconds versus 16.0 seconds for the Portage Street corridor), both corridors resulted in similar scores (76 and 70, respectively). This illustrates that the objective function is capable of accounting for multiple factors that are important for consideration of corridors for retiming. Another interesting observation can be made for corridors ranked as #7, #8, #9, and #10. All four corridors have the highest value for the variable "last time retimed", of 23.5 years, a fixed value that ODOT uses for corridors that haven't been retimed over 23 years. However, this parameter is not the sole driver of corridor rank as it can be observed for corridors #7 and #8; relatively moderate values of AADTs (32,348, and 22,452) also contribute to overall corridor rank. Similarly, for corridors #8, and #9 relatively moderate values of IQRs (0.29 and 0.21) contribute to such rank. On the other hand, the lowest-ranked corridors experience very low values of delay and IQRs. Additionally, some of these low-ranked corridors (see ranks #110, #111, #116, #117) were retimed more recently (no later than 2.2 years from the time of corridors ranking), which leads to both lower T_{lr} in the ranking calculation, and also likely these corridors perform better since they have recently been retimed.

When obtained ranking results were presented to agency representatives, it was found that the results are generally sound and in alignment with expectations. For instance, the SR-32 corridor, which has the highest priority for retiming (ranked as #1), has already been selected as a capital improvement project (reconfiguration of major corridor signalized intersection to a full interchange) for the following year due to significant congestion observed and the AADT on this corridor. Further, the SR-250 corridor at I-77 Strasburg, which was ranked #9 for retiming (based on the 2021 data), has recently been retimed in 2023 and the before-and-after results from this corridor indicated significant improvements in travel times and vehicle delays. Another similar observation comes from the US-224 corridor (Boardman), which was ranked #29 (based on the 2021 data). The US-224 (Boardman) corridor has also been retimed in 2023 and the before-and-after the study indicated significant improvements in travel time. These findings validate that the proposed ranking method is capable of identifying corridors that experience issues and would largely benefit from signal retiming. Similarly, the US-20 corridor, which was ranked #95 (out of 120 corridors) for signal retiming, has also recently been retimed and the before-and-after analysis indicated marginal changes in travel time and speeds along the corridor. The reason why this corridor was selected for retiming could be due to the long time period since it was last time retimed i.e., 11 years. Such an example confirms that similar corridors might not be the best candidates for retiming. Note

that these were the only corridors that have been recently retimed since 2021 with the before-and-after analysis data, and thus only these corridors were included in the assessment.

4. CONCLUSIONS

This study presented data-driven approaches aiming to address two problems that transportation agencies managing traffic signal control systems nowadays face. The first problem relates to the selection of appropriate traffic signal control system solutions for prevailing field conditions and agency capabilities. The second problem relates to the prioritization of corridors for signal retiming projects.

From the application of the developed toolbox, the obtained results demonstrated that the toolbox could provide the appropriate recommendations based on the unique corridor circumstances and agency capabilities. Additionally, the recommended solutions by the toolbox were generally in line with agency expectations based on their local knowledge and understanding of unique corridor conditions. Another strength of the proposed toolbox is its ease of use for practitioners. While only three case studies were presented in this paper, the application of the toolbox to numerous case studies showed that it takes less than a few hours to apply the toolbox for a given study corridor. The proposed toolbox is intended to support the process of selection of appropriate traffic signal solutions and generally can be considered in addition to proven engineering principles and judgment. The authors of the study are aware that not all signal systems solutions and technologies within a particular system group (e.g., adaptive traffic signal control) have the same capabilities. Therefore, users of the tool are advised to conduct separate analyses of whether existing available solutions on the market can achieve their operational goals.

When it comes to prioritization of corridors for signal retiming projects, it was found that results from the method application validate that the proposed ranking method can identify corridors that experience issues and would largely benefit from signal retiming. For instance, the corridor that has the highest priority for retiming has already been selected by agency representatives as a capital improvement project for the following year. Also, the proposed method was capable of identifying those corridors for which retiming would bring marginal benefits. Proposed approaches can benefit agencies in making more informed decisions during the selection of corridors for signal retiming, especially for large agencies with limited budgets and resources.

The proposed approaches highlight the significance of systematic decision-making in traffic signal control management. The availability of third-party probe vehicle data has enabled transportation agencies to tackle longstanding challenges without requiring substantial investments in data collection infrastructure, such as in-pavement or roadside sensors. Given the constant evolution of technology, it's essential to emphasize that the willingness and readiness of agencies to depart from outdated approaches in traffic signal control management are critical factors for successfully managing traffic signal systems.

References:

[1] Koonce, P. (2008). *Traffic signal timing manual* (No. FHWA-HOP-08-024). United States. Federal Highway Administration.

[2] Abbas, M., Chaudhary, N. A., Pesti, G., & Sharma, A. (2005). Guidelines for determination of optimal traffic responsive plan selection control parameters. Technical No. Tx0-4421-2, College Station, TX.

[3] Stevanovic, A., & Martin, P. T. (2008). Split-cycle offset optimization technique and coordinated actuated traffic control evaluated through microsimulation. Transportation Research Record, 2080(1), 48-56.

[4] Zhao, Y., and Z. Tian. Applicability of Adaptive Traffic Control Systems in Nevada's Urban Areas. Technical Report. Department of Transportation, NV, 2011.

[5] Mudigonda, S., Ozbay, K., & Doshi, H. (2008). Evaluation and selection of adaptive traffic control strategies on transportation networks: Decision support tool based on geographic information system. Transportation Research Record, 2064(1), 51-64.

[6] Dobrota, N., Stevanovic, A., & Mitrovic, N. (2020). Development of assessment tool and overview of adaptive traffic control deployments in the US. Transportation research record, 2674(12), 464-480.

[7] Mitrovic, N., Dobrota, N., Pereira, M. B., Espino, E., & Stevanovic, A. (2023). Data-Driven Decision Support Platform for Selection of Intersections for Adaptive Traffic Signal Control. Transportation Research Record, 03611981231159872.

[8] Gordon, R. L. (2010). Traffic signal retiming practices in the United States (Vol. 409). Transportation Research Board.

[9] Humphreys, E. P., & Click, S. M. (2018). Evaluating the Three-Year Rule for Retiming Coordinated Traffic Signals using Simulation with Real-World Traffic Data (No. 18-03185).

[10] Sunkari, S. (2004). The benefits of retiming traffic signals. Institute of Transportation Engineers. ITE Journal, 74(4), 26.
[11] Pulipati, S. B. (2006). Regional prioritization of corridors for traffic signal retiming. The University of Texas at Arlington.
[12] Day, C. M., Li, H., Sturdevant, J. R., & Bullock, D. M. (2018). Data-driven ranking of coordinated traffic signal systems for maintenance and retiming. Transportation research record, 2672(18), 167-178.
[13] Saldivar-Carranza, E. D., Li, H., Platte, T., & Bullock, D. M. (2023). Systemwide Identification of Signal Retiming Opportunities with Connected Vehicle Data to Reduce Split Failures. Transportation Research Record, 03611981231168844.
[14] Day, C. M., Remias, S. M., Li, H., Mekker, M. M., McNamara, M. L., Cox, E. D., & Bullock, D. M. (2015). Performance ranking of arterial corridors using travel time and travel time reliability metrics. Transportation Research Record, 2487(1), 44-54.
[15] Mathew, J., Krohn, D. W., Li, H., Day, C. M., & Bullock, D. M. (2017). Implementation of probe data performance measures (No. PA-2017-001-PU WO 001). Pennsylvania. Dept. of Transportation. Bureau of Maintenance and Operations.
[16] Poddar, S., Chakraborty, P., Sharma, A., Knickerbocker, S., & Hawkins, N. (2022). Massively parallelizable approach for evaluating signalized arterial performance using probe-based data. Journal of Intelligent Transportation Systems, 1-15.
[17] PennDOT (2022). Traffic Data Report. Pennsylvania Department of Transportation. URL: http://gis.penndot.gov/BPR_PDF_FILES/Documents/Traffic/Traffic_Information/Annual_Report/2022/Traffic_Pattern_Group.pdf. accessed 01/15/2024
[18] Iroanya, R. O. (2020). An Evaluation of Turning Movement Counts and Estimation of Initial Turning Proportions (Doctoral dissertation).
[19] Denney Jr, R. W., Curtis, E., & Head, L. (2009). Long green times and cycles at congested traffic signals. Transportation research record, 2128(1), 1-10.
[20] Denney, R. W., & Hamilton, B. A. (2009). *Improving traffic signal management and operations: a basic service model* (No. FHWA-HOP-09-055). United States. Federal Highway Administration.
[21] Regional Integrated Transportation Information System (RITIS). (2023). A data-driven platform for transportation analysis, monitoring, and data visualization. The University of Maryland. url: https://ritis.org/login?r=Lw==. Accessed 01/15/2024
[22] Margiotta, R. A., Turner, S., Taylor, R., & Chang, C. (2018). National performance measures for congestion, reliability, and freight, and CMAQ traffic congestion: General guidance and step-by-step metric calculation procedures (No. FHWA-HIF-18-040).
[23] ODOT. (2023). Transportation Information Mapping System. URL: https://gis.dot.state.oh.us/tims
[24] Dunn, M. R., Ross, H. W., Baumanis, C., Wall, J., Lammert, J., Duthie, J., ... & Machemehl, R. B. (2019). Data-driven methodology for prioritizing traffic signal retiming operations. Transportation Research Record, 2673(6), 104-113.
[25] Highway Capacity Manual. 2022. 7th Edition: A Guide for Multimodal Mobility Analysis. Washington, DC: The National Academies Press. https://doi.org/10.17226/26432.

RAZVOJ I IMPLEMENTACIJA ALATA ZA POVEĆANJE EFIKASNOSTI UPRAVLJANJA SVETLOSNOM SIGNALIZACIJOM: STUDIJE SLUČAJA IZ PENSILVANIJE I OHAJA

Nemanja Dobrota, Burak Cesme
Kittelson and Associates, Inc.

Rezime: Efikasno upravljanje svetlosnom signalizacijom je ključno za optimalno upravljanje saobraćajnim tokovima i smanjene vremenskih gubitaka. U ovom radu su predstavljene dve studije koje se bave ključnim izazovima sa kojima se suočavaju transportne agencije. Prva studija se odnosi na razvoj aplikacije koja ima za cilj da preporuči strategije rada svetlosnih signala a u zavisnosti od karakteristika mreže i ograničenjima agencije koja upravlja signalima. Razvijena aplikacija je primenjena u Komonveltu Pensilvanijia, u Sjedinjenim Američkim Državama (SAD). Pokazano je da je razvijena aplikacija poboljšala procese odabira signalnog sistema. U drugoj studiji je predložen metod za određivanja prioriteta za noveliranje signalnih planova koji je zasnovan na vremenskim gubicima, pouzdanosti vremena putovanja, protoku saobraćaja i proteklom vremenu od poslednjeg noveliranja signalnih planova. Primenjen u državi Ohajo, SAD, predloženi pristup je efikasno identifikovao koridore za noveliranje signalnih planova, što je dovelo do značajnih poboljšanja

u samom procesu alokacije resursa unutar agencije. Ove studije naglašavaju važnost sistematičnog pristupa zasnovanog na podacima u upravljanju svetlosnom signalizacijom sa ciljem poboljšavanja efikasnosti realizacije saobraćajnog procesa na transportnim mrežama.

Ključne reči: *sistemi svetlosne signalizacije, podaci iz komercijalnih vozila, sistemi donošenja odluka, vremenski gubici*

KONCEPT IZMENJIVE SAOBRAĆAJNE SIGNALIZACIJE U FUNKCIJI INFORMISANJA KORISNIKA

Stamenka Stanković[1], Nikola Čelar[2], Jelena Kajalić[3]
[1]Saobraćajni fakultet, Univerzitet u Beogradu, Vojvode Stepe 305, Beograd, R. Srbija, s.stankovic@sf.bg.ac.rs
[2]Saobraćajni fakultet, Univerzitet u Beogradu, Vojvode Stepe 305, Beograd, R. Srbija, n.celar@sf.bg.ac.rs
[3]Saobraćajni fakultet, Univerzitet u Beogradu, Vojvode Stepe 305, Beograd, R. Srbija, j.kajalic@sf.bg.ac.rs

Rezime: *Informisanje korisnika saobraćajnog sistema predstavlja jednu od tri glavne funkcije upravljanja saobraćajem putem ITS-a. Ovom funkcijom se u realnom vremenu pružaju informacije o stanju i uslovima u saobraćajnom toku, izmenama režima saobraćaja i uslovima na putu i okruženju. Informacije se korisnicima distribuiraju na dva načina, sredstvima javnog informisanja i saobraćajnom signalizacijom sa izmenjivim sadržajem poruka (VMS). VMS sadrži tekst, saobraćajne znakove i piktograme sa ciljem informisanja i skretanja pažnje učesnika u saobraćaju na trenutne i/ili predstojeće događaje u saobraćajnom toku. U ovom radu je prikazan jedan od koncepata standardizacije strukture i sadržaja VMS-a koji u odnosu na aktuelnu domaću praksu obezbeđuje veći stepen mogućnosti prilikom informisanja korisnika.*

Ključne reči: *ITS, informisanje korisnika,VMS*

THE CONCEPT OF VARIABLE MESSAGE SIGNS IN THE FUNCTION OF USER INFORMATION

Stamenka Stanković[2], Nikola Čelar[1], Jelena Kajalić[3]
[1]Faculty of Transport and Traffic Engineering, University of Belgrade, Vojvode Stepe 305, Belgrade, Republic of Serbia, s.stankovic@sf.bg.ac.rs
[2]Faculty of Transport and Traffic Engineering, University of Belgrade, Vojvode Stepe 305, Belgrade, Republic of Serbia, n.celar@sf.bg.ac.rs
[3]Faculty of Transport and Traffic Engineering, University of Belgrade, Vojvode Stepe 305, Belgrade, Republic of Serbia, j.kajalic@sf.bg.ac.rs

Abstract: *Informing users of the traffic system is one of the three main functions of traffic management through ITS. This function provides real-time information on the traffic flow state and conditions, changes in traffic regimes and road and environmental conditions. Information is distributed to users in two ways, using public information and variable message signs (VMS). VMS contains text, traffic signs and pictograms intending to inform and draw the attention of road users to current and/or upcoming events in the traffic flow. This paper presents one of the concepts of standardization of the structure and content of the VMS, which provides a greater degree of possibilities when informing users compared to the current domestic practice.*

Keywords: *ITS, traffic information, VMS*

1. UVOD

Efikasnost transportnog sistema je od vitalnog značaja za ekonomski rast, društvenu povezanost i dobrobit pojedinca. Primena inteligentnih transportnih sistema (ITS) u drumskom saobraćaju ima ključnu ulogu u upravljanju saobraćajem, povećanju bezbednosti i informisanju korisnika u realnom vremenu.

U konceptu upravljanja saobraćajem primenom ITS-a izdvajaju se tri osnovne funkcije [1] i to:

- informisanje;
- vođenje (rutiranje);
- upravljanje saobraćajnim tokovima i kontrola pristupa.

Funkcija informisanja podrazumeva pružanje informacija korisnicima servisa (vozačima, upravljaču puta, službama održavanja puta i sl.) o uslovima u saobraćajnom toku, vremenskim uslovima, izmenama režima saobraćaja, događajima, itd. U ovom radu akcenat je stavljen na funkciju informisanja krajnjih korisnika, vozača, odnosno na način diseminacije informacija ka korisnicima pre i tokom realizacije putovanja. Ova ITS

[1] Stamenka Stanković: s.stankovic@sf.bg.ac.rs

aplikacija, servis, se po preporuci primenjuje na celokupnoj putnoj mreži, dok se aplikacije upravljanja saobraćajem primenjuju samo na pojedinim lokacijama koje ispunjavaju jasne kriterijume za implementaciju odgovarajućeg seta upravljačkih mera.

Primarni cilj informisanja korisnika je optimizacija saobraćajnog toka kroz pružanje tačnih i pravovremenih informacija vozačima, transportnim agencijama i drugim zainteresovanim stranama. Takođe, informisanje korisnika doprinosi unapređenju bezbednosti saobraćaja upozoravajući vozače na opasnosti, uska grla, nepovoljne vremenske uslove i druge potencijalne rizike. Savremeni algoritmi upravljanja mogu predvideti stanja u saobraćajnom toku, identifikovati potencijalna zagušenja i preporučiti optimalne rute u realnom vremenu, osnažujući putnike da donose informisane odluke i prilagođavaju svoje planove putovanja u skladu sa tim.

Generalno, funkcija informisanja korisnika sadrži tri osnovna servisa [2], i to:

- Informacije o aktuelnim i prognoziranim događajima;
- Informacije o uslovima u saobraćaju i vremenu putovanja;
- Informacije o vremenskim uslovima.

Informacije o događajima se odnose na informisanje korisnika puta o očekivanim i neočekivanim događajima na mreži, poput radova na putu, saobraćajnih nezgoda, rekurentnih zagušenja, zatvaranja saobraćaja usled manifestacija ili naglih promena stanja toka ili vremenskih uslova i dr.

Informacije o uslovima u saobraćaju i vremenu putovanja se odnose na pružanje trenutnih i prognoznih informacija o efikasnosti saobraćajnog procesa (nivou usluge), kao i o vremenu putovanja deklarisanom rutom u preovlađujućim, aktuelnim saobraćajnim uslovima.

Informacije, kao i upozorenja, o nepovoljnim vremenskim uslovima obuhvataju informacije o stanju površine kolovoza, intenzitetu i karakteru padavina, vidljivosti i ostalim meteorološkim uslovima koji mogu negativno uticati na saobraćajni proces.

Informacije se korisnicima sistema distribuiraju na dva načina:

- Informacije putem sredstava javnog informisanja (radija, javnih televizijskih servisa, interneta, mobilne telefonije, itd.);
- Informacije putem saobraćajne signalizacije sa izmenjivim sadržajem poruka (VMS).

Informisanje putem javnih medija predstavljaju minimum zahteva koji je potrebno primeniti na nivou celokupne mreže, dok je informisanje putem VMS-a selektivno primenjivo uz ispunjavanje određenih kriterijuma za implementaciju.

Standardizacija uloge, strukture i sadržaja znakova za izmenjivim sadržajem poruka za informisanje korisnika obezbeđuje unifikaciju i harmonizaciju sistema. Harmonizacija sistema i procesa informisanja korisnika pojednostavljuje operativnu implementaciju upravljačkih mera i akcija. S druge strane, unifikacija sistema omogućava da korisnici sistema percipiraju uticaj mera na ujednačen i dosledan način, tako što se isti prikazi i informacije prikazuju u istim situacijama.

U ovom radu dat je prikaz domaće prakse i inostranih iskustava u primeni VMS-a za informisanje korisnika uz sagledavanje prednosti i nedostataka različitih koncepata diseminacije informacija ka krajnjim korisnicima.

2. VMS ZA INFORMISANJE KORISNIKA

Znakovi sa izmenjivim sadržajem poruka kao izvršni elementi u generalnom smislu predstavljaju displeje koji imaju mogućnost prikazivanja standardnih saobraćajnih znakova, tekstualnog ispisa i piktograma u cilju informisanja učesnika u saobraćaju o značajnim aktuelnim ili predstojeće događajima na narednim deonicama osnovne rute, odnosno predmetnog putnog pravca. VMS treba da ima mogućnost prikazivanja širokog spektra informacija i preporuka, uključujući zagušenja u saobraćaju, vreme putovanja, zatvorene deonice/rampe, vremenske uslove, hitna upozorenja i dr. U tom smislu VMS mora ispuniti naredne zahteve:

- Vidljivost: VMS bi trebalo da bude uočljiv sa dovoljne udaljenosti, bez obzira na vremenske uslove ili doba dana. Ovo se postiže korišćenjem odgovarajuće dimenzije znaka, kontrasta, veličine fonta i rezolucije prikaza.
- Čitljivost: Poruke prikazane na VMS-u treba da budu lake za čitanje i brzo razumevanje. Ovo uključuje korišćenje jasnih fontova, odgovarajući razmak između slova i reči i izbegavanje složenih jezičkih konstrukcija.
- Prilagodljivost: VMS bi trebalo da omogući prikazivanje informacija za širok spektar različitih prethodno definisanih situacija.
- Otpornost na vremenske uslove i energetska efikasnost.

Da bi informacije bile razumljive korisnicima sistema, VMS mora biti jasno i jednostavno strukturiran. Informacije koje se pružaju korisnicima treba shvatiti s jedne strane kao dopunu informacijama koje se distribuiraju putem javnih medija, a s druge strane kao dodatni medij komunikacije.

Za primenu izmenjive saobraćajne signalizacije za informisanje korisnika, pored protoka kao osnovnog kriterijuma, uglavnom se koristi i lokacijski kriterijum. U tom smislu, VMS se po pravilu pozicioniraju ispred značajnih ukrštanja, u tačkama u kojima dolazi do odlučivanja o ruti, kako bi se korisnici sistema informisali o događajima na osnovnoj i preporukama koje se odnose na alternativnu rutu. Takođe, VMS se primenjuje na deonicama na kojima se očekuje pojava rekurentnih zagušenja (npr. autoputske deonice u zonama velikih gradova), i na deonicama sa specifičnim objektima, poput dugačkih tunela, graničnih prelaza, čeonih naplatnih stanica i sl. Mikrolokacija znakova mora biti definisana na način da obezbedi da korisnik puta ima dovoljno vremena da reaguje, te rastojanje do tačke donošenja odluke ne bi trebalo da bude manje od 2 km [3].

Generalno, u evropskoj praksi je za informisanje korisnika zastupljeno pet tipova VMS-a koji se razlikuju u zavisnosti od strukture kreiranja informacija. U tom smislu, razlikuju se naredni tipovi:

- VMS koji omogućava prikazivanje isključivo tekstualni poruka, bez piktograma,
- VMS u konfiguraciji piktogram-tekst (samo jedan piktogram i tri reda teksta),
- VMS u konfiguraciji piktogram-piktogram-tekst (2 piktograma i tri reda teksta),
- VMS u konfiguraciji piktogram-tekst-piktogram (2 piktograma i tri reda teksta),
- Full-matrix VMS (potpuna fleksibilnost konfiguracije piktograma i teksta).

3. VMS - DOMAĆA PRAKSA

Na mreži najvišeg ranga u Republici Srbiji, za informisanje korisnika se dominantno koristi VMS u konfiguraciji piktogram-tekst-piktogram, odnosno matrični saobraćajni znak za izmenljivim sadržajem poruka koji se sastoji od centralnog jednobojnog LED polja namenjenog ispisu tekstualnih poruka i dva višebojna LED polja, sa leve i desne strane, za prikazivanje standardnih saobraćajnih znakova opasnosti i izričitih naredbi (Slika 1.).

Slika 1. *Koncept VMS-a za informisanje korisnika u domaćoj praksi*

Ovakav koncept strukture VMS-a obezbeđuje delimičnu univerzalnost njegove primene u smislu mogućnosti realizacije većeg broja funkcija ITS-a. Pored dominantne funkcije informisanja korisnika, koncept predmetnog saobraćajnog znaka omogućava i ostvarivanje funkcije upravljanja saobraćajnim tokovima, odnosno primenu upravljačkih mera i servisa koji se odnose na upravljanje incidentnim situacijama, upravljanje brzinama i dinamički režim zabrane preticanja za teretna vozila. Iako ovaj multifunkcionalni koncept može biti sagledan kao pozitivan, sa druge strane ovakvim pristupom se ograničava količina i spektar informacija kao i kvalitet poruke koja se prenosi krajnjem korisniku. Ovo je naročito slučaj ukoliko se pored informacije korisniku želi dati i preporuka (npr. o alternativnoj ruti).

Uobičajena primena dvobojnih LED polja, sa leve i desne strane VMS-a, onemogućava primenu određenog spektra saobraćajnih znakova i piktograma koji bi na kvalitetniji način preneli poruku korisnicima od isključive primene tekstualnog ispisa. Takođe, evropske preporuke daju prednost primeni piktograma u cilju harmonizacije ITS-a na evropskom nivou [4].

Može se pretpostaviti da je izbor koncepta VMS-a za informisanje korisnika u domaćoj praksi imao za cilj obezbeđivanje veće funkcionalnosti pojedinačnog VMS-a, ali bez kreiranja jasnih scenarija događaja koji zahtevaju informisanje korisnika.

4. KONCEPT INFORMISANJA KORISNIKA

Informacije koje se pružaju korisnicima se uslovno mogu grupisati na: informacije koje se odnose na upravljanje saobraćajem, na bezbednost saobraćaja, informacije o specifičnim lokaciji ili opšte informacije i kampanjske poruke koje se odnose na bezbednost saobraćaja.

Informacije koje se odnose na upravljanje saobraćajem imaju za cilj optimizaciju saobraćajnog procesa i informisanje učesnika najčešće o alternativnim rutama u slučaju pojave zagušenja ili zatvaranja/blokade određenog elementa mreža koji može biti posledica slučajnih događaja ili planiranih aktivnosti.

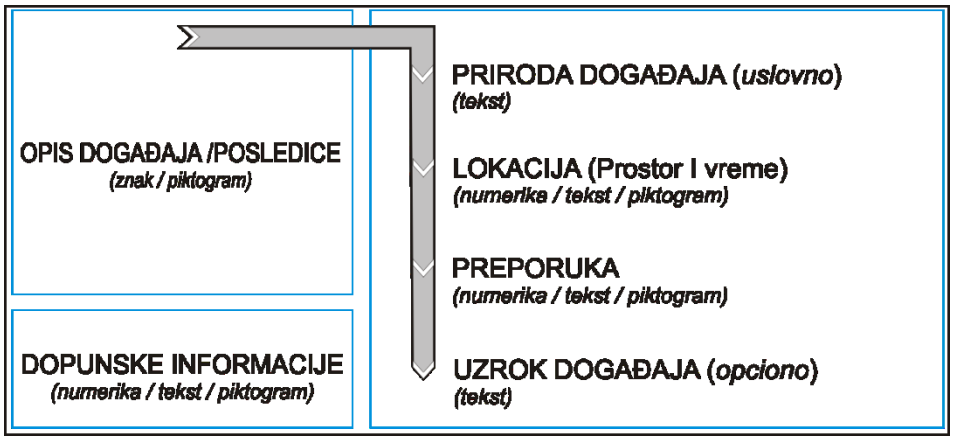
Informacije koje se odnose na bezbednost saobraćaja informišu korisnike u slučaju pojave iznenadnih događaja kao što su saobraćajna nezgoda, požar, kvarovi vozila, nepovoljni vremenski uslovi, itd.

Informacije o događajima/stausima koji se odnose na specifičnu lokaciju ili opšte informacije na nacionalnom nivou obuhvataju najrazličitiji set saobraćajnih informacija o masovnim događajima poput sajmova, sportskih manifestacija i načinu pristupa istim. S druge strane, ovaj tip informacije podrazumeva i informisanje o vremenima putovanja na alternativnim rutama na strateški važnim tačkama ili vremenima zadržavanja na specifičnim lokacijama (naplatnim stanicama, graničnim prelazima i carinskim terminalima).

Informacije se vozačima mogu plasirati kao samostalna informacija ili sa dodatkom odgovarajuće preporuke.

Korišćenje VMS-a za kampanje u bezbednosti drumskog saobraćaja ima najniži prioritet u informisanju korisnika i moraju imati jasno ograničen period primene i definisan i odobren sadržaj saobraćajno-edukativnog i preventivnog karaktera. Ovaj tip poruka se mora razlikovati od ostalih informacija koje se prenose korisnicima. Iste ne bi trebalo da budu aktivne u vršnim satima kada se može očekivati potreba za drugim tipovima informisanja. Takođe, dugotrajne kampanje mogu dovesti do navikavanja korisnika na iste, što može dovesti do gubitka kredibiliteta samog VMS-a.

VMS predstavlja najsloženiji izvršni element ITS-a, koji mora da bude koncipiran na način da vozači mogu biti u stanju da istovremeno čitaju tekst i piktograme, i to u veoma kratkom vremenskom periodu. Iz tog razloga koncept formiranja kompleksne informacije bi trebao da se bazira na jasno definisanim postulatima, čime se obezbeđuje uniformnost sistema informisanja korisnika. Na narednoj slici prikazan je okvirni koncept formiranja složene informacije a time i strukture full-matrix VMS-a za informisanje korisnika (Slika 2.).



Slika 2. *Princip formiranja kompleksne informacije*
Izvor: EasyWay 2012 [5]

U hijerarhijskom i hronološkom smislu najvažnija je informacija kojom se definiše događaj ili njegova posledica, u zavisnosti od značaja istih sa aspekta vozača. Ova informacija se po pravilu prenosi putem saobraćajnog znaka/piktograma, znakovima opasnosti, izričitih naredbi, obaveza ili obaveštenja o blokadi/zatvaranju elementa mreže (npr. deonica autoputa, tunel, izlazna rampa). Opciono, ispod znaka mogu se prikazati dopunske informacije koje se odnose na prikazani saobraćajni znak a koje detaljnije opisuju obim događaja ili prenose specifične informacije u formi piktograma ili teksta. Obim događaja se prikazuje navođenjem dužine kolone u kilometrima (npr. 10 km) ili vremenskim gubicima u minutima ili satima (npr. 30 minuta, 120 minuta, 2.5 sata). Specifične informacije podrazumevaju prikazivanje vremena važenja znaka, ili grupe korisnika na koju se znak odnosi i dr.

Deo VMS-a namenjen tekstualnom ispisu bi trebao da bude hijerarhijski ustrojen po važnosti informacije koja se prenosi [6]. Generalna preporuka je da je ***prvog prioriteta*** ona informacija koja se odnosi na prirodu događaja koji je prikazan saobraćajnim znakom, odnosno piktogramom. Ova informacija je naročito važna ukoliko se događaj ne može detaljno objasniti standardnim saobraćajnim znakom (npr. primena znaka „opšta opasnost“ u slučaju saobraćajne nezgode ili magle).

Informacije ***drugog prioriteta*** po važnosti odnose se na lokaciju događaja, prevashodno u prostornom smislu ali i u vremenskom (npr. dodatno vreme putovanja za prolazak lokacije događaja).

Informacija ***trećeg prioriteta*** podrazumeva preporuku koja se daje vozačima ukoliko ista postoji, naročito ako se odnosi na preusmeravnje ili savetodavnu poruku (npr. uspori).

Kao ***četvrti prioritet*** vozačima se opciono može preneti informacija o uzroku događaja. Na primer, u slučaju kolone vozila kao primarne informacije koja se prenosi korisnicima, uzrok može biti nezgoda, radovi na putu, itd.

Ovaj algoritam kreiranja kompleksne informacije treba posmatrati delimično fleksibilno, sa osnovnom dilemom koja informacija je najbitnija sa aspekta vozača u smislu njenog pozicioniranja u okviru tekstualnog dela VMS-a. U slučajevima kada se događaj ne može definisati saobraćajnim znakom/piktogramom (nepostojanje standardnog saobraćajnog znaka/piktograma) navođenje uzroka događaja u tekstualnom delu VMS-a je za korisnike od primarnog značaja (npr. znak „opšta opasnost“ u slučaju magle).

Fleksibilnost kao i čitljivost tekstualnog dela VMS-a se dodatno može pospešiti primenom piktograma i umetnutih saobraćajnih znakova. Na primer, umesto teksta „koristite izlaz“ jednostavnije je primeniti piktogram za izlaz (Slika 3.) kao i umesto teksta „uspori“ efikasnije je koristiti umetnuti znak za preporučenu brzinu. Takođe, postoje određene nedoumice po pitanju primene samo velikih slova za ispisivanje tekstualnih poruka. Različite studije su pokazale su da bi poruke sa svim velikim slovima trebalo koristiti samo u slučaju kratkih reči (npr. „‚MAGLA“) [7][8]. Sastav poruke u kojoj su značajne reči napisane velikim slovima omogućava bolje prepoznavanje najvažnijih reči, ubrzavajući razumevanje celokupnog sadržaja poruke [7].

Na narednoj slici prikazana je jedna od mogućih varijanti diseminacije informacija ka krajnjem korisniku u slučaju zagušenja na deonici koje je uzrokovano nezgodom, sa definisanom lokacijom događaja, procenjenim dodatnim vremenom putovanja, kao i preporukom za preusmeravanja ka odredištu. U konkretnom primeru izostavljeno je dodatno pojašnjenje prirode događaja, jer je isti jasno definisan saobraćajnim znakom. S druge strane, kao poslednji prioritet data je informacija o uzroku događaja, jer su informacije o lokaciji i preporuka bitnije informacije za vozače.

Slika 3. *Primer kreiranja informacije u predstavljenom konceptu*

Naredni primer zatvaranja autoputske rampe (Slika 4.) ilustruje razliku u konceptima kreiranja informacija koje se prenose VMS-om u domaćoj praksi u odnosu na predloženi koncept. Za razliku od predloženog koncepta na datom primeru, može se uočiti da je u domaćoj praksi prenošenje informacija zasnovano na primeni znakova opasnosti i izričitih naredbi, što generalno ne odgovara karakteru i prirodi situacije. Takođe, dominantna primena teksta umesto njegove kombinacije sa piktogramima usložnjava proces čitanja znaka. Na ovaj način se ne ostavlja prostor za navođenje svih potrebnih informacija, npr. naziv čvora i odredišta što su informacije sa kojima su vozači familijarni.

S druge strane, domaća praksa, zbog mogućnosti prikazivanja dva saobraćajna znaka, u određenim situacijama može i događaj i uzrok događaja prikazati putem znakova/piktograma (npr. zagušenje čiji je uzrok radovi na putu).

Slika 4. *Uporedni prikaz VMS-a u a) predloženom konceptu i b) domaćoj praksi*

5. ZAKLJUČAK

Brojne istraživanja su potvrdila opravdanost funkcije informisanja korisnika putem VMS-a, u smislu poboljšanja efikasnosti saobraćaja, smanjenju vremena putovanja i povećanju bezbednosti. Obezbeđujući informacije u realnom vremenu, VMS omogućava informisano donošenje odluka, optimizaciju rute i doprinosi poštovanju saobraćajnih propisa. Takođe, informisanje putem VMS-a je ključno u slučaju nastanka incidentnih situacija, minimizirajući poremećaje u saobraćajnom toku kroz pravovremenu komunikaciju sa vozačima.

Kako bi se formirao efikasan servis informisanja korisnika neophodno je u prethodnom koraku jasno definisati moguće scenarije događaja i njihove varijacije u zavisnosti od specifičnosti lokacije kao i dostupnosti podatka u realnom vremenu. Navedeni korak predstavlja preduslov za formiranje kvalitetnog i uniformnog koncepta prenošenja informacija vozačima.

U radu je prikazan način kreiranja strukture VMS-a koji omogućava prenošenje informacija najšireg spektra na dosledan i uniforman način uz određeni stepen fleksibilnosti. Prikazani koncept je zasnovan na preporukama o upotrebi piktograma umesto teksta, čime se obezbeđuje lakše čitanje i razumevanje informacije, a pri čemu se delimično rešava problem dvojezičnog prikaza teksta.

Kao najfleksibilniji pristup kreiranju koncepta informacija izdvaja se full-matrix VMS, koji podržava varijabilnu primenu saobraćajnih znakova u okviru VMS-a i mogućnost supstitucije takstualnih formi simbolima, odnosno piktogramima. Ovaj pristup favorizovanja piktograma zahtevao bi i kreiranje/primenu novih piktograma uz neophodan period adaptacije vozača na iste primenom kombinacije „tekst + piktogram“ tokom određenog perioda potrebnog za edukaciju korisnika.

Literatura

[1] Bundesamt für Strassen ASTRA. 2016. Verkehrsmanagement auf Nationalstrassen (Kopfrichtlinie VM-NS).
[2] Federal Highway Research Institute (BASt). 2021. Reference Handbook for Harmonised Core ITS Service Deployment in Europe.
[3] Bundesamt für Strassen ASTRA. 2016. Wechseltextanzeigen (WTA) V2.01.
[4] Conference of European Directors of Roads (CEDR). 2003. Framework for harmonised Implementation of Variable Message Signs in Europe (FIVE).
[5] EasyWay, European Commission. 2012. Variable Message Signs Harmonisation Principles of VMS Messages Design.
[6] Conference of European Directors of Roads (CEDR). 2009. VMS Harmonization in Europe.
[7] Fancello, G.; Serra, P.; Pinna, C. 2021. Visual Perception and Understanding of Variable Message Signs: The Influence of the Drivers' Age and Message Layout. Safety 7(3):60. https://doi.org/10.3390/safety7030060
[8] Fancello, G.; Carta, M.G.; Fadda, P. 2013. An experimental evaluation of text reading for Variable Message Signs an Italian case study. External Costs of Transport Systems: Theory and Applications—Selected Papers, pp.126-141.

STRUKTURA UPRAVLJAČKIH MERA U ODNOSU NA HIJERARHIJU ELEMENATA AUTOPUTA

Nikola Čelar[1], Stamenka Stanković[2], Jelena Kajalić[3]
[1]Saobraćajni fakultet, Univerzitet u Beogradu, Vojvode Stepe 305, Beograd, R. Srbija, n.celar@sf.bg.ac.rs
[2]Saobraćajni fakultet, Univerzitet u Beogradu, Vojvode Stepe 305, Beograd, R. Srbija, s.stankovic@sf.bg.ac.rs
[3]Saobraćajni fakultet, Univerzitet u Beogradu, Vojvode Stepe 305, Beograd, R. Srbija, j.kajalic@sf.bg.ac.rs

Rezime: *Osnovne funkcije upravljanja saobraćajem putem ITS-a obuhvataju informisanje korisnika, upravljanje saobraćajnim tokovima, vođenje tokova i kontrolu pristupa. Putna mreža najvišeg ranga sastoji se od različitih elemenata od kojih svaki zahteva primenu odgovarajućih upravljačkih funkcija i mera a shodno tome i različitu ITS opremu. U tom smislu, upravljačke mere i stepen opreme je potrebno prilagoditi saobraćajnim zahtevima i specifičnim karakteristikama različitih elemenata mreže. Harmonizacija arhitekture upravljačkog sistema pojednostavljuje operativnu implementaciju upravljačkih mera i akcija. S druge strane, na ovaj način se obezbeđuje da korisnici sistema percipiraju uticaj mera na ujednačen i dosledan način, tako što se iste upravljačke akcije realizuju u istim ili sličnim situacijama. U radu je prikazana strukturalna veza između upravljačkih funkcija, odgovarajućih mera i neophodnog nivoa opreme u odnosu na definisane elemente mreže.*

Ključne reči: *ITS, upravljačke mere, elementi autoputa*

TRAFFIC CONTROL MEASURES STRUCTURE ACORDING TO THE HIERARCHY OF HIGHWAY ELEMENTS

Nikola Čelar[1], Stamenka Stanković[2], Jelena Kajalić[3]
[1]Faculty of Transport and Traffic Engineering, University of Belgrade, Vojvode Stepe 305, Belgrade, Republic of Serbia, n.celar@sf.bg.ac.rs
[2]Faculty of Transport and Traffic Engineering, University of Belgrade, Vojvode Stepe 305, Belgrade, Republic of Serbia, s.stankovic@sf.bg.ac.rs
[3]Faculty of Transport and Traffic Engineering, University of Belgrade, Vojvode Stepe 305, Belgrade, Republic of Serbia, j.kajalic@sf.bg.ac.rs

Abstract: *The basic functions of ITS encompass user information, traffic management, route guidance, and access control. The highest-level road network consists of various elements, each requiring the application of appropriate management functions and measures, consequently necessitating different ITS equipment. Traffic management measures and the level of equipment need to be tailored to traffic demands and the specific characteristics of different network elements. Harmonizing the architecture of the management system simplifies the operational implementation of management measures and actions. Additionally, this ensures that system users perceive the impact of measures in a uniform and consistent manner, by implementing the same management actions in identical or similar situations. The paper illustrates the structural relationship between management functions, corresponding measures, and the necessary level of equipment concerning defined network elements.*

Keywords: *ITS, traffic management measures, highway elements*

1. UVOD

Cilj upravljanja saobraćajem na putnoj infrastrukturi najvišeg funkcionalnog ranga je obezbeđivanje zahtevanog kvaliteta opsluživanja korisnika saobraćajnog sistema. Upravljanje saobraćajem putem ITS-a ima za primarni cilj prostorno i vremensko usklađivanje raspoloživog kapaciteta mreže sa merodavnim saobraćajnim zahtevom, uz zadovoljavajući nivo usluge. Najveći efekti primene upravljačkih mera, u smislu smanjenja negativnih posledica saobraćaja i ostvarivanja određenih ekonomskih ušteda i društvenih koristi, ostvaruju se na elementima mreže na kojima se realizuje najveći transportni rad.

Autoputska mreža, koja po svojoj funkciji, karakteru tokova i saobraćajnom opterećenju predstavlja hijerarhijski najviši nivo mreže državnih puteva, zahteva obezbeđivanje najvišeg nivoa efikasnosti i bezbednosti [1]. S tim u vezi, primena ITS-a na autoputevima predstavlja jedinstven pristup upravljanju saobraćajnim tokovima, sa narednim ciljevima [2]:

[1] Nikola Čelar: n.celar@sf.bg.ac.rs

- održanje i unapređenje efikasnosti (nivoa usluge) puta - smanjenje učestalosti pojave, prostorne obuhvatnosti i vremena trajanja zagušenja;
- unapređenje bezbednosti saobraćaja - smanjenje broja i posledica saobraćajnih nezgoda;
- očuvanje ekonomičnosti postojeće putne infrastrukture - bolje iskorišćenje postojećih kapaciteta mreže;
- poboljšanje kvaliteta životne sredine, smanjenje emisije zagađujućih materija i potrošnje energije - harmonizacija uslova realizacije saobraćajnog procesa.

2. FUNKCIJE UPRAVLJANJA SAOBRAĆAJEM NA AUTOPUTU

U baznom konceptu upravljanja saobraćajem na autoputevima izdvajaju se tri osnovne funkcije i to :

- informisanje;
- vođenje, odnosno rutiranje;
- upravljanje saobraćajnim tokovima i kontrola pristupa.

Informisanje korisnika sistema dominantno se odnosi na distribuciju informacija i prognoza o događajima na mreži, informacija o uslovima u saobraćaju i vremenima putovanja kao i informacija o vremenskim uslovima.

Informacije u realnom vremenu i prognoze o događajima obuhvataju informisanje korisnika puta o očekivanim i neočekivanim događajima na mreži. Događaji, na način na koji su definisani, predstavljaju sve situacije koje uzrokuju nagle promene stanja saobraćajnog toka i koje mogu dovesti do negativnih efekata po pitanju efikasnosti i bezbednosti saobraćaja. U tom smislu, izdvajaju se dve kategorije događaja: očekivani i neočekivani. Očekivani događaju obuhvataju planirane aktivnost na mreži, poput radova na putu, zatvaranja saobraćaja usled manifestacija i sl. kao i očekivanu, rekurentnu, pojavu zagušenja na determinisanim elementima mreže. S druge strane, neočekivane događaje karakterišu iznenadne promene parametara saobraćajnog toka koje nastaju kao posledica pojave incidentnih situacija, saobraćajnih nezgoda, naglih promena parametara saobraćajnog toka ili vremenskih uslova (magla, obilne padavine) i sl.

Informacije o uslovima u saobraćaju i vremenu putovanja na deonici obuhvataju pružanje trenutnih i prognoznih informacija o kvalitetu realizacije saobraćajnog procesa na određenom segmentu puta (nivou usluge), kao i o ukupnom vremenu putovanja deklarisanom rutom u preovlađujućim, aktuelnim saobraćajnim uslovima.

Informacije i upozorenja o vremenskim uslovima obuhvataju informacije o stanju površine kolovoza, intenzitetu i karakteru padavina, vidljivosti, i ostalim meteorološkim uslovima koji mogu negativno uticati na saobraćajni proces. Pružanje dinamičkih informacija o trenutnom i očekivanom razvoju vremenskih prilika omogućava korisnicima da na osnovu informacija planiraju putovanje, odnosno da prilagode svoje ponašanje tokom njegove realizacije.

Rutiranje, odnosno vođenje saobraćaja alternativnom rutom ima za cilj sprečavanje ili otklanjanje poremećaja u saobraćajnom toku na predstojećoj deonici osnovne trase, a koji je nastao, ili koji može nastati, kao posledica realizacije očekivanog ili češće neočekivanog događaja. Pomenuta funkcija se implementira kroz dva servisa i to:

- informisanje o događaju sa preporukama alternativne rute (putem saobraćajne signalizacije sa izmenjivim sadržajem tekstualnih poruka ili putem elektronskih medija);
- vođenje korisnika na alternativne rute (pomoću izmenjive putokazne signalizacije).

Upravljanje saobraćajnim tokovima se može definisati kao sinhonizovan, dinamički uticaj na saobraćajni tok, saobraćajni zahtev i kapacitet puta, kroz skup mera i upravljačkih akcija, a sa ciljem obezbeđivanja prihvatljivog ili zahtevanog nivoa usluge. Upravljanje saobraćajnim tokovima na autoputevim podrazumeva primenu narednog spektra upravljačkih mera:

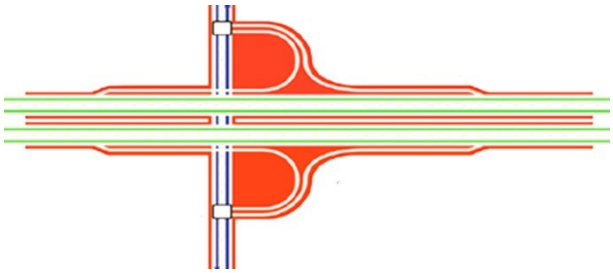
- upravljanje incidentnim situacijama;
- dinamičko upravljanje brzinama (ograničenjem brzine);
- upravljanje i kontrola pristupa na ukrštanjima i sekundarnim čvorovima;
- upravljanje saobraćajnim trakama;
- upravljanje režimom zaustavne trake;
- dinamički režim zabrane preticanja za teretna vozila.

3. KLASIFIKACIJA ELEMENATA AUTOPUTA SA UPRAVLJAČKOG ASPEKTA

Autoput kao entitet se sastoji od različitih mrežnih elemenata, od kojih svaki ima specifične zahteve po pitanju strukture mera za upravljanje saobraćajem. Generalno, sa aspekta koncepta upravljanja, autoput se može posmatrati kao funkcionalna veza četiri mrežna elementa i to [3]:

- Deonice,
- Specifični putni objekti - tuneli,
- Ukrštanja i sekundarni čvorovi,
- Parkirališta i čekaonice za teretni saobraćaj.

Deonica, kao deo trase autoputa između dva ukrštanja, u hijerarhiji upravljanja predstavlja primaran mrežni elemenat čijim zahtevima su podređeni svi ostali elementi. Mrežni element tunel obuhvata zatvorene strukture i galerije dužine preko 300m, kao i pridružene zone, odnosno segmente deonica pre i posle tunela. Ukrštanja i sekundarni čvorovi, kao složeni element, obuhvata zone ulivnih i izlivnih rampi, kao i sekundarne čvorove, odnosno tačke kontakta sa mrežom nižeg ranga (Slika 1.). Parkirališta i čekaonice predstavljaju specifične objekte, servise puta, primarno namenjene stacioniranju teretnih vozila u različite svrhe.



Slika 1. *Mrežni element - ukrštanja i sekundarni čvorovi*
Izvor: ASTRA [4]

Shodno navedenom, upravljačke mere, odnosno oprema koji je neophodno primeniti, mora prilagođena specifičnim zahtevima različitih elemenata mreže i potrebama saobraćaja. Sistemski pristup upravljanju zasniva se na trostepenom konceptu nivoa opreme, NIZAK, SREDNJI i VISOK, za svaki pojedinačni element mreže. Primena višeg nivoa opreme, posledično omogućava i primenu većeg broja ITS servisa, odnosno upravljačkih mera. Nivoi opreme za svaki mrežni element moraju se utvrditi na osnovu posebno definisanih kriterijuma. Na autoputu, hijerarhijski struktuirani mrežni elementi (deonica, tunel, ukrštanja, parkirališta za teretni saobraćaj) mogu se nadovezivati ili čak i preklapati. Kako bi se obezbedila homogenost sistema, nivoi opremljenosti susednih elemenata mreže moraju biti međusobno usklađeni.

4. NIVOI OPREME ELEMENTA MREŽE

4.1. Nivoi opreme na deonici

Osnovna trasa autoputa, odnosno mrežni element deonica, u hijerarhijskoj strukturi upravljanja predstavlja primaran elemenat na kome se realizuju osnovni ciljevi upravljanja pomoću ITS-a. U tom smislu, spektar potencijalnih upravljačkih mera za ovaj elemenat mreže je najkompleksniji. U narednoj tabeli prikazani su nivoi opreme koji su neophodni za realizaciju odgovarajućeg seta upravljačkih mera/servisa na deonici.

Tabela 1. *Mere upravljanja saobraćajem za odgovarajući nivo opreme na deonici*

ITS servisi/upravljačke mere	Nivo opreme		
	NIZAK	SREDNjI	VISOK
• Informisanje i rutiranje putem elektronskih medija/znakova sa izmenjivim sadržajem tekstualnih poruka • Rutiranje pomoću izmenjive putokazne signalizacije	X	X	X
• Upravljanje incidentnim situacijama • Dinamičko upravljanje brzinama • Ramp metering • Dinamički režim zabrane preticanja za teretna vozila		X	X
• Upravljanje režimom zaustavne trake • Upravljanje saobraćajnim trakama			X

Izvor: ASTRA, 2016. [3]

Nizak nivo opreme podrazumeva pokrivenost celokupne mreže državnih puteva informacijama koje se distribuiraju putem elektronskih medija. Iako pripadaju najnižem nivou opreme, za donošenje odluke o implementaciji servisa informisanja i rutiranja putem znakova sa izmenjivim sadržajem tekstualnih poruka (tekstualni VMS) i izmenjivom putokaznom signalizacijom, primenjuju se odgovarajuće grupe kriterijuma, pri čemu u okviru svake grupe mora biti ispunjen najmanje 1 kriterijum. Za primenu tekstualnog VMS-a i/ili izmenjive putokazne signalizacije obično se primenjuju naredne grupe kriterijuma:

- Generalni preduslovi za implementaciju: npr. postojanje alternatvnog putnog pravca (max +1h vremena putovanja), potreba za informisanjem tranzitnog saobraćaja, blizina graničnog prelaza, itd.
- Saobraćajni pokazatelji: PDS i PDS TV (npr. >10.000 voz/dan i >1.000 voz/dan);
- Karakteristike lokacije/deonice: blizina važnih ukrštanja, udaljenost od carine, odmorišta, graničnog prelaza ili susednog VMS-a (npr. <20km);
- Procenjena učestalost aktivacije servisa: npr. >25 na godišnjem nivou.

Srednji nivo opreme se koristi na deonicama sa uslovno velikim saobraćajnim opterećenjem i velikom frekvencijom pojave incidentnih situacija (npr. zagušenja, saobraćajne nezgode, vozila u kvaru, nepovoljni vremenski uslovi). Srednji nivo opreme na deonici omogućava primenu mera za dinamičko upravljanje brzinama i upozoravanje na opasnost. Takođe, ovaj nivo opreme uključuje i meru dinamičke zabrane preticanja za teretna vozila i primenu ramp-meteringa na ulivnim rampama kako bi se optimizovao saobraćajni tok na deonici autoputa.

Za primenu servisa dinamičkog upravljanja brzinama i upozoravanja na opasnost koriste se dominantno saobraćajni kriterijumi: npr. stepen zasićenja, i merodavni časovni protok ($Qm_{50.h}$ i $Qm_{200.h}$), kao i prognozni protok (Qm za 15 god.) [5]. ITS servis koji se odnosi na upravljanje pristupom sa ulivnih rampi (ramp-metering) se primenjuje na deonicama na kojima se upravljanjem brzinama ne može postići zahtevani, odgovarajući nivo usluge (NU D). Za primenu upravljačke mere dinamička zabrana preticanja za teretna vozila kao kriterijum se koristi prosečan dnevni saobraćaj po smeru (PDS), udeo teretnih vozila u toku, dužina i stepen uzdužnog nagiba deonice puta.

Visok nivo opreme dodatno uključuje primenu mera za upravljanje režimom zaustavne trake i za upravljanje po trakama. Za upravljanje režimom zaustavne trake se primenjuju isti saobraćajni kriterijumi kao i za primenu servisa dinamičkog upravljanja brzinama (stepen zasićenja i merodavni časovni protok), ali sa strožijim graničnim vrednostima. Dodatno, navedeni servis se može primeniti i na deonicama sa čestom pojavom nezgoda usled zagušenja i promene traka, na deonicama sa nižom efikasnosti kao posledica procesa preplitanja, na deonicama sa čestom pojavom zagušenja na izlivu koja se prelivaju na deonicu, na uzdužnim nagibima u uslovima velikog udela teretnih vozila u toku, itd. Upravljanje po trakama treba primeniti na deonicama koje pored kriterijuma saobraćajnog opterećenja ispunjavaju i naredne uslove:

- Deonice sa velikom gustinom raskrsnica;
- Deonice sa više tunela sa primenjenim upravljanjem po trakama;
- Deonice sa većom frekvencijom nezgoda ili čestom realizacijom radova na putu.

4.2. Nivoi opreme u tunelu

U tunelima, kao specifičnim putnim objektima, nivo opreme treba da pored upravljačkih zahteva odgovori na bezbednosne rizike i specifične operativne zahteve.

Nizak nivo opreme podrazumeva mogućnosti zatvaranja tunela iz bezbednosnih razloga. Navedeni nivo opreme uglavnom podrazumeva primenu svetlosnih signala u zonama prilaza tunelskim portalima.

Srednji nivo treba da omogući upravljanje saobraćajnim trakama u tunelu u slučaju saobraćajne nezgode, zagušenja ili radova. U situaciji potpunog zatvaranja jedne tunelske cevi i preusmeravanja saobraćaja u suprotan smer (režim dvosmernog saobraćaja u jednoj cevi), vreme potrebno za realizaciju mere ne sme biti duže od 2 sata.

Visok nivo opreme obuhvata tunele u kojima, pored potreba srednjeg nivoa opreme, mora biti obezbeđeno i brzo preusmeravanje saobraćaja u tunelsku cev namenjenu suprotnom smeru, uz definisano vreme za sprovođenje koje ne bi trebalo da traje duže od 30 minuta. Navedeni nivo opreme zahteva dodatne fizičke komponente sistema, kao što su mobilne barijere, treptači ili svetlosne zapreke/markeri.

Tabela 2. *Mere upravljanja saobraćajem za odgovarajući nivo opreme u tunelu*

ITS servisi/upravljačke mere	Nivo opreme		
	NIZAK	SREDNjI	VISOK
• Upozorenje i zatvaranje tunelske cevi	X	X	X
• Upravljanje trakama • Preusmeravanje u suprotnu tunelsku cev		X	X
• Brzo preusmeravanje u suprotnu tunelsku cev			X

Izvor: ASTRA, 2016. [3]

Iako je dominantan kriterijum za definisanje nivoa opreme dužina tunela, mogu se uključiti i dodatni kriterijumi za primenu za jedan stepen višeg ili nižeg nivoa opreme u odnosu na standardni slučaj (Tabela 3).

Tabela 3. *Kriterijumi za definisanje nivoa opreme u tunelima*

L	Bez opreme	NIZAK	SREDNjI	VISOK
<300m	Standardni slučaj	$Q>Q_{NU_D}$ nema zaustavne trake, postoji preglednosti	-	-
300-600m	$Q<Q_{NU_D}$ postoji zaustavna traka, postoji preglednost	Standardni slučaj	$Q>Q_{NU_D}$ nema zaustavne trake	-
>600m	-	$Q<Q_{NU_D}$ ima zaustavna traka, postoji preglednost	Standardni slučaj	$Q>Q_{NU_D}$ nema alternativne rute

4.3. Nivoi opreme na ukrštanjima i sekundarnim čvorovima

Umesto egzaktnog definisanja nivoa opremljenosti, na ukrštanjima i sekundarnim čvorovima su odgovarajuće upravljačke mere definisane na osnovu hijerahije funkcionalnih subelemenata ukrštanja.

Prvi hijerarhijski nivo, GLAVNA TRASA (1. prioritet) obuhvata mere u oblasti održanja i optimizacije saobraćajnog toka na glavnoj trasi u zoni ukrštanja (NU D). Fokus u okviru ovog nivoa posmatranja zasniva se na primeni ramp meteringa u zoni priključka, koji se primenjuje po istim kriterijumima kao i za deonice.

Drugi hijerarhijski nivo, IZLIVNA RAMPA (2. prioritet) uključuje mere za izbegavanje nastanka zagušenja na izlivnoj rampi i formiranje reda do glavne trase. U okviru navedenog, s jedne strane, mora se razmotriti primena mera na sekundarnom čvoru (prilagođavanje tipa sekundarne raskrsnice i načina regulisanja saobraćaja na istoj). S druge strane, moguće su mere poput obezbeđivanja dodatnog prostora za formiranje reda na izlivnoj rampi ili produženje izlivne trake. Kao osnovni kriterijumi za primenu mera na izlivnoj rampi primenjuju se merodavni protok i prosečna dužina reda na rampi.

Treći hijerarhijski nivo, ULIVNA RAMPA (3. prioritet) obuhvata mere koje se primenjuju u uslovima velikog intenziteta tokova na ulivnoj rampi. U navedenoj situaciji, moguća je primena mere upravljanja po trakama (zatvaranje vozne trake kao pomoć pri ulivanju), produženje ulivne trake ili u krajnjoj meri izgradnja dodatne trake za ubrzanje. Osnovni kriterijum za primenu mera na ulivnoj rampi je da se njihovom primenom nivo usluge na glavnoj trasi ne degradira ispod NU D, a da je na ulivnoj rampi merodavni protok veći od odgovarajućeg za NU D.

Četvrti hijerarhijski nivo, SEKUNDARNI ČVOROVI (4. prioritet) uključuje mere na sekundarnim čvorovima koje se odnose na efikasnost saobraćaja na sekundarnoj saobraćajnici. Moguće mere su prilagođavanje tipa sekundarne raskrsnice i načina regulisanja saobraćaja, ili optimizacija svetlosnih signala. Upravljačke mere na sekundarnim čvorovima su opravdane ukoliko je nivo usluge na sekundarnoj saobraćajnici niži od NU D i/ili ukoliko je prosečna dužina reda veća od kritične (npr. dužina reda do susednog čvora).

Tabela 4. *Hijerarhijski nivoi primene ITS servisa na ukrštanjima i sekundarnim čvorovima*

ITS servisi/upravljačke mere	Hijerarhijski nivoi			
	Sekundar ničvor	Ulivna rampa	Izlivna rampa	Glavna trasa
• Ramp-metering				X
• Prilagođavanje tipa čvora / načina regulisanja saobraćaja • Povećanje skladišnog kapaciteta rampe/produženje izlivne trake			X	
• Upravljanje po trakama • Produženje ulivne trake		X		
• Prilagođavanje tipa čvora / načina regulisanja saobraćaja	X			

Izvor: ASTRA, 2018. [4]

4.3. Nivoi opreme na parkiralištima i odmorištima za teretna vozila

Navedeni mrežni element, odnosno servis puta, sa upravljačkog aspekta može se klasifikovati u dve kategorije:

- Parkirališta i odmorišta za teretna vozila – privremeno stacioniranje vozila zbog redovnih okolnosti (npr. dnevni odmor vozača),
- Čekaonice za teretna vozila – namenski objekti za potrebe realizacije upravljačjih mera u slučaju incidenta (npr. saobraćajna nezgoda), u slučaju različitih ometanja kao tačka kontrole pristupa ispred uskih grla (npr. blizina graničnog prelaza/carine).

Nizak nivo opreme se primenjuje na svim objektima za stacioniranje teretnih vozila, čime se obezbeđuje dostupnost informacija (sa ili bez preporuka i naređenja) koje se krajnjim korisnicima prenose putem elektronskih medija. Ovaj nivo podrazumeva primenu opreme za procenu stepena okupiranosti objekta.

Srednji nivo opreme dodatno omogućava i optimizaciju korišćenja prostora u okviru dostupnih objekata, kako bi se obezbedila optimalna prostorna distribucija vozila po objektima i izbegla prezuzetost pojedinih. Stepen popunjenosti objekata duž rute se detektuje automatski, i prenosi vozačima na odgovarajućim prilaznim rutama pomoću izmenjive signalizacije.

Visok nivo opreme obuhvata opsežnije mere za optimizaciju prostorna distribucija vozila po objektima i automatsku predselekciju i trijažu u objektima. Ovaj nivo opreme se koristi kada postoje zahtevi za upravljanje stacionarnim saobraćajem (efikasno korišćenje raspoloživih parking mesta) ili za automatizovanu predtrijažu različitih kategorija teretnih vozila.

Tabela 5. *Mere upravljanja saobraćajem za odgovarajući nivo opreme na parkiralištima*

ITS servisi/upravljačke mere	Nivo opreme		
	NIZAK	SREDNJI	VISOK
• Informisanje i preporuke putem elektronskih medija	X	X	X
• Automatsko prikupljanje podataka o nivou okupiranosti		X	X
• Upravljanje stacionarnim saobraćajem (npr. trijaža u skladu sa vremenom polaska)			X

Izvor: ASTRA, 2016. [3]

Tabela 6. *Mere upravljanja saobraćajem za odgovarajući nivo opreme na čekaonicama*

ITS servisi/upravljačke mere	Nivo opreme		
	NIZAK	SREDNJI	VISOK
• Informisanje i preporuke putem elektronskih medija	X	X	X
• Upravljanje dinamičkim saobraćajem • Doziranje izlaza		X	X
• Automatska predselekcija i trijaža			X

Izvor: ASTRA, 2016. [3]

5. ZAKLJUČAK

Inteligentni transportni sistemi predstavljaju standardan pristup upravljanju saobraćajem na autoputevima u cilju postizanja efikasnog, bezbednog i ekološki prihvatljivog drumskog transporta. Može se zaključiti da je struktura sistema, setovi upravljačkih mera odnosno ITS servisa koji se mogu primenjivati na odgovarajućim elementima autoputa, kao i odgovarajući nivoi opreme, generalno definisani.

S jedne strane, na upravljaču puta je da donese odluku koje upravljačke mere je neophodno primeniti na pojedinim elementima mreže. Odluka mora biti bazirana na jasno definisanim kriterijumima za primenu svakog pojedinačnog servisa. Preporuke kriterijuma i njihovih graničnih vrednosti iz različite relevantne literature, predstavljaju kvalitetnu polaznu osnovu za definisanje istih na nacionalnom nivou, imajući u vidu karakteristike saobraćajnih tokova na lokalnoj autoputskoj mreži. S druge strane, nivo opreme koji se primenjuje na različitim elementima mreže, treba da proističe na osnovu izabranih upravljačkih mera/servisa.

Na ovaj način, kreiranjem jasne metodologije za definisanje nivoa opreme za svaki element autoputa, na bazi uspostavljenih kriterijuma za odabir upravljačkih mera, postiže se harmonizacija arhitekture upravljačkog sistema, čime se, s jedne strane, pojednostavljuje operativna implementacija upravljačkih mera i akcija, i s druge strane, obezbeđuje da korisnici sistema percipiraju primenu mera na ujednačen i dosledan način.

Literatura

[1] Čelar, N.; Stanković, S.; Kajalić, J. (2018). Inteligentni transportni sistemi na autoputevima. Zbornik radova Treći srpski kongres o putevima, str. 307-316, Beograd.
[2] Federal Highway Research Institute (BASt). 2021. Reference Handbook for Harmonised Core ITS Service Deployment in Europe.
[3] Bundesamt für Strassen ASTRA. 2016. Verkehrsmanagement auf Nationalstrassen (Kopfrichtlinie VM-NS).
[4] Bundesamt für Strassen ASTRA. 2018. Sekundärknoten Verkehrstechnische Anforderungen.
[5] Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt). 2018. Merkblatt für Verkehrsrechnerzentralen und Bundesanstalt für Straßenwesen Merkblatt für die Ausstattung von Verkehrsrechnerzentralen und Unterzentralen (MARZ).

METODOLOGIJA ZA EVALUACIJU UTICAJA AUTONOMNIH VOZILA NA SAOBRAĆAJNI SISTEM

Milan Knežević[1], Slavica Gavrić[1], dr Aleksandar Stevanović[1]

Univerzitet u Pitsburgu[1], mik296@pitt.edu, slg130pitt.edu, stevanovic@pitt.edu

Razvoj autonomnih vozila (AV) obećava poboljšanje efikasnosti saobraćaja, bezbednosti i uopšte kvaliteta života. Međutim, očekuje se da će prelazak sa konvencionalnih vozila i automatizovana vozila biti dugotrajan proces. Od suštinskog značaja je proceniti efekte AV na saobraćajni sistem tokom ovog tranzicionog perioda. Ova evaluacija je neophodna kako bi se sprovele preventivne mere u razvoju AV, koje mogu pomoći da se ublaže potencijalni budući problemi. U okviru ove studije, predložili smo metodologiju za evaluaciju uticaja AV na saobraćajni sistem i životnu sredinu. Koristili smo set metoda i performansi prilagođenih toj svrsi. Procena uticaja AV na saobraćajni sistem ne samo da koristi istraživačima, proizvođačima AV-a i agencijama za transport, već takođe pomaže i različitim nivoima vlasti u donošenju odluka.

Ključne reči: *evaluacija uticaja autonomnih vozila, metodologija, simulacija*

METHODOLOGY FOR EVALUATION OF THE IMPACT OF HIGLY AUTOMATED VEHICLES ON TRANSPORATION SYSTEM

Milan Knežević[1], Slavica Gavrić[1], dr Aleksandar Stevanović[1]

University of Pittsburhg[1], mik296@pitt.edu, slg130pitt.edu, stevanovic@pitt.edu

Highly Autonomous Vehicles (HAV) development holds the promise of enhancing traffic efficiency, safety, and overall quality of life. Nevertheless, the transition from conventional traffic flow to and automated traffic flow is expected to be a long process. It is crucial to assess the effects of HAV on transportation systems during this transitional period. This evaluation is necessary to implement proactive measures in the development of HAV, helping to mitigate potential future issues. In this study, we have developed a methodology for evaluating the impact of HAV on the transportation system and the environment. We have employed a set of methods and performance measures tailored for this purpose. Assessing the impact of HAV on the transportation system not only benefits researchers, HAV manufacturers, and transportation agencies but also aids government entities in making well-informed decisions.

Keywords: highly automated vehicles, methodology, simulation

UVOD

Ubrzani razvoj informacionih tehnologija, telekomunikacija i veštačke inteligencije doveo je do razvoja Autonomnih vozila (AV) i proširio njihovu primenu u saobraćajnom sistemu. Očekuje se značajan porast procenta AV kako na autoputevima i vangradskim deonicama, tako i u urbanim gradskim sredinama. Iako je teško predvideti kada će AV ući u masivnu upotrebu, mnoge automoto i IT kompanije ubrzano rade na razvoju ovih vozila. Na primer, AV-o razvijeno od strane kompanije Google je bezbedno prešlo oko 105 000 kilometara, dok je Motinal AV-o integrisano sa algoritmima mašinskog učenja i klaud računarima kako bi prikupljalo i analiziralo podatke. Institut za transportnu politiku Viktorija je prognozirao masovno usvajanje AV u periodu između 2040-te i 2050-te godine [1].

Brojna istraživanja pokazuju da razvoj AV i njihova implementacija na mreži puteva i ulica dovodi do velikih promena u efikasnosti, bezbednosti saobraćaja i životnoj sredini [2] [3]. Iako se brojne studije bave uticajem AV, i dalje ne postoji jedinstvena metodologija koja bi omogućila sveobuhvatnu evaluaciju AV-a u saobraćajnoj mreži. Cilj ovog rada jeste da razmotri i predloži jedan oblik metodologije za evaluaciju uticaja AV-a, koji se pretežno zasniva na modeliranju i simulaciji.

PREGLED LITERATURE

Autonomna vozila predstavljaju proizvod auto industrije zasnovan na napretku i razvoju autonomne tehnologije [4]. Prema drugim studijama [5] autonomna vožnja ima potencijal da unparedi pristupačnost, komfor prilikom vožnje, manju potrošnju goriva kao i poslovanje preduzeća koji vrše uslugu deljenja vožnje. Pored toga, AV-a donekle doprinose smanjenju zagušenja u saobraćaju (iako se još uvek vodi debata o tome), manjoj emisiji izduvnih gasova i buke, ali i većoj mobilnosti osoba sa invaliditetom [5]. Takođe, postoje velika očekivanja od AV-a u vezi sa unapređenjem efikasnosti saobraćaja [6]. Međutim, činjenica je da AV-a svojim karakteristikama i mogućnostima narušavaju tradicionalne okvire saobraćajnog sistema [7].

Posledično, već spomenutom razvoju tehnologije AV, pojavile su se brojne studije koje istražuju potencijalni uticaj AV na performanse efikasnosti saobraćajnog sistema, bezbednost saobraćaja, interakcije između AV-a i klasičnih vozila (KV), ponašanje vozača, itd. [8]. Karakteristike saobraćajnog toka, koje obuhvataju kategorije vozila sa različitim tipovima ponašanja vozača kao i njhov procenat u saobraćajnom toku, predstavljaju važan faktor koji utiče na kapacitet saobraćajnice [9]. Ponašanje vozača obuhavata širok i komplikovan spektar promenljivih. Brojne studije su pokazale postojanje korelacije između ponašanja vozača i bezbednosti saobraćaja koje su takođe klasifikovale vozače prema njihovoj tendenciji ka rizičnom upravljanju vozilom [10] [11] [12]. Sa druge strane, ponašanje vozača utiče takođe na životnu sredinu. Agresivan stil vožnje ima uticaj na potrošnju goriva i emisiju izduvnih gasova [13]. Rios Tores u [14] je pokazao da postoje značajne razlike u potrošnji goriva kada je reč o agresivnoj i stabilnoj/normalnoj vožnji. Za razliku od čoveka, AV-a imaju sposobnost da analiziraju podatke iz više izvora (V2X komunikacija sa senzorima na vozilu) kao i da izvrše mnogo precizniju kontrolu i pozicioniranje vozila i time poboljšaju uslove u saobraćajnom toku, kapacitet i bezbednost saobraćaja [15].

Procenat AV-a

Brojne studije su pokazale da procenat AV u saobraćajnom toku ima veliki uticaj kako na bezbednost saobraćaja [16], tako i na efikasnost saobraćajnog sistema. Veći pozitivan uticaj je očekivan sa većim procentom AV, međutim dostizanje toga je postepeni proces i zahteva vreme [17]. Procenjeno je da saobraćajni tok koji je u potpunosti formiran od AV može povećati kapacitet saobraćajnice do 40% u gradovima, a 80% na autoputevima [18]. Takođe, AV imaju bezbedniji kraći interval sleđenja od klasičnih vozila [19], efikasnije ubrzanje i usporenje [20], kao i manje ljudske greške [21], što dovodi do bolje harmonizacije saobraćajnog toka i unapređenja prosečne brzine saobraćajnog toka na putevima [22]. Prema nekim studijama [17] veća unapređenja bezbednosti saobraćaja se mogu dostići sa 50%, dok je uticaj sa 30% AV zanemarljiv. Uzimajući u obzir indikatore bezbednosti saobraćaja poput vremena do sudara, bezbednost se povećava za 40,7% ako se procenat AV-a poveća na 50% [23]. Autori nekih studija [24] su razvili napredne algoritme mašinskog učenja i analizirali bezbednost saobraćaja za konektovana autonomna vozila (KAV). Ovaj algoritam je bio testiran na dve raskrsnice. Rezultati su pokazali 90% manje konflikata sa 50% AV-a u celoj populaciji vozila, i 50% manje konflikata sa 30% AV-a. Procenat AV-a manji od 20% nije pokazao značajne uticaje na bezbednost saobraćaja. Rezultati nekih studija [25] su pokazali da brojni tipovi saobraćajnih nezgoda mogu biti smanjeni na autoputevima ako procenat AV-a u ukupnoj populaciji vozila dostigne 50% AV. Neki drugi autori [26] su koristili AIMSUN simulaciju kako bi evaluirali uticaj V2V i V2I komunikacija na kapacitet autoputeva. Rezultati su pokazali da sa malim procentom AV, nema značajne promene kapaciteta, dok sa 100% AV-a kapacitet dostiže 4000 voz/h. KAV-a koja putuju u specijalno rezervisanoj traci mogu značajno da utiču na kapacitet autoputeva [27]. Pokazano je da posebne trake za KAV-a povećavaju zagušenja kada je u saobraćajnom toku niži procenat AV-a i da taj procenat AV-a treba da bude: barem 50% za dve trake, i barem 30% za četiri trake na autoputevima, kako bi se efikasnost saobraćaja povećala [27]. Na osnovu literarnog pregleda se može zaključiti da procenat AV-a u saobraćajnom toku značajno utiče na performanse efikasnosti i bezbednosti saobraćaja sa tim da se veći efekti mogu primetiti tek kada procenat AV-a pređe 50% u saobraćajnom toku, dok procenat AV-a ispod 30% nema značajan uticaj na parametre performansi.

Emisije Gasova kod AV

Emisija izduvnih gasova vozila u saobraćaju i dalje predstavlja jedan od glavnih ekoloških problema za urbane sredine i odgovarajuće donosioce odluka [17]. Upravljanje raskrsnicama je važna karakteristika u smanjenju emisija izduvnih gasova i potrošnje goriva [28]. KAV-a mogu komunicirati sa RSU (Roadside Units) i na taj način dobijati informacije o saobraćaju na raskrsnici, a potom optimizirati njihovu brzinu kako bi izbegli nepotrebna zaustavljanja [17]. Korišćenjem inteligentnih raskrsnica uz pomoć V2V tehnologija, može se postići smanjenje vreme putovanja za 86%, potrošnju goriva za 40% i smanjenje emisije CO_2 za 55% [29]. Studija [30] je istraživala komunikacione algoritme GLOSA (Green Light Optimal Speed Advisory) i ARC (Adaptive route change) i merila tri parametra uključujući prosečno vreme zaustavljanja, prosečnu potrošnju goriva i prosečno vreme putovanja. Rezultati su pokazali da je smanjenje potrošnje goriva postignuto već sa 50% AV-a u saobraćajnom toku, dok je za smanjenje vremena putovanja taj prag 60% AV. Pored toga, neke studije [31] razvile su ideju CVIC (Cooperative Vehicle Intersection Control) koja ne zahteva primenu svetlosnih signala. CVIC koristi numeričke optimizacione metode [32] kako bi minimizirao potencijalne konflikte na raskrsnici, što može smanjiti emisiju CO_2 i potrošnju goriva do 44%.

Plotun KAV

Postavljanje KAV-a u plotun ima potencijal da poveća kapacitet saobraćajnice, kao i da smanji potrošnju goriva kroz harmonizaciju brzina i smanjivanje otpora vazduha [33] [34] [35]. U literaturi, razmatranje plotuna KAV-a je podeljeno u četiri kategorije, navedene ispod [17].

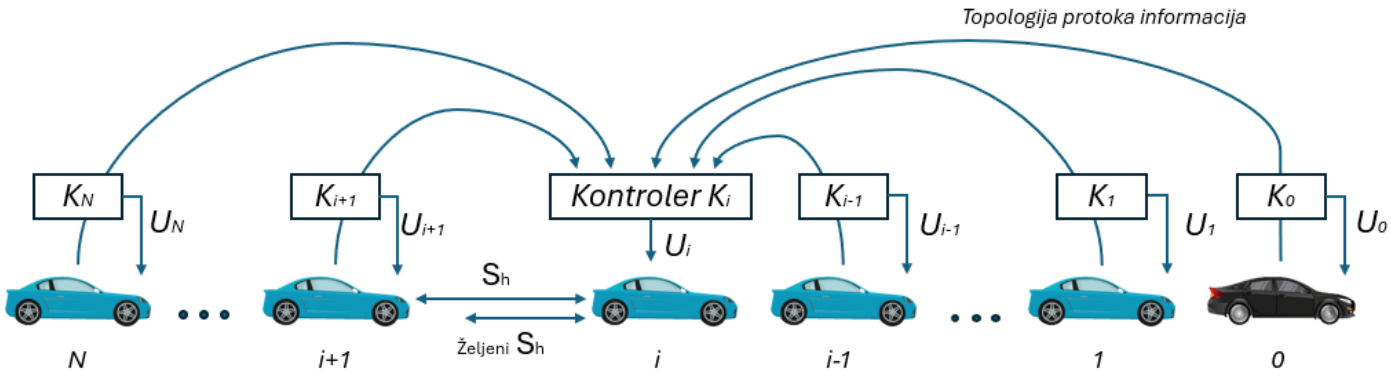
1) DAS (Driver Assistant System) sa sistemima eko-ulivanja i izlivanja

2) Optimizacija trajektorije

3) Algoritmi upravljanja raskrsnicom uključujući kooperativna vozila ili raskrsnice bez svetlosnih signala

4) Integracija svetlosnih signala i optimizacije trajektorije vozila.

Plotun se definiše kao red vozila na putu koji sadrži N+1 vozila, uključujući vođu plotuna (indeks 0) i N pratećih vozila (indeks od 1 do N) [36]. Plotun KAV-a sadrži četiri komponente: dinamika vozila – model sleđenja svakog vozila u plotunu, topologija protoka informacija - način na koji vozila međusobno prenose informacije, rastojanje - definiše željeno rastojanje sleđenja između vozila, kontroler - upravljač vozila koji kontroliše vozilo na osnovu dobijenih informacija [36]. Slika 1 prikazuje primer plotuna konektovanih autonomnih vozila.



Slika 1. Plotun konektovanih autonomnih vozila sa komponentama

MODELIRANJE

Modeliranje AV

Brojne studije koje su analizirale uticaj AV-a koristile su simulacione softvere. Pregledom literature [8] zaključeno je da postoje različiti načini za modeliranje AV-a u simulaciji koji variraju u zavisnosti od saobraćajnog modela, dinamike AV-a, ulaznih podataka kao i kalibraciji. Iako se neki od ovih modela češće koriste, i dalje ne postoje univerzalno prihvaćene metode, što otežava poređenje i izvođenje konačnih zaključaka [8].

Na primer, Gaspar [37] je formirao model AV-a koji na osnovu okruženja, a dobijajući informacije uz pomoć V2V i I2V komunikacijama, adaptira kretanje AV smanjujući potrošnju goriva, a pritom ne remeti uslove u saobraćajnom toku.

PrARX model vožnje [38] obuhvata proces logike donošenja odluka vozača i njihovo kontinuirano ponašanje u jedinstvenom okviru za CACC (Cooperative Adaptive Cruse Control). U ovom okviru, jednačina stanja uključuje reprezentaciju autonomnih i neautonomnih vozila u simulaciji uključujući PrARX model ponašanja. Studije sa ovim tipom modela su pokazale poboljšanja u stabilnosti plotuna vozila.

Xiao [39] je prikazao realističan bez-sudarni višerežimski model za CACC, kombinovanjem realnog CACC sistema sa uticajem vozača na longitudinalna kretanja vozila. Ovaj model se pokazao kao potpuno bezbedan pri velikim opsezima brzine kretanja, sa ubrzanjima od -1 do 1 m/s^2. Slično tome, model CFFM (Collision-Free Car-Following, CFFM) [40] omogućava bezbednost pod svim okolnostima naglog kočenja ali i stabilnost plotuna vozila u saobraćajnom toku. Ovaj model omogućava repliciranje trajektorija vozila i može se primeniti u brojnim scenarijima i kompleksnim saobraćajnim situacijama u urbanim sredinama.

Iako prvenstveno služi za modeliranje KV [41], IDM model (Inteligent Driving Model), se može modifikovati prilikom modeliranja AV. Na taj način može se koristiti prilikom istraživanja za strategiju optimalne promene trake [42], percepciju vozača o uslovima u saobraćajnom toku putem V2V komunikacije [43] ili istraživanja stabilnosti saobraćajnog toka i plotuna vozila [44].

Takođe, dobro poznati Viedemanov model [45] sa jednostavnim modifikacijama se može koristi za modeliranje AV-a. Zeidler [46] je pokazao da se modifikacijom VISSIM Veidemanovog 99 modela mogu simulirati situacije bez obzira da li su AV-a konektovana ili ne. To omogućava modeliranje slučajeva kada postoji veća verovatnoća da vozila izgube konekciju, što može biti čest slučaj u urbanim sredinama. Gubitak konekcije može doći usled brojnih faktora, na primer gubitak konekcije sa vođom plotuna usled svetlosnog signala ili mešanje KV-a između dva AV-a u saobraćajnoj traci usled skretanja. Laka implementacija Videdemanovog modela u simulacionom softveru i raznovrsnost primene obezbeđuje idealan bazni model za modeliranje AV-a. Sa druge strane, neke druge studije [47] su unapredile postojeći Viedemanov 99 model uvodeći različit način vožnje AV, razlikujući sigurniju, normalnu, i agresivnu vožnju. Takođe, pored klasičnog modela praćenja ova studija je uzela u obzir i model promene trake.

U jednoj studiji [48] autori su formirali su potpunu arhitekturu za kooperativu simulaciju vožnje unutar SiVIC-RTMaps platforme. Ova simulacija koristi prednosti SiVIC-RTMaps platforme kako bi formirala veoma realističnu simulaciju, omogućavajući detaljno razumevanje ponašanja svakog vozila. Takođe, pojedinačni statistički rezultati svakog vozila mogu biti generisani. Rezultati simulacije su potvrdili da postoji napredak u komunikaciji između vozila u plotunu kao i manji broj saobraćajnih nezgoda, međutim rezultati nisu pokazali poboljšanje u težini saobraćajnih nezgoda što zahteva dodatna istraživanja [48]. Neki drugi istraživači [49] su dizajnirali simulator vožnje baziran na virtuelnoj realnosti (VR) koji evaluira iskustvo korisnika AV-a kroz podatke o njegovom psihofizičkom stanju. Ovaj simulator je baziran na GENIVI otvorenoj platformi jer je originalno dizajniran za praćenje interakcija između čoveka i mašine. Simulator omogućava dodavanje novih karakteristika vozilima, uključuje zvuk vozila, ima više vizuelnih scenarija za

vožnju i eksperimente kao i model krutog tela vozila za tesitranje deformacija prilikom saobraćajne nezgode [49]. Simulacija vozila u VR se takođe može koristiti za testiranje brojnih scenarija poput saobraćajnih nezgoda, gubitka oznaka na kolovozu, i otkazivanje senzora na vozilu [50]. Iako istraživanja AV uz pomoć VR može imati brojne primene, ovakve studije su retke zbog brojnih otežavajućih okolnosti koje ovakvi eksperimenti mogu imati [51]. Zbog toga, eksperimenti sa ovakvim tipom simulatora moraju biti detaljno dizajnirani i kvalitetno kalibrisani kako bi rezultati bili verodostojni.

Modeliranje klasičnih vozila

Modeliranje klasičnih vozila mora da prati logiku kretanja čoveka prilikom upravljanja vozilom, kako po uzdužnom tako i po bočnom pravcu kretanja [52]. Po uzdužnom pravcu, KV prati prethodna vozila sa odgovarajućim prihvatljivim intervalom sleđenja, prilagođavanjem brzine i željenim ubrzanjem, odnosno usporenjem [53]. Po bočnom pravcu, vozači KV moraju odlučiti kada i kako treba da izvrše promenu trake, ulivanje/izlivanje i obilaženje [53]. Za bilo koji KV model praćenja, mikrosimulacija koristi različite statističke distribucije i funkcije za definisanje maksimalnih, minimalnih, i željenih vrednosti ubrzanja i usporenja, kao i maksimalnih i željenih brzina i drugih karakteristika vozila [47].

Autori prethodnih studija [52] su klasifikovali modele praćenja KV u zavisnosti od korišćene logike. U klasifikaciji su razlikovali Gazis-Herman-Roteri (GHR) model [54] gde je ubrzanje vozila koja slede proporcionalno brzini ispitanog vozila (sopstvenog vozila), razlici u brzinama između sledbenika i vođe i razmaku između njih; Model bezbednosne distance (Safety-distance model) [55] gde sledbenik uvek prati bezbedonosnu distancu u odnosu na vođu; Psihološki model praćenja poznatiji i kao Veidemanov model u kojem vozači reaguju na vozila kada se dostigne postavljeni prag za relativnu brzinu (razlika u brzini između pratioca i vodećeg vozila) ili rastojanje sleđenja.

Makroskopsko modeliranje AV

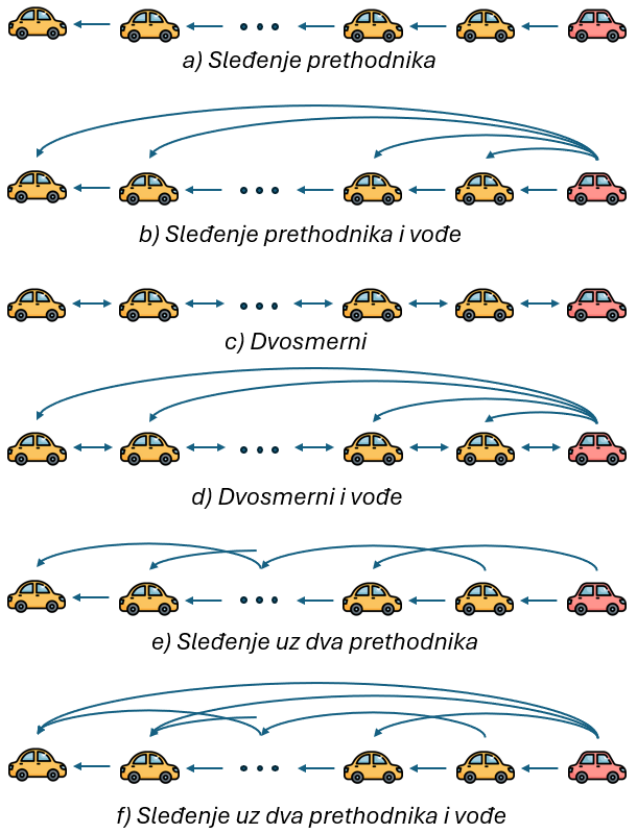
Iako je prva pomisao na AV bolja efikasnost i bezbednost saobraćaja, AV mogu da doprinesu i većoj makromobilnosti i pristupačnosti kao novi vid prevoza. Novi vid prevoza koji AV mogu stvoriti jeste deljena vožnja na zahtev, što može povećati pristupačnost saobraćajne usluge stanovništva u gradovima. Iz više perspektive, trend korišćenja usluga deljenja mobilnosti širom sveta povezan je sa višestrukim koristima kao što su smanjenje stope vlasništva nad vozilima, smanjenje pređene kilometraže vozila, smanjenje emisije gasova i efekta staklene bašte kao i povećanje proseče stope popunjenosti vozila [56] [57] [58]. Merenje uticaja AV na pristupačnost saobraćajnih usluga zahteva uspostavljanje makromodela grada, što se postiže uz pomoć odgovarajućih makroskopskih simulacionih softvera.

Autori drugih studija [59] su, na primer, razvili model transporta koji odgovara potražnji za saobraćajnim uslugama (Demand Responsive Transport, DRT) za potrebe simulacije Deljenih Autonomnih Vozila (DAV) u VISUM softveru. Model se zasniva na podeljenoj vožnji na zahtev u kojem DAV, sa električnim motorom, koje se nalazi najbliže mestu ulaska/izlaska odlazi da pokupi putnike koji su zahtevali vožnju. Nakon toga, odlazi do krajnjeg odredišta najkraćim putem, a potom odlazi do sledećeg putnika ili do stanice za punjenje baterija, ukoliko ima potrebe za tim.

Komunikacija

Razvoj i distribucija konektovanih autonomnih vozila (KAV) u mreži ne mogu biti postignuti bez korišćenja komunikacionih tehnologija [17]. Radio detekcija (RADAR) bila je jedna od prvih metoda komunikacije između plotuna vozila, ali količina informacija koja se mogla preneti bila je ograničena i svako vozilo je moglo komunicirati samo sa vozilom ispred i iza [60] [61]. RADAR komunikacija koristi Predecessor following, Predecessor-following leader i Bidirekcionu informacionu toplogiju komunikacije (ITK) [62] [63] [64]. Razvoj V2V i V2X komunikacionih tehnologija kao što je komunikacija kratkog dometa (Dedicated Short Range Communication, DSRC), ad hok mreže za vozila (VANET), mobilne ad hok mreže (MANET) kao i 5G mreža [65] omogućava mnogo kompleksnije ITK. Sa time se razlikuje šest tipova ITK između KAV

(Slika 2): *Sleđenje prethodnika, Sleđenje prethodnika i vođe, Dvosmerni, Dvosmerni vođa*, *Sleđenje uz dva prethodnika, Sleđenje uz dva prethodnika i vođu* [17].



Slika 2. Topologija Informacionog toka komunikacija za V2V komunikacije

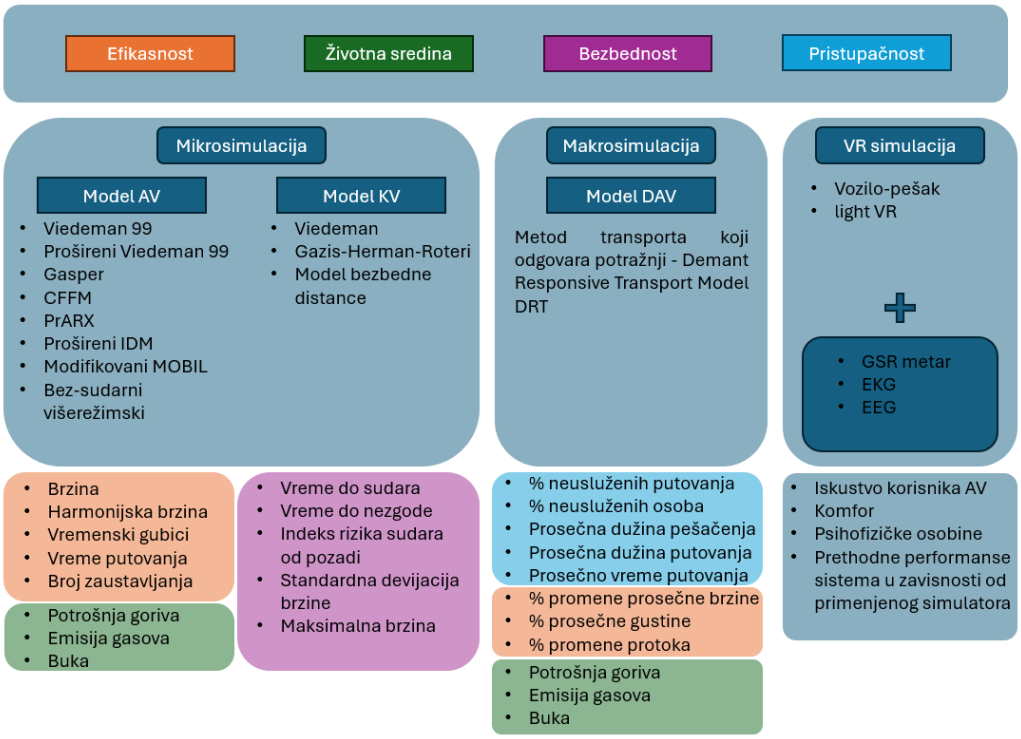
METODOLOGIJA

Uticaj autonomnih vozila na celokupan saobraćajni sistem je veoma složen proces jer AV utiču na mnogo različitih načina. Predložena metodologija meri uticaj AV na oblasti efikasnosti, bezbednosti, životne sredine i pristupačnosti primenom simulacionih metoda. Metodologija opisuje tri vrste simulacija u zavisnosti od oblasti ispitivanja: 1) *Mikrosimulaciju*, 2) *Makrosimulaciju,* i 3) *VR simulaciju* kombinovanu sa nekoliko fizičkih komponenti.

Autori predlažu upotrebu simulacionih softvera VISSIM i VISUM (ili sličnih SUMO, MatSim) jer omogućavu lako merenje parametara performansi kao i integraciju sa kontrolerima signala, komunikacionim elementima za KAV, i slično. Makrosimulacija posebno zahteva modeliranje deljenih autonomnih vozila kako bi se izvršila evaluacija uticaja AV. VR simulacija koristi određene računarske komponente koje su neophodne za simulaciju virtulene stvarnosti. Pored toga, moguće je povezati i uređaje za merenje psihofizičkih karakteristika, poput EKG-a i EEG-a, za detaljnija istraživanja ponašanja vozača. Slika 3 prikazuje osnovnu šemu metodologije u kojoj su prikazani svi tipovi simulacija, modeli vozila, kao i parametri performansi saobraćajnog sistema koji mogu biti izmereni u okviru svake metode.

Prvi korak u primeni metodologije jeste izbor realne lokacije terena na kojoj će se vršiti merenje uticaja AV. Terenskim istraživanjem dobijaju se ključni ulazni podaci poput, celokupne geometrije mreže na lokaciji, specifični scenariji koji odgovaraju lokaciji kao i tipu autonomnih vozila, njihovom procentu ili vrsti

komunikacije za KAV na speficičnoj lokaciji. Nakon toga, u zavisnosti od oblasti merenja, specifičnih terenskih podataka i željenih parametara performansi, korisnik odlučuje o vrsti simulacija koje će se koristiti za evaluaciju sistema. Slika 4 prikazuje osnovne korake predložene metodologije.



Slika 3. Šema metodologije

Svaka od simulacija u metodologiji zahteva posebno modeliranje kako autonomnih tako i klasičnih vozila. U literaturi postoje različiti modeli AV svaki sa svojim određenim karakteristikama i primenama, zavisno od lokalnih uslova na kojima se metodologija primenjuje. U Tabeli 1 su opisani modeli AV sa njihovim osobina, rezultatima, i tipovima konekcije koje zahtevaju. Preporučuje se korišćenje modifikovanog Viedemanovog 99 modela za modeliranje AV u mikrosimulaciji zbog njegove jednostavne primene.

Modeliranje KV je već dugo vremena poznato i takođe se može primeniti u simulaciji. Tabela 2 prikazuje tri modela za modeliranje KV koji se mogu koristiti, a preporuka autora je takođe Viedemanov model.

Sa druge strane, primena VR simulacije zahteva dodatne resurse, poput računarske opreme i dodatnih mernih instrumenata. Međutim, određeni simulatori ne zahtevaju skupu opremu kao što su stolice, upravljači, monitori i slično, već samo uređaj sa virtuelnu stvarnost. Sa takvim uređajima, moguće je istraživati uticaj AV na bezbednost i komfor pešaka, pri čemu se u virtuelnu realnost ubacuje samo pešak kao učesnik. Tabela 3 prikazuje sve modele za VR simulaciju sa njihovim karakteristikama.

Slika 4. Koraci metodologije

Tabela 1. Modeli autonomnih vozila

Tip	***Model***		***Konekcija***	***Osobina***	***Rezultat***
AV	Gasper [37]		V2V, I2V	Adaptira kretanje vozila na osnovu prikupljenih informacija iz okruženja	Smanjuje potrošnju goriva i ne remeti saobraćajni tok
Kon. KV	Modifikacija IDM-a	Prošireni IDM za konektovana vozila [43]	V2V	Konektovana vozila prenose informacije o njihovom ponašanju vozilu koje ih prati, koje zatim podesi svoje ubrzanje u funkciji svoje brzine, i brzine i intervalu sleđenja ostalih vozila ispred koja se nalaze u domenu komunikacije	Veća stabilnost saobraćajnog toka u nehomogenom stanju (struktura toka sa konektovanim KV i nekonektovanim KV)
CAV		Modifikovani MOBIL (model promene trake) [42]	V2V	Optimizacija efikasnosti saobraćaja kroz minimizaciju vremenskih gubitaka, brzine promene trake, potrošnje goriva i emisije CO2 i usporenja	Smanjenje vremenskih gubitaka, veća potrošnja goriva usled većih brzina kretanja, veća brzina promena trake po kilometru
CAV	Bez-sudarni višerežimski model [39]		V2V	Kombinuje realističan ACC-CACC sistem sa intervencijama vozača pri optimizaciji podužnog kretanja vozila	Nema saobraćajnih nezgoda pri punim opsezima brzine sa ubrzanjem vođe u rasponu od -1 do 1 m/s^2
CAV	CFFM Collision-Free Car-Following [40]		V2V	Na osnovu granica ubrzanja koje mogu osigurati bezbednost u predviđenim opasnim uslovima, donosi se odluka o tačnom ubrzanju uzimajući u obzir efikanost i komfor	Garantuje bezbednost pri normalnom i naglom kočenju u bilo kom trenutku pa se može koristiti u kompleksnim saobraćajnim situacijama
CAV	PrARX Probability-Weighted AutoRegressive eXogenous inputs [38]		V2V	Koristi MPC u rešavanju optimizacionih problema u realnom vremenu računanjem ubrzanja/usporenja za svako AV zajedno sa predviđanjem ponašanja KV	Stabilnost plotuna vozila
CAV	Modifikovani Viedeman [46]		V2V	Modifikacija određenog broja parametra Viedemanovog	Manji interval sleđenja između vozila, lako

			modela u VISSIM simulacionom softveru. Omogućava modeliranje konektovanih vozila ali i situacija pri gubljenju konekcije	modeliranje autonomnih vozila
CAV	Prošireni Modifikovani Viedeman [47]	V2V	Modifikacija parametara Videmanovog modela u VISSIM simulacionom softveru. Omogućava modeliranje za različite nive automativnosti vozila kao i željenom ponašanju	Preciznije modeliranje autonomnih vozila

Tabela 2. Modeli klasičnih vozila sa vozačem

Model	***Osobina***
Gazis-Herman-Roteri [54]	Ubrzanja vozila koja slede je proporcionalno brzini podvrgnutog (sopstvenog vozila), razlici u brzinama između sledbenika i vođe i razmaku između njih
Model bezbedne distance [55]	Vozila iza uvek prate određeno bezbedno rastojanje sleđenja
Viedeman [46]	Vozači reaguju na vozila kada se postigne postavljeni prag za relativnu brzinu (razlika u brzini između vozila koje prati i vođe) ili rastojanje sleđenja

Tabela 3. Modeli simulacije virtuelne realnosti

Tip	***Osobina***	***Rezultat***
Kooperativna SiViC-RTMaps simulacija [48]	Realistična simulacija vozila koja omogućava detaljno razumevanje ponašanja svakog vozila u simulaciji	Omogućava evaluaciju ADAS sistema kroz realističnu simulaciju i merenje psihofizičkih parametara vozača
GENIVI simulator [49]	Simulator vožnje koji je kombinovan sa virtuelnom realnosti	Evaluacija potpunog iskustva vožnje autonomnih vozila kao i merenje psihofizičkih parametara
Vozilo-Pešak simulator [66]	Simuliranje virtuelnog okruženja za ispitivanje interakcija između AV i pešaka	Evaluacija bezbednosti i ponašanja pešaka pri interakciji sa AV
Light VR simulator [50]	Lako prenosivi simulator vožnje koji je kombinovan sa virtuelnom realnosti	Evaluacija potpunog iskustva vožnje autonomnih vozila kao i merenje psihofizičkih parametara

Konačna evaluacija AV na saobraćajni sistem se izvodi na osnovu parametara performansi. Ovi parametri mogu biti izvedeni iz različitih izvora, uključujući simulacione softvere. Na primer, parametri efkasnosti dobijaju se direktno od VISSIM-a koji analizira trajektorije vozila.

Sa druge strane parametri koji se odnose na životnu sredinu zahtevaju dodatne alate poput CMEM-a (Comperhensive Modal Emission Model) [67], MOVES [68], ili sličnih modela iz kojih se dobijaju podaci o emisijama izduvnih gasova. CMEM model koristi trajektorije vozila iz VISSIM-a (ili drugih mikrosimulacionih softvera) kako bi analizirao emisije izduvnih gasova. Osim toga, parametre životne sredine je moguće dobiti

i direktno od makroskopske simulacije pomoću VISUM softvera ako se u njega integrišu modeli za emisiju (npr. modeli bazirani na priručniku za faktore emisije (HBEFA) [69]).

Parametri bezbednosti se uglavnom zasnivaju na SSAM (Surrogate Safety Assessment Model) [70], alatu koji se koristi za evaluaciju surogat performansi bezbednosti saobraćaja. Analiza SSAM-a se vrši na osnovu podataka trajektorija vozila dobijenih pomoću VISSIM modela. Parametri pristupačnosti, se takođe, dobijaju direktno od VISUM-a na osnovu podešavanja korisnika. U Tabeli 4 su sumirani parametri performansi prema oblastima i alatima koji su potrebni za njihovu evaluaciju.

Pored klasične evaluacije parametara performansi i njihove analize, korisnici treba da imaju u vidu procenat autonomnih vozila koji se nalazi na određenoj lokaciji. Na taj način, korisnici mogu izvršiti prognoze odgovarajućih performansi u zavisnosti od procenta autonomnih vozila. Ovaj pristup omogućava donošenje odluka o budućim akcijama na osnovu potencijalnih scenarija razvoja i upotrebe autonomnih vozila.

Tabela 4. Parameri performanski prema oblastima sa potrebnim alatima

Oblast	***Alat***	***Parametar***
Efikasnost	VISSIM, SUMO, Aimsun	Brzina Vremenski gubici Vreme putovanja Broj zaustavljanja Vreme zaustavljanja
Bezbednost	VISSIM, SUMO, Aimsun & SSAM	Vreme do sudara Vreme do nezgode Indeks rizika sudara od pozadi Standardna devijacija brzine Maksimalna brzina
Životna sredina	VISSIM & CMEM, VISUM	Potrošnja goriva Emisija gasova
Pristupačnost	VISUM	% neopsluženih putovanja % neopsluženih osoba % promene prosečne brzine % promene prosečne gustine % promene protoka Prosečna dužina pešačenja Prosečna dužina putovana Prosečno vreme putovanja
Ostalo	VR simulacija + Psihofizički merni instrumenti	Iskustvo sa AV na osnovu upitnika Komfor putnika na osnovu upitnika Tip i vreme reakcije na osnovu video snimka Promene u radu srca Promene u radu mozga Promene u elektrodermalnoj reakciji

ZAKLJUČAK

U ovom radu prikazan je predlog metodologije za evaluaciju uticaja autonomnih vozila na saobraćajni sistem. Prvobitno je analizirana relevantna literatura kako bi se identifikovali modeli autonomnih i klasičnih vozila u simulacionim softverima, kao i VR simulatore i njihove modele. Nakon toga, metodologija je opisana

i podeljena je na četiri aspekta evaluacije: efikasnost saobraćaja, bezbednost saobraćaja, uticaj na životnu sredinu, i pristupačnost saobraćajne usluge.

Metodologija predlaže korisnicima da simuliraju izabrane lokacije, kroz simulacione softvere sa različitim nivoima agregacije, kako bi istraživali uticaj autonomnih vozila. Korisnik prvo mora prikupiti potrebne podatke sa terena, poput gemetrije mreže, procenta AV, specifičnih scenarija kao i načinu komunikacije između KAV. Nakon toga, pomoću simulacionog modela lokacije moguće je sprovesti neophodne analize i prognoze. Time se dobijaju relevanti parametri performansi u skladu sa simuliranim scenarijima i specifičnim interesima.

Implementacija ove metodologije pruža struktuiran pristup proceni različitih aspekata uticaja autonomnih vozila na saobraćajni sistem. Sistematski pristup metodologije pruža osnovu za indentifikaciju ključnih faktora koji utiču na performanse saobraćajnog sistema u kontekstu uvođenja autonomnih vozila. Takođe, omogućava identifikaciju strategija i mera koje mogu unaprediti efikasnost, bezbednost, održivost i pristupačnost transportnih sistema.

LITERATURA

[1] T. Litman, “Autonomous Vehicle Implementation Predictions: Implications for Transport Planning”.
[2] R. Arvin, A. J. Khattak, M. Kamrani, and J. Rio-Torres, “Safety evaluation of connected and automated vehicles in mixed traffic with conventional vehicles at intersections,” *Journal of Intelligent Transportation Systems*, vol. 25, no. 2, pp. 170–187, Mar. 2021, doi: 10.1080/15472450.2020.1834392.
[3] J. Hamadneh and D. Esztergar-Kiss, “Impacts of Shared Autonomous Vehicles on the Travelers’ Mobility,” in *2019 6th International Conference on Models and Technologies for Intelligent Transportation Systems (MT-ITS)*, Cracow, Poland: IEEE, Jun. 2019, pp. 1–9. doi: 10.1109/MTITS.2019.8883392.
[4] N. Gavanas, “Autonomous Road Vehicles: Challenges for Urban Planning in European Cities,” *Urban Science*, vol. 3, no. 2, p. 61, Jun. 2019, doi: 10.3390/urbansci3020061.
[5] A. Nikitas, K. Michalakopoulou, E. T. Njoya, and D. Karampatzakis, “Artificial Intelligence, Transport and the Smart City: Definitions and Dimensions of a New Mobility Era,” *Sustainability*, vol. 12, no. 7, p. 2789, Apr. 2020, doi: 10.3390/su12072789.
[6] T. Cohen and C. Cavoli, “Automated vehicles: exploring possible consequences of government (non)intervention for congestion and accessibility,” *Transport Reviews*, vol. 39, no. 1, pp. 129–151, Jan. 2019, doi: 10.1080/01441647.2018.1524401.
[7] Q. Lu, T. Tettamanti, D. Hörcher, and I. Varga, “The impact of autonomous vehicles on urban traffic network capacity: an experimental analysis by microscopic traffic simulation,” *Transportation Letters*, vol. 12, no. 8, pp. 540–549, Sep. 2020, doi: 10.1080/19427867.2019.1662561.
[8] P. Gora, C. Katrakazas, A. Drabicki, F. Islam, and P. Ostaszewski, “Microscopic traffic simulation models for connected and automated vehicles (CAVs) – state-of-the-art,” *Procedia Computer Science*, vol. 170, pp. 474–481, 2020, doi: 10.1016/j.procs.2020.03.091.
[9] L. Ye and T. Yamamoto, “Modeling connected and autonomous vehicles in heterogeneous traffic flow,” *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, vol. 490, pp. 269–277, Jan. 2018, doi: 10.1016/j.physa.2017.08.015.
[10] W. Wang, J. Xi, A. Chong, and L. Li, “Driving Style Classification Using a Semisupervised Support Vector Machine,” *IEEE Trans. Human-Mach. Syst.*, vol. 47, no. 5, pp. 650–660, Oct. 2017, doi: 10.1109/THMS.2017.2736948.

[11] L. Lemarié, F. Bellavance, and J.-C. Chebat, “Regulatory focus, time perspective, locus of control and sensation seeking as predictors of risky driving behaviors,” *Accident Analysis & Prevention*, vol. 127, pp. 19–27, Jun. 2019, doi: 10.1016/j.aap.2019.02.025.
[12] G. Azimi, A. Rahimi, H. Asgari, and X. Jin, “Severity analysis for large truck rollover crashes using a random parameter ordered logit model,” *Accident Analysis & Prevention*, vol. 135, p. 105355, Feb. 2020, doi: 10.1016/j.aap.2019.105355.
[13] M. V. Faria, G. O. Duarte, R. A. Varella, T. L. Farias, and P. C. Baptista, “Driving for decarbonization: Assessing the energy, environmental, and economic benefits of less aggressive driving in Lisbon, Portugal,” *Energy Research & Social Science*, vol. 47, pp. 113–127, Jan. 2019, doi: 10.1016/j.erss.2018.09.006.
[14] J. Rios-Torres, J. Liu, and A. Khattak, “Fuel consumption for various driving styles in conventional and hybrid electric vehicles: Integrating driving cycle predictions with fuel consumption optimization,” *International Journal of Sustainable Transportation*, vol. 13, no. 2, pp. 123–137, Feb. 2019, doi: 10.1080/15568318.2018.1445321.
[15] T. Ard, R. A. Dollar, A. Vahidi, Y. Zhang, and D. Karbowski, “Microsimulation of energy and flow effects from optimal automated driving in mixed traffic,” *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, vol. 120, p. 102806, Nov. 2020, doi: 10.1016/j.trc.2020.102806.
[16] A. Papadoulis, M. Quddus, and M. Imprialou, “Evaluating the safety impact of connected and autonomous vehicles on motorways,” *Accident Analysis & Prevention*, vol. 124, pp. 12–22, Mar. 2019, doi: 10.1016/j.aap.2018.12.019.
[17] A. Matin and H. Dia, “Impacts of Connected and Automated Vehicles on Road Safety and Efficiency: A Systematic Literature Review,” *IEEE Trans. Intell. Transport. Syst.*, vol. 24, no. 3, pp. 2705–2736, Mar. 2023, doi: 10.1109/TITS.2022.3227176.
[18] B. Friedrich, “The Effect of Autonomous Vehicles on Traffic,” in *Autonomous Driving*, M. Maurer, J. C. Gerdes, B. Lenz, and H. Winner, Eds., Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2016, pp. 317–334. doi: 10.1007/978-3-662-48847-8_16.
[19] Y. Liu, J. Guo, J. Taplin, and Y. Wang, “Characteristic Analysis of Mixed Traffic Flow of Regular and Autonomous Vehicles Using Cellular Automata,” *Journal of Advanced Transportation*, vol. 2017, pp. 1–10, 2017, doi: 10.1155/2017/8142074.
[20] S. C. Calvert, W. J. Schakel, and J. W. C. Van Lint, “Will Automated Vehicles Negatively Impact Traffic Flow?,” *Journal of Advanced Transportation*, vol. 2017, pp. 1–17, 2017, doi: 10.1155/2017/3082781.
[21] H. Clark and J. Feng, “Age differences in the takeover of vehicle control and engagement in non-driving-related activities in simulated driving with conditional automation,” *Accident Analysis & Prevention*, vol. 106, pp. 468–479, Sep. 2017, doi: 10.1016/j.aap.2016.08.027.
[22] F. Zheng, C. Liu, X. Liu, S. E. Jabari, and L. Lu, “Analyzing the impact of automated vehicles on uncertainty and stability of the mixed traffic flow,” *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, vol. 112, pp. 203–219, Mar. 2020, doi: 10.1016/j.trc.2020.01.017.
[23] A. Olia, H. Abdelgawad, B. Abdulhai, and S. N. Razavi, “Assessing the Potential Impacts of Connected Vehicles: Mobility, Environmental, and Safety Perspectives,” *Journal of Intelligent Transportation Systems*, vol. 20, no. 3, pp. 229–243, May 2016, doi: 10.1080/15472450.2015.1062728.
[24] L. Ye and T. Yamamoto, “Evaluating the impact of connected and autonomous vehicles on traffic safety,” *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, vol. 526, p. 121009, Jul. 2019, doi: 10.1016/j.physa.2019.04.245.
[25] G. Xiao, J. Lee, Q. Jiang, H. Huang, M. Abdel-Aty, and L. Wang, “Safety improvements by intelligent connected vehicle technologies: A meta-analysis considering market penetration rates,” *Accident Analysis & Prevention*, vol. 159, p. 106234, Sep. 2021, doi: 10.1016/j.aap.2021.106234.

[26] S. E. Shladover, D. Su, and X.-Y. Lu, “Impacts of Cooperative Adaptive Cruise Control on Freeway Traffic Flow,” *Transportation Research Record*, vol. 2324, no. 1, pp. 63–70, Jan. 2012, doi: 10.3141/2324-08.
[27] A. Talebpour and H. S. Mahmassani, “Influence of connected and autonomous vehicles on traffic flow stability and throughput,” *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, vol. 71, pp. 143–163, Oct. 2016, doi: 10.1016/j.trc.2016.07.007.
[28] E. Ericsson, “Independent driving pattern factors and their influence on fuel-use and exhaust emission factors,” *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, vol. 6, no. 5, pp. 325–345, Sep. 2001, doi: 10.1016/S1361-9209(01)00003-7.
[29] A. M. D. Souza, A. Boukerche, G. Maia, R. I. Meneguette, A. A. F. Loureiro, and L. A. Villas, “Decreasing greenhouse emissions through an intelligent traffic information system based on inter-vehicle communication,” in *Proceedings of the 12th ACM international symposium on Mobility management and wireless access*, Montreal QC Canada: ACM, Sep. 2014, pp. 91–98. doi: 10.1145/2642668.2642677.
[30] K. Katsaros, R. Kernchen, M. Dianati, D. Rieck, and C. Zinoviou, “Application of vehicular communications for improving the efficiency of traffic in urban areas,” *Wireless Communications*, vol. 11, no. 12, pp. 1657–1667, Dec. 2011, doi: 10.1002/wcm.1233.
[31] J. Lee and B. Park, “Development and Evaluation of a Cooperative Vehicle Intersection Control Algorithm Under the Connected Vehicles Environment,” *IEEE Trans. Intell. Transport. Syst.*, vol. 13, no. 1, pp. 81–90, Mar. 2012, doi: 10.1109/TITS.2011.2178836.
[32] Jorge Nocedal, Stephen J. Wright, *Numerical Optimization*.
[33] A. A. Alam, A. Gattami, and K. H. Johansson, “An experimental study on the fuel reduction potential of heavy duty vehicle platooning,” in *13th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems*, Funchal, Madeira Island, Portugal: IEEE, Sep. 2010, pp. 306–311. doi: 10.1109/ITSC.2010.5625054.
[34] S. E. Shladover, C. Nowakowski, X.-Y. Lu, and R. Ferlis, “Cooperative Adaptive Cruise Control: Definitions and Operating Concepts,” *Transportation Research Record*, vol. 2489, no. 1, pp. 145–152, Jan. 2015, doi: 10.3141/2489-17.
[35] S. Tsugawa, S. Kato, and K. Aoki, “An automated truck platoon for energy saving,” in *2011 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, San Francisco, CA: IEEE, Sep. 2011, pp. 4109–4114. doi: 10.1109/IROS.2011.6094549.
[36] S. E. Li, Y. Zheng, K. Li, L.-Y. Wang, and H. Zhang, “Platoon Control of Connected Vehicles from a Networked Control Perspective: Literature Review, Component Modeling, and Controller Synthesis,” *IEEE Trans. Veh. Technol.*, pp. 1–1, 2024, doi: 10.1109/TVT.2017.2723881.
[37] P. Gáspár and B. Németh, “Design of adaptive cruise control for road vehicles using topographic and traffic information,” *IFAC Proceedings Volumes*, vol. 47, no. 3, pp. 4184–4189, 2014, doi: 10.3182/20140824-6-ZA-1003.01912.
[38] H. Chin, H. Okuda, Y. Tazaki, and T. Suzuki, “Model predictive cooperative cruise control in mixed traffic,” in *IECON 2015 - 41st Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Yokohama: IEEE, Nov. 2015, pp. 003199–003205. doi: 10.1109/IECON.2015.7392593.
[39] L. Xiao, M. Wang, and B. Van Arem, “Realistic Car-Following Models for Microscopic Simulation of Adaptive and Cooperative Adaptive Cruise Control Vehicles,” *Transportation Research Record*, vol. 2623, no. 1, pp. 1–9, Jan. 2017, doi: 10.3141/2623-01.
[40] L. Li and Wanjing Ma, “A Collision-Free Car-Following Model for Connected Automated Vehicles,” 2017, doi: 10.13140/RG.2.2.16083.27685.
[41] M. Treiber, A. Hennecke, and D. Helbing, “Congested traffic states in empirical observations and microscopic simulations,” *Phys. Rev. E*, vol. 62, no. 2, pp. 1805–1824, Aug. 2000, doi: 10.1103/PhysRevE.62.1805.

[42] U. Khan, P. Basaras, L. Schmidt-Thieme, A. Nanopoulos, and D. Katsaros, “Analyzing cooperative lane change models for connected vehicles,” in *2014 International Conference on Connected Vehicles and Expo (ICCVE)*, Vienna, Austria: IEEE, Nov. 2014, pp. 565–570. doi: 10.1109/ICCVE.2014.7297612.
[43] L. Liu, C. Li, Y. Li, S. Peeta, and L. Lin, “Car-Following Behavior of Connected Vehicles in a Mixed Traffic Flow: Modeling and Stability Analysis,” in *2018 IEEE 8th Annual International Conference on CYBER Technology in Automation, Control, and Intelligent Systems (CYBER)*, Tianjin, China: IEEE, Jul. 2018, pp. 1085–1088. doi: 10.1109/CYBER.2018.8688207.
[44] J. Sun, Z. Zheng, and J. Sun, “Stability analysis methods and their applicability to car-following models in conventional and connected environments,” *Transportation Research Part B: Methodological*, vol. 109, pp. 212–237, Mar. 2018, doi: 10.1016/j.trb.2018.01.013.
[45] R. Wiedemann, *Simulation des Straßenverkehrsflusses*. in Schriftenreihe des Instituts für Verkehrswesen der Universität Karlsruhe, no. 8. German: Univ., Inst. für Verkehrswesen, Karlsruhe, 1974.
[46] V. Zeidler, H. S. Buck, L. Kautzsch, P. Vortisch, and C. M. Weyland, “SIMULATION OF AUTONOMOUS VEHICLES BASED ON WIEDEMANN’S CAR FOLLOWING MODEL IN PTV VISSIM”.
[47] H. U. Ahmed, Y. Huang, and P. Lu, “A Review of Car-Following Models and Modeling Tools for Human and Autonomous-Ready Driving Behaviors in Micro-Simulation,” *Smart Cities*, vol. 4, no. 1, pp. 314–335, Mar. 2021, doi: 10.3390/smartcities4010019.
[48] D. Gruyer, S. Demmel, B. d’Andréa-Novel, and G. S., “Simulating Cooperative Systems Applications: a New Complete Architecture,” *IJACSA*, vol. 4, no. 12, 2013, doi: 10.14569/IJACSA.2013.041226.
[49] L. Morra, F. Lamberti, F. G. Prattico, S. L. Rosa, and P. Montuschi, “Building Trust in Autonomous Vehicles: Role of Virtual Reality Driving Simulators in HMI Design,” *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 68, no. 10, pp. 9438–9450, Oct. 2019, doi: 10.1109/TVT.2019.2933601.
[50] D. Sportillo, A. Paljic, and L. Ojeda, “Get ready for automated driving using Virtual Reality,” *Accident Analysis & Prevention*, vol. 118, pp. 102–113, Sep. 2018, doi: 10.1016/j.aap.2018.06.003.
[51] J. P. Nuñez Velasco, H. Farah, B. Van Arem, and M. P. Hagenzieker, “Studying pedestrians’ crossing behavior when interacting with automated vehicles using virtual reality,” *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, vol. 66, pp. 1–14, Oct. 2019, doi: 10.1016/j.trf.2019.08.015.
[52] A. T. Johan Jason Olstam, “Comparison of Car-following models.” Swedish Natinal Road and Transport Research Institute SE-581 95 Linköping Sweden, 2004. Accessed: Mar. 06, 2024. [Online]. Available: https://www.semanticscholar.org/paper/Comparison-of-car-following-models-Olstam-Tapani/c5c75200817a05e570b8cf0f2e7a059693309422
[53] S. P. Hoogendoorn and R. Hoogendoorn, “Generic Calibration Framework for Joint Estimation of Car-Following Models by Using Microscopic Data,” *Transportation Research Record*, vol. 2188, no. 1, pp. 37–45, Jan. 2010, doi: 10.3141/2188-05.
[54] D. C. Gazis, R. Herman, and R. W. Rothery, “Nonlinear Follow-the-Leader Models of Traffic Flow,” *Operations Research*, vol. 9, no. 4, pp. 545–567, Aug. 1961, doi: 10.1287/opre.9.4.545.
[55] L. A. Pipes, “An Operational Analysis of Traffic Dynamics,” *Journal of Applied Physics*, vol. 24, no. 3, pp. 274–281, Mar. 1953, doi: 10.1063/1.1721265.
[56] J. V. Hall and A. B. Krueger, “An Analysis of the Labor Market for Uber’s Driver-Partners in the United States,” *ILR Review*, vol. 71, no. 3, pp. 705–732, May 2018, doi: 10.1177/0019793917717222.

[57] S. Shaheen, “Innovative Mobility: Carsharing Outlook,” 2018, doi: 10.7922/G2ZC811P.
[58] T. D. Chen and K. M. Kockelman, “Carsharing’s life-cycle impacts on energy use and greenhouse gas emissions,” *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, vol. 47, pp. 276–284, Aug. 2016, doi: 10.1016/j.trd.2016.05.012.
[59] I. Matalqah, M. Shatanawi, A. Alatawneh, and F. Mészáros, “Impact of Different Penetration Rates of Shared Autonomous Vehicles on Traffic: Case Study of Budapest,” *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, vol. 2676, no. 12, pp. 396–408, Dec. 2022, doi: 10.1177/03611981221095526.
[60] J. Zhou and H. Peng, “Range Policy of Adaptive Cruise Control Vehicles for Improved Flow Stability and String Stability,” *IEEE Trans. Intell. Transport. Syst.*, vol. 6, no. 2, pp. 229–237, Jun. 2005, doi: 10.1109/TITS.2005.848359.
[61] S. S. Stankovic, M. J. Stanojevic, and D. D. Siljak, “Decentralized overlapping control of a platoon of vehicles,” *IEEE Trans. Contr. Syst. Technol.*, vol. 8, no. 5, pp. 816–832, Sep. 2000, doi: 10.1109/87.865854.
[62] S. E. Shladover, “Review of the State of Development of Advanced Vehicle Control Systems (AVCS),” *Vehicle System Dynamics*, vol. 24, no. 6–7, pp. 551–595, Jul. 1995, doi: 10.1080/00423119508969108.
[63] P. Seiler, A. Pant, and K. Hedrick, “Disturbance Propagation in Vehicle Strings,” *IEEE Trans. Automat. Contr.*, vol. 49, no. 10, pp. 1835–1841, Oct. 2004, doi: 10.1109/TAC.2004.835586.
[64] P. A. Cook and S. Sudin, “Convoy Dynamics with Bidirectional Flow of Control Information,” *IFAC Proceedings Volumes*, vol. 36, no. 14, pp. 401–406, Aug. 2003, doi: 10.1016/S1474-6670(17)32453-9.
[65] T. Willke, P. Tientrakool, and N. Maxemchuk, “A survey of inter-vehicle communication protocols and their applications,” *IEEE Commun. Surv. Tutorials*, vol. 11, no. 2, pp. 3–20, 2009, doi: 10.1109/SURV.2009.090202.
[66] T. Tran, C. Parker, and M. Tomitsch, “A Review of Virtual Reality Studies on Autonomous Vehicle–Pedestrian Interaction,” *IEEE Trans. Human-Mach. Syst.*, vol. 51, no. 6, pp. 641–652, Dec. 2021, doi: 10.1109/THMS.2021.3107517.
[67] M. Barth, “Development of a Comprehensive Modal Emissions Model.” Apr. 2020.
[68] US Environmental Protection Agency, “Motor Vehicle Emission Simulator (MOVES).” Dec. 2009.
[69] Mario Keller, “Handbuch fu¨r Emissionsfaktoren des Strassenverkehrs (HBEFA) (handbook of emission factors for road traffic).” 2004.
[70] US Department of Transportation, Federal Highway Administration, “Surrogate Safety Assessment Model and Validation: Final Report.” Jun. 2008.

REGULATORNI IZAZOVI U IMPLEMENTACIJI INFORMACIONO-KOMUNIKACIONIH TEHNOLOGIJA U KONTEKSTU POVEZANIH I AUTONOMNIH VOZILA

Aleksandra Kostić Ljubisavljević, Branka Mikavica, Momir Manović[1]
Saobraćajni fakultet, a.kostic@sf.bg.ac.rs, b.mikavica@sf.bg.ac.rs, m.manovic@sf.bg.ac.rs

Rezime: *Povezana i autonomna vozila (Connected and Autonomous Vehicles, CAV) predstavljaju inovativno tehnološko rešenje koje ima veoma važnu ulogu u Inteligentnim transportnim sistemima (Intelligent Transport Systems, ITS). Koncept CAV omogućava vozilima da pored senzora i aktuatora koji pružaju informacije o neposrednom okruženju, uspostave komunikaciju kako međusobno, tako i sa infrastrukturom. Na taj način se proširuje percepcija vozila o njegovoj okolini, omogućava bezbednija i efikasnija vožnja i obezbeđuju se novi načini za rešavanje zagušenja u saobraćaju. U ovom radu dat je pregled informaciono-komunikacionih tehnologija na kojima se zasniva koncept CAV. Analizirani su trenutni i budući zahtevi u kontekstu upravljanja radio-frekvencijskim spektrom koji je namenjen za CAV. Takođe, u radu su analizirani izazovi i prepreke za širu praktičnu primenu CAV, sa posebnim osvrtom na regulatorna pitanja i bezbednost komunikacije između vozila, kao i komunikacije vozila sa infrastrukturom.*

Ključne reči: *povezana i autonomna vozila, Inteligentni transportni sistemi, regulativa, bezbednost komunikacije*

REGULATORY CHALLENGES IN THE IMPLEMENTATION OF INFORMATION AND COMMUNICATION TECHNOLOGIES IN THE CONTEXT OF CONNECTED AND AUTONOMOUS VEHICLES

Aleksandra Kostić Ljubisavljević, Branka Mikavica, Momir Manović[2]
Faculty of Transport and Traffic Engineering, a.kostic@sf.bg.ac.rs, b.mikavica@sf.bg.ac.rs, m.manovic@sf.bg.ac.rs

Abstract: *Connected and Autonomous Vehicles (CAV) represent an innovative technological solution that plays a crucial role in Intelligent Transportation Systems (ITS). The CAV concept allows vehicles to establish communication with each other and with the infrastructure, in addition to sensors and actuators that provide information about the immediate environment. This expands the vehicle's awareness of its environment, allows for safer and more efficient driving, and introduces new ways to address traffic congestion. This paper provides an overview of the information and communication technologies underlying the CAV concept. It analyzes current and future requirements in the context of managing the radio frequency spectrum dedicated to CAV. Additionally, the paper examines challenges and obstacles for broader practical implementation of CAV, with a specific focus on regulatory issues and the security of communication between vehicles, as well as communication between vehicles and infrastructure.*

Keywords: *connected and autonomous vehicles, Intelligent Transportation Systems, regulation, security*

1. UVOD

Zbog intenzivne urbanizacije, današnje društvo se suočava sa brojnim problemima u drumskom saobraćaju. Podaci iz 2016. godine pokazuju da prosečan vozač u Parizu godišnje izgubi 65 časova u gužvi. Za vozače u Moskvi i Los Anđelesu, ove vrednosti su bile 91 čas i 104 časa godišnje (Paret & Rebaine, 2022). Pored problema zagušenja, zbog povećanog broja vozila dešava se i veliki broj saobraćajnih nezgoda. Svetska zdravstvena organizacija (*World Health Organization, WHO*) je 2023. godine objavila podatak da godišnje 1,19 miliona ljudi strada u saobraćajnim nezgodama, od kojih su više od polovine ranjivi učesnici u saobraćaju, kao što su pešaci i biciklisti. Takođe, sadašnji podaci govore da će se trend urbanizacije nastaviti i u budućnosti. Predviđa se da će do 2050. više od 70% svetske populacije živeti u gradovima (*Road Traffic Injuries*, 2023). Povećana gustina naseljenosti u urbanim sredinama implicira i povećan broj motornih vozila u saobraćajnim tokovima. Ovo za posledicu ima otežavanje rešavanja problema optimalnog rutiranja i bezbednosti u saobraćaju. Krajnji rezultat su gužve i veliki broj saobraćajnih nezgoda.

[1]Autor zadužen za korespodenciju: m.manovic@sf.bg.ac.rs
[2]Author in charge of correspondence: m.manovic@sf.bg.ac.rs

Povezana i autonomna vozila (*Connected and Autonomous Vehicles*, CAV) predstavljaju tehnologiju koja može značajno ublažiti prethodno navedene izazove. Cilj ove tehnologije sa zasniva na međusobnoj komunikaciji između vozila, kao i na komunikaciji vozila sa infrastrukturom. Na ovaj način omogućena je automatizacija velikog broja procesa upravljanja vozilom. Pored automatizacije, moguće je pružanje brojnih informacija vozaču o dešavanjima na putu, koje mogu uticati na donošenje boljih odluka prilikom upravljanja. Ishod primene ove tehnologije mogao bi biti smanjenje gužvi i broja saobraćajnih nezgoda (Ziyad et al., 2021).

Neka od istraživanja pokazuju da je čak oko 90% saobraćajnih nezgoda uzrokovano ljudskom greškom (Wishart, 2022). Ovaj podatak je usmerio istraživanje CAV tehnologije ka bezbednosti u saobraćaju. Trenutni cilj većine zemalja u svetu, koje se bave razvojem ove tehnologije je kreiranje pouzdanog sistema koji može da samostalno donosi odluke kako bi sprečio nezgodu ili da pruža vozaču informacije o opasnosti kojih vozač nije svestan.

Implementacija CAV tehnologije u praksi nije jednostavna. Pored tehničkih problema, postoje dodatni pravni i društveni izazovi. CAV tehnologija je relativno nova tehnologija, i kao takva zahteva definisanje pravnih normi i standarda. Bez odgovarajućih regulatornih mera i propisa, nije moguća šira implementacija. Takođe, neophodno je razmotriti kakav uticaj ova tehnologija ima na društvo, ekonomiju i tržište rada.

Rad je organizovan na sledeći način. Nakon uvodnih razmatranja, u drugom poglavlju prikazani su tehnički aspekti radio komunikacije, kao i primena CAV tehnologije. U trećem poglavlju dat je uporedni prikaz dve osnovne grupe standarda informaciono-komunikacionih tehnologija koje podržavaju CAV. Četvrto poglavlje govori o regulaciji spektra koji je potreban za radio komunikaciju. Peto poglavlje daje prikaz stanja trenutnog razvoja CAV sistema u svetu. U šestom poglavlju prikazani su izazovi i problemi sa kojima se CAV suočava. Sedmo poglavlje obuhvata zaključna razmatranja.

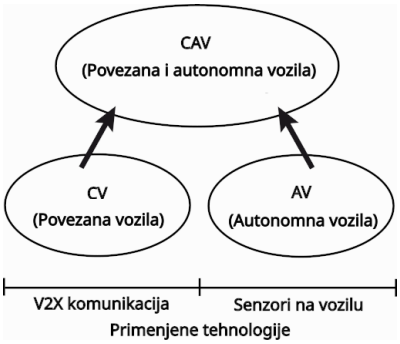
2. TEHNIČKI ASPEKTI RADIO KOMUNIKACIJA U KONTEKSTU POVEZANIH I AUTONOMNIH VOZILA

U poslednjih nekoliko godina CAV tehnologija je značajno napredovala zahvaljujući brojnim kompanijama i organizacijama koje su uložile novac i vreme u razvoj ove tehnologije. Ne postoji razlog za sumnju da se ovaj trend neće nastaviti u budućnosti. Trenutni stav zajednice koja se bavi razvojem je, da je čak oko 90% tehničkih problema rešeno, i to za veoma kratak vremenski period. Međutim, pokazalo se da preostalih 10%, koji su ključni za ispravno funkcionisanje sistema, nije tako lako postići kao što je bilo očekivano. Ali, razvoj se neprekidno nastavlja i pitanje je vremena kada će svi tehnički problemi biti rešeni (Wishart, 2022).

Između funkcionalnosti vozila i tehnologija koje su primenjene postoji direktna veza, na osnovu čega se vozila mogu podeliti u tri grupe: povezana vozila (*Connected Vehicles,* CV), autonomna vozila (*Automated Vehicles*, AV) i povezana i autonomna vozila. CV vozila koriste radio komunikaciju kako bi razmenjivali informacije, dok AV kozila koriste senzore, pomoću kojih automobil stiče "svest" o svojoj okolini. Organizacija SAE (*Society of Automotive Engineers*), propisuje šest nivoa autonomnosti vozila (*Report ITU-R M.2534-0 - Connected Automated Vehicles*, 2023., *The 6 Levels of Vehicle Autonomy Explained | Synopsys Automotive*, 2023).

1) Nivo 0 - Ovaj nivo se odnosi na vozila koja nemaju nikakvu autonomiju i njima se upravlja ručno.
2) Nivo 1 - Vozilo poseduje neki vid asistencije vozaču. Ovo može biti npr. pomoć pri upravljanju ili ubrzanju vozila.
3) Nivo 2 - Ovaj nivo uključuje ADAS (*Advanced Driver Assistance Systems*), i omogućava vozilu da kontroliše upravljanje i ubrzanje. Međutim, vozač mora biti za volanom i može preuzeti kontrolu u svakom trenutku.
4) Nivo 3 - Omogućena je detekcija okoline vozila. Zahvaljujući ovoj karakteristici, automobil, na primer, može doneti odluku o preticanju sporijeg vozila. Međutim, vozač i dalje mora biti za volanom kako bi preuzeo kontrolu ukoliko vozilo nije u mogućnosti da obavi zadatak.
5) Nivo 4 - Razlika između nivoa 4 i 3 je u tome što vozila na nivou 4 mogu samostalno da donose odluke u kritičnim situacijama. Ovo praktično znači da vozila mogu da se kreću bez pomoći vozača. Ipak, zbog nerešenih odgovornosti i drugih pravnih pitanja, prostor kretanja ovih vozila je najčešće ograničen na određene oblasti.
6) Nivo 5 - Vozila nivoa 5 ne zahtevaju nikakvu intervenciju vozača. Nemaju volan, kao ni pedale za upravljanje. Slobodno mogu da se kreću kuda žele, i da izvršavaju sve što i iskusni vozač može.

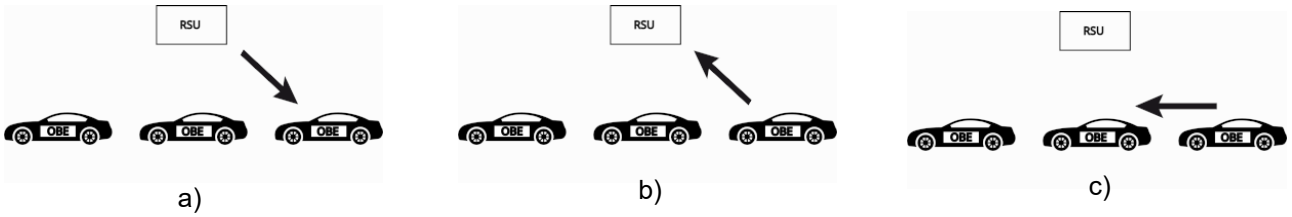
Kao što je prikazano na Slici 1, CAV vozila upotrebljavaju kombinaciju senzora koje koriste AV vozila i radio komunikaciju koju koriste CV vozila.



Slika 1. *Veza CAV vozilima sa CV i AV vozilima*

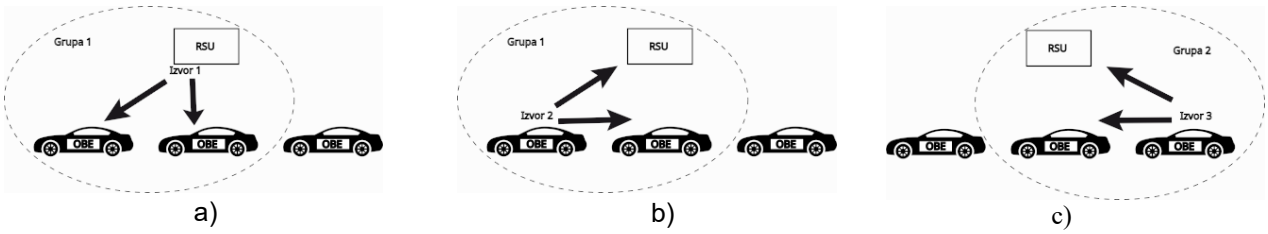
Postoje tri tipa radio komunikacija u slučaju CAV vozila (*Report ITU-R M.2534-0 - Connected Automated Vehicles*, 2023):

1) *Unicast* komunikacija - *Unicast* komunikacija je tipa tačka-tačka, kao što je to prikazano na Slici 2. Koristi se kada predajnik šalje poruku tačno jednom prijemniku. Predajnik u komunikaciji može biti OBE (*On-Board Equipment)*, kao i RSU *(Roadside Unit).* Ovaj tip komunikacije je koristan u situacijama gde V2X server šalje informaciju vozilu.



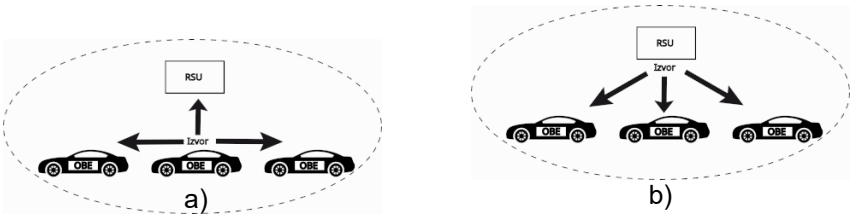
Slika 2. *Unicast komunikacija a) RSU predajnik-OBE prijemnik b) OBE predajnik-RSU prijemnik c) OBE predajnik-OBE prijemnik*

2) *Multicast* komunikacija - *Multicast* komunikacija je tipa jedan ka više (Slika 3). Koristi se za komunikaciju vozila u grupi.



Slika 3. *Multicast komunikacija a) RSU predajnik u grupi 1 b) OBE predajnik u grupi 1 c) OBE predajnik u grupi 2*

3) *Broadcast* komunikacija - *Broadcast* komunikacija se koristi kada se informacija sa predajnika šalje svim uređajima u mreži, kao što je to prikazano na Slici 4. Primer primene ovog tipa komunikacije je slučaj kada vozilo hitne službe šalje informaciju svim vozilima u blizini. Na slici 4. prikazana je *broadcast* komunikacija.



Slika 4. *Broadcast komunikacija a) OBE predajnik b) RSU predajnik*

CAV je veoma složen i dinamičan sistem od koga se zahteva veoma visoka pouzdanost, malo kašnjenje i mali gubitak podataka. Kako bi ove karakteristike bile ispunjene, tehnički zahtevi koje CAV mora da ispuni su jako strogi.

Neki od izazova koje je neophodno regulisati su:

1) Topologija prenosa - V2X (*Vehicle-to-Everything*) komunikacija je omnidirekcionog tipa više ka više. Ređi su slučajevi *unicast* ili *multicast* komunikacije.
2) Dinamičan kanal komunikacije - Zbog velike mobilnosti čvorova u mreži, karakteristike kanala se brzo menjaju. Takođe mobilnost čvorova dovodi do pojave Doplerovog efekta kao i propagacije elektromagnetnog talasa po više putanja. Zbog ovih razloga prijemnik mora da ispunjava stroge kriterijume, kako bi komunikacija bila što pouzdanija.
3) Dinamičan broj učesnika u komunikaciji - Mobilnost čvorova takođe dovodi do brzih promena broja učesnika u komunikaciji. Ovo za posledicu ima promenjivu zauzetost kanala. Broj vozila koji komuniciraju u jednom trenutku može biti od 100 do 800 vozila.
4) Dinamično korišćenje kanala - Različiti CAV servisi imaju različite zahteve u pogledu propusnog opsega. Neki servisi mogu zahtevati više od jednog kanala za komunikaciju.
5) Dinamične V2X poruke - Radi što efikasnijeg korišćenja spektra V2X poruke se šalju samo kada su neophodne i prilagođene su tako da sadržaj koji treba da bude poslat, bude što je moguće manji. Ovo dovodi do generisanja poruka različitih dužina, koje se šalju različitim brzinama na aperiodičan način.
6) Domet - Kako bi broj saobraćajnih nezgoda bio smanjen, neophodno je da procenat uspešno poslatih paketa u gradskim i prigradskim naseljima bude između 80% i 90% na rastojanju od 150 m, a na autoputevima neophodno je obezbediti isti procenat uspešnosti slanja paketa, ali na rastojanju od 500m.
7) Selekcija tipa modulacije - Veoma dinamični uslovi na putu zahtevaju modulaciju koja je otpornija na šum. Najčešće korišćena modulacija je QPSK (*Quadrature Phase Shift Keying*), dok je u nekim situacijama moguće koristiti i modulacije višeg reda.
8) Dozvoljeno kašnjenje u CAV sistemima je ispod 10 ms (*Report ITU-R M.2534-0 - Connected Automated Vehicles*, 2023).

U Tabeli 1 prikazano je poređenje tehničkih karakteristika radio komunikacija naprednih ITS sistema i CAV sistema.

Tabela 1. *Poređenje tehničkih karakteristika naprednih ITS sistema i CAV sistema*

	Domet pokrivanja	**Veličina paketa (uključujući *overhead)***	**Kašnjenje**	**Verovatnoća uspešnog slanja paketa**	**Pouzdanost servisa**
ITS	*Ad hoc* komunikacija do 1000 m	380 bajta - 1900 bajta	Manje od 100 ms	Više od 90% na autoputa pri udaljenosti od 500 m. Više od 90 % u gradskim i prigradskim naseljima na udaljenosti od 150m.	90% - dovoljno da obezbedi verovatnoću manju od 5% da će dve uzastopne sigurnosne poruke biti pogrešne na distanci od 300 m.
CAV	*Ad hoc* komunikacija do 1000 m. Komunikacija može da uključuje i hibridnu implementaciju ćelijskih radio komunikacionih sistema	400 bajta - 6000 bajta	Manje od 10 ms	Više od 90%.	99,9% - dovoljno da obezbedi operacije autonomnog vozila sa nula grešaka

Različite oblasti primene CAV-a imaju različite tehničke zahteve za telekomunikacione mreže. Automobilska industrija propisala je sedam klasa primene CAV (svaka primena može pripadati jednoj ili više klasa):

1) Bezbednost - Ova klasa pruža povećanu bezbednost za vozila i vozače. Primeri ove klase su kočenje u slučaju opasnosti, pomoć u raskrsnici, pomoć za izbegavanje sudara i pomoć prilikom promene trake.

2) Upravljanje vozilom - Ova klasa primene je jako bitna za proizvođače automobila. Proizvođači mogu da koriste podatke prikupljene sa senzora za ažuriranje ECU (*Engine Control Unit*) softvera ili podršku na daljinu.
3) Pogodnosti - Ova klasa je primarno namenjena vozačima i pruža im brojne olakšice, kao što su kooperativna navigacija, autonomno pametno parkiranje itd. Ova primena nema veliki bezbednosni značaj ali ima veliku vrednost za vozača.
4) Autonomna vožnja - Ova klasa se odnosi isključivo na vozila koja imaju mogućnost samo-upravljanja. Primene su autonomna vožnja, upravljanje na daljinu itd.
5) Kretanje u grupi - Ova klasa primene omogućava kretanje vozila u grupi. Primeri ove primene su upravljanje grupom, određivanje pozicije u grupi, raspuštanje grupe, upravljanje rastojanjima u grupi. Ove primene su jako pogodne za kompanije koje se bave transportom (Pauca et al., 2020).
6) Efikasnost u saobraćaju i očuvanje okoline - Ova klasa je prevashodno namenjena za upravljanje u gradovima. Primeri primene u ovoj klasi su pametno rutiranje vozila, informacije o gužvi u saobraćaju i optimizacije brzine u funkciji očuvanja životne sredine.
7) Društvo i društvena zajednica - Ova klasa obuhvata primene koje su od značaja za društvo i javne službe generalno, kao što su npr. policija, vatrogasna služba i druge hitne službe. Primeri primene u ovoj klasi su informacija o vozilu hitne službe u blizini, izveštaji sudara itd. (*Report ITU-R M.2534-0 - Connected Automated Vehicles*, 2023, Zhang et al., 2021).

Primene koje su karakteristične isključivo za CAV vozila su:

1) Koordinisano udruživanje vozila - Ova primena smatra se jednom od osnovnih, jer se koristi u drugim složenijim scenarijima. Koordinisano udruživanje vozila uključuje razmenu informacije između dva vozila koja treba da se udruže u određenoj tački. Informacije koje se razmenjuju su predviđena trajektorija kretanja vozila, brzina, ubrzanje itd.
2) Koordinisano manevrisanje vozilom - Ideja ove primene je da automobil šalje informaciju ostalim vozilima o njegovoj narednoj planiranoj trajektoriji kretanja. Na ovaj način povećava se koordinacija učesnika u saobraćaju i smanjuje se verovatnoća nezgode.
3) Kreiranje plotuna vozila - Ova primena predstavlja specijalan slučaj primene koordiniranog manevrisanja vozilom. Plotun vozila uključuje nekoliko vozila koja se kreću u konvoju. Najčešća praktična primena je plotun kamiona. U plotunu kamiona, vodećim kamionom upravlja čovek, dok ga ostali kamioni bez vozača prate na odgovarajućoj distanci. Primer ove primene prikazan je na Slici 5 (Alighanbari & Azad, 2020, Li & He, 2018). Plotun vozila se aktivno razvija i najzastupljenije je u Japanu. Zbog svoje popularnosti postoji dosta istraživačkih radova koji se bave ovom primenom. Istraživanja su pokazala da ukoliko se vozila međusobno kreću u neposrednoj blizini, zbog smanjenja otpora vazduha vozila koja prate vodeće vozilo, utrošak goriva se značajno smanjuje. Rezultati nekih istraživanja pokazuju da ukoliko se vozila kreću sa međusobnim rastojanjem od 4 m i sa brzinom od 80 km/h, može se postići ušteda goriva od 15%. Ukoliko bi se kretala sa rastojanjem od 2 m, ušteda bi bila oko 25 % (*Report ITU-R M.2534-0 - Connected Automated Vehicles*, 2023).
4) Razmena neobrađenih podataka između vozila - Ova ideja omogućava razmenu neobrađenih podataka koje vozilo prikuplja svojim kamerama, senzorima i lidarima sa drugim vozilima. Na ovaj način vozila proširuju svest o svojoj okolini dobijajući informacije o objektima koji se ne nalaze u njihovom prostoru vidljivosti.
5) Upravljanje vozilom na daljinu - Upravljanje vozilom na daljinu je jako korisno u situacijama kada je autonomna vožnja otežana. U tom slučaju operator koji se nalazi na udaljenoj lokaciji upravlja vozilom u realnom vremenu koristeći video signal koji se prenosi sa automobila. Da bi ovo bilo moguće, neophodno je da vozilo ima bežičnu konekciju sa operatorom.
6) Autonomno parkiranje vozila - Autonomno parkiranje ima primenu u različitim sektorima. Realizuje se tako što vozač ostavlja vozilo na definisanoj lokaciji odakle vozilo samostalno pronalazi mesto za parkiranje. Vozač kada želi, može putem aplikacije izabrati lokaciju gde želi da ga vozilo sačeka (*Report ITU-R M.2534-0 - Connected Automated Vehicles*, 2023).

Slika 5. *Plotun kamiona*

3. STANDARDIZACIJA INFORMACIONO-KOMUNIKACIONIH TEHNOLOGIJA KOJE PODRŽAVAJU POVEZANA I AUTONOMNA VOZILA

Bežične tehnologije koje se koriste na pristupnom nivou u povezanim i autonomnim vozilima pripadaju sledećim grupacijama standarda: IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*) i 3GPP (*3rd Generation Partnership Project*) standardima.

IEEE tehnologija je zasnovana na standardu IEEE 802.11p. Implementacija ovog standarda u Evropi nosi naziv ITS-G5, dok se u Sjedinjenim Američkim Državama koristi naziv DSRC (*Dedicated Short Range Communication*). U Japanu se koristi naziv ITS Connect.

3GPP tehnologija se zasniva na unapređenjima D2D (*Device to Device*) komunikacije koja je bila definisana kao deo ProSe servisa za podršku *ad hoc* komunikacija. Tehnologije koje ih podržavaju su LTE V2X (*Long Term Evolution - Vehicle to Everything*) i NR V2X (*New Radion - Vehicle to Everything*). Ono što je karakteristično za 3GPP standard je neophodna pokrivenost baznim stanicama, kako bi bila moguća komunikacija vozila sa mrežom.

Radio komunikacija je jedan od bitnijih delova CAV sistema, ali nije jedini. Postoji veliki broj drugih aspekata na koje je neophodno obratiti pažnju. Neki od njih su: funkcionalna bezbednost, robusno pozicioniranje, mašinsko učenje itd. Radio komunikacije predstavljaju samo jedan element u kompleksnom sistemu.

Tehnologije koje se koriste na višim slojevima iznad pristupnog nivoa definisane su u standardima (*Report ITU-R M.2534-0 - Connected Automated Vehicles*, 2023):

1) ETSI ITS skup standarda.
2) CET skup standarda.
3) IEEE 1609 skup standarda.
4) SAE skup standarda.
5) CCSA skup standarda.
6) China-SAE skup standarda.

Standardi koji definišu bezbednost u kontekstu CAV dati su u ITU preporuci ITU-T X.1372 (*ITU-T X.1372, Security Guidelines for Vehicle-to-Everything (V2X) Communication*, 2020).

Bez obzira na protokole koji se koriste na pristupnom nivou, sistem uređaja koji se koriste za radio komunikaciju je sličan i sastoji se od:

1) Oprema u vozilu - OBE predstavlja opremu pomoću koje korisnici komuniciraju sa ostalim uređajima, kao i sa okolinom. Oprema uključuje transiver koji ostalim učesnicima pruža informacije o kretanju vozila kao što su: trenutna lokacija, brzina, pravac kretanja. Takođe, moguće je pružanje i dodatnih informacija koristeći senzore koji se nalaze na automobilu.
2) Oprema pored puta - Ova oprema pruža tri osnovne funkcionalnosti. Prva funkcija je pružanje informacija korisniku o stanju na putu. Druga funkcija omogućava vozilima da se povežu na mrežne

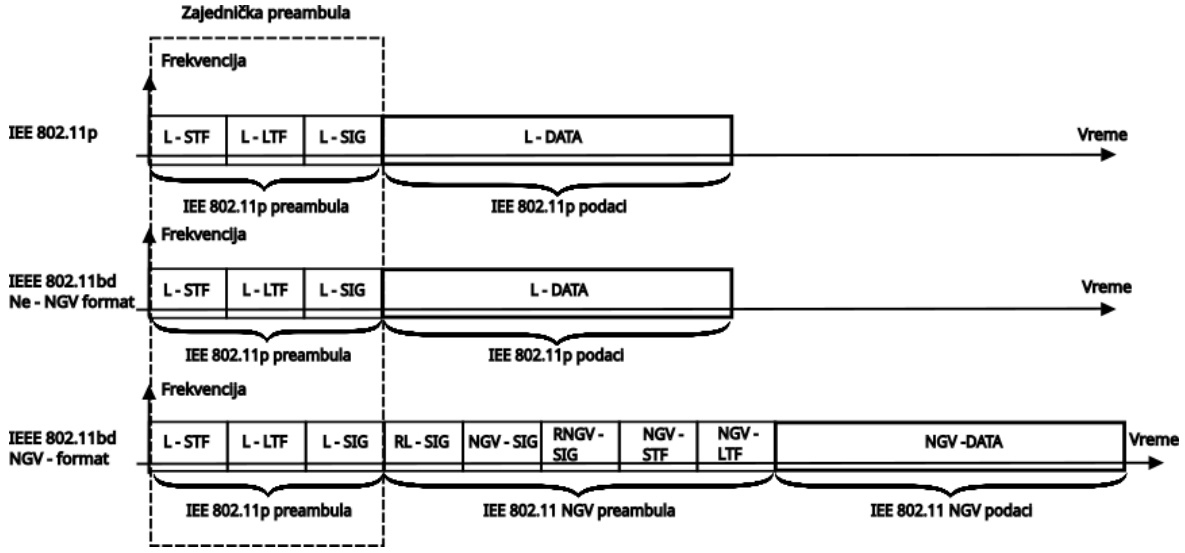
resurse na kojima su pokrenute aplikacije koje vozilo koristi, i treća funkcija je upravljanje bezbednošću povezanih autonomnih vozila.

3) Jezgro sistema (*Core systems*) - Ovaj deo infrastrukture obezbeđuje prenos informacija do aplikacija koje korisnici koriste.
4) Sistemi za podršku (*Support systems*) - Ovaj deo je prevashodno namenjen upravljanju bezbednošću prilikom uspostavljanja komunikacije.
5) Komunikacioni sistemi (*Communications systems*) - Ovaj deo integriše prethodno navedene sisteme i obezbeđuje bezbednu komunikaciju vozila sa aplikacijama.
6) Aplikacioni sistemi (*Application-specific systems*) - Aplikacioni sistem predstavlja deo infrastrukture gde se nalaze aplikacije koje vozila koriste (Wishart, 2022).

3.1. Pregled IEEE standarda koji podržavaju CAV

IEEE 802.11p standard, kao i njegov dodatak IEEE 802.11bd, ispunjavaju sve zahteve koji se postavljaju pred povezana i autonomna vozila, a posebno dobre rezultate imaju u pogledu kašnjenja. Važno je napomenuti da pored kašnjenja pri uspostavljanju komunikacija, postoje dodatna kašnjenja koja unose aplikacije viših slojeva koje vrše obradu podataka.

Oba standarda mogu koristiti istovremeno isti kanal u istoj geografskoj regiji korišćenjem vremenskog multipleksa. 802.11bd standard podržava kompatibilnost unazad, tako što implementira dva tipa okvira na sloju linka za podatke. Prvi okvir je identičan sa okvirima standarda 802.11p, dok drugi deli zajedničko zaglavlje. Posledica ovoga je da uređaji koji koriste 802.11p standard mogu da prepoznaju nove okvire 802.11bd standarda, međutim, ne mogu da ih dekoduju; uređaji koji koristi 802.11bd standard mogu i da dekoduju okvire standarda 802.11p. Prilikom uspostavljanja komunikacije, uređaji koji podržavaju 802.11bd postavljaju kontrolni bit kako bi naznačili mogućnost korišćenja novih okvira. Prikaz okvira koje koriste ovi standard dat je na Slici 6 (*Report ITU-R M.2534-0 - Connected Automated Vehicles*, 2023).



Slika 6. *Tipovi okvira u 802.11p i 802.11bd standardu*

3.2. Pregled 3GPP standarda koji podržavaju CAV

C-V2X (*Cellular-Vehicle-to-Everything*) podrška je omogućena unapređenjima koje su donosili novi 3GPP tehnički izveštaji. LTE - V2X je definisanima u tehničkim izveštajima 14 i 15, dok je NR V2X definisan u tehničkim izveštajima 16, 17 i 18 (*Report ITU-R M.2534-0 - Connected Automated Vehicles*, 2023).

3GPP tehnički izveštaj 14, koje je donet je 2017. godine, definisao je interfejs komunikacije i frekvencijski opseg od 5,9 GHz u kome se vrši komunikacija. U 3GPP tehničkom izveštaju 15, definisane su nove mogućnosti, kao što su agregiranje nosioca i modulacije višeg reda. Ove novine su značajno uticale na povećanje protoka, kao i na smanjenje kašnjenja. Sa donošenjem 3GPP tehničkog izveštaja 16 omogućene su napredne V2X mogućnosti zasnovane na više različitih tehnologija, kao što je NR V2X, koji se koristi u kombinaciji sa LTE V2X. Napredne mogućnosti su podeljene u tri kategorije:

1) Mogućnost formiranja plotuna vozila, kojim se omogućava dinamičko formiranje plotuna vozila.
2) Mogućnost primene proširenih senzora, kojim se omogućava deljenje sirovih ili obrađenih podataka koji su prikupljeni na lokalnim senzorima sa ostalim vozilima.
3) Mogućnost napredne vožnje, koja omogućava polu-automatizovanu ili potpuno automatizovanu vožnju.

Sve prethodno navedene mogućnosti zahtevaju veoma pouzdane veze i mala kašnjenja kako bi funkcionisali na odgovarajući način. Takođe, 3GPP izveštaji definišu i KPI (*Key Performance Indicators*) parametre koji se koriste za procenu kvaliteta sistema (Wishart, 2022).

Kada je reč o praktičnoj primeni CAV sistema, V2N (*Vehicle-to-Network*) povezanost ima brojne prednosti. Primer primene je upravljanje vozilom na daljinu. U slučajevima kada vozač nije u stanju da upravlja vozilom, ili se vozilo nalazi u opasnom okruženju, moguće je upravljati vozilom sa udaljene lokacije. Takođe, mobilna mreža vrši autorizaciju korisničke opreme koja omogućava V2X komunikaciju preko mobilne mreže. Pored toga, mreža obezbeđuje integritet prenosa podataka, kao i zaštitu privatnosti korisnika.

4. REGULISANJE RF SPEKTRA ZA POVEZANA I AUTONOMNA VOZILA

Frekvencijski opseg je ograničen resurs sa kojim raspolaže svaka država. Radi što efikasnijeg korišćenja spektra, potrebno je detaljno planiranje namene svakog dela opsega. CAV još uvek nema jasno definisan opseg namenjen za komunikaciju između vozila. Preporučeni spektar namenjen za bežične komunikacije u ITS sistemima definisan je u ITU-R M.2121 preporuci (*Recommendation ITU-R M.2121-1 (12/2023) - Harmonization of Frequency Bands for Intelligent Transport Systems in the Mobile Service*, 2023). Međutim, ova preporuka ne uzima u obzir pojedinačne primene automatizacije. Očekuje se da će dalji razvoj CAV-a uticati na definisanje jasne klasifikacije i tražnje za spektrom za različite namene.

Istraživanja koja su već sprovedena pokazuju da je za neke primene moguća komunikacija u delu spektra oko 60 GHz, koji nije definisan preporukom koja se odnosi na dodelu spektra u ITS-u. Ovaj deo spektra bi se koristio za komunikaciju na malim razdaljinama, kao npr. pri kretanju plotuna vozila (*Report ITU-R M.2534-0 - Connected Automated Vehicles*, 2023).

U Tabeli 2 se nalaze trenutni zahtevi za spektrom u različitim opsezima. Data tabela se ne odnosi na delove spektra koji su potrebni za komunikaciju sa mobilnom mrežom. Međutim, očekuje se da će sve primene CAV-a koje koriste mobilnu mrežu, koristiti i deo spektra koji je namenjen za 4G/5G mrežu. Takođe, analizu zahtevanog spektra potrebno je izvršiti za svaku zemlju gde se implementira CAV, jer od gustine vozila i uslova na putu zavisi i neophodni spektar (*Report ITU-R M.2534-0 - Connected Automated Vehicles*, 2023).

Tabela 2. *Procene neophodne širine spektra u različitim opsezima*

Frekvencijski opseg	Opis	Trenutna dostupnost	Zahtevani spektar
5.9 GHz	Glavni frekvencijski opseg namenjen za implementaciju bezbednosti na putu.	Trenutno je prema preporuci ITU-R M.2121 deo spektra 5850/5855 - 5925 MHz namenjen za ITS.	U urbanim sredinama tipična vrednost je oko 123 MHz, dok je na autoputu tipična vrednost oko 114 MHz.
Milimetarski talasi	Deo spektra namenjen komunikacijama na malim razdaljinama, sa velikim protokom i malim kašnjenjima.	U Evropi je za ITS namenjen deo spektra oko 60 GHz.	Trenutne procene su da je potrebno bar 2 GHz propusnog opsega.
< 1 GHz	Deo spektra namenjen komunikaciji na većim udaljenostima, za prenos kontrolnih informacija i kao redundantni link koji se koristi za bezbednost.	U Japanu je alociran deo spektra oko 760 MHz za bezbednost u saobraćaju.	Najmanje 10 MHz

5. REZULTATI REGULISANJA RADIO KOMUNIKACIJA U KONTEKSTU POVEZANIH I AUTONOMNIH VOZILA PO REGIONIMA

CAV tehnologija neprekidno napreduje, kako na tehničkom tako i na regulatornom planu. Širom sveta postoji veliki broj projekata čiji je krajnji cilj unapređenje CAV tehnologije. U ovom poglavlju dat je pregled trenutnih dostignuća u oblasti regulisanja radio komunikacija u kontekstu CAV.

5.1 Evropa

U Evropi je već završen veliki broj projekata koji se bave kooperativnom povezanom i autonomnom vožnjom. Projekti su se bavili različitim nivoima automatizacije, a neki od projekata su: 5G NETMOBIL, ADAS&ME, AdaptIVe, AutoNet2030, Fraunhofer FOKUS CMP, ICT4CART. Cilj svih projekata bio je unapređenje performansi automatizovane vožnje korišćenjem radio komunikacija. Međutim, iz pravnih razloga nisu svi projekti uključivali autonomna vozila.

Većina projekata je kao tehnologiju radio komunikacije koristila DSRC, međutim, nekoliko projekata je istraživalo i druge tehnologije. Primer projekta koji je istraživao 5G tehnologiju radio komunikacije je 5G NETMOBIL.

5.2 Severna Amerika

U Kanadi, država i industrija zajedno učestvuju u istraživanju, aktivno prikupljajući podatke i vršeći testiranja u različitim okruženjima sa ciljem procene performansi i bezbednosti sistema. Iako Kanada nema deo frekvencijskog opsega koji je isključivo namenjen CAV-u, postoji deo spektra od 30 MHz (5895-5925 MHz) koji je namenjen ITS-u.

Sjedinjene Američke Države aktivno rade na regulatornom i neregulatornom planu sa ciljem omogućavanja što šire primene autonomnih vozila. Krajnji cilj je potpuna integracija CAV tehnologije u nacionalni sistem saobraćaja i transporta. SAD takođe nije namenio deo spektra isključivo za CAV. 2020. godine, SAD su odlučile da smanje deo spektar koji je prethodno bio dodeljen ITS-u sa 75 MHz na 30 MHz i definisale su korišćenje 3GPP standarda.

5.3 Azija

Kina je 2018. godine dodelila 20 MHz spektra za LTE V2X radio komunikacione sisteme. Sistemi su koji uključuju pokrivanje kako urbanih, tako i ruralnih delova implementirani u nekim delovima Kine. 2020. godine pokrenuta je ideja o korišćenju 5G tehnologije, a već 2021. i 2022. godine nastale su i prve implementacije. Aplikacije su prevashodno namenjene za bezbednost na putu, pružajući informacije o semaforima i ograničenjima na putu.

Veliki napredak na polju autonomnih vozila na svetskom nivou doveo je do velikog razvoja autonomne vožnje i u Japanu. Na tržištu se pojavio veliki broj vozila sa nivoom automatizacije 3. Japan se intenzivno bavi razvojem autonomnih vozila; alociran je spektar namenjen za autonomna vozila na frekvenciji oko 5.9 GHz, u širini od 30 MHz. Programi razvoja u Japanu se prvenstveno bave unapređenjem bezbednosti u saobraćaju i smanjenju broja saobraćajnih nezgoda.

Republika Koreja je još jedna azijska zemlja koja se bavi razvojem autonomnih vozila. Kao i u drugim državama, cilj je unapređenje bezbednosti u saobraćaju, analiza različitih aspekata kreiranja plotuna vozila, kao i razvoj autonomnih autobusa. Primarna tehnologija radio komunikacije između vozila je 5G mobilna mreža (Wishart, 2022).

6. PREPREKE ZA ŠIRU IMPLEMENTACIJU POVEZANIH I AUTONOMNIH VOZILA

Tri osnovna problema sa kojima se CAV suočava su: tehnički izazovi, pravni izazovi i društveni izazovi. Za široku primenu CAV-a neophodno je rešiti ove probleme, a kako bi problemi bili rešeni neophodno je definisanje standarda i regulatornih normi.

6.1 Tehnički izazovi

Najznačajniji tehnički izazovi se odnose na: softverski segment sistema, kašnjenje i bezbednost sistema.

Softverski segment CAV sistema je veoma složen. Iz tog razloga, moguće su brojne neočekivane greške. Greške u softverskim rešenjima mogu nastati na višim slojevima, gde se obrađuju podaci prikupljeni sa senzora, ili na nižim slojevima, gde se aktuatorima zadaju odgovarajuće komande. Kako bi se unapredila pouzdanost softverskih rešenja, potrebno je sprovesti sveobuhvatna testiranja.

Dodatni problem predstavlja kašnjenje, koje nije moguće eliminisati. Većina primena CAV tehnologije ima veoma stroge zahteve po pitanju kašnjenja; zbog toga je potrebno primeniti odgovarajuće tehnike kako bi se kašnjenje minimiziralo.

Bezbednost komunikacija je jedan od najvećih problema sa kojim se CAV suočava. Sajber napadi su u današnjem društvu veoma česta pojava, i iz tog razloga potrebno je preduzeti sve mere kako ne bi došlo do uspešnog napada. Posledice napada mogu biti ozbiljne, kao npr. preuzimanje kontrole nad vozilom (Almehrezi et al., 2020).

Svi prethodno opisani tehnički problemi mogu se objediniti u jedan opšti problem planiranja i implementacije infrastrukture. U opštem slučaju, CAV sistem je veoma složen i zahteva detaljno planiranje. Ovaj proces je tehnički zahtevan i zahteva velika novčana ulaganja.

6.2 Pravni izazovi

Uvođenje autonomnih vozila iniciralo je i veliki broj pravnih problema. Prvo pitanje koje se postavlja je definicija autonomnog vozila, kao i koja se vozila mogu smatrati autonomnim. Sledeći problem koji se jasno nameće je definisanje vozača. S obzirom na to da autonomnim vozilom upravlja više entiteta, kao što su: operator mreže, softver i korisnik, postavlja se pitanje, "Ko je vozač?".

Iz ova dva osnovna pitanja proizilaze drugi problemi, kao što je problem "Ko je kriv u slučaju nezgode?". Odgovor na ovo pitanje je jako teško utvrditi zbog kompleksnosti sistema. Da li je došlo do hardverske greške u samom vozilu, da li je kriv operator mreže ili je kriva kompanija koja se bavila razvojem softvera? Ovo dalje dodatno otežava posao osiguranja vozila.

Takođe, jako je važno pitanje privatnosti podataka korisnika. Pošto korisnici koriste mrežu operatora, operator u svakom trenutku ima podatke o svim korisnicima, kao i njihovim lokacijama u realnom vremenu. Iz tog razloga je neophodno definisati zakon koji štiti privatnost podataka korisnika.

Ovo su osnovni pravni problemi sa kojima se CAV suočava. Uslov da neka tehnologija bude široko primenjena je postojanje dobre pravne regulative (Bensrhair & Bapin, 2021, Hamid, 2022).

6.3 Društveni izazovi

CAV tehnologija može imati značajan uticaj na društvo. Sa pojavom automatizacije u različitim industrijskim oblastima dolazi do smanjenja broja radnika. Razlog tome je što su mašine obično ekonomski isplativije, a često i efikasnije od ljudi. Primer poslova koje bi CAV potencijalno mogao da ugrozi je profesionalni vozač kamiona. Kretanje vozila u grupi omogućava da konvoj kamiona ima samo jednog vozača.

Pored uticaja na tržište rada, nove tehnologije često imaju problem sa društvenim prihvatanjem. Ljudi su svesni kompleksnosti problema autonomnog upravljanja vozilom, kao i posledica koje mogu doći ukoliko sistem nije adekvatno implementiran. Iz tog razloga, društveno prihvatanje CAV tehnologije je sporo. Kako bi ljudi stekli poverenje u tehnologiju neophodno je da regulative koje se donose budu transparentne.

7. ZAKLJUČAK

Razvoj novih tehnologija neprekidno omogućava inovativne načine rešavanja brojnih izazova u drumskom saobraćaju. U ovom kontekstu, povezana i autonomna vozila predstavljaju izuzetno značajnu oblast koja se zasniva na integraciji informacija prikupljenih putem senzora smeštenih na vozilima i prenošenju tih informacija drugim vozilima i ostaloj infrastrukturi. Ova kombinacija omogućava vozilima da budu u potpunosti povezana i sposobna za autonomno upravljanje. Povezana i autonomna vozila predstavljaju spoj tehnološkog napretka

i društvenih potreba, ali je ključno kontinuirano raditi na razvoju i implementaciji tehnologija uz istovremeno rešavanje izazova kako bi se osiguralo da ova inovacija donese maksimalne koristi društvu.

U ovom radu dat je sveobuhvatni pregled tehnologija povezanih i autonomnih vozila, sa posebnim naglaskom na uspostavljanje radio komunikacija između vozila. Takođe, u radu su analizirani različiti problemi sa kojima se CAV suočava u svom razvoju i implementaciji. To uključuje izazove u pogledu bezbednosti, privatnosti, regulative i standardizacije. Identifikacija ovih problema je ključna za dalji napredak CAV.

Definisanje standarda i regulatornih politika u domenu CAV kasni za tehnološkim razvojem. Zbog toga je neophodno posvetiti veću pažnju ovom aspektu razvoja, kako bi se uskladio sa brzim razvojem tehnologije. Veliki potencijal ove tehnologije, na šta ukazuje veliki broj država u svetu koje se bave razvojem, uticao je na ubrzanje donošenja odgovarajućih regulatornih mera. Kako bi se uspostavili odgovarajući standardi i regulatorne mere koje treba da omoguće unapređenje bezbednosti u saobraćaju i podsticanje inovacija u što kraćem vremenskom periodu, neophodna je koordinacija između organizacija i deljenje postignutih rezultata istraživanja.

Literatura

[1] Alighanbari, S., & Azad, N. L. (2020). Multi-Vehicle Coordination and Real-time Control of Connected and Automated Vehicles at Roundabouts. *2020 IEEE 3rd Connected and Automated Vehicles Symposium (CAVS)*, 1–6. https://doi.org/10.1109/CAVS51000.2020.9334596

[2] Almehrezi, F. R., Yeun, C. Y., Yoo, P. D., Damiani, E., Hammadi, Y. A., & Yeun, H. (2020). An Emerging Security Framework for Connected Autonomous Vehicles. *2020 7th International Conference on Behavioural and Social Computing (BESC)*, 1–4. https://doi.org/10.1109/BESC51023.2020.9348317

[3] Bensrhair, A., & Bapin, T. (Eds.). (2021). *From AI to Autonomous and Connected Vehicles: Advanced Driver-Assistance Systems* (1st edition). Wiley-ISTE.

[4] Hamid, U. Z. A. (2022). *Autonomous, Connected, Electric and Shared Vehicles: Disrupting the Automotive and Mobility Sectors*. SAE International.

[5] *ITU-T X.1372, Security guidelines for vehicle-to-everything (V2X) communication*. (2020).

[6] Li, Y., & He, C. (2018). Connected Autonomous Vehicle Platoon Control Considering Vehicle Dynamic Information. *2018 37th Chinese Control Conference (CCC)*, 7834–7839. https://doi.org/10.23919/ChiCC.2018.8483514

[7] Paret, D., & Rebaine, H. (2022). *Autonomous and connected vehicles: Network architectures from legacy networks to automotive ethernet* (B. A. Engel, Trans.). Wiley.

[8] Pauca, O., Caruntu, C. F., & Maxim, A. (2020). Trajectory Planning and Tracking for Cooperative Automated Vehicles in a Platoon. *2020 24th International Conference on System Theory, Control and Computing (ICSTCC)*, 769–774. https://doi.org/10.1109/ICSTCC50638.2020.9259780

[9] *Recommendation ITU-R M.2121-1 (12/2023)—Harmonization of frequency bands for Intelligent Transport Systems in the mobile service*. (2023).

[10] *Report ITU-R M.2534-0—Connected automated vehicles*. (2023).

[11] *Road traffic injuries*. (n.d.). Retrieved March 18, 2024, from https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/road-traffic-injuries

[12] *The 6 Levels of Vehicle Autonomy Explained | Synopsys Automotive*. (2023). Retrieved March 18, 2024, from https://www.synopsys.com/automotive/autonomous-driving-levels.html

[13] Wishart, J. (2022). *Fundamentals of Connected and Automated Vehicles*. SAE International.

[14] Zhang, Z., Yu, L., Fan, X., Li, Y., & Wang, L. (2021). A Survey of V2X Testing for Cooperative Connected and Automated Mobility. *2021 IEEE 24th International Conference on Computer Supported Cooperative Work in Design (CSCWD)*, 942–946. https://doi.org/10.1109/CSCWD49262.2021.9437817

[15] Ziyad, M., Naranje, V., Suresh, S., Mishra, V. P., & Salunkhe, S. (2021). Intelligent Traffic System for Sustainable Mobility. *2021 International Conference on Computational Intelligence and Knowledge Economy (ICCIKE)*, 504–507. https://doi.org/10.1109/ICCIKE51210.2021.9410725

ANALIZA EFIKASNOSTI UVOĐENJA STIMULATIVNIH MJERA ZA UPOTREBU SISTEMA ENP NA AUTOPUTU „9. JANUAR“

Bojan Mihaljčić[1], *„Uniqa“ osiguranje d.d. Sarajevo, Bosna i Hercegovina*
Goran Mihaljčić, *“Triglav“ osiguranje a.d. Banja Luka, Bosna i Hercegovina*
Vuk Bogdanović, *Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, Srbija*
Vladimir Gatarić, *JP „Autoputevi RS“ d.o.o. Banja Luka, Bosna i Hercegovina*

Rezime: *Elektronska naplata putarine (ENP) predstavlja savremeni model beskontaktnog plaćanja putarine upotrebom TAG uređaja. Za razliku od klasičnih, manuelnih sistema naplate putarine putem kartice, ENP ima brojne prednosti koje se ogledaju u kraćem vremenu opsluge, što direktno utiče na smanjene zagušenja, smanjenja vremena putovanja i emisije štetnih gasova, ušteda goriva, a indirektno na povećanje bezbjednosti saobraćaja. Provedenim istraživanjem 2020. godine na naplatnoj stanici Jakupovci, na auto-putu “9. januar”, na naplatnim rampama sa manuelnom naplatom putarine, koje služe za opsluživanje vozila koja se isključuju sa auto-puta, utvrđeni stepen iskorišćenja je bio preko 20 puta veći od stepena iskorišćenja naplatnih rampi sa ENP uređajem. Istraživanjem sprovedenim u Srbiji, na naplatnoj stanici Dobanovci auto-puta E-70, stepen iskorišćenja naplatnih rampi ENP je bio višestruko veći. Nakon realizacije mjera od strane upravljača, u 2024. godini sprovedeno je novo istraživanje čiji rezultati su pokazali porast stepena iskorišćenja naplatnih rampi sa ENP. U okviru rada prikazane su mjere sprovedene od strane upravljača, uporedna analiza rezultata istraživanja prije i nakon primene mjera za povećanje elektronske naplate putarine, kao i efekti primenjenih mjera.*

Ključne reči: *ručna naplata putarine, ENP, stimulativne mere, porast stepena iskorišćenja.*

ANALYSIS OF THE EFFECTIVENESS OF INTRODUCING STIMULATIVE MEASURES FOR THE USE OF THE ENP SYSTEM ON THE HIGHWAY "JANUARY 9"

Bojan Mihaljčić, *„Uniqa“ insurance d.d. Sarajevo, Bosnia and Herzegovina*
Goran Mihaljčić, *“Triglav“ insurance a.d. Banja Luka, Bosnia and Herzegovina*
Vuk Bogdanović, *University of Novi Sad, Faculty of Technical Sciences, Serbia*
Vladimir Gatarić, *Public Company ,,Republic of Srpska Motorways” Banja Luka, Bosnia and Herzegovina*

Abstract: *Electronic toll collection (ENP) represents a modern model of contactless toll payment using a TAG device. Unlike classic, manual card toll collection systems, ENP has numerous advantages that are reflected in shorter service times, which directly affects reduced congestion, reductions in travel time and emissions of harmful gases, fuel savings, and indirectly increases traffic safety. The research carried out in 2020 at the Jakupovci toll station, on the highway "9. January", at the toll ramps with manual toll collection, which are used to serve vehicles that turn off the highway, the determined degree of utilization was over 20 times higher than the degree of utilization of the toll ramps with ENP device. According to research carried out in Serbia, at the Dobanovci toll station of the E-70 highway, the degree of utilization of the ENP toll ramps was several times higher. After the implementation of the measures by the management, a new survey was conducted in 2024, the results of which showed an increase in the degree of utilization of toll plazas with ENP. The paper presents the measures implemented by the management, a comparative analysis of research results before and after the implementation of measures to increase electronic toll collection, as well as the effects of the applied measures.*

Keywords: *manual toll collection, ENP, incentive measures, increase in utilization rate.*

1. UVOD

Prvi auto-put u svijetu je izgrađen u Italiji 1925. godine, od Milana do Laghija, a prvi moderni auto-put je pušten u saobraćaj u Njemačkoj 1932. Godine, od Kölna do Bonna.

U Federaciji Bosne i Hercegovine 2001. godine započeta je izgradnja auto-puta Visoko - Sarajevo Sjever, čime je zvanično počela izgradnja koridora Vc kroz Bosnu i Hercegovinu, odnosno auto-puta A1, koja je završena 2003. godine i time predstavljala prvih 20 kilometara auto-puta u Bosni i Hercegovini [1]. Na području Republike Srpske 2004. godine započeta je izgradnja auto-puta E-661 Banja Luka - Gradiška, 2013. godine završeni su radovi čime je izgrađen i pušten u saobraćaj prvi auto-put na teretoriji Republike Srpske, dužine 26,5 kilometara [2].

[1] Bojan Mihaljčić: bojanmihaljcic@hotmail.com

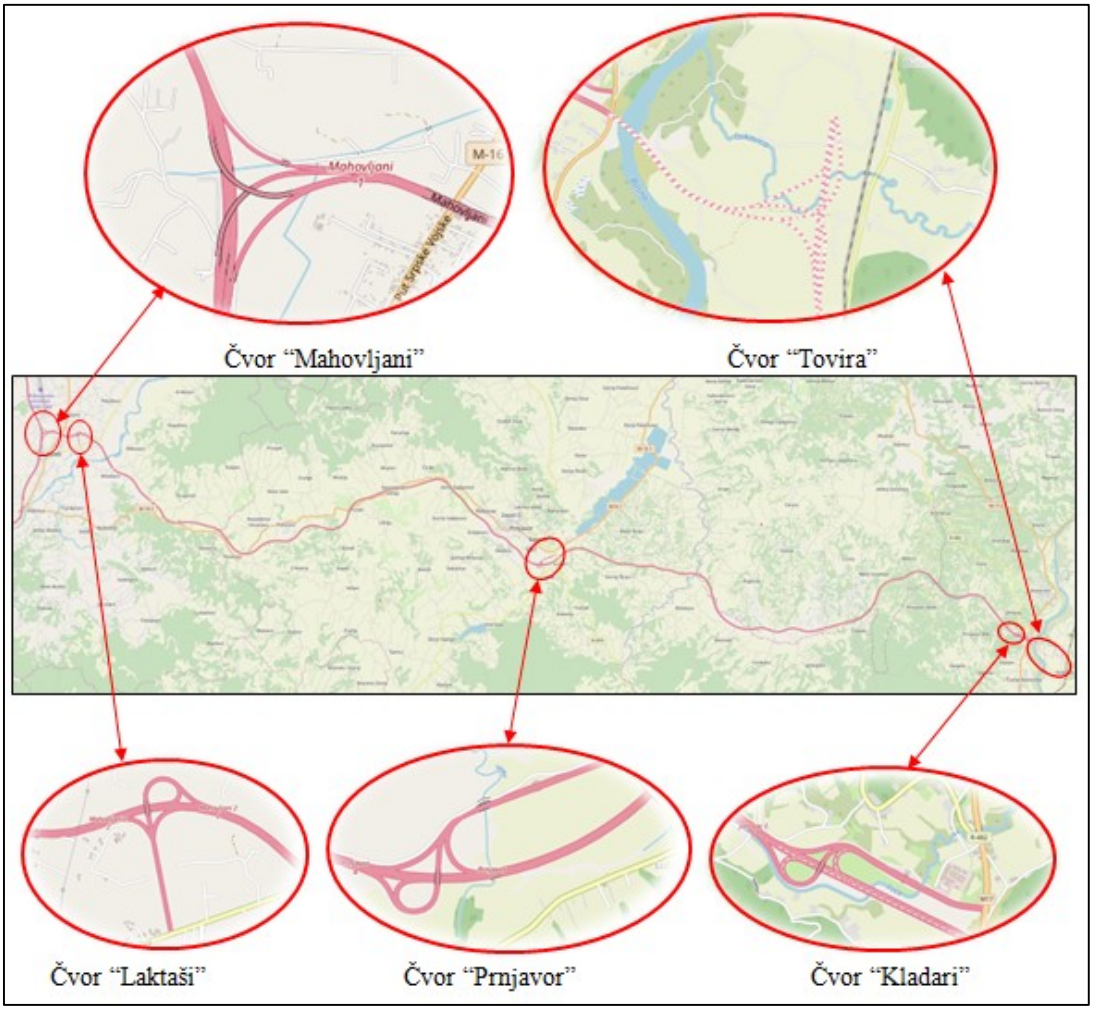
Prva naplata putarine na postojećim auto-putevima u Federaciji Bosne i Hercegovine počela je 1. juna 2008. godine, dok je u Republici srpskoj prva naplata počela 16. marta 2015. godine [1,2]. Naplatom putarine prikupljaju se sredstva za održavanje postojećih i izgradnju novih dionica auto-puteva. U nekim zemljama naplata putarine se vrši putem naplatnih rampi, tj. zatvorenog ili otvorenog sistema naplate (poput BiH, Srbije, Hrvatske Makedonija, itd.), neke zemlje su to uredile korištenjem tzv. vinjeta (Slovenija, Bugarska i sl.), a neke kroz dodatne poreze za svoje državljane. Svi ovi sistemi naplate putarine imaju svoje prednosti i mane.

Jedan od najvažnijih elemenata svakog putovanja jesu vremenski gubici koji se javljaju svakodnevno u manjem ili većem obimu. Uzroci vremenskih gubitaka su brojni i na njih se ne može uticati ali po pitanju naplate putarine postoji veliki potencijal za poboljšanje efikasnosti rada stanica za naplatu. Poslednjih nekoliko desetina godina došlo je do poboljšanja efikanosti rada sistema za naplatu putarine upotrebom elektronske naplate putarine (ENP) gdje se plaćanje vrši bez zadržavanja na naplatnoj rampi.

U okviru rada prikazane su mjere sprovedene od strane upravljača auto-puta koje se odnose na povećanje upotrebe sistema elektronske naplate putarine, kao i uporedna analiza rezultata istraživanja prije i nakon realizacije navedenih mjera. Konačan cilj rada je da se kroz realne podatke o saobraćaju prikaže koliki su efekti primjenjenih mjera.

2. AUTOPUT "9. JANUAR", BANJA LUKA - DOBOJ

Početna stacionaža predmetnog auto-puta nalazi se iza interregionalnog čvora Mahovljani, a završna na spoju sa izgrađenim dijelom koridora "Vc" kroz Republiku Srpsku, odnosno interregionalnim čvorom Tovira, u zoni između naseljenih mjesta Johovac i Rudanka. Sama dionica auto-puta obuhvata tri čvora Laktaši, Prnjavor i Kladari, tipa „T- petlje" s cestarinskim prolazom.[2]



Slika 1. *Trasa autoputa "9. januar" Banja Luka – Doboj*
Source: (https://www.openstreetmap.org/#map=16/44.8687/17.4076)

Dužina dionice auto-puta iznosi 71+912,51 km. Kolovoz je izgrađen od asfaltnog zastora, razdjelnim ostrvom širine 4,0 m, podjeljen na dvije kolovozne trake za odvijenje dvosmernog saobraćaja. Širina jedne kolovozne trake iznosi 10,70 m, sa dvije saobraćajne trake širine po 3,75 m, zaustavnom trakom širine 2,70 m i ivičnom trakom od 0,50 m. Na nekim dionicama postoje trake za spora vozila sa lijeve odnosno desne strane kolovoza u širini od 3,30 m. Širina bankine iznosi 1,50 m. Za zaštitu od buke izgrađeni su zidovi za zaštitu od buke. [2]

Veze autoputa “9. januar” Banja Luka – Doboj, sa postojećom putnom mrežom izvršene su pomoću denivelisanih raskrsnica:[2]

- Čvor „Mahovljani“ za povezivanje autoputa “9. januar” Banja Luka - Doboj sa autoputem E-661, Banja Luka – Gradiška;
- Čvor „Laktaši“ za povezivanje autoputa “9. januar” Banja Luka - Doboj sa lokalnim putem L1, Laktaši – Laktaši (auto-put);
- Čvor „Prnjavor“ za povezivanje autoputa “9. januar” Banja Luka - Doboj sa regionalnim putem R-I-2102;
- Čvor „Kladari“ za povezivanje “9. januar” autoputa Banja Luka - Doboj sa magistralnim putem M-I-105;
- Čvor „Tovira“ za povezivanje autoputa Banja Luka-Doboj sa koridorom Vc.

2.1. Postojeći sistem za naplatu putarine na auto-putu “9. januar”, Banja Luka - Doboj

Naplata putarine na auto-putu “9. januar” vrši se u zatvorenom sistemu naplate putarine, gdje su vozila podjeljena u četiri kategorije i jednu potkategoriju.

Slika 2. *Kategorizacija vozila*
Source: (https://autoputevirs.com/wp-content/uploads/2024/02/Jakupovci.pdf)

Kod zatvorenog sistema naplate putarine, naplatne rampe se nalaze na oba kraja određene dionice autoputa (ulaz/izlaz), a takođe, sve petnje na autoputu imaju naplatne rampe, kako bi se spriječila mogućnost besplatnog korišćenja nekih dionica. U zatvorenom sistemu naplate putarine vozači uzimaju karticu na ulazu na auto-put, na rampama prilagođenim za tu namjenu. Tu karticu korisnici daju na izlaznim rampama, na kojima im se obračunava iznos putarine na osnovu dužine pređene dionice. Ako korisnik izgubi karticu, najčešće mu se naplaćuje iznos putarine koju bi platio da se vozio najdužom dionicom tog autoputa. U okviru ovog sistema može da postoji i kombinovano i varijanta elektronske naplate putarine. Elektronska naplata putarine omogućava korisniku brzu i efikasnu naplatu putarine, bez posredovanja blagajnika i čekanja na naplatnim mjestima. [3]

Sama dionica auto-puta “9. januar” Banja Luka – Doboj, obuhvata četiri naplatne stanice i to, Laktaši, Drugovići, Prnjavor i Kladari. Iste se nalaze duž dionice autoputa “9. Januar” i izgrađene su kao stanice za naplatu putarine na priključku za sve saobraćajne tokove, ulazne i izlazne sa auto-puta. Naplatna stanica Laktaši ima tri ulazne naplatne rampe i pet izlaznih, naplatna stanica Drugovići ima po jednu naplatu rampu po smjeru, naplatna stanica Prnjavor dvije ulazne i tri izlazne naplatne rampe, a naplatna stanica Kladari po četri naplatne rampe u oba smjera, za opsluživanje vozila koja ulaze ili izlaz sa autoputa. Sve stanice su sa izgrađenom infrastrukturom za manuelni sistem plaćenja putarine putem kartice i sistemom beskontaktnog plaćanja putarine upotrebom TAG uređaja – ENP.

Još jedna naplatna stanica u koju se sliva većina tokova sa auto-puta “9. januar”, a koja se ne nalazi duž njegove trase, nego na ulazu na auto-put E-661, idući iz smjera Banje Luke prema Gradišci, jeste naplatna stanica Jakupovci koja je izgrađena kao glavna naplatna stanica za sve saobraćajne tokove, posjeduje ukupno šest naplatnih rampi od kojih su tri namjenjene za opsluživanje vozila koje se uključuju na autoput, a tri za vozila koja se isključuju sa autoputa. Dvije središnje trake su reverzibilne, i po potrebi mogu da se koriste za naplatu u oba smjera.

3. METOD ISTRAŽIVANJA

Cilj istraživanja je utvrditi stepen iskorištenja naplatnih rampi sa manuelnim sistemom plaćanja kao i rampi sa ENP uređajem, prije i posle uvođenja stimulativnih mjera od strane upravljača autoputa. Konačan cilj je da se kroz realne podatke o saobraćaju prikaže koliki su efekti primjenjenih mjera.

Imajući u vidu cilj istraživanja, predmet istraživanja je brojanje opsluženih vozila prilikom naplate putarine na naplatnim rampama koje služe za opsluživanje vozila koja se isključuju sa autoputa, u zavisnosti od načina plaćanja, manuelno putem kartice ili sistemom za elektronsku naplatu putarine.

Naplatna stanica Jakupovci se nalazi sjevero-istočno od Banja Luke, na ulazu na auto-put E-661, idući iz smjera Banje Luke prema Gradiški. Imajući u vidu da se većina tokova sa auto-puta “9. januar” sliva prema Banja Luci, na naplatnu stanicu Jakupovci, ista je uzeta kao mjesto istraživanja.

Stanica je koncipirana kao jedna od stanica u zatvorenom sistemu naplate putarine na auto-putevima Republike Srpske. Posjeduje šest saobraćajnih naplatnih traka, od kojih su po jedna krajnje desna u svakom smjeru namijenjene isključivo za elektronsku naplatu, dvije srednje trake se isključivo koriste za ručnu naplatu, dok su preostale dvije kombinovane, i po potrebi mogu da se koriste i za elektronsku i za ručnu naplatu. Dvije središnje trake su reverzibilne, i po potrebi mogu da se koriste za naplatu u oba smjera, dok su preostale trake, po dvije u svakom smjeru, namijenjene isključivo za kretanje vozila i naplatu u jednom smjeru.[3]

Slika 3. *Naplatna stanica “Jakupovci” smjer Banja Luka - Gradiška*
Source: (Marjanac T. i dr., 2023)

Slika 4. *Naplatna stanica “Jakupovci smjer Gradiška – Banja Luka*
Source: (Obrada autora)

Istraživanje je rađeno 20.02.2020. godine u vremenskom periodu od jednog časa, koje je provedeno metodom brojanja opsluženih vozila po naplatnim rampama koje služe za opsluživanje vozila koja se isključuju sa autoputa, u zavisnosti od načina plaćanja putarine, a zatim, nakon provedenih mjera od strane upravljača puta, rađeno je novo istraživanje u istom vremenskom perionu posle 4 godine, odnosno 20.02.2024. godine. U vrijeme vršenja istraživanja, dvije od tri rampe služile su isključivo za sistem ručne naplate putarine, dok je treća služila za korisnike ENP.

3.1. REZULTATI ISTRAŽIVANJA PRIJE UVOĐENJA STIMULATIVNIH MJERA

Prema podacima iz Sistema za upravljanje i nadzor naplate putarine Javnog preduzeća „Autoputevi Republike Srpske“ d.o.o. Banja Luka, dobijeni su podaci da je 20.02.2020. godine, u toku 24 časa, na naplatnoj stanici Jakupovci, na rampama sa manuelnim sistemom naplate putem kartice opsluženo je 3.213 vozila, dok je sistemom za ENP opsluženo 791 vozilo, odnosno manuelni sistem naplate je koristilo **80,2%** vozača, a sistem za ENP **19,8%**.

Brojanjem opsluženih vozila na navedenoj naplatnoj stanici Jakupovci, u jednom času, od 09:00 do 10:00 broj opsluženih vozila na sve tri naplatne rampe iznosio je 296. Broj opsluženih vozila prema naplatnim rampama prikazan je u Tabeli 1.

Tabela 1. *Broj opsluženih vozila po rampama i načinu naplate*

Naplatna rampa	Način naplate	Broj opsluženih vozila	%
I naplatna rampa	Manuelni sistem	129 voz/h	**43,6**
II Naplatna rampa	Manuelni sistem	118 voz/h	**39,9**
III naplatna rampa	Sistem ENP	49 voz/h	**16,5**

Izmjereno prosječno vrijeme zadržavanja jednog vozila na naplatnoj rampi sa manuelnim sistemom naplate, prilikom plaćanja putarine iznosio je 12 s/voz, iz čega proizilazi da je broj mogućih opsluživanja u toku jednog časa

$$\frac{3600}{12} = 300\ voz/h$$

Broj mogućih opsluživanja na jednoj naplatnoj rampi sa sistemom za ENP iznosi 2000 voz/h.[4]

3.1.1. Sinteza podataka

Na osnovu broja maksimalno mogućih opsluživanja naplatnih rampi u zavisnosti od načina naplate, dolazi se do podatka da je stepen iskorištenja naplatnih rampi sa manuelnim sistemom naplate, 20.02.2020. godine, za 24 časa, iznosio

$$\rho = \frac{3.213}{(2 \times 300) \times 24} \times 100 = 22{,}3\%$$

a stepen iskorištenja naplatne rampe sa sistemom za ENP, takođe u posmatranih 24 časa

$$\rho = \frac{791}{1 \times 2000 \times 24} \times 100 = 1{,}6\%$$

U vrijeme istraživanja, brojanja opsluženih vozila dana 20.02.2020. godine, u jednom satu, od 09:00 do 10:00 časova, stepen iskorištenja za prvu naplatnu rampu sa manuelnim sistemom naplate putarine je iznosio

$$\rho = \frac{129}{1 \times 300} \times 100 = 43\%,\ \text{za drugu}\ \rho = \frac{118}{1 \times 300} \times 100 = 39{,}3\%$$

odnosno, stepen iskorištenja obe naplatne rampe u času istraživanja je iznosio

$$\rho = \frac{247}{2 \times 300} \times 100 = 41{,}2\%$$

dok je stepen iskorištenja naplatne rampe sa sistemom za ENP iznosio

$$\rho = \frac{49}{1 \times 2000} \times 100 = 2{,}5\%$$

3.2. Sprovedene mjere i rezultati istraživanja nakon istih

Javno preduzeće “Autoputevi Republike Srpske” d.o.o. je sprovelo niz mjera uz medijske kampanje kako bi podstakli korisnike autoputeva na veću upotrebnu sistema za elektronsku naplatu putarine.

Neke od sprovedenih mjera su:

- Stalni popusti pri dopuni korisničkog računa od 15%;
- Poposti pri kupovini TAG uređaja od 50% i na dopunu korisničkog računa 20%;
- Popusti pri kupovini TAG uređaja od 60%;
- Jedinstveni sistem ENP korištenjem TAG uređaja u cijeloj BiH;

Slika 3. *Kampanja 60% popusta na TAG*
Source: (Obrada autora)

Slika 3. *Kampanja “Jednim tagom kroz RS I FBiH)*
Source: (https://energologija.com)

Nakon sprovođenja mjera od strane upravljača auto-puta, takođe prema podacima iz Sistema za upravljanje i nadzor naplate putarine Javnog preduzeća „Autoputevi Republike Srpske“ d.o.o. Banja Luka, dobijeni su podaci da je 20.02.2024. godine, u toku 24 časa, na rampama sa manuelnim sistemom naplate putem kartice opsluženo 3.363 vozila, dok je sistemom za ENP opsluženo 1.979 vozila, odnosno u procentima, manuelni sistem naplate putarine je koristilo **63%** vozača, a sistem za ENP **37%**.

U vremenskom periodu od 09:00 do 10:00, brojanjem je utvrđeno da je na sve tri naplatne rampe opsluženo 374 voz/h, a broj vozila opsluženih po rampama prikazan je u Tabeli 2:

Tabela 2. *Broj opsluženih vozila po rampama i načinu naplate*

Naplatna rampa	Način naplate	Broj opsluženih vozila	%
I naplatna rampa	Manuelni sistem	137 voz/h	**37**
II Naplatna rampa	Manuelni sistem	121 voz/h	**32**
III naplatna rampa	Sistem ENP	116 voz/h	**31**

3.2.1. Sinteza podataka

Uzimajući u obzir prosječno vrijeme zadržavanja jednog vozila na naplatnoj rampi sa manuelnim sistemom naplate prilikom plaćanja putarine od 300 voz/h, kao i kod ENP od 2000 voz/h, dolazi se do podatka da je stepen iskorištenja naplatnih rampi sa manuelnim sistemom naplate dana 20.02.2024. godine, u toku 24 časa, iznosio

$$\rho = \frac{3.363}{(2 \times 300) \times 24} \times 100 = 23{,}4\%$$

a stepen iskorištenja naplatne rampe sa sistemom za ENP, takođe u posmatranih 24 časa

$$\rho = \frac{1.979}{1 \times 2000 \times 24} \times 100 = 4{,}1\%$$

Istog dana, u jednom satu, od 09:00 do 10:00 časova, stepen iskorištenja za prvu naplatnu rampu sa manuelnim sistemom naplate putarine je iznosio

$$\rho = \frac{137}{1\times300} \times 100 = 45{,}7\%$$, a za drugu $\rho = \frac{121}{1\times300} \times 100 = 40{,}3\%$

odnosno stepen iskorištenja obe naplatne rampe u posmatranom vremenu je iznosio

$$\rho = \frac{247}{2 \times 300} \times 100 = 43\%$$

dok je stepen iskorištenja naplatne rampe sa sistemom za ENP iznosio

$$\rho = \frac{116}{1 \times 2000} \times 100 = 5{,}8\%$$

4. DISKUSIJA

Uzimajući u obzir visok procenat korištenja manuelnog sistema plaćanja putarine putem kartice u vrijeme provedenog istraživanja 20.02.2020. godine, u jednom satu, od 09:00 do 10:00 časova, od 83,5%, dovelo je do toga da opsluženi broj vozila na naplatnim rampama koje se koriste za opsluživanje vozila koja se isključuju sa autoputa, od 296 voz/h, dovede do 41,2% iskorištenja ovh naplatnih rampi i pri tome prouzrokuje gužve na prilazima, a samim tim i do povećanja vremenskih gubitaka putovanja, potrošnje goriva, zagađenja životne sredine i dr.

Sistem za ENP,u posmatranom vremenskom intervalu, koristio je mali broj korisnika, svega 16%, pa je stepen iskorištenja rampi sa ENP uređajem u vrijeme vršenja istraživanja iznosio samo 2,5%.

Istraživanjem sprovedenim u Srbiji, koje se odnosi na proračun pokazatelja rada sistema naplate putarine na naplatnoj stanici Dobanovci (Šimanovci) na auto-putu E-70 [16], na naplatnim rampama koje služe za vozila koja se isključuju sa auto-puta, tj. gdje se vrši plaćanje putarine, stepen iskorištenja naplatnih rampi sa ručnom naplatom je iznosio 94%, a rampi sa sistemom ENP 21%.[4]

Nakon sprovedenih mjera od strane upravljača auto-puta, naplatne rampe sa manuelnom naplatom putarine u vrijeme vršenja drugog istraživanja, dana 20.02.2024. godine, u istom vremenskom intervalu u kojem je vršeno i prvo istraživanje, od 90:00 do 10:00 časova, koristilo je 14,5% manje korisnika, odnosno od ukupno 374 voz/h opsluženih vozila u posmatranom periodu, nih 69% koristilo je manuelni sistem naplate, ali zbog povećanog broja korisnika auto-puta, stepen iskorištenja ovih rampi je ipak bio u porastu i iznosio je 45,7%.

Naplatne rampe sa ENP uređajem u vrijeme drugog istraživanja, nakon provedenih mjera, koristio je dva puta veći broj korisnika nego prije provođenja istih, odnosno sistem za ENP je koristilo 31% vozača, što je dovelo do povećanja stepena iskorištenja ovog vida opsluživanja sa 2,5% na 5,8%.

4.1. Ograničenja i prijedlog budućih istraživanja

Ograničenje ovog istraživanja ogleda se u tome što je uporeda analiza dobijenih podataka brojanjem korisnika auto-puta koji su se isključivali na naplatnoj stanici Jakupovci i koji su koristili ENP, za razliku od manuelne naplate, vršena samo za jedan dan i jedan sat u istom danu, u vremenskom razmaku od 4 godine.

Ovo ograničenje može rezultirati nepotpunim podacima jer saobraćaj i korištenje različitih načina naplate putarine variraju u zavisnosti od doba dana, dana u sedmici, sezone ili drugih faktora. Stoga, rezultati ovog istraživanja mogu biti ograničeni u smislu generalizacije na širu populaciju ili donošenja opštih zaključaka o preferencijama korisnika u vezi s načinom naplate putarine.

Daljnje istraživanje koje bi obuhvatilo više vremenskih intervala i različite dane u sedmici, te možda čak i različite lokacije auto-puta, moglo bi pružiti potpuniju sliku o korištenju različitih načina naplate putarine i preferencijama korisnika.

5. ZAKLJUČAK

Sistem ENP polako postaje sve popularniji način naplate putarine u razvijenim zemljama zbog brzine i efikasanog način naplate. Ušteda vremena je značajna jer vozila prolaze kroz naplatne rampe bez zaustavljanja radi plaćanje, naplata se vrši automatski, što direktno utiče na smanjene zagušenja, smanjenja vremena putovanja i emisije štetnih gasova, ušteda goriva, a indirektno na povećanje bezbjednosti saobraćaja.

Zbog malog procenta upotrebe rampi sa ENP uređajem na auto-putu “9. januar”, od svega 16,5% procenata upravljač auto-puta je sproveo niz aktivnosti u cilju podizanja svijesti vozača o prednostima ovog načina plaćanja, a zatim je kroz stimulativne mjere podstakao njegovu upotrebu.

U okviru rada prikazane su mjere sprovedene od strane upravljača, uporedna analiza rezultata istraživanja prije i nakon primene mjera za povećanje elektronske naplate putarine, kao i efekti primenjenih mjera. Svrha rada je da ukaže na mogućnost uticaja upravljača na korisnike auto-puta kroz medijske kampanje i stimulativne mjere.

Prelaskom sa manuelnog sistema na sistem za ENP većeg broja korisnika auto-puta povećala bi se i propusna moć opsluživanja naplatne stanice, a samim tim i njen stepen iskorištenja, pa bi na istom broju naplatnih rampi mogao biti opslužen daleko veći broj korisnika, koji se može očekivati u narednom periodu, nakon spajanja autoputa “9. januar” sa koridorom “Vc”, koji je u fazi gradnje.

Literatura

[1] Autoceste Federacije Bosne I Hercegovine, (on-line) available at: https://www.jpautoceste.ba/
[2] Autoputevi RS doo, (on-line) available at: https://autoputevirs.com/autoputevi-rs-d-o-o-banja-luka/
[3] Marjanac T., Gatarić V., Bogdanović V. (2023). Uticaj pandemije korona virusa na karakteristike protoka vozila na auto-putu E-661, 12. Međunarodna konferencija “Bezbjednost saobraćaja u lokalnoj zajednici” Republika Srpska, Banja Luka.
[4] Glavić D., Milenković M., Radosavljević S. (2018). Analiza rada stanica za naplatu putarine primenom teorije masovnog opsluživanja, Put i saobraćaj, LXIV, 3/2018, 13-19

OVERVIEW OF AUTOMATED TRAFFIC SIGNAL PERFORMANCE MEASURES (ATSPM) AND LESSONS LEARNED FROM DEPLOYMENTS - 055-T4-0217

Nemanja Dobrota[1], Stevanovic Aleksandar[2], Burak Cesme[1], and Shannon Warchol[1]
[1] Kittelson and Associates, Inc. [2] University of Pittsburgh

Abstract: *Automated Traffic Signal Performance Measures (ATSPM) represent a relatively novel concept for the management of traffic signals in the US. For a long time, the performance of traffic signals was known only through periodic field visits, hindering transportation agencies from properly managing traffic flow. With the emergence of technology about two decades ago, data from traffic signal controllers and detectors were for the first time retrieved, stored, and processed in a form that allows for a closer examination of signal performance in an ongoing manner. In this paper, we present an overview of ATSPM technology, its key components, and the types of traffic signal performance measures it provides. Additionally, we discuss the costs and benefits associated with ATSPMs based on the implementation of ATSPMs in several agencies in the US.*

Keywords: *traffic signal performance measures, high-resolution data, traffic management.*

1. INTRODUCTION – Arial, Font 10, Bold

Performance measurement of traffic signals is essential for efficient traffic operations, management, and planning. Traditionally, periodical field data collection campaigns have been major indicators of signal performance. Conventional traffic signal performance measures (TSPMs) such as average control delay, and queue lengths, have been based on periodically collected data aggregated for specific time intervals. Such practices have been one of the major limiting factors for proper management and operations of traffic signals.

In the early 2000s group of researchers from Texas [1] estimated several traffic signal performance measures by utilizing detector status events (i.e., ON, OFF) combined with signals status data (e.g., Phase Begin Green, Phase Gap Out). The study was conducted based on data from microsimulation as required data sources were not readily available from field traffic controllers [1]. Shortly after researchers from the University of Purdue were able to extract so-called high-resolution (i.e., 10Hz) signal and detector from field traffic signal controllers for the first time and generate a range of TSPMs [2]. Considering the potential of emerging data sources several State Departments of Transportation (DOTs) in the US around 2010, embarked on the development of a software platform that will allow for real-time data collection, storage, processing, and traffic signal performance reporting called Automated Traffic Signal Performance Measures (ATPSM) [3]. Up to date, there are several software solutions of the ATSPM platform that agencies are deploying to track signal performance in an automated and centralized manner.

Numerous research studies have been conducted since to address various aspects of ATPMS, such as the development of more comprehensive traffic signal performance measures [4-6], attempts to optimize traffic signal performance [7], estimation of benefits and costs associated with ATSPMs deployment [8], guidance documents for agencies on utilization of ATSPMs [9,10], and similar. This paper sheds light on the concept of ATSPM, discusses the key components, and ATSPM use cases, and provides insights into costs and benefits related to implementation of ATSPM from several agencies in the US. Lastly, we discuss some novel trends in the realm of ATSPMs.

2. OVERVIEW OF ATSPM

2.1. Components of ATSPMs

Within components of ATSPM, we discuss the main *hardware and software requirements*. In terms of hardware, there are several key components needed to establish ATSPM:

1. Traffic signal controller
2. Detector devices
3. Communication devices
4. Data storage units

In terms of traffic signal controllers, the essential piece is that controllers need to have is data-logger capable of collecting time-stamped phase and detector state changes. The majority of modern traffic signal controllers are now capable of logging high-resolution data. Table 1 shows an example of a time-stamped high-resolution data log. Event codes relate to specific signals or detection events, such as detector status changed to OFF

(event code = 81) or phase beginning green (event code = 1), whereas the Parameter column defines which signal group or detector channel relates to specific event code. The common practice in Utah DOT is to code signal phases for parameter values 1-16, and for detector channels use numbers afterward (i.e., >17). For event code, dictionary reader is referred to original documentation [11].

Table 1. *Excerpt from high-resolution signal and detection data log*

INTERSECTION ID	DATE	TIME	EVENT CODE	PARAMETER
4b2394aa-d254	1/12/2021	1:28:51.3	1	6
4b2394aa-d254	1/12/2021	1:28:51.3	1	2
4b2394aa-d254	1/12/2021	1:29:02.4	82	23
4b2394aa-d254	1/12/2021	1:29:06.6	82	61
4b2394aa-d254	1/12/2021	1:29:12.6	82	62
4b2394aa-d254	1/12/2021	1:29:12.6	82	63
4b2394aa-d254	1/12/2021	1:29:25.8	82	8
4b2394aa-d254	1/12/2021	1:29:30.1	81	23
4b2394aa-d254	1/12/2021	1:29:30.3	81	27

In terms of detection devices, strict requirements do not exist. As long as the detector is capable of indicating occupied vs non-occupied status these are sufficient. A variety of detector devices exist on the market, such as traditional inductive loops, approach-based video cameras, fish-eye cameras, and micro-wave devices among others. For pedestrian detection, “push buttons” at each intersection corner are commonly used although novel trends indicate the use of video cameras powered by image recognition. Typical detection placement used to support ATSPM is shown in Figure 1. It should be noted here that not all of the detectors presented in Figure 1 are required for ATSPM. The presented case in Figure 1, represents an ideal case and as such can support the generation of all traffic signal performance measures, which are further discussed in the subsequent section.

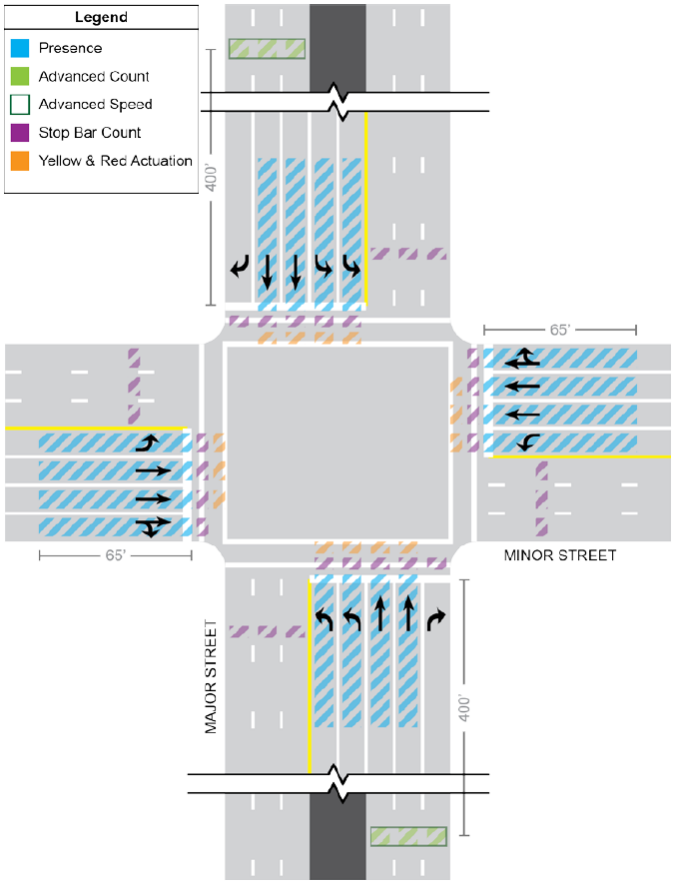


Figure 2. *Typical ATSPM Detection Layout*
Source: Adopted from NCDOT Guide On ATSPMs [9]

Communication devices such as fiber-optics and cellular networks are used to transmit data from traffic signal controllers to a centralized place. In urban areas, fiber-optic devices are commonly used to establish connections from signalized intersections to a centralized place, whereas cellular networks are commonly used in sub-urban or remote areas. It should be noted that ATSPM does not require an agency to have/operate a traffic control management center. ATSPMs could be centralized at any place where software is installed and data from intersections could be retrieved.

Lastly, transmitted data are stored in two ways, either on servers physically operated and maintained by an ATSPM-deploying agency or in a cloud-based system. For agencies operating a smaller number of signals (<200) rule of thumb is that data are stored within agency-owned data servers whereas for a larger number of intersections, agencies refer to cloud solutions. Based on some earlier ATSPM deployments, it was estimated that one signalized intersection with detection generates about 19 MB of data per day.

Collected and stored high-resolution data are then retrieved by ATSPM software, and data are processed to generate traffic signal performance measures. Considering that high-resolution log data keeps track of each event, data collected in such a way are not aggregated. Simple aggregation of data to specified time intervals (e.g., 5-minute bins), is not applicable in the case of traffic signal performance measures as these should be estimated in a cycle-by-cycle manner. Therefore, for the majority of TSPMs, ATSPM software processed data firstly to aggregate them on a cyclical level, and further aggregation on several minute bins, 15-minute bins are commonly used, is performed. Figure 2 shows the typical interface of the open-source ATSPM platform hosted by Utah DOT. Important to state is that to date there are several ATSPM software solutions available on the market.

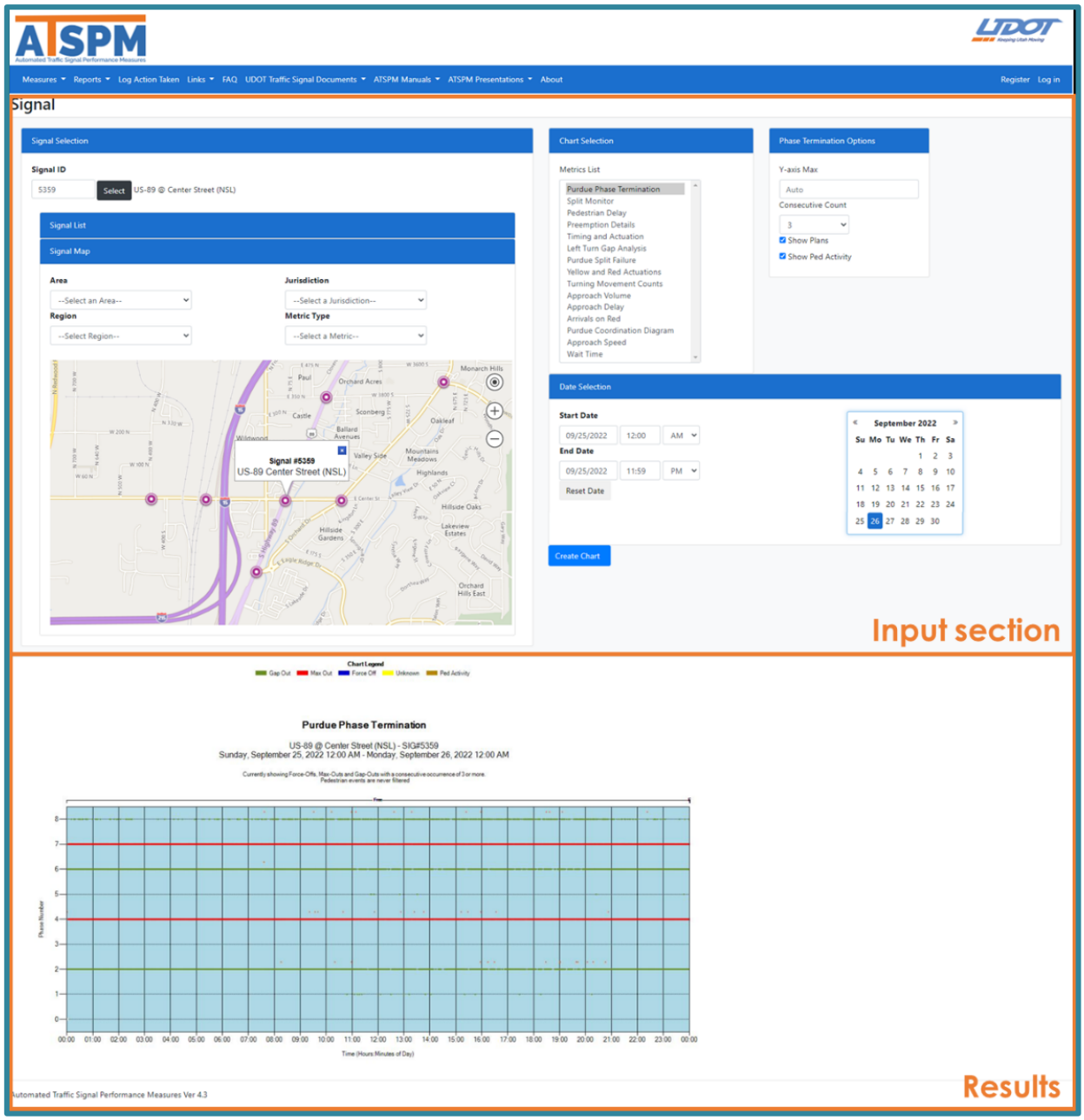


Figure 2. *UDOT ATSPMs platform interface*

2.2. Types of Traffic Signal Performance Measures

Traffic signal performance measures can be used for various purposes, such as communication equipment health monitoring, detection equipment health monitoring, measurement of delay for vehicles, non-motorized users (pedestrians and bicycles), and transit vehicles, measurement of progression quality, and safety performance measurement. Considering that each of these objectives is very distinct, various traffic signal performance measures are used to achieve this objective. Figure 3 shows TSPMs commonly used to achieve certain objectives. It is beyond the scope of this paper to describe listed TSPMs and the required detection layout for their generation, thus, the reader is directed to a relevant source [10].

OBJECTIVE	AGGREGATED STATUS REPORT(S)	INDIVIDUAL SIGNAL PERFORMANCE MEASURE(S)
1 Communication Equipment Health	• Percent of connected signals communicating	• 3.1 Communication Status • 3.2 Flash Status • 3.3 Power Failures
2 Detection Equipment Health	• Percent of detectors fully functional by mode (e.g., vehicle, pedestrian, bicycle, rail, emergency vehicle, transit, truck)	• 3.4 Detection System Status • 3.5 Vehicle Volumes (high volumes during low-traffic times) • 3.6 Phase Termination (high number of max-outs, force-offs, and/or pedestrian calls during low-traffic times) • 3.12 Pedestrian Volumes (high volumes during low-traffic times) • 3.13 Pedestrian Phase Actuation and Service (high number of pedestrian calls during low-pedestrian times) • 3.25 Preemption Details (high number of requests) • 3.26 Priority Details (high number of requests)
3 Vehicle Delay	• Average vehicle delay • Percent of cycles with unserved vehicles • Percent of movements at or near capacity	• 3.5 Vehicle Volumes (applied to capacity analysis) • 3.6 Phase Termination • 3.7 Split Monitor • 3.8 Split Failures • 3.9 Estimated Vehicle Delay • 3.10 Estimated Queue Length • 3.11 Oversaturation Severity Index • 3.18 Effective Cycle Length (for delay estimation) • 3.24 Time-Space Diagram
Pedestrians	• Minimum, maximum, and average pedestrian delay • Percent of movements with high pedestrian activity	• 3.12 Pedestrian Volumes • 3.13 Pedestrian Phase Actuation and Service • 3.14 Estimated Pedestrian Delay • 3.15 Estimated Pedestrian Conflicts • 3.18 Effective Cycle Length (for delay estimation)
Bicycles	• Minimum, maximum, and average bicycle delay • Percent of movements with high bicycle activity	• 3.5 Vehicle Volumes (applied to capacity analysis if bicycle detection is separate) • 3.9 Estimated Vehicle Delay (if bicycle detection is separate) • 3.18 Effective Cycle Length (for delay estimation)
Safety	• Percent of movements with queues that exceed storage • Percent of vehicles entering on red • Number of conflicting movements	• 3.10 Estimated Queue Length • 3.11 Oversaturation Severity Index • 3.15 Estimated Pedestrian Conflicts • 3.16 Yellow/Red Actuations • 3.17 Red-Light-Running (RLR) Occurrences
4 Vehicle Progression	• Percent of vehicles arriving on green • Percent of vehicles arriving on red	• 3.5 Vehicle Volumes (assess TOD plans) • 3.10 Estimated Queue Length • 3.11 Oversaturation Severity Index • 3.18 Effective Cycle Length (confirm coordination) • 3.19 Progression Quality • 3.20 Purdue Coordination Diagram • 3.21 Cyclic Flow Profile • 3.22 Offset Adjustment Diagram • 3.23 Travel Time and Average Speed • 3.24 Time-Space Diagram
5 Rail	• Percent of preempt calls received at design value or no more than specified value • Percent of track clearance green intervals completed before train arrival • Average delay due to preemption	• 3.25 Preemption Details (percent of false calls as well as minimum, maximum, and average preemption times – advance and/or simultaneous)
Emergency Vehicles	• Percent of emergency vehicles arriving on green • Percent of emergency vehicles arriving on red	• 3.25 Preemption Details (delay per emergency vehicle and number of requests)
Transit	• Percent of transit vehicles arriving on green • Percent of transit vehicles arriving on red	• 3.26 Priority Details (delay per transit vehicle and number of requests)
Trucks	• Percent of trucks arriving on green • Percent of trucks arriving on red	• 3.26 Priority Details (delay per truck and number of requests)

Figure 3. *Traffic signal system objectives and performance measures*
Source: NCHRP 954 [10]

2.3. Users of ATSPMs

Utilizing ATSPMs represents a proactive strategy for managing traffic signal systems, as it involves continuous monitoring of trends. This enables staff to detect potential issues before they are reported by the public. In the event of public service requests, ATSPMs can swiftly validate information and address issues without the need for extensive on-site monitoring. Furthermore, real-time data allows for assessing the effects of signal timing adjustments and determining if further modifications are necessary. Figure 4 outlines the distinct roles, goals, and advantages of every stakeholder group engaged in the deployment of signal performance metrics.

STAKEHOLDER(S)	ROLE(S) in the management, operation, and use of the transportation system.	OBJECTIVE(S) related to traffic signal operations.	BENEFIT(S) achieved through the use of signal performance measures over traditional methods.
Traffic Signal Engineers/ Technicians	• Identify malfunctioning equipment • Adjust signal timing • Troubleshoot, validate, and address public service requests	• Maximize functioning equipment • Minimize delay for transportation system users • Improve safety • Improve progression • Manage traffic variability	• Continuously available metrics • Less modeling required • Automated alerts for maintenance and operational issues
Traffic Signal Managers	• Prioritize project locations for infrastructure improvements and signal retiming • Set agency policies and standard practices • Report to decision-makers	• Acquire necessary staff and equipment resources • Allocate resources effectively	• Comparable metrics across intersections and corridors for prioritizing activities • Sharable reports that summarize the impacts of maintenance and operational activities
Policy Decision-Makers	• Identify funding sources and determine allocation • Report to the public	• Maximize investments	• Quantitative performance tracking • Real-time updates
IT Staff	• Procure and install equipment/software • Ensure security and backups • Manage servers and databases	• Install a system that is sustainable • Keep the technology functioning	• Potential new role in the signal system group
Other Agency Staff	• Perform transportation planning • Execute design and construction	• Program future transportation projects • Design and build functional traffic signals • Minimize delay during construction	• Continuously available metrics • Benefit/cost information
Public	• Use transportation system • Provide input on performance	• Reach destination in a safe and timely manner	• Improved mobility • Improved reliability • Improved safety

Figure 4. *Stakeholder roles, objectives, and signal performance measure benefits*
Source: NCHRP 954 [10]

3. ATSPM USE CASES

The use of ATSPM allows for a wide range of applications. In this section, the authors list several use cases of ATSPMs to illustrate how they can support proper traffic signal management.

3.1 Detection equipment health

One of the ATSPMs reports called Phase Termination, serves to show the reason why each phase at a signalized intersection terminated. There are several reasons why certain phases can terminate:

- Gap out – when the signal controller terminates the phase because the minimum time has been served, there was a conflicting call, and the vehicle extension timer has expired.
- Max out – when there is sufficient traffic to extend the phase to its maximum time. If a phase maxes out, it may indicate the phase is at or over capacity or the need to investigate alternative reasons (such as broken detector holding a constant call).
- Force off – when there is sufficient traffic to extend the phase to its force-off point. This is similar to a max out but occurs when the controller is timing a coordinated plan.
- Skip – when a phase does not time because there was no call.
- Pedestrian activity – which indicates the termination point for pedestrian phases.

Phase Termination report can be used to investigate patterns of how certain phase terminates throughout time. Furthermore, if for instance, pedestrian calls were received for a longer time, especially during night/early morning hours, this could be indicative of potential pedestrian detector malfunction. The ATSPM has system alerts that can be configured to evaluate signals and report phases where the pedestrian activations exceed the thresholds set in the Watchdog Configuration menu. Figure 5 shows an example from the UDOT system, where the system is configured to alert signal operators if 200+ pedestrian activations occur between 1 a.m. and 5 a.m. on the same day. As can be observed from Figure 5, Phase 6 has constant pedestrian calls during the period when the alarm is configured, as a result, an alert is sent through email to the traffic signal operator so that this malfunctioning detector can be replaced.

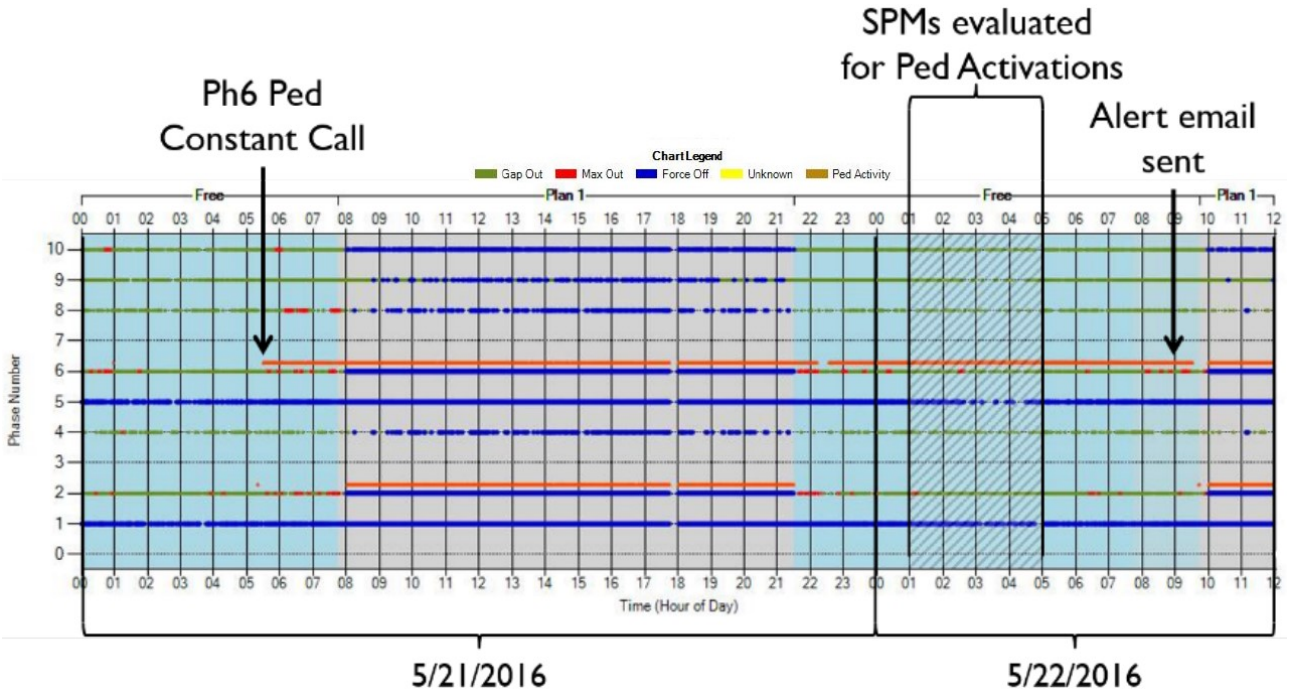


Figure 5. *ATSPM Evaluation for High Pedestrian Activation Occurrences*
Source: ATSPM User Case Manual [12]

3.2 Progression quality evaluation

The main report for progression quality evaluation within ATSPM is called the Purdue Coordination Diagram (PCD). The PCD depicts vehicle arrivals compared to the signal state (i.e. green, yellow, red) for each cycle of the coordinated phases. Each vehicle actuation is depicted as a single dot; dots below the green line represent vehicles arriving on red, and dots above the green line represent vehicles arriving on green (as illustrated in Figure 6). In addition, the report provides the percentage of vehicles arriving on green as well as a platoon ratio, which normalizes arrivals on green considering the percentage of time the phase was green during the cycle.

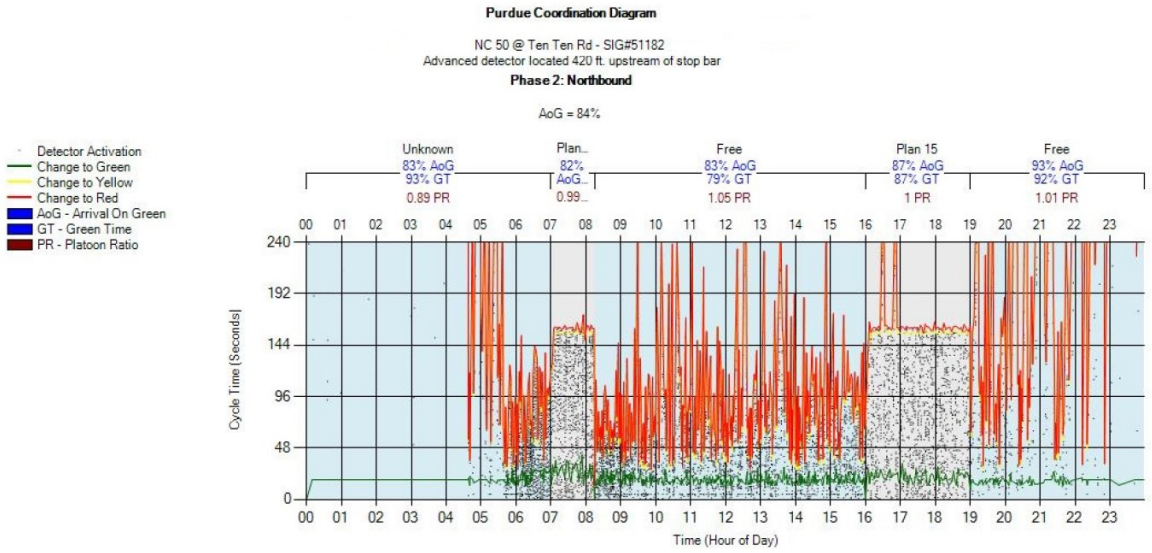


Figure 6. *Purdue Coordination Diagram*

In this use case of ATSPM, it is shown how PCD can be used to illustrate the effects of offset modification on traffic arrivals. The Virginia DOT made modifications to offsets along a corridor close to Charlottesville, Virginia. Before these adjustments, Figure 7a, depicting PCD, illustrated that vehicle arrivals at a specific intersection occurred before the green interval during midday timing. Following the offset changes, a greater proportion of vehicles arrived during the green phase, as evidenced in Figure 7b. Utilizing a PCD chart facilitates the validation of signal timing alterations, indicating improved progression or the need for further adjustments.

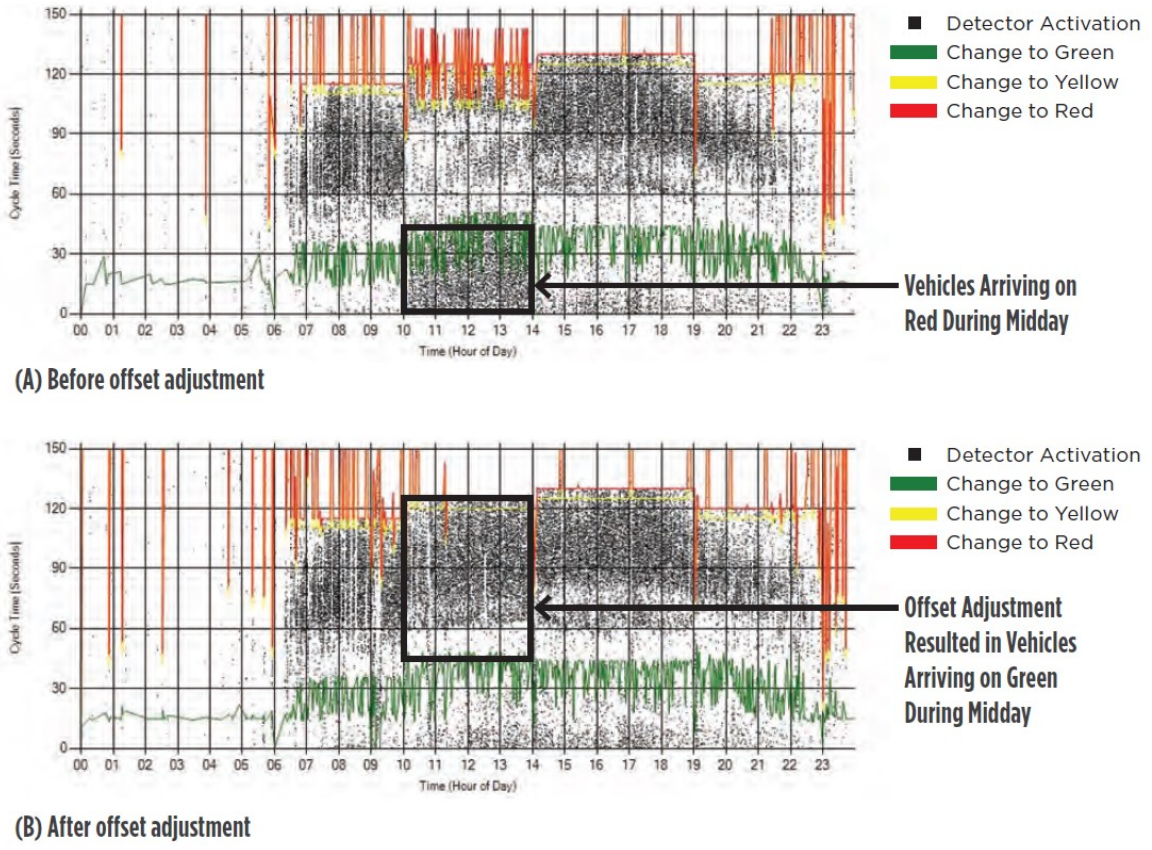


Figure 7. *Use of PCD for Progression Quality Evaluation*
Source: NCHRP 954 [10]

3.3 Safety Monitoring

Red clearance, a signal timing parameter, varies in application among agencies. Though not mandatory, its purpose is to allocate an interval during which conflicting signal displays are red, allowing vehicles that entered the intersection on yellow sufficient time to cross without conflict. Utilizing signal performance measures that monitor vehicles entering the intersection on red aids agencies in determining the necessity and optimal duration of red clearance. One report available in ATSPM, named Yellow/Red Actuations, enables agencies to assess the frequency of violations (vehicles entering the intersection on red) and "severe" violations (vehicles entering significantly after the end of red clearance). If the report highlights a notable number of vehicles entering the intersection shortly after the yellow change interval ends, agencies can employ ATSPMs to analyze progression. This evaluation helps in deciding whether adjustments to offset or green time could diminish violation frequency, or if additional red clearance is warranted.

Figure 8 shows 24 hours of yellow and red actuation for a phase. In this case, there are severe violations in the AM, with vehicles entering the intersection well into the service time for the next phase.

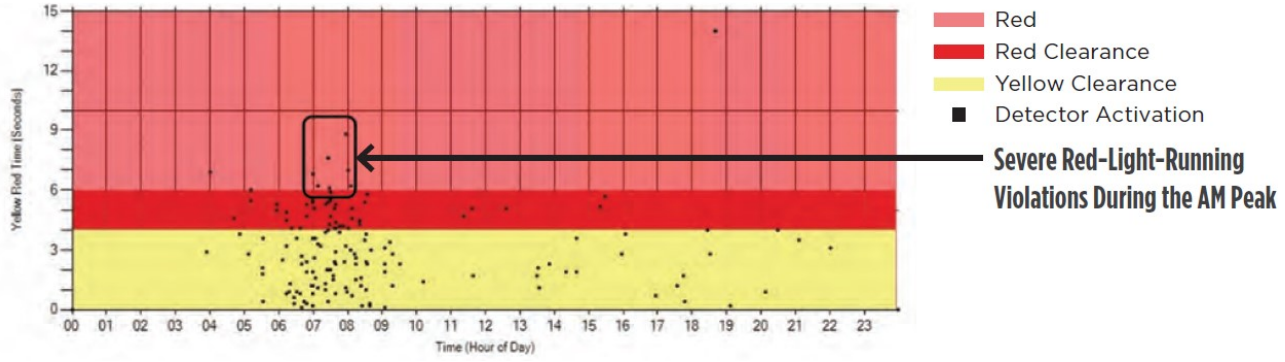


Figure 8. Yellow/Red Actuations
Source: SPM Basics and Applications Overview [13]

4. COSTS AND BENEFTS

In an extensive study by the Federal Highway Administration, several ATSPM-deploying agencies were interviewed to understand the major costs and benefits associated with the deployment of the ATSPM system [8]. For instance, Georgia DOT, which operates 6,804 traffic signals, reported that major cost components of implementing ATSPM include detection system reconfiguration and documentation, installation costs, maintenance costs, integration/training costs, and usage costs. These amount to a total deployment cost of $593,120 and an operation cost of $285,640. However, the benefits outweigh these costs significantly. The primary benefits include avoiding manual data collection, reducing response time to complaints, and enhancing performance documentation, totaling $9,495,600 in agency benefits. Public benefits such as improved response to equipment failures, capacity benefits, progression benefits, and pedestrian service benefits have not been quantified. The implementation of ATSPM has led to substantial efficiency gains and cost savings for GDOT, showcasing the value of data-driven approaches in traffic signal management.

In the case of Utah DOT which operates 2,750 signals, major cost components include approximately $1 million in labor costs for software development, resulting in an investment of about $474 per signal. Additional costs for ATSPM deployment range from $230 to $400 per signal. However, UDOT's proactive approach and investment have led to numerous benefits. These include improved signal timing management, enhanced response to public calls, proactive detector anomaly detection, and savings in labor costs. The total estimated benefits, including agency savings and public benefits, amount to approximately $108 million over ten years. Lessons learned emphasize the importance of executive support, a robust signal maintenance program, and active usage of the technology for successful implementation and institutionalization of ATSPMs.

The Maricopa County DOT operates 170 traffic signals and maintains roadways across Maricopa County, Arizona, in collaboration with other transportation agencies through AZTech. MCDOT's implementation of ATSPM was facilitated by strong upper-level management support, a need for data-driven decision-making, and previous investments in infrastructure upgrades. Major cost components include detection system upgrades, communication system improvements, and integration costs, totaling $765,000 in sunk costs and $75,900 in deployment costs. However, operational benefits include avoiding manual data collection costs ($176,016), reducing scheduled maintenance visits ($866,184), and decreasing response time to public

complaints ($441,584), totaling $1,483,784 over a 10-year life cycle. The net present value (NPV) of the benefits outweighs the NPV of the costs, indicating a positive return on investment for MCDOT.

Lake County DOT, Wisconsin, operates a total of 180 signals, out of which 133 are currently under an ATSPM system. Major cost components for Lake County DOT's implementation of ATSPMs include firmware upgrades at approximately $37,352, detection system reconfiguration costing around $20,633, server installation at an estimated $15,000, installation costs totaling approximately $64,774, and future maintenance costs estimated at $24,000 per year for licensing, with an additional $6,300 for integration and training expenses. The total deployment cost sums up to $198,029. On the other hand, major benefit components comprise the avoidance of manual data collection, estimated at $3,612,960 over a 10-year life cycle, and reduced complaint response time equating to $440,781 in savings. The total post-implementation and life cycle agency benefits amount to approximately $4,053,741.

CONCLUSIONS

This study provides an overview of the Automated Traffic Signal Performance Measures platform and its key components. The authors discuss several use cases of ATSPM reports as well as the costs and benefits associated with the deployment of ATSPMs in several State Departments of Transportation.

Based on the experiences of ATSPM deploying agencies, that already have all key components in place, such as detection, modern traffic signal controllers, and communications ATSPM solutions could be very beneficial and represent a low to moderate level of effort to deploy. In some instances, agencies deployed ATSPM as pilot projects for a certain number of intersections, to facilitate value assessment before a system-wide implementation. During pilot projects, it was found that open-source ATSPM software provided by Utah DOT can help tremendously to lower initial costs.

Overall, the success of ATSPM integration was largely attributed to strong executive leadership support and a clear operational plan. While larger agencies with robust IT resources utilized open-source software developed by Utah DOT, smaller agencies often relied on vendor-provided solutions. ATSPM implementation incurred various costs, from procurement to maintenance, but yielded significant benefits such as improved data collection, reduced response time to service calls, and enhanced safety. However, despite the potential benefits, agencies faced challenges in comprehensively tracking the costs and benefits of ATSPM implementation.

The most recent trends stem from ATSPM solutions based on traditional physical detectors. These novel solutions utilize probe vehicle data to generate similar types of traffic signal performance measures originally proposed in ATSPM. Such an approach significantly reduces installation and maintenance costs as a deploying agency is only required to purchase a license per intersection. With the emergence of connected vehicle data, it is reasonable to expect that signal performance measures will be conducted using floating car data, rather than relying on data from fixed sensors.

References

[1] Balke, K. N., H. A. Charara, and R. Parker. Development of a Traffic Signal Performance Measurement System (TSPMS). No. FHWA/TX-05/0-4422-2. College Station, Texas Transportation Institute, Texas A & M University System, 2005

[2] Smaglik, E. J., Sharma, A., Bullock, D. M., Sturdevant, J. R., & Duncan, G. (2007). Event-based data collection for generating actuated controller performance measures. Transportation Research Record, 2035(1), 97-106.

[3] Li, H., A. M. Hainen, J. R. Sturdevant, T. Atkison, S. Talukder, J. K. Mathew, D. M. Bullock, D. Nelson, D. M. Maas, Jr., J. Fink, and T. Stiles. Indiana Traffic Signal Hi Resolution Data Logger Enumerations. Indiana Department of Transportation and Purdue University, West Lafayette, Indiana, 2019. https://doi.org/10.5703/1288284316998

[4] Day, C. M., Bullock, D. M., Li, H., Remias, S. M., Hainen, A. M., Freije, R. S., ... & Brennan, T. M. (2014). Performance measures for traffic signal systems: An outcome-oriented approach.

[5] Li, P., Chowdhury, F. R., Wang, P., & Imtiaz, S. M. (2020). Actuated traffic signal performance evaluation along arterials using wi-fi travel time samples and high-resolution traffic signal events data. *Transportation Research Record*, *2674*(6), 268-280.

[6] Dobrota, N. (2022). Enhancement of Traffic Signal Retiming Process Using Novel Methods and Traffic Signal Performance Measures (Doctoral dissertation, University of Pittsburgh).

[7] Hu, H., & Liu, H. X. (2013). Arterial offset optimization using archived high-resolution traffic signal data. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 37, 131-144.

[8] O'Brien, P., Stevanovic, A., Day, C., Hale, D., & Matout, N. (2020). A Methodology and Case Study: Evaluating the Benefits and Costs of Implementing Automated Traffic Signal Performance (No. FHWA-HOP-20-003). United States. Federal Highway Administration.
[9] Kittelson and Associates, ITRE (2019). NCDOT Guide on Automated Traffic Signal Performance Measures.
[10] National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. 2020. Performance-Based Management of Traffic Signals. Washington, DC: The National Academies Press. https://doi.org/10.17226/25875.
[11] Li, H., A. M. Hainen, J. R. Sturdevant, T. Atkison, S. Talukder, J. K. Mathew, D. M. Bullock, D. Nelson, D. M. Maas, Jr., J. Fink, and T. Stiles. Indiana Traffic Signal Hi Resolution Data Logger Enumerations. Indiana Department of Transportation and Purdue University, West Lafayette, Indiana, 2019. https://doi.org/10.5703/1288284316998
[12] Utah DOT (2020). Automated Traffic Signal Performance Measures User Case Examples
[13] Taylor, M. 2016. "SPM Basics and Applications Overview." Presented at Automated Traffic Signal Performance Measures Workshop, Salt Lake City, UT. http://dx.doi.org/10.5703/1288284316030

PREGLED KONCEPTA "AUTOMATIZOVANI POKAZATELJI KVALITETA RADA SVETLOSNIH SIGNALA" I PRIKAZ NAJBITNIJIH ZAKLJUČAKA OD NJEGOVE PRIMENE

Nemanja Dobrota[1], Aleksandar Stevanovic[2], Burak Cesme[1], Shannon Warchol[1]
[1] Kittelson and Associates, Inc. [2] University of Pittsburgh

Rezime: *Automatizovani pokazatelji kvaliteta rada svetlosnih signala (APKRSS) predstavljaju relativno novi koncept upravljanja radom svetlosnih signala u Sjedinjenim Američkim Državama (SAD). Tradicionalan način prikupljanja podataka o kvalitetu rada svetlosnih signala se svodi na periodična terenska istraživanja koji posledično onemogućava agencije da na adekvatan način upravljaju radom svetlosnih signala. Sa razvojem tehnologije u poslednje dve decenije, po prvi put je omgućeno prikupljanje podataka iz kontrolera i detektora, zatim njihovo skladištenje kao i obrada na način koji omogućava detaljnije ispitivanje kvaliteta rada svetlosne signalizacije i to na kontinuiran način. U ovom radu dat je prikaz koncepta APKRSS, njegovih ključnih komponenti, kao i tipovi različitih pokazatelja koji su integrisani u okviru ovog koncepta. Dodatno, autori daju prikaz troškova i koristi koji su rezultirali implementacijom APKRSS u nekoliko saobraćajnih agencija u SAD.*

Ključne reči: *Pokazatelji rada svetlosnih signala, podaci visoke rezolucije, upravljanje saobraćajem*

COOPERATIVE INTELIGENT TRANSPORT SYSTEMS (C-ITS) BRING THROUGH VEHICLE2X COMMUNICATION SIGNIFICANT REDUCTION OF TRAFFIC JAMS, ACCIDENTS AND EMISSIONS

Milena Vučković[1]
Milan Radivojević[2]

[1] *Yunex Traffic d.o.o. Beograd, milena.vuckovic@yunextraffic.com*
[2] *Yunex Traffic d.o.o. Beograd, milan.radivojevic@yunextraffic.com*

Abstract: *The digitalization of the road is an essential pillar for the mobility of the future: Intelligent communication technologies connect road users of all kinds with the infrastructure. This creates potential for increasing road safety and efficiency while reducing negative environmental impacts, which helps to improve the quality of life in and between cities. Increasing networking and comprehensive data exchange between road users and infrastructure are the essential building blocks for the future of mobility. V2X communication technology enables applications to increase traffic safety, optimize traffic flow, reduce negative environmental impacts, and increase operational safety while complying with the latest IT security standards.*
Through V2X technology, vehicles communicate with on-site infrastructure and cooperative traffic management systems. In the future, these components will form the basis for autonomous driving applications. Countries will promote the development of an innovative and digital infrastructure through digitalization strategies. The introduction of V2X communication is a building block of the global strategy and has been tested and deemed useful in numerous research projects.

Keywords: C-ITS, V2X, road digitalization, traffic safety, communications technology.

1. INTRODUCTION

Digitalization of roads and intelligent communication technologies make the right base for the connected traffic. It helps cities and municipalities to improve the quality of life and form the basis for sustainable growth. Despite intensive efforts to provide attractive alternatives to individual and freight road traffic, a further increase in the volume of traffic can be expected in the future. Future connected mobility both on non-urban and urban sections provide the possibility for better and greater utilization of existing capacities, in addition to guaranteeing greater safety for all traffic users.
In this document we will focus on digital Vehicle-to-Everything (V2X) communication between vehicles and infrastructure systems through modern communication technology in interurban cases with system components explanation and project examples.

2. VEHICLE2X COMMUNICATION

Vehicle-to-everything (**V2X**) is automatic communication and data exchange between road users and infrastructure making a turning point for the future mobility. V2X communication technology enables applications to increase traffic safety, optimise traffic flow, reduce negative environmental impacts and increase operational safety while complying with the latest IT security standards. Through V2X technology, vehicles communicate with on-site infrastructure and cooperative traffic management systems via installed On-board units (OBUs) and via Roadside units (RSUs). This enables networking of vehicles and infrastructure. In the future, these components will form the basis for autonomous driving applications. Not only motorised individual transport (MIV) benefits from this technology. The intermodal networking of transport, in particular public transport, should be emphasised, which enables the V2X use cases. [1], [2]

[1] Autor zadužen za korespodenciju: *Yunex Traffic d.o.o. Beograd, milena.vuckovic@yunextraffic.com*
[2] Autor zadužen za korespodenciju: *Yunex Traffic d.o.o. Beograd, milan.radivojevic@yunextraffic.com*

Cooperative intelligent transport systems (C-ITS) bring through vehicle2x communication significant reduction of traffic jams, accidents and emissions.

2.1. C-ITS – already implemented use cases for highways to improve traffic management and road safety

With the help of broadcasting technology, road conditions are analysed and information on congestion, accidents and road closures is transmitted to road users. ASFiNAG (Autobahnen- und Schnellstraßen-Finanzierungs-Aktiengesellschaft) is the first infrastructure provider in Europe to install a system in Austria that networks vehicles and traffic infrastructure on motorways. The first V2X applications warn drivers of dangerous situations. Further expansion stages will include automated driving and networked traffic management.
One of the most important advantages of C-ITS (Cooperative ITS) is the real-time transmission of traffic incidents information. If a vehicle detects an incident that is relevant for other road users, it immediately reports it by radio to compatible vehicles in the vicinity and / or sends the location of an incident to the central system thru adequate units. In vehicles with integrated C-ITS functionality, the relevant message is then displayed directly. [1], [2]

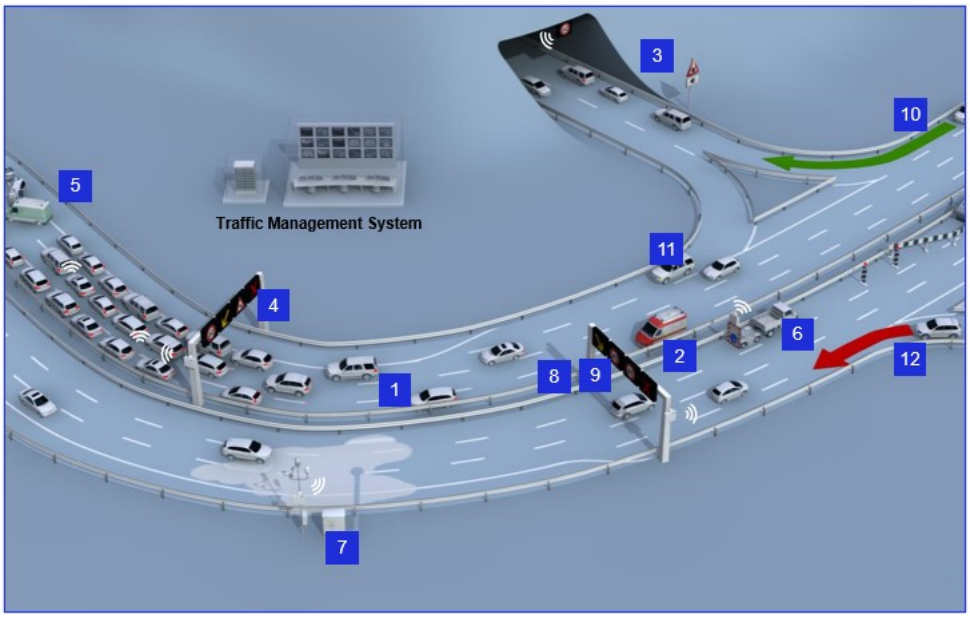


Figure 1. *V2X-based interurban use cases. Source: Yunex Traffic C-ITS*

1	Emergency electronic brake light
2	Emergency vehicle approaching
3	Slow or stationary vehicle(s)
4	Traffic jam ahead warning
5	Hazardous location notification
6	Road works warning
7	Weather conditions
8	In-vehicle signage
9	In-vehicle speed limits
10	Traffic information and smart routing
11	Cooperative collision risk warning
12	Wrong way driving

Figure 2. *V2X- already implemented use cases on highways. Source: Yunex Traffic C-ITS*

Tabel 1. *Vehicle applications for drivers*

Vehicle applications for drivers	
Roadworks Warning	Vehicle Safety
Emergency Vehicle Approaching	Vehicle Safety
Hazardous location notification	Vehicle Safety
Obstacle Detection Warning	Vehicle Safety
Person/animals on the road	Vehicle Safety
In-vehicle signage	Traffic Control
In-vehicle speed limits	Traffic Control
Shoulder Lane Release	Traffic Control
Platoon support for automated vehicles	Automated Driving
SAE Level clearance	Automated Driving
Situation based distance gap	Automated Driving

Source: Yunex Traffic C-ITS

Tabel 2. *Traffic management applications for operators*

Traffic management applications for operators	
Accident	Incident Mgmt.
Stationary Vehicle	Incident Mgmt.
Traffic Jam – Shockwave Damping	Incident Mgmt.
Wrong Way Driving	Incident Mgmt.
Hazardous location notification	Incident Mgmt.
Vehicle Safety System Active	Incident Mgmt.
Dangerous Goods Vehicle Tracking	Tunnel Mgmt.
Probe Vehicle Data	Traffic Mgmt.
Travel Time	Travel Time
Accident	Incident Mgmt.
Stationary Vehicle	Incident Mgmt.

Source: Yunex Traffic C-ITS

2.1.1. Car2X communication

Setting out V2X technology will occur over time. New cars are already equipped with corresponding technology. According to largest German automobile manufacturer Volkswagen, there are already over 1.2 million vehicles on Europe's roads that are equipped with Car2x communication as a standard. The Volkswagen Golf VIII is the first passenger car to be fitted with V2X technology as standard equipment using a new chipset from NXP, but also new electric models ID.3, ID.4, ID.5 and Cupra Born have already implemented this technology. [2]
The wireless communication system VW have used is a variant of Wi-Fi called 802.11p that has been optimized to enable vehicle-to-vehicle (V2V), vehicle-to-infrastructure (V2I) and V2X connectivity. [1], [2]

Figure 3. *More than 1.200.000 Volkswagen vehicles with V2X in Europe.* *Source: Yunex Traffic C-ITS*

Cooperative intelligent transport systems (C-ITS) bring through vehicle2x communication significant reduction of traffic jams, accidents and emissions.

2.2. V2X system components

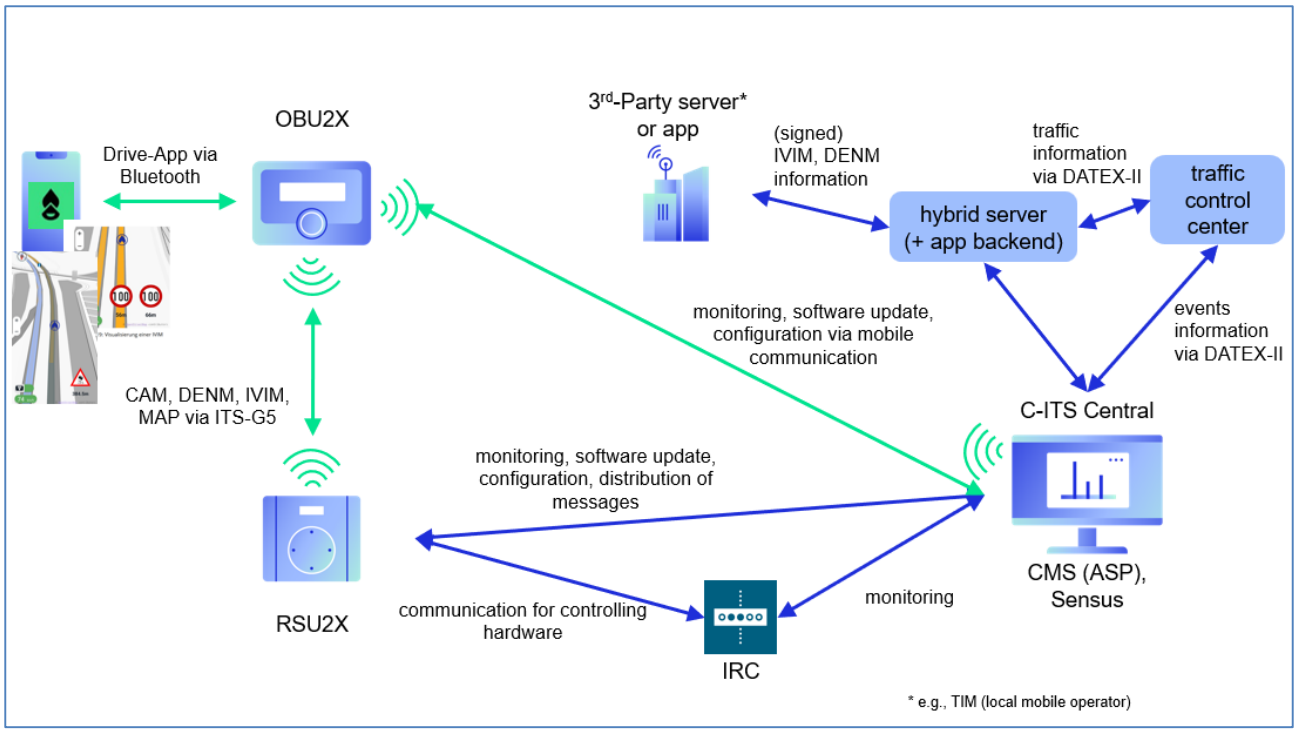


Figure 4. *V2X system components overview Source: Yunex Traffic C-ITS*

2.2.1 Cooperative Management System (CMS)

CMS is the main component. It links and monitors the Roadside units (RSU) in a central system and sends messages via the RSUs to the road users. CMS allows flexible monitoring of RSUs and traffic at any time and any place. It is easy to use thanks to geographical views and displays of traffic messages and data based on current technologies like Datex II Interface, Service/Debug Tools etc.

A Roadside Unit (RSU) communicates with both, the traffic management center, and the vehicles:

- The RSU sends time-critical information (e.g. the current signal status) directly to the vehicles.
- Static and non-time-critical information (e.g. sign information) can be communicated to the vehicles either by the RSU or the CMS
- Vehicles continuously report their current position, speed and direction of travel via their Vehicle2X Onboard Units.
- The RSU collects this information.
- The CMS uses this information to manage traffic more efficiently and in real time.

Cooperative and intermodal traffic management aims to minimise the negative effects of traffic, such as congestion, accidents, and environmental pollution. Traffic management uses digitalisation to achieve its goals. Modern sensor systems, floating car data (FCD) and V2X are used to determine the current traffic situation in detail. This traffic data is analysed in a traffic management centre, from which traffic strategies are then derived. This cooperative and intermodal centre forms the basis for the various V2X use cases (both in urban and interurban) and enables the digital control and influencing of traffic. Traffic controllers, dynamic display panels, apps, and prioritisation systems for various means of transport, such as buses and trams, emergency vehicles (e.g. fire brigade, emergency doctor, etc.) and bicycles, as well as traffic light systems are available for influencing traffic in the urban environment.

Cooperative traffic management here not only connects the various authorities such as public transport operators, police and municipal administration, but also cooperates directly with the vehicles via V2X. The goals of traffic management are achieved through optimized use cases with the help of linking modern data from V2X, AI sensors and floating car data (FCD) with conventional traffic data. To accommodate this change, a modern and secure IT infrastructure is needed.

The cooperative traffic management system collects mobility data from all data sources, visualizes it and provides the information via standardized and modern interfaces. This then creates the conditions for V2X use cases. The system is based on an open, scalable, secure and service-oriented architecture (SOA). With this SOA, the individual services are realized mainly independently of each other, which significantly increases the availability of the overall system. Services can be exchanged while retaining their external interfaces without affecting the remaining parts of the system.
The platform concept has proven itself in application by making the flow of data from external sources to the deployed services simple, secure and regulated via standardized and open interfaces. In this way, further mobility services are networked in real time in a provider-neutral manner.
The platform itself fulfils the following requirements of cooperative traffic management:

- Cross-stakeholder access to all mobility information. This includes, among other things, traffic status, disruptions, events, incidents and road works.
- Detailed analyses for the evaluation of the traffic situation, including all the Data sources.
- Management and configuration of infrastructure objects such as RSU, OBU, (public transport) reporting points and map data (topology).
- Optimization of all mobility options and the entire road network, by flexible traffic management scenarios. Simulation models continuously test and evaluate the overall system based on real-time traffic, public transport and incident data.
- Complete transparency on the effects of traffic management strategies on the environmental situation. This is made possible by combining traffic and environmental simulation. Thus, it is possible to create scenarios and react to emission forecasts in a timely manner.
- The necessary degree of freedom to develop and modularly integrate customer-specific applications using flexible and open data services. This ranges from incident management reports to environmental, traffic or public transport dashboards.
- Monitoring functions for the operation of the system, ensuring reliability and minimizing downtime.
- A high level of communication security, as well as protection of the field devices using a dedicated security concept.

The system is compliant with the V2X requirements defined by the international Car2Car Communication Consortium, the ETSI (European Telecommunications Standards Institute) and the US-DoT (US Department of Transportation).

Vehicle2X offers cities and municipalities a multi-functional and future-proof solution with high investment protection. Vehixle2X integrates all internationally required V2X communication standards and is also fully compatible with all Vehicle2X solutions in hardware and software. Thanks to open interfaces, Vexicle2X can communicate with numerous controllers via standard connections and can also be extended later with additional communication modules, e.g. for web-based controllers. Vehicle2X offers a high level of IT security thanks to the Cyber-Security process and a defined security concept for maintenance and service. [1], [2]

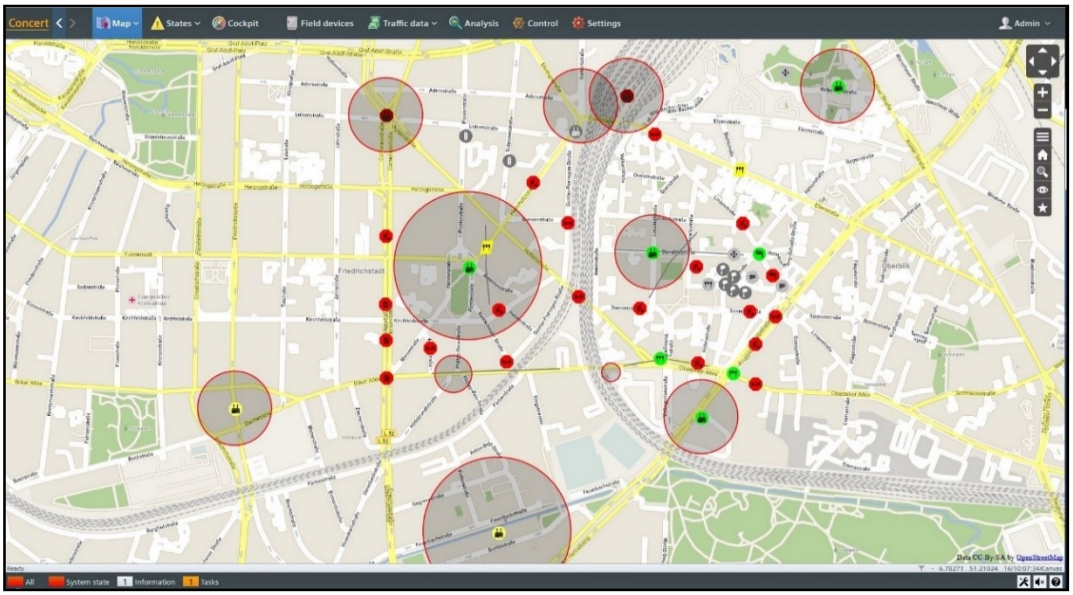


Figure 5. *Hazard alerts are created in the traffic management center (CMS) by the operator and sent to the vehicles. Reports from vehicles (e.g., accident) are forwarded to the CMS and visualized on the map. Source: Yunex Traffic C-ITS*

Cooperative intelligent transport systems (C-ITS) bring through vehicle2x communication significant reduction of traffic jams, accidents and emissions.

2.2.2. Roadside Unit (RSU2X)

The RSU2X is the central interface for wireless communication between roadside infrastructure and the Onboard Unit (OBU). The bidirectional communication via the RSU2X enables both the transmission of information (e.g. speed limits) and the reception of Onboard messages in real time. A powerful dual-core CPU offers numerous interfaces with high safety standards and ensures a fast connection to back-end systems:

- Communication via Wi-Fi 802.11p and LTE-V2x
- Uses the 5.9 GHz radio band reserved for traffic applications.
- Easy installation due to robust weatherproof housing, stand-alone or integrated with a traffic control unit.

Figure 6. *RSU2X with Quad-Core CPU edge computing and up to 4000 message verifications per second. Supports DSRC (dedicated short-range communication)/802.11p and C-V2X (3GPP Rel.14/15).*
Source: Yunex Traffic C-ITS

2.2.3. Onboard Unit (OBU)

The OBU integrates vehicles into cooperative ITS systems (C-ITS) and the deployment of infrastructure-driven C-ITS services and applications. Via the OBU, Vehicle2X can send hazard alerts to service vehicles or prioritize public transport and emergency vehicles. It enables road users to adapt their driving behaviour at an early stage, thus increasing safety for pedestrians and cyclists.

- Powerful transceiver for smooth communication with the RSUs
- Very high accuracy of position and speed determination
- Easy installation (plug and play) and operation for the driver
- Retrofittable and mountable in almost any vehicle

Figure 7. *OBU2X for windscreen installation with integrated V2X module and built-in GNSS receiver with GPS/Galileo/GLONASS or external antennas for GNSS and/or V2X with Integrated 4G/3G/2G module.*
Source: Yunex Traffic C-ITS

Figure 8. *OBU2X-R rack version of Onboard unit.*
Fix installation in the vehicle with external antenna and V2X Modul (ITS-G5 o.C-V2X)
Source: Yunex Traffic C-ITS

2.3. Project example - first comprehensive network of roads and vehicles in Europe

First comprehensive network of roads and vehicles in Europe has been done by ASFiNAG (Autobahnen- und Schnellstraßen-Finanzierungs-Aktiengesellschaft) and is the first C-ITS infrastructure project. For this purpose, 525 RSUs were installed on a total of 2,200 kilometers of highways network.
A new generation of intelligent and connected vehicles are already on Austrian roads, communicating with C-ITS units (RSUs) they pass by. The vehicles receive an update on construction sites and incidents for the next few kilometers via WLAN and display a warning a few hundred meters before the actual location. Drivers are thus warned on time and before reaching the incident zone and can master the traffic situation without any problems.
Interoperability test between the road operator ASFINAG and automobile manufacturer Volkswagen was done in September 2023 in the Autobahnmeisterei (ABM) Salzburg. The final test drive with a Volkswagen (ID.7) took place in September on the motorway around Salzburg. [1], [2]

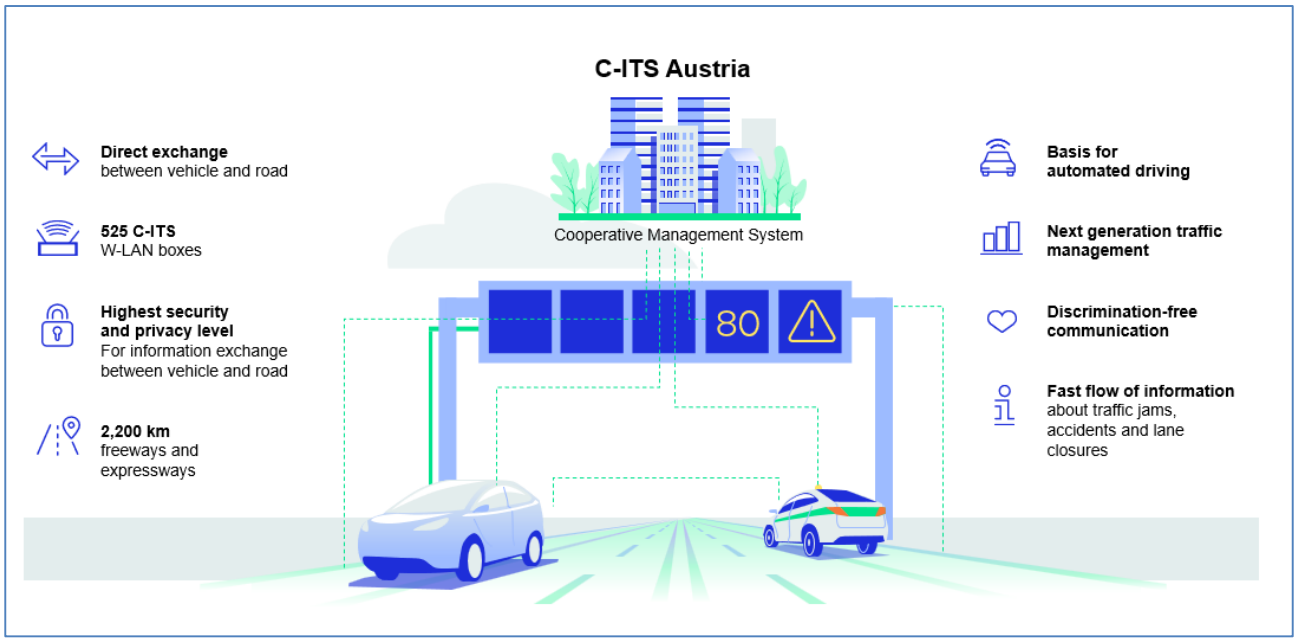


Figure 9. *Overview of the C-ITS ASFiNAG project. Source: Yunex Traffic C-ITS*

Cooperative intelligent transport systems (C-ITS) bring through vehicle2x communication significant reduction of traffic jams, accidents and emissions.

The first V2X applications were warning the drivers of dangerous situations. If driving towards a danger zone, an acoustic warning tone can be heard, and the corresponding symbol is shown on the vehicle display (= information). The countdown until the event starts. Just before the danger zone, a warning tone sounds again, and the corresponding warning is shown in red (= warning) on the display.

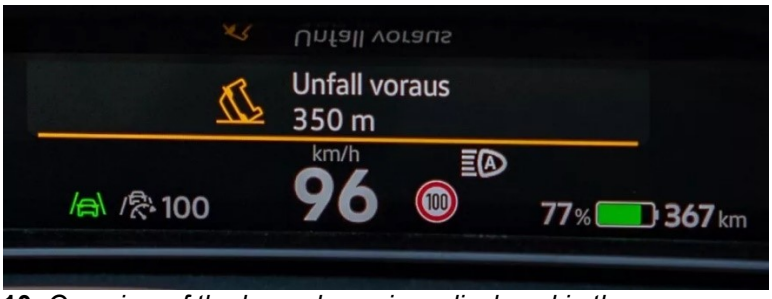


Figure 10. *Overview of the hazard warnings displayed in the passenger cockpit.*
Source: ASFiNAG C-ITS

The hazard warnings are recorded centrally in the ASFiNAG event database by the operator of the respective traffic management center. C-ITS, as a separate system, runs fully automatically in the background. If a new event is recorded, the event is translated into the corresponding C-ITS warning and distributed to the surrounding roadside units. Passing vehicles "collect" these warnings and indicate them as required. Reports from vehicles are reported directly to the traffic management center as potential traffic-relevant situations. Meaning: “I am a car and I have an accident at this position.” [3], [5]

Figure 11. *Overview of the ASFiNAG CMS and VW Cockpit. Source: ASFiNAG C-ITS*

For the second generation of intelligent cars, it will be feasible to display digital traffic signs in the vehicle - without the error-prone nature of current camera-based systems - or support lane-specific traffic guidance using highly accurate data. A series launch is expected in 2025/2026.
Further expansion phases of this project will include automated driving and network traffic management.

2.3.1. “Day one” and “Day two” use cases

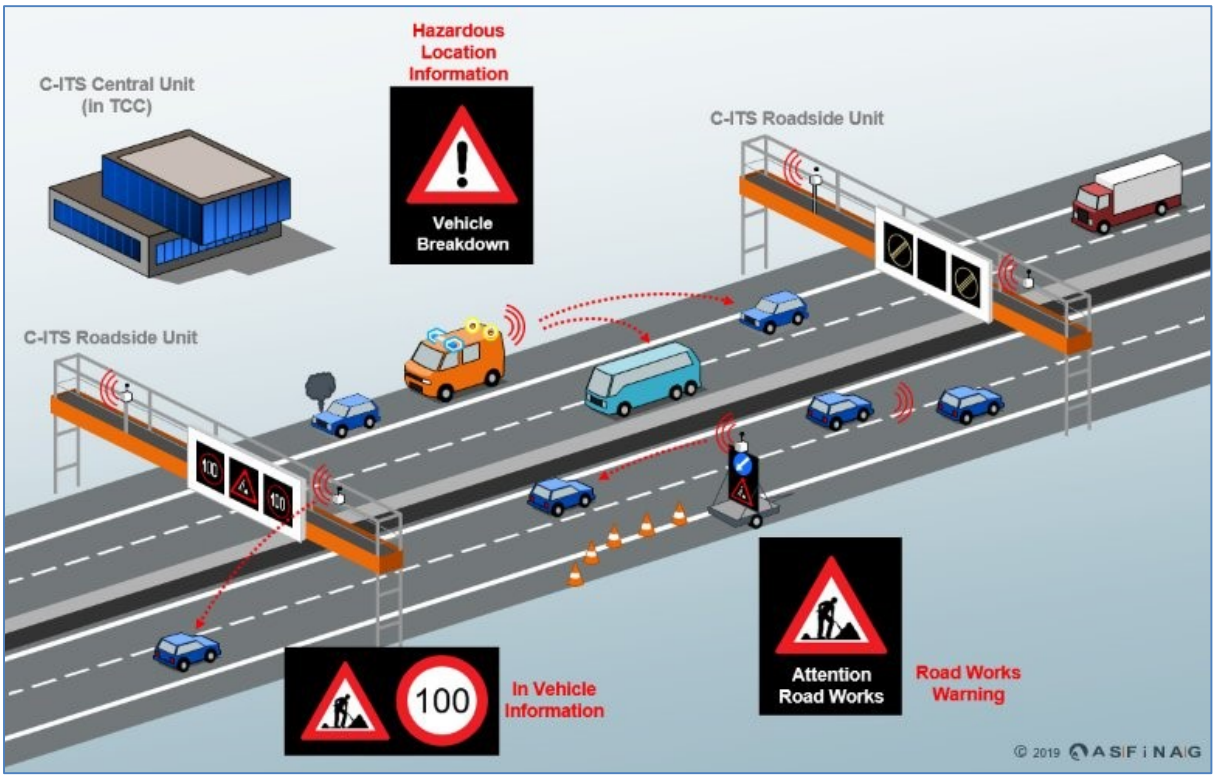


Figure 12. *Visualization of the ASFiNAG C-ITS project Source: ASFiNAG C-ITS*

“Day one” use cases ASFiNAG implemented at the beginning of the implementation (all of them according to the C-Roads platform) are**:**

- Roadworks Warning
- Hazardous Locations (accident, etc.)
- Vehicle Detection

Cooperative Awareness Message (CAM) Aggregation – “Virtual Detection”, as one of the standardized messages of the C-ITS for the high frequency (in milliseconds) exchange of traffic data between vehicles. [7]

The message itself contains, among other data, the current position, speed and direction of movement, allowing:

- Aggregation of CAM information in virtual detection zones.
- Vehicle counting & average speed by class.
- Supports automatic configuration of detection zones.

Single vehicle data for travel time determination:

- Anonymous recording of individual vehicles via ITS-G5, Wi-Fi and Bluetooth
- Provision of the anonymous vehicle IDs to the control center for travel time calculation

Cooperative intelligent transport systems (C-ITS) bring through vehicle2x communication significant reduction of traffic jams, accidents and emissions.

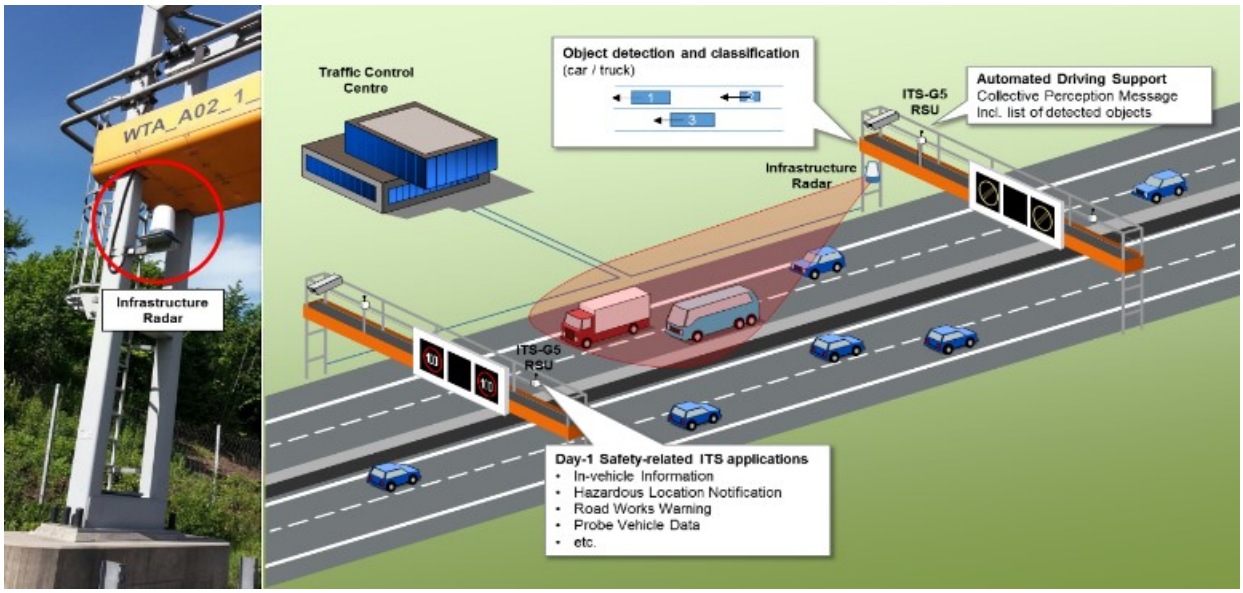


Figure 13. ***"Day one" use cases C-ITS ASFiNAG.*** *Source: ASFiNAG C-ITS*

"Day 1" services implemented from 2022 onwards, according to the C-Roads platform:

- Fully C-ROADS compliant
- Focus: Safety
- Roadworks Warning (RWW) based on ETSI DENM (Decentralized Environmental Notification Message) standard.
- Hazardous Location Notification (HLN) based on ETSI DENM standard.
- In-Vehicle Signage (IVS) based on ISO IVIM (In-Vehicle Information message)

"Day 2" services implemented from 2024 onwards:

- Partly already available in C-ROADS or yet to be harmonized.
- Focus: Supporting automated vehicles
- Automated Vehicle Guidance (AVG) based on ISO IVIM
  - SAE / ISAD Level Guidance, [8]
  - Platoon Support Information (platoon control for connected vehicles under the realistic vehicle-to-vehicle/vehicle-to-infrastructure (V2X) communications).
- Collective Perception Service (CPS) based on ETSI CPM (collective perception message).

Day 2 use cases I - road information for automated vehicles:

1. SAE level clearance for automated vehicles: The purpose of the use case is to regulate (or at least inform about) the allowed SAE automation level within a specific road segment or lane segment (lane clearance).
2. Platoon support information for automated vehicles: Platoon support information would transport the view of the road operator into the vehicle, giving advice about applicable sections and lanes for platooning and the recommended parameters (vehicle classes, number of vehicles, overall length) for forming a platoon in those areas.
3. Situation based distance gap for automated vehicles: Main part of this use case is the communication of the traffic control center requested distance gap from the infrastructure to the vehicles.
4. Vehicle type and lane specific speed limit for automated vehicles: The use case consists of sending a vehicle type and lane specific speed limit information, which is adjusted continuously based on road and traffic conditions.
5. Vehicle type and lane specific speed recommendation for automated vehicles: The use case consists of sending a vehicle type and lane specific recommended speed information, which is continuously adjusted based on road and traffic conditions.
6. Contextual emergency corridor information: The use case "Emergency Corridor" is a multi-step approach to inform vehicles about the need to form an emergency corridor in case of a traffic jam.

Day 2 use cases II - collective perception:

1. Collective perception of objects on the road: The use-case collective perception (in passive mode) informs vehicles about obstacles on the road, vulnerable road users as well as critical driving-situations, based on detection by external sensors (e.g. radar, information from connected vehicles).
2. Information about ITS-G5 equipped objects and persons on the road: In the active mode, object identification on the road can be achieved using a personal ITS-G5 device, which actively transmits messages containing its position, sender designation, speed, or heading. These messages are sent either to vehicles (P2V) or to the infrastructure - (P2I) pedestrian to infrastructure.
3. Traffic situation awareness based on CAM: Connected vehicles emit CAMs for real-time monitoring, enabling ITS-based awareness and generating warnings distributed to vehicles via C-ITS infrastructure, leveraging trajectories and data fusion at the traffic control center.

Day 2 use cases III - road works warning:

1. Long term road works warning: Long-term Road works (RW) present complex scenarios involving significant changes in road topology, potentially requiring multiple semantically linked message formats from the infrastructure to vehicles (I2V), addressing alterations like additional lanes, shifts, and varied speed regulations beyond what short-term RW warnings can convey.

Day 2 Use Case – Barrier-Control-System:

Preconditions for implementation:
- Route atlas is supplied with reporting points and transferred to OBU2X.
- Event triggers are defined on the RSU2X (which line controls which I/O)
- Line and route are configured in the OBU2X.

How it works:
1. the vehicle with the OBU2X drives into the trigger zone and sends an SRM (Signal request message) with R09 telegram (ODG format – OCIT developer group)
2. the SRM is interpreted accordingly by the RSU2X, and the corresponding I/O is triggered by the IRC.
3. the RSU2X sends feedback to the OBU2X in the vehicle via SSM.

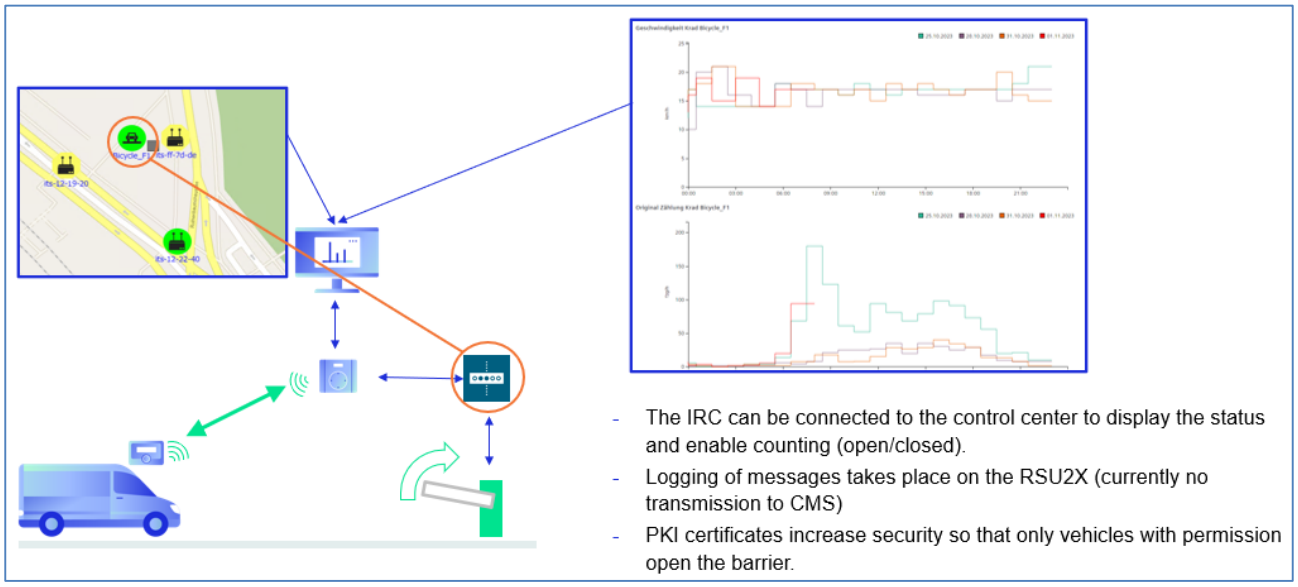


Figure 14. *Day 2 use case Barrier-Control-System Source: Yunex Traffic C-ITS*

Cooperative intelligent transport systems (C-ITS) bring through vehicle2x communication significant reduction of traffic jams, accidents and emissions.

2.3.2. Successful projects with V2X implemented in interurban areas

Since 2017, there have been many successful projects with V2X implemented in interurban areas. These include the following examples:

1. Austria: ASFINAG C-ITS (ongoing since 2018).

Implemented Use Cases:

- IVIM (In Vehicle Signage, In Vehicle Speed Limit)
- DENM (Hazardous Locations Notification, Roadworks Warning)
- Travel Time Service

2. Belgium: C-Roads Wallonia (2017 - 2020).

Implemented Use Case:

- DENM (Hazardous Locations Notification, Roadworks Warning)

3. Italy: C-Roads Italy Autostrada Brescia-Padova (2021 - 2023).

Implemented Use Cases:

- IVIM (Dynamic Speed Limit)
- DENM (Hazardous Locations Notification, Roadworks Warning)

3. CONCLUSION

The current technology has been in operation for several years and has also been expanded and adapted during this time. The conversion to digital technology is a great challenge for the operators and for this reason must be implemented gradually with a migration concept adapted to the respective operator.
The main obstacles to V2X implementation are more legal topic and regulatory side. Also, the fact that all car producers should adopt to the growing trend. “British weekly *The Economist* argued in 2016 that autonomous driving is more driven by regulations than by technology.” [3]

With the C-Roads platform, as a joint initiative of European Member States and road operators for testing and implementing C-ITS services, cross-border harmonization and interoperability should ensure more synchronized C-ITS deployment in Europe (as described on the Figure 14). [6]

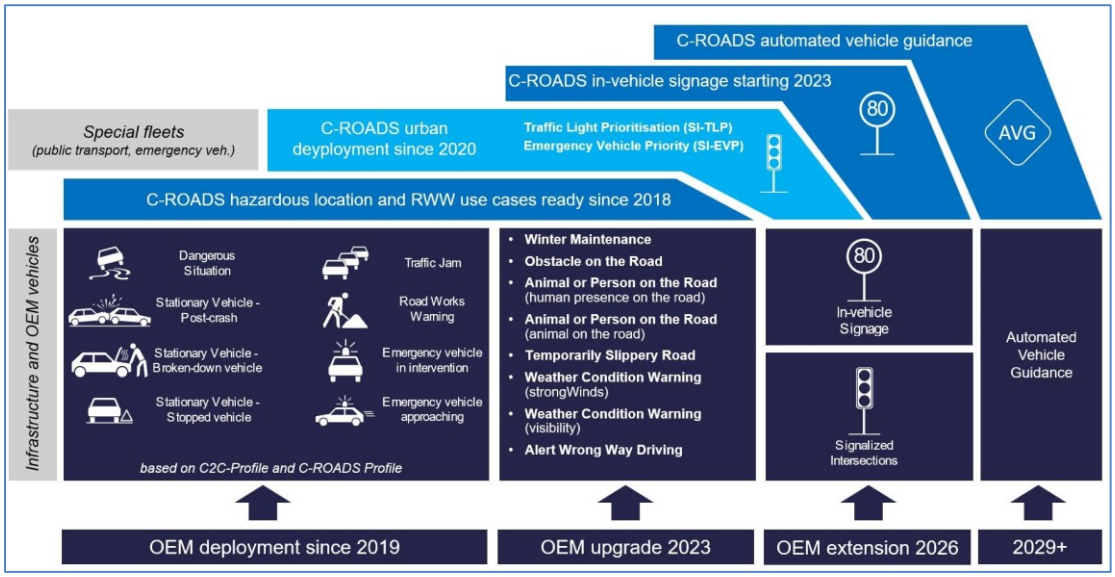


Figure 15. *Roadmap of C-ITS services of the traffic infrastructure. Source: ASFiNAG / C-Roads*

Literature

The work is based on internal documentation, which is the property of Yunex Traffic and is not publicly available.

[1] Yunex Traffic (2024), *Traffic Management – Connected Mobility Solutions,* [Internet] Available at: Connected Mobility Solutions - Yunex Traffic
[2] Yunex Traffic (2024), *Advanced Traffic Management*, [Internet] Available at: Advanced Traffic Management - Yutraffic Concert - Yunex Traffic

Other relevant sources of information:

[3] ASFiNAG Blog, [Internet] Available at: „Achtung: Unfall voraus!“ – ASFINAG-Warnungen werden direkt im Fahrzeug angezeigt | ASFINAG Blog
[4] Forbes, Article, [Internet] Available at: Volkswagen Adds ‘Vehicle-To-Everything’ Communications To Revamped Golf With NXP Chips (forbes.com)
[5] V2X Wikipedia article, [Internet] Available at: Vehicle-to-everything - Wikipedia
[6] C-Roads platform, [Internet] Available at: Platform: C-Roads
[7] C-ITS Strategy Austria, [Internet] Available at: https://www.bmk.gv.at/dam/jcr:805487b2-3563-4bd0-8fc6-e392970a42ec/citsstategy.pdf
[8] SAE International, [Internet] Available at: SAE Levels of Driving Automation™ Refined for Clarity and International Audience

RAZVOJ MODELA ZA DOBIJANJE INTERVALA SLEĐENJA SA ASPEKTA EFIKASNOSTI I BEZBEDNOSTI DVOTRAČNIH PUTEVA

Marko Subotić[1]
Saobraćajni fakultet Doboj, Univerzitet Istočno Sarajevo, Vojvode Mišića 52, marko.subotic@sf.ues.rs.ba
Vladan Tubić
Saobraćajni fakultet Beograd, Univerzitet u Beogradu, Vojvode Stepe 305, vladan@sf.bg.ac.rs
Željko Stević
Saobraćajni fakultet Doboj, Univerzitet Istočno Sarajevo, Vojvode Mišića 52, zeljko.stevic@sf.ues.rs.ba
Suzana Miladić-Tešić
[4] Saobraćajni fakultet Doboj, Univerzitet Istočno Sarajevo, Vojvode Mišića 52, suzana.miladictesic@sf.ues.rs.ba

Rezime: *Interval sleđenja, kao mikroskopski parametar saobraćajnog toka, predstavlja značajan pokazatelj uslova odvijanja saobraćaja primenljiv u saobraćajnim analizama. Sa ciljem postizanja kontinuiranog saobraćajnog toka, sa aspekta efikasnosti potrebni su uravnoteženi intervali, a sa aspekta bezbednosti saobraćaja duži intervali sleđenja. U radu su analizirani intervali sleđenja dobijeni empirijskim istraživanjem na mernim sekcijama na usponu/padu dvotračnih puteva u Bosni i Hercegovini, pri čemu su razvijeni modeli polinoma osmog stepena za dobijanje ovih parametara u funkciji uzdužnog nagib, sa visokim koeficijentom korelacije (R^2>0,7). Analizom intervala sleđenja u funkciji uzdužnog nagiba za različite klase vozila, dobijene vrednosti pokazuju povećanje intervala sleđenja za veće uspone. Takođe, pokazano je da je interval sleđenja stohastička veličina, čije vrednosti značajno variraju u uslovima slobodnog saobraćajnog toka na usponu/padu dvotračnih puteva.*

Ključne reči: *interval sleđenja, slobodan tok, klasa vozila, efikasnost, bezbednost*

DEVELOPING A MODEL TO DETERMINE TIME HEADWAYS FROM THE ASPECT OF TWO-LANE ROADS EFFICIENCY AND SAFETY

Marko Subotić
Faculty of Transport and Traffic Engineering, University of East Sarajevo, Vojvode Mišića 52, marko.subotic@sf.ues.rs.ba
Vladan Tubić
Faculty of Transport and Traffic Engineering, University of Belgrade, Vojvode Stepe 305, vladan@sf.bg.ac.rs
Željko Stević
Faculty of Transport and Traffic Engineering, University of East Sarajevo, Vojvode Mišića 52, zeljko.stevic@sf.ues.rs.ba
Suzana Miladić-Tešić
Faculty of Transport and Traffic Engineering, University of East Sarajevo, Vojvode Mišića 52, suzana.miladictesic@sf.ues.rs.ba

Abstract: *The time headway, as a microscopic parameter of the traffic flow, is an important indicator of traffic conditions applicable in traffic analyses. In order to achieve a continuous traffic flow, balanced headways are needed from the efficiency aspect while longer ones are necessary from the aspect of the traffic safety. This paper analyses headways obtained by empirical research on measuring sections on the gradual rise/fall of two-lane roads in Bosnia and Herzegovina, thus developing 8th degree polynomial models to obtain these parameters as a function of the longitudinal slope, with a high correlation coefficient (R^2>0,7). Analysing the headways in the function of the longitudinal gradient for different classes of vehicles, recorded values show an increase in the headway for higher gradients. Also, it has been shown that headway is a stochastic quantity, the values of which vary significantly in conditions of the free traffic flow on the gradual rise/fall of the two-lane roads.*

Keywords: *headway, free flow, vehicle class, efficiency, safety*

1. UVOD

Dvotračni putevi čine veliki deo putne mreže, a posebno su zastupljeni u ruralnim područjima. Radi efikasnog i bezbednog odvijanja saobraćaja na njima, potrebno je obezbediti adekvatne razmake i optimalnu vidljivost vozila u kolonskoj vožnji i vozila koja se mimoilaze. Na dvotračnim putevima vozačima je dat određeni nivo

[1] Autor zadužen za korespodenciju: Marko Subotić, e-mail: marko.subotic@sf.ues.rs.ba

slobode kretanja da izaberu željenu brzinu, optimalni vremenski/prostorni razmak između vozila, da propuštaju brza vozila i sl. Mere performansi dvotračnih puteva su važni za operativnu analizu, kao i za projekte nadogradnje i poboljšanja uslova odvijanja saobraćaja na njima. Pod operativnim analizama se uglavnom sprovode procedure date u HCM priručniku (Highway Capacity Manual) za utvrđivanje mera performansi [1] kao što su prosečna brzina putovanja (ATS) i procenat vremena provedenog praćenja (PTSF) za tri reprezentativne klase dvotračnih puteva. Na našim dvotračnim putevima, mere performansi se uglavnom oslanjaju na parametre saobraćajnog toka, kao merljive veličine koje se primenjuju u lokalnim uslovima. Čest je slučaj da su brza vozila prinuđena da prate sporija, što dovodi do formiranja kolona, stvaranja zagušenja i sl., što opet zavisi od obima saobraćaja. Vozači vozila koji slede druga vozila, prihvataju pojavu optimalnih praznina između istih, a samim tim i intervale sleđenja između vozila. U takvim uslovima deo vozača postaje nestrpljiv, pa preuzimaju značajnu količinu rizika da bi izvršili preticanje sleđenog vozila, što implicira negativnim pojavama u bezbednosti saobraćaja.

Interval sleđenja vozila (*eng.Headway*) je važan mikroskopski parametar saobraćajnog toka koji se definiše kao vremenska razlika između čela prolaska dva bilo koja uzastopna vozila na posmatranom preseku saobraćajnice. Inženjerska primena ovog parametra obuhvata različite oblasti istraživanja koje se primenjuju u saobraćaju, počevši od kapaciteta puta, Nivoa Usluge, bezbednosti puteva, efikasnosti odvijanja saobraćaja i sl. Veliki broj istraživanja [2,3,4,5,6] pored intervala sleđenja, ujedno analizira i druge parametre toka (slobodna brzina, gustina, protok i sl.) za ocenu uslova odvijanja saobraćaja na deonicama puteva. Kontinuirani saobraćajni tok, sa optimalnim intervalima sleđenja predstavlja meru efikasnosti i bezbednosti na dvotračnim putevima. Takođe, razvijeni modeli kretanja vozila zasnovani na različitim pojavama u saobraćaju su od pomoći u inženjerskoj praksi za analizu kapaciteta puta i proceni efikasnosti primenjene strategije upravljanja saobraćajnim tokovima.

Osnovni cilj ovog rada zasnovan je na razvoju modela polinomom osmog stepena sa relativno visokim koeficijentom korelacije (R^2>0,7), na osnovu prikupljene baze podataka sa 14 mernih sekcija dvotračnih dvosmernih puteva. Takođe, na osnovu relevantnog uzorka, utvrđeno je da će se vrednosti intervala sleđenja na većini mernih sekcija raspoređivati po zakonitosti logaritamske-normalne raspodele.

U narednim poglavljima, rad je organizovan na sledeći način. U poglavlju 2 predstavljen je literarni pregled gde su dati savremeni literarni podaci za intervale sleđenja i njihove raspodele. Metodologija istraživanja i karakteristike intervale sleđenja analizirani su u poglavlju 3. Razvoj model i glavni rezultati istraživanja opisani su u poglavlju 4. Diskusija rezultata istraživanja i zaključci dati su u poglavlju 5, zajedno sa pravcima budućih istraživanja.

2. LITERARNI PREGLED

Veliki broj istraživanja zasnovan je na analizi raspodele interval sleđenja u odnosu na saobraćajnu situaciju. [2,3] U svrhu razvoja algoritma optimizacije saobraćajanih signala u pokrajini Beijing u Kini, dokazano je da je log-normalni model raspodele pogodniji za uslove slobodnog saobraćajnog toka, dok za status zasićenja je pogodniji log-logistički model raspodele [7]. Istraživanjem sprovedenim na osnovu eksperimentalne analize intervala sleđenja i distribucije brzina na ruralnim putevima u Severnoj Italiji, korišćen je model intervala sleđenja zasnovan na gama-generalizovanom čekanju. Analiza je rađena na dva poprečna preseka ravnih segmenata puta sa širinom saobraćajne trake 3,6 m i širinom ramena od 0,6m. Utvrđeno je da parametri saobraćajnog toka koji utiču na distribuciju intervala sleđenja su brzina i sastav (struktura) toka. Takođe, vremenske (ne)prilike i geometrija puta, bili su zajednički uslovi za sve analizirane scenarije [2].

Radi klasifikacije interval sleđenja predložena su tri modela za tri stanja na putevima sa homogenim saobraćajem: negativni eksponencijalni model u uslovima smanjenog saobraćaja, Gama model za srednje stanje saobraćaja i model normalne raspodele za veliki saobraćaj ograničenog domena [8]. Takođe, Jang je analizirao interval sleđenja na prigradskoj arteriji i izvršio klasifikaciju podataka za pet različitih saobraćajnih tokova (5-9, 10-14, 15-19, 20-24, 25-29 voz/min) [9].

Analizirajući efekte bezbednosti saobraćaja na putničkim automobilima sa aspekta kontinuiranog saobraćajnog toka, razvijeno je istraživanje koje se fokusira na uslove saobraćajnog toka na padu, gde se vozačima daju saveti kako ravnomernije da se raspoređuju na dve trake. Saveti su ukazivali da se poveća brzina samo ako postoji spajanje prethodnika u susednoj traci, ili da se vozači obaveste o kraju reda, povećavajući spremnost za ubrzanje. Pozitivni efekti se već mogu uočiti za male protoke, dok je značajno smanjenje vremenskih gubitaka uočeno za veće protoke [10].

Takođe, na osnovu istraživanja sprovedenog na dvotračnim putevima u pokrajini Venecija (severna Italija) analizirani su dobijeni podaci na četiri preseka iz induktivnih petlji i radarskih senzora koji su simullirani. Rezultati su pokazali da inverzna Vejbulova raspodela je najpogodnija za predstavljanje raspodele intervala sleđenja za većinu opsega protoka, a takođe i log-logistička raspodela se prilično dobro uklapa u posmatrane raspodele intervala sleđenja, bez obzira na opseg protoka [11]. Istraživanjem koje je sprovedeno na 50 različitih deonica ruralnih dvotračnih puteva svrstanih u dve klase u Srbiji, pokazano je da postoji razlika u graničnim vrednostima intervala sleđenja za ove dve klase puteva u uslovima slobodnog toka. Za klasu I interval sleđenja je iznosio 6,3 s, a za klasu II 8,4 s. [12]

3. METODOLOGIJA ISTRAŽIVANJA

Prema HCM priručniku [1], analiza intervala sleđenja na dvotračnim putevima u uslovima slobodnog saobraćajnog toka nema primarnu ulogu u definisanju Nivoa Usluge i kapacitetu saobraćajnica, kao što je ta uloga data brzini toka, dok se u domaćim preporukama istraživanju intervala sleđenja daje prioritetna uloga u definisanju pokazatelja zasnovanih na efikasnosti i bezbednosti saobraćaja. Zbog toga se može izvesti blaga hipotetička pretpostavka da se sa povećanjem interval sleđenja smanjuje mogućnost potencijalne nezgode što se pozitivno reflektuje na bezbednost saobraćaja, a sa aspekta efikasnosti uravnoteženi intervali sleđenja obezbeđuju kontinuitet kretanja vozila, čime se pozitivno deluje na efikasnost eksplotacije dvotračnih puteva.

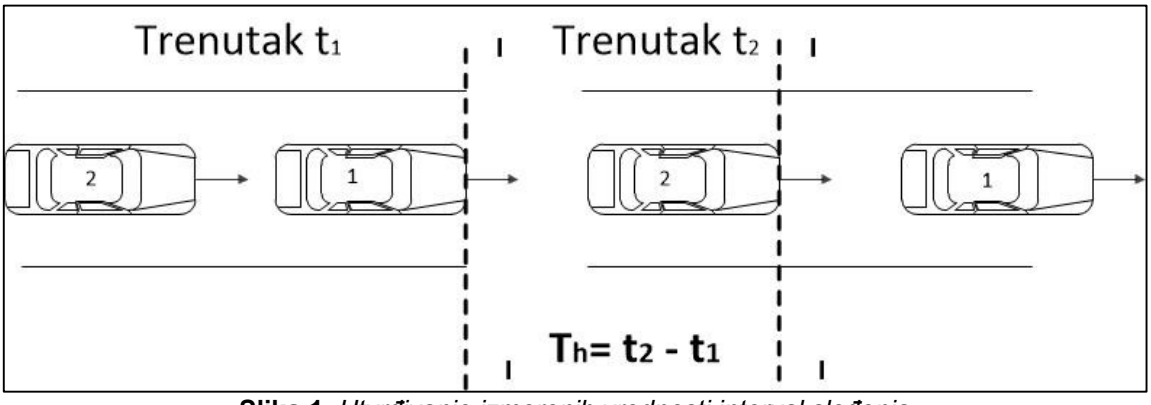
U okviru ovog rada prihvaćena je metodologija lokalnog merenja za empirijsko utvrđivanje intervala sleđenja primenljiva na mernim sekcijama dvotračnih puteva, tako da je moguće ovu metodologiju primeniti i u Bosni i Hercegovini. Na svakoj mernoj sekciji zamišljenog preseka dvotračnog puta za jednu saobraćajnu traku, moguće je utvrditi interval sleđenja prema unapred definisanim klasama vozila (putnički automobil - putnički automobil (PA-PA), BUS - putnički automobil (BUS-PA), lako teretno vozilo - putnički automobil (LTV-PA), teško teretno vozilo - putnički automobil (TTV-PA) i auto voz - putnički automobil (AV-PA)). Interval sleđenja na jednom preseku puta u utvrđenom vremenskom period T dobija se iz relacije:

$$\overline{T_h} = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^{N} t_{hi} \ \ (s) \qquad (1)$$

gde su:

$\overline{T_h}$ – srednja vrednost intervala sleđenja posmatranog preseka puta za i-tu klasu vozila,
N – broj vozila koja su prošla kroz zamišljeni presek saobraćajnice u period T,
t_{hi}- konkretno izmerena vrednost intervala sleđenja na preseku saobraćajnice.

Na slici 1 prikazan je metod utrđivanja intervala sleđenja, tako što se na mernim sekcijama odredi zamišljeni presek puta gde prolazi “čelo” vozila, a nakon toga se utvrđuje vrednost vremenskog intervala sleđenja sledećeg vozila.



Slika 1. *Utvrđivanje izmerenih vrednosti interval sleđenja*

Postupak utvrđivanja intervala sleđenja podrazumeva da se sve izmerene vrednosti intervala sleđenja klasiraju prema klasama vozila za dobijene vrednosti. Na osnovu dobijenih aritmetičkih sredina na posmatranim presecima mernih sekcija puta analiziranih klasa vozila, moguće je razviti model za utvrđivanje interval sleđenja primenljiv u lokalnim uslovima.

Za potrebe ovog rada sprovedeno je istraživanje na 14 preseka posmatranih mernih sekcija deonica dvotračnih puteva, kako bi se na bazi referentnog uzorka, a u formi preporuke, definisale vrednosti intervala sleđenja prilagođenih konktretnim lokalnim uslovima u saobraćaju. Korišćenje modela za izračunavanje aritmetičke sredine intervala sleđenja dobijanih na osnovu baze izmerenih podataka u lokalnim uslovima je vezano za relaciju (1).

Na relevantnom uzorku izmerene su vrednosti intervala sleđenja i eksportovane u bazu podataka, na osnovu čega je vršena analiza i sinteza dobijenih podataka. Takođe, klasiranje vrednosti rađeno jeu različitom rasponu klasa, što je zavisilo od kategorije vozila. U kontekstu definisanja metodologije i tehnike istraživanja, izbora lokacije i načina obrade podataka, korišćeni su naredni elementi i kriterijumi koji su dati u tabeli 1.

Tabela 1. *Kriterijumi merenja intervala sleđenja*

Primenjena metodologija	osnovni metod empirijskog merenja intervala sleđenja, posmatranje pet osnovnih kategorija vozila (PA, BUS, LTV, TTV i AV
Tehnika snimanja	poluautomatska, primenom posebnog softvera PROTOK VOZILA instaliranog na laptopu
Izbor lokacije	fizički elementi: standardni dvotračni put (magistralni), na presecima mernih sekcija sa uzdužnim nagibom
	saobraćajni kriterijumi: prosečno saobraćajno optrećenje, veći procenat učešća komercijalnih vozila (15 i više), saobraćajna traka za pravo, nepostojanje uticaja parkiranja ili autobuskih stajališta, realizacija snimanja u vršnom i vanvršnom periodu
Obrada podataka	Na bazi prosečnih vrednosti pojedinačnih lokacija i sumarne prosečne vrednosti, u analizi se zanemaruje uticaj pozicije vozila u redu

Izvor: Autori

Ipak, pre nego što se pristupi izučavanju vrednosti intervala sleđenja, utvrđena je struktura vozila u toku na sva tri preseka. Izmerena vrednost izražena u procentima se odnosi na 76,9 % putničkih vozila, što nam govori o realnom uticaju komercijalnih vozila od 23,1 %. Respektivno u skladu sa tim, može se smatrati opravdanim izučavanje vrednosti intervala sleđenja za dvotračni put, jer je veliki uticaj komercijalnih vozila, a pre svega TTV na saobraćajni tok.

4. REZULTATI ISTRAŽIVANJA

Lokacije mernih sekcija smeštene su na magistralnim putevima vangradske putne mreže M-103, M-105, M-106 i M-108 u Bosni i Hercegovini. Analizom deonica magistralnih puteva I reda na području Bosne i Hercegovine (ukupno 14 deonica), obrađeno je 14 mernih sekcija na predviđenim deonicama ukupne dužine putne mreže BiH (111,866 km). Svaka dužina merne sekcije ispred zamišljenog preseka nije bila manja od 1000 m dužine, na kojoj su utvrđene vrednosti aritmetičke sredine uspona/pada, a koje su date u rasponu od pada -5.50% do uspona od 7,50% na mernim sekcijama deonica.

Na mernim sekcijama uticaj ulivanja i izlivanja vozila je bio zanemarljiv, a saobraćaj se sastojao uglavnom od vozača koji svakodnevno sedaju za volan. Saobraćaj je sniman pomoću lokalnog merenja iz bočne perspektive. Činjenica je da dobijeni podaci ne utiču na nivo protoka vozila niti na sastav saobraćajnog toka, ali bi imali značajan uticaj na brzinu vozila. Okvirni udeo komercijalnih vozila (BUS, LTV, TTV i AV) na datoj lokaciji iznosi oko 23,1% tokom perioda snimanja (10:30-11:30) po suvom vremenu kada je termin najvećeg tranzita.

U tabeli 2 prikazane su analizirane deonice sa oznakama, dužinama deonica, dužinama mernih sekcija i nagibom (usponom/padom). Ne ulazeći u opsežnu analizu PGDS-a, uočeno je da na svim mernim sekcijama preovladavaju uslovi slobodnog saobraćajnog toka, tako da će navedeni modeli biti predloženi za navedene lokalne uslove.

Tabela 2. *Tehničko-eksploatacione karakteristike mernih sekcija deonica dvotračnih puteva*

Redni broj	Deonica	Tehničko-eksploatacione karakteristike deonica			
		Oznaka deonice	Dužina merne sekcije	UN	Dužina deonice (km)
1	Ivanjska-Šargovac	M-I-108	min 1000 m	-5.50%	14.967
2	Vrhovi-Šešlije	M-I-103	min 1000 m	-5.00%	14.073
3	Ivanjska-Šargovac	M-I-108	min 1000 m	-3.00%	14.967
4	Ivanjska-Šargovac	M-I-108	min 1000 m	-2.00%	14.967
5	Vrhovi-Šešlije	M-I-103	min 1000 m	-1.00%	14.073
6	Rudanka-Doboj	M-I-105	min 1000 m	0%	7.405
7	Klašnice 1 -Gornja Vijaka	M-I-106	min 1000 m	1.00%	38.553
8	Klupe-Teslić (Barići)	M-I-108	min 1000 m	2.00%	16.734
9	Klašnice 1 -Gornja Vijaka	M-I-106	min 1000 m	3.00%	38.553
10	Klašnice 1 -Gornja Vijaka	M-I-106	min 1000 m	4.00%	38.553
11	Vrhovi-Šešlije	M-I-103	min 1000 m	5.00%	14.073
12	Obodnik-Klupe	M-I-108	min 1000 m	6.00%	20.134
13	Obodnik-Klupe	M-I-108	min 1000 m	7.00%	20.134
14	Obodnik-Klupe	M-I-108	min 1000 m	7.50%	20.134

Izvor: Autori

Podaci o intervalima sleđenja prikupljani su korišćenjem empirijskog merenja primenom softvera „PROTOK VOZILA“ za klasiranje, snimanje i eksportovanje dobijenih podataka. Prema cilju i programu sprovedenog istraživanja potrebno je razviti modele za utvrđivanje vrednosti intervala sleđenja na vangradskim putevima u Bosni i Hercegovini. Sa dobijenim rezultatima ova zavisnost se može prikazati u analitičkom i grafičkom obliku matematičkog modela.

Planom sprovednog istraživanja izmerene su vrednosti intervala sleđenja za PA-PA, BUS-PA, LTV-PA, TTV-PA i AV-PA. Za svaku mernu sekciju utvrđene su vrednosti empirijske aritmetičke sredine intervala sleđenja vozila za svih pet mernih klasa vozila. Vizuelno je utvrđeno da je broj izmerenih intervala sleđenja koji se kreću u toku dat kao *n-1,* jer se prvo vozilo ne uzima u razmatranje. Dobijeni rezultati su dali određenu međuzavisnost intervala sleđenja za pet klasa vozila (čije su reprezentativne vrednosti dobijene aritmetičkom sredinom) i uzdužnog nagiba (uspon/pad), pa će se kriva koja predstavlja tu međuzavisnost aproksimirati polinomom odgovarajućeg stepena. Iz razloga koji opredeljuje što precizniju primenu obrasca, biće formirani modeli polinoma osnog stepena koji obezbeđuje dovoljnu tačnost aproksimacije sa relativno visokim koeficijentom korelacije (R^2).

Zavisnost intervala sleđenja od uzdužnog nagiba (uspon/pad) predstaviće se sledećim polinomom osmog stepena:

$$\mathbf{T_h = a + b \cdot G + c \cdot G^2 + d \cdot G^3 + e \cdot G^4 + f \cdot G^5 + g \cdot G^6 + h \cdot G^7 + i \cdot G^8} \quad (2)$$

Gde su:

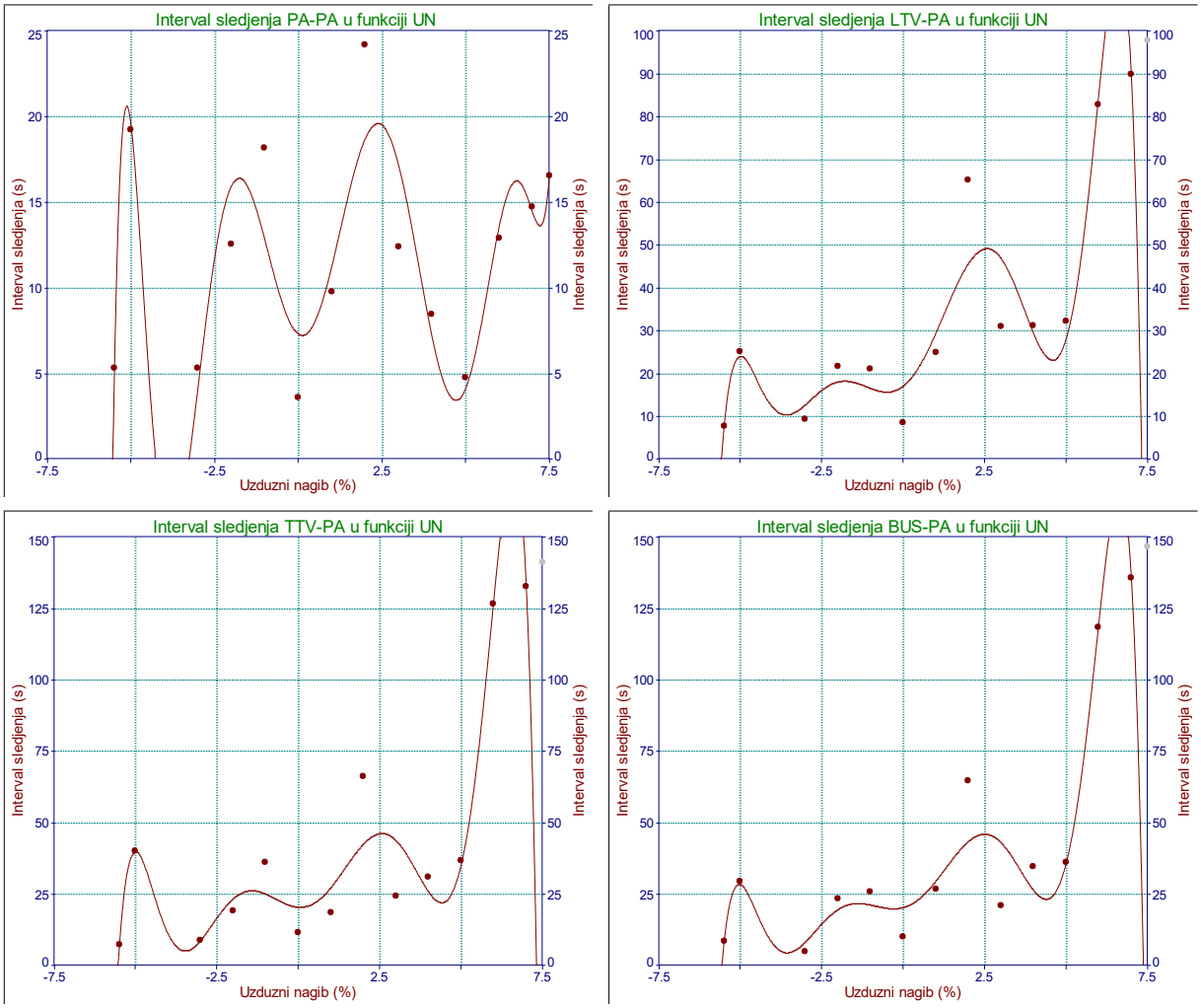
T_h – aritmetičke sredine vrednosti intervala sleđenja za i-tu klasu vozila,
G – uzdužni nagib,
a,b,c,d,e,f,g,h,i – koeficijenti.

Na osnovu dobijenih podataka o intervalima sleđenja na 14 mernih sekcija koje su klasirane za 5 različitih klasa, aritmetičkom sredinom (AS) izračunate sui dobijene srednje vrednosti. Takođe, dobijene su vrednosti i standarddne devijacije (SD), koje u ovom slučaju nisu od praktičnog zncaja. Dobijene vrednosti AS pokazuju da su intervali sleđenja stohastičke veličine i da variranje njihovih vrednosti prema klasama vozila u funkciji uzdužnog nagiba zavisi od više uticajnih faktora (PGDS, Rmin, vozno-dinamičkih karakteristika vozila i sl.). Takođe, najniža dobijena srednja vrednost za interval sleđenja PA-PA je dobijena na deonici Rudanka-Doboj za ravan teren UN=0%, a naniža vrednost za AV-PA, na deonici Ivanjska-Šargovac na padu od -3%. Za klase komercijalnih vozila evidentno je povećanje interval sleđenja na usponu, dok su na padu, vrednosti intervala sleđenja skloni variranju vrednosti od slučaja do slučaja, što pokazuje da su intervali sleđenja stohastičke veličine (Tabela 3).

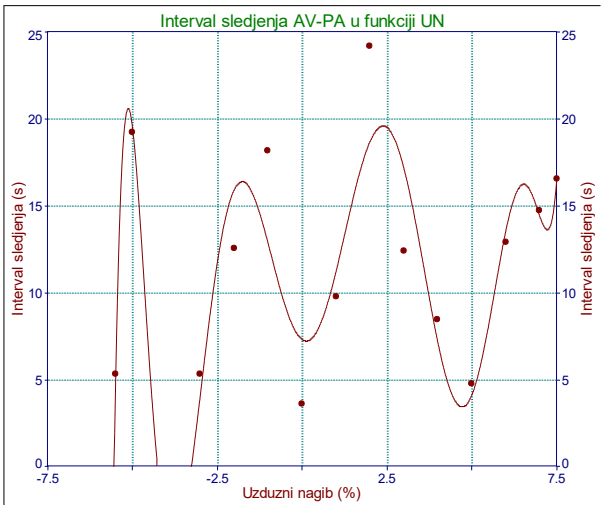
Tabela 3. *Aritmetička sredina dobijenih vrednosti interval sleđenja sa veličinom mernog uzorka*

Redni broj	Deonica	Veličina mernog uzorka (br. merenja)	AS intervala sleđenja po mernim sekcijama deonica				
			Th [s] (PA-PA)	Th [s] (LTV-PA)	Th [s] (TTV-PA)	Th [s] (BUS-PA)	Th [s] (AV-PA)
1	Ivanjska-Šargovac	1000	5.349	7.714	7.577	8.633	10.136
2	Vrhovi-Šešlije	1000	19.269	25.272	40.269	29.491	44.767
3	Ivanjska-Šargovac	1000	5.331	9.406	9.107	4.979	7.934
4	Ivanjska-Šargovac	1000	12.553	21.713	19.393	23.681	12.926
5	Vrhovi-Šešlije	1010	18.174	21.102	36.395	26.04	33.222
6	Rudanka-Doboj	1011	3.6	8.609	11.969	10.162	16.488
7	Klašnice 1 -Gornja Vijaka	912	9.794	25.096	18.537	26.949	16.669
8	Klupe-Teslić (Barići)	775	24.22	65.23	66.46	64.88	97.99
9	Klašnice 1 -Gornja Vijaka	908	12.43	31.124	24.458	21.191	64.944
10	Klašnice 1 -Gornja Vijaka	1007	8.48	31.271	31.253	34.794	63.897
11	Vrhovi-Šešlije	918	4.79	32.367	36.991	36.362	82.858
12	Obodnik-Klupe	736	12.907	82.888	126.711	118.67	189.593
13	Obodnik-Klupe	713	14.739	90.027	132.791	135.949	236.574
14	Obodnik-Klupe	811	16.559	97.84	141.196	146.706	264.434
UKUPNO		**12.801**					

Izvor: Autori



Slika 2. *Grafički prikaz modela za utvrđivanje interval sleđenja PA-PA, LTV-PA, TTV-PA i BUS-PA na dvotračnim putevima u BiH*



Slika 3. *Grafički prikaz modela za utvrđivanje interval sleđenja AV-PA na dvotračnim putevima u BiH*

Grafički prikaz modela razvijenih polinomom osmog stepena za utvrđivanje vrednosti interval sleđenja u funkciji uzdužnog nagiba predstavljen je na slici 2 i slici 3. Ovako kompleksan polinomni model je razvijen radi dobijanja što većeg nivoa korelacije za svih pet klasa, gde je R^2>0,77.

Takođe, pored grafičkog oblika, dat je i analitički oblik modela prema kategorijama vozila prikazan u tabeli 4. Potrebno je napomenuti, da nije razvijan jedinstven model za sve klase, jer su vozno dinamičke karakteristike vozila i tehničko-eksploatacione karakteristike puta takve da ovakav model ne bi bio verodostojan.

Tabela 4. *Dobijeni modeli polinoma osmog stepena za utvrđivanje interval sleđenja*

Kategorija vozila PA-PA	Koeficijent korelacije $R^2 = 0{,}7736$
$T_h = 7{,}294 - 1{,}197 \cdot G + 5{,}677 \cdot G^2 + 0{,}486 \cdot G^3 - 0{,}977 \cdot G^4 + 0{,}007 \cdot G^5 + 0{,}05 \cdot G^6 - 0{,}003 \cdot G^7 - 0{,}001 \cdot G^8$ (s)	
Kategorija vozila LTV-PA	Koeficijent korelacije $R^2 = 0{,}9114$
$T_h = 17{,}212 - 6{,}166 \cdot G + 6{,}714 \cdot G^2 + 0{,}458 \cdot G^3 - 0{,}91 \cdot G^4 + 0{,}074 \cdot G^5 + 0{,}04 \cdot G^6 - 0{,}002 \cdot G^7 - 0{,}001 \cdot G^8$ (s)	
Kategorija vozila TTV-PA	Koeficijent korelacije $R^2 = 0{,}9386$
$T_h = 20{,}466 - 0{,}509 \cdot G + 6{,}905 \cdot G^2 + 1{,}964 \cdot G^3 - 1{,}155 \cdot G^4 - 0{,}176 \cdot G^5 + 0{,}06 \cdot G^6 + 0{,}004 \cdot G^7 - 0{,}001 \cdot G^8$ (s)	
Kategorija vozila BUS-PA	Koeficijent korelacije $R^2 = 0{,}9424$
$T_h = 20{,}411 - 3{,}336 \cdot G + 6{,}032 \cdot G^2 + 1{,}065 \cdot G^3 - 0{,}984 \cdot G^4 - 0{,}112 \cdot G^5 + 0{,}05 \cdot G^6 + 0{,}003 \cdot G^7 - 0{,}001 \cdot G^8$ (s)	
Kategorija vozila AV-PA	Koeficijent korelacije $R^2 = 0{,}7736$
$T_h = 7{,}295 - 1{,}197 \cdot G + 5{,}677 \cdot G^2 + 0{,}486 \cdot G^3 + 0{,}977 \cdot G^4 + 0{,}007 \cdot G^5 + 0{,}05 \cdot G^6 - 0{,}003 \cdot G^7 - 0{,}001 \cdot G^8$ (s)	

5. DISKUSIJA REZULTATA ISTRAŽIVANJA I ZAKLJUČCI

Dobijeni rezultati analogni su sa polaznom hipotetičkom pretpostavkom da se sa povećanjem intervala sleđenja, smanjuje mogućnost potencijalne nezgode što se pozitivno reflektuje na bezbednost saobraćaja, a sa aspekta efikasnosti uravnoteženi intervali sleđenja obezbeđuju kontinuitet kretanja vozila, čime se pozitivno deluje na efikasnost eksplotacije dvotračnih puteva. Analizom dobijenih podataka, najniži intervali sleđenja su dobijeni na deonici Rudanka–Doboj, gde je i najveći obim saobraćaja, a uvidom u bazu podataka o saobraćajnim nezgodama, ova deonica ima najveći broj saobraćajnih nezgoda i ocenjena je kao relativno rizična [13], čime je potvrđen prvi deo hipotetičke pretpostavke. Takođe, u okviru ovog rada, pokazano je da su velika odstupanja srednjih vrednosti intervala sleđenja od deonice do deonice po klasama vozila, što je sa aspekta efikasnosti relativno nepovoljno, bez obzira što su u pitanju uslovi slobodnog saobraćajnog toka.

Navedene deonice u cilju efikasne eksploatacije ipak zahtevaju uravnotežene intervale sleđenja, a samim tim i kontinuirane saobraćajne tokove, čime se potvrđuje kompletna hipotetička pretpostavka.

Aritmetičke sredine vrednosti intervala sleđenja za PA, LTV, TTV, BUS i AV pokazuju neuravnoteženo dobijene vrednosti. Odstupanja vrednosti intervala sleđenja prema mernim sekcijama pokazuju odstupanja dobijenih vrednosti i do 80 puta u uslovima slobodnog toka (npr. odnos intervala sleđenja kod AV za UN=7.5% u odnosu na PA na ravnom terenu). Takođe, sa povećanjem uzdužnog nagiba-uspona, dolazi do povećanja prosečno dobijenih vrednosti intervala sleđenja, što se posebno odnosi na komercijalna vozila. Kontinuirani rast intervala sleđenja, primećen je sa povećanjem uspona od ravnog terena dodo uspona od UN=7.50%, dok se na padu, može primetiti varijacija srednjih vrednosti intervala sleđenja za sve klase vozila. Na osnovu ovoga, može se zaključiti da se vrednosti intervala sleđenja ne ponašaju isto na usponu i padu, odnosno, ne može se govoriti o kontinuiranom padu/rastu ovih vrednosti u funkciji uzdužnog nagiba.

Minimalno dobijena vrednost aritmetičke sredine intervala sleđenja je na deonici Rudanka-Doboj i iznosi 3.6 s na UN=0%, a maksimalno dobijena vrednost je za AV na usponu od 7.5% i iznosi 264.34 s.

U okviru ovog rada, razvijeni su polinomi osmog stepena funkcionalne zavisnosti intervala sleđenja od UN po suvom kolovozu dvotračnih puteva. Razvijeni modeli dati su u analitičkom i grafičkom obliku za PA-PA, LTV-PA, BUS-PA, TTV-PA i AV-PA. Potrebno je istaći da se nešto niže vrednosti koeficijenta korelacije datih modela (R^2=0.7736) javljaju za PA-PA i AV-PA, što pokazuje veliko rasipanje dobijenih AS intervala sleđenja, bez obzira što je razvijen polinom osmog stepena. Ostale vrednosti imaju relativno uravnotežena odstupanja (LTV-PA, BUS-PA, TTV-PA), jer je dobijen visok koeficijent korelacije R^2>0.9.

Kao nedostatak ovog istraživanja, potrebno je uraditi detaljnu statističku analizu, sa ciljem dobijanja 15, 50 i 85-pecentilne vrednosti intervala sleđenja. Takođe, potrebno je napomenuti da bez obzira što su ekstremne vrednosti eliminisane iz uzorka, utvrđena su znatna odstupanja vrednosti intervala sleđenja u funkciji uzdužnog nagiba.

Svi dobijeni rezultati naglašeno ukazuju na potrebu konstantnog praćenja promena u strukturi saobraćajnog toka, kao i promenama u intervalima sleđenja. U cilju posedovanja ažurnih podataka o strukturi saobraćajnog toka i performansama pojedinih klasa vozila, neophodno je i u narednom periodu stalno vršiti slična istraživanja, jer je normalno očekivati da će se struktura voznog parka u velikoj meri menjati u narednom periodu, što će se posledično odražavati na usavršavanje modela za utvrđivanje intervala sleđenja.

Zahvale

Ovaj rad je deo istraživanja urađenog u okviru projekta „Istraživanje interval sleđenja u modelima analize efikasnosti i bezbjednosti dvotračnih puteva“ koji je podržalo Ministarstvo za naučnotehnološki razvoj i visoko obrazovanje Republike Srpske, broj **19.032/961-39/23.**

Literatura

[1] Highway Capacity Manual: A Guide for Multimodal Mobility Analysis 2016. 6th ed. Transportation Research Board, Washington, D.C.
[2] Rossi, R.; Gastaldi, M.; Pascucci, F. 2014. Empirical Analysis of Vehicle Time Headways and Speeds on Rural Two-Lane, Two-Way Roads. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2422(1), 141–149. doi:10.3141/2422-16
[3] Mubashir, M.; Khan, J. A.; Shah, A. U.; Khurshid, M. B. 2023. Comparison of Headway Measurement Methods for Heterogeneous Traffic Conditions, International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology (IJRASET) ISSN: 2321-9653, doi.org/10.22214/ijraset.2023.55135
[4] Boora, A.; Ghosh, I.; Chandra, S. ; Rani, K. 2018. Measurement of free-flow conditions on multilane intercity highways under heterogeneous traffic conditions. Journal of the South African Institution of Civil Engineering, 60(1), 2-9. https://dx.doi.org/10.17159/2309-8775/2018/v60n1a1
[5] Oghoyafedo K. N.; Enunwa B. T.; Nwankwo E. (2022). Capacity Evaluation Along Benin-Lagos Expressway by Traffic Flow and Time Headway Approach, NIPES Journal of Science and Technology Research 4(1) pp. 322-328, https://doi.org/10.37933/nipes/4.1.2022.26
[6] Samadi, H.; Aghayan, I.; Abdollahzadeh Nasiri, A.S.; Rahmani, O. ; Hasanvand, M. 2023. Platoon-Based Assessment of Two-Way Two-Lane Roads Performance Measure: A Classification Method, Journal of Advanced Transportation, vol. 2023, Article ID 5054427, 13 pages. https://doi.org/10.1155/2023/5054427

[7] Yin, S.; Li, Z.; Zhang, Y.; Yao, D.; Su, Y.; Li, L. 2009. Headway distribution modeling with regard to traffic status. In 2009 IEEE intelligent vehicles symposium (pp. 1057-1062). IEEE.
[8] May, A. 1990. Traffic Flow Fundamentals. Prentice Hall.
[9] Jang, J. 2012. Analysis of time headway distribution on suburban arterial. KSCE J Civ Eng 16, 644–649. doi.org/10.1007/s12205-012-1214-4
[10] Schakel, WJ.; Klunder, G.; Van Arem, B.V; Harmsen, E.; Hagenzieker, MP. 2012. Reducing travel delay by in-car advice on speed, headway and lane use based on downstream traffic flow conditions - a simulation study. In s.n. (Ed.), Proceedings of the 15th meeting of the Euro working group on transportation (pp. 1-9). EWGT.
[11] Riccardo, R.; Massimiliano, G. 2012. An Empirical Analysis of Vehicle Time Headways on Rural Two-lane Two-way Roads. Procedia - Social and Behavioral Sciences, 54, 865–874. doi:10.1016/j.sbspro.2012.09.802
[12] Stepanović, N.; Tubić, V.; Zdravković, S. 2023. Determining Free-Flow Speed on Different Classes of Rural Two-Lane Highways, Promet – Traffic & Transportation.; 35(3):315-330. https://doi.org/10.7307/ptt.v35i3.195
[13] Subotić, M.; Tubić, V.; Stević, Ž. 2022. Analiza uticaja broja pristupnih tačaka dvotračnih puteva na saobraćajni rizik, 4. srpski kongres o putevima, Srpsko društvo za puteve „Via-Vita“, Beograd.

UTICAJ PUTA I OKOLINE NA NASTANAK SAOBRAĆAJNE NEZGODE U ZONI RADOVA NA PUTEVIMA U REPUBLICI SRBIJI

Dalibor Pešić[1], Aleksandra Obradović[2]
[1] *Saobraćajni fakultet, d.pesic@sf.bg.ac.rs*
[2] *Saobraćajni fakultet, a.obradovic998@gmail.com*

Rezime: *Kako bi se upravljalo određenim sistemom, neophodno je jasno definisati postojeće stanje koje bi se uz adekvatne upravljačke mere približilo ciljanom (željenom) stanju. Jedan od osnovnih ciljeva u bezbednosti saobraćaja odnosi se na smanjenje broja saobraćajnih nezgoda. Primenom različitih alata kojima je moguće na detaljan način uvideti uticaj puta na nastanak saobraćajne nezgode, omogućava se različit spektar mera kojima se mogu otkloniti nedostaci puta koji su u direktnoj vezi sa nastankom saobraćajnih nezgoda. Zona radova predstavlja specifično mesto za sve učesnike u saobraćaju. Neki od načina povećanja nivoa bezbednosti u zoni radova odnosi se na stvaranje suženja pri kretanju, smanjenje brzine kretanja, postavljanje svetlosne saobraćajne signalizacije itd. U radu će biti prikazana analiza bezbednosti saobraćaja u Republici Srbiji sa posebnim osvrtom na uticajni faktor put.*

Ključne reči: *bezbednost saobraćaja, zona radova, saobraćajne nezgode, uticajni faktor puta*

THE INFLUENCE OF THE ROAD AND ENVIRONMENT ON THE OCCURRENCE OF TRAFFIC ACCIDENTS IN THE ROAD WORK ZONE IN THE REPUBLIC OF SERBIA

Dalibor Pešić[1], Aleksandra Obradović[2]
[1] *Faculty of Transport and Traffic Engineering, d.pesic@sf.bg.ac.rs*
[2] *Faculty of Transport and Traffic Engineering, a.obradovic998@gmail.com*

Abstract: *In order to manage a specific system, it is necessary to clearly define the existing state, which, through appropriate control measures, would approach the targeted (desired) state. One of the fundamental goals in road safety is to reduce the number of road accidents. By employing various tools that allow a detailed understanding of the road's impact on the occurrence of road accidents, a diverse range of measures can be implemented to address road deficiencies directly linked to the occurrence of road accidents. Work zones represent a specific location for all traffic participants. Some ways to increase safety levels in work zones include creating narrowing points, reducing travel speed, installing light traffic signaling, etc. The paper will present a safety analysis of traffic in the Republic of Serbia, with a specific focus on the influential factor of the road.*

Keywords: *traffic safety, work zones, road accidents, road impact factor*

1. UVOD

Upravljanjem nekim sistemom ili procesom znači preduzeti upravljačke mere kako bi se postojeće stanje sistema približilo ciljanom (željenom) stanju (Vujanić, i dr., 2011). Kada je u pitanju upravljanje bezbednošću saobraćaja na mreži puteva neophodno je redovno i adekvatno primenjivati alate bezbednosti saobraćaja koji se koriste za procenu stanja bezbednosti saobraćaja.
Put kao jedan od faktora bezbednosti saobraćaja utiče na ranjive učesnike u saobraćaju. Prema klasifikaciji puta, najbezbedniji su autoputevi, dok su najnebezbednije gradske ulice. Na otvorenim putevima za mešovit saobraćaj rizik nastanka nezgode je tri, dok je na gradskim ulicama šest puta veći. Prema svetskim iskustvima, put je sam po sebi ili u sadejstvu sa drugim faktorima, uzročnik približno oko trećine svih saobraćajnih nezgoda. Alati bezbednosti saobraćaja koji se koriste u Republici Srbiji, a odnose se na razmatranje i uticaj puta i njegove okoline na nastanak saobraćajne nezgode predstavljaju: mapiranje rizika, upravljanje crnim tačkama, ocena uticaja puta na bezbednost saobraćaja, revizija bezbednosti puta, provera bezbednosti puta, upravljanje bezbednošću putne mreže, dubinska analiza saobraćajnih nezgoda i nezavisna ocena doprinosa puta nastanku saobraćajne nezgode.
Kako sama zona radova predstavlja specifično mesto koje predstavlja prelazak sa normalnog u izmenjeni režim saobraćaja, tako je i njen uticaj na bezbednost saobraćaja specifičan.

[2] Autor zadužen za korespodenciju: a.obradovic998@gmail.com

Zbog svoje prirode i načina obeležavanja i vođenja saobraćaja, neophodno je sprovoditi detaljne analize nivoa bezbednosti u zoni radova. U većini slučajeva prilikom izvođenja radova na određenim deonicama puta ne postoji alternativni pravac na koji se mogu preusmeriti saobraćajni tokovi, pa u tom slučaju zona radova postaje potencijalno opasno mesto. Deo zone radova koji je najrizičniji za nastanak saobraćajnih nezgoda, naročito sa smrtnim posledicama, predstavlja samo gradilište.
Za potrebe rada prikazane su dve ekspertize saobraćajne nezgode u zoni radova i jedna nezavisna ocena saobraćajne nezgode u zoni radova. Iako ekspertiza saobraćajnih nezgoda sagledava sve uticajne faktore (čovek-vozilo-put-okruženje), a nezavisna ocena samo uticaj puta na nastanak saobraćajne nezgode, njihovo uporedno posmatranje i analiziranje može dovesti do ključnih propusta koji se u budućnosti mogu otkloniti pre puštanja saobraćaja kroz samu zonu radova. Cilj rada ogleda se u predlogu mera i prikaza ključnih zaključaka koji se odnose na najučestalije propuste kada su u pitanju saobraćajne nezgode u zoni radova. Takođe, u radu će biti prikazan pregled strane i domaće literature koji se odnosu na primenu pomenutih alata, kao i na različita istraživanja bezbednosti saobraćaja u zoni radova.

2. PREGLED LITERATURE

Autor Jonathan Rolison uvideo je propust, prilikom vršenja uviđaja saobraćajnih nezgoda, od strane policijskih službenika. Odnosno, smatrao je da je neophodno sagledati kvalitet i pouzdanost podataka koji se dobijaju od strane policije. Takođe, navodi kako je vrlo teško i nezahvalno odrediti u policijskom izveštaju koji je uticajni faktor za nastanak saobraćajne nezgode. Istraživanje je obuhvatilo 162 policijska službenika koji su prijavljivali svoje percepcije o odnosima među uticajnim faktorima u obrascu ua prijavu saobraćajne nezgode. Dobijeni rezultati primenom statističkog modela ukazuju na neusaglašenost između postojećeg obrasca policijskih službenika i njihove precepcije same situacije, odnosno uticajnih faktora na nastanak saobraćajne nezgode. Autor smatra da prikazana analiza treba da predstavlja primer za unapređenje postojećeg obrasca koji popunjavaju policisjki službenici. Takođe, što detaljniji i prilagođeniji obrazac bude bio policiskim službenicija, to će sama uviđajna dokumentacija biti potpunija, jasnija i razumljivija za dalje eksperte koji se bave dubinskim analizama, nezavisnim ocenama saobraćajnih nezgoda, veštačenjem saobraćajnih nezgoda, kao i ostalim alatima nalaize bezbednosti saobraćaja.
Prisustvo zone radova povećava saobraćajne konflikte i može izazvati saobraćajne nezgode sa teškim posledicama, kako učesnika u saobraćaju, tako i radnika koji izvode radove (Weng i sr., 2011). Kao što su pokazali mnogi istraživači, verovatnoća pojave saobraćajne nezgode u zoni radova je veća nego u zonama u kojima se ne dešavaju radovi. Zone radova mogu se kategorisati u tri tipa: (1) građevinske; (2) održavanje; i (3) korisnost. Građevinske zone radova su dugotrajne, gde radne aktivnosti traju duže od tri dana. U zonama građevinskih radova, treba primeniti kompletan plan kontrole saobraćaja kako bi se poboljšala bezbednost saobraćaja u zoni radova. S obzirom da je u ovom kontekstu gradnja definisana kao dužina od tri dana, onda će se građevinski radovi uvek produžiti do noćnih radova. Zbog toga, retroreflektujuće i osvetljene uređaje treba primeniti za ovaj tip zone radova. Takođe, ograničenje brzine mora biti postavljeno u zonama građevinskih radova kako bi se poboljšala bezbednost radnika. U poređenju sa zonama građevinskih radova, zone radova na održavanju obično imaju kratko trajanje rada, gde posao zauzima više od jednog sata, ali manje od tri dana. Pošto je trajanje rada kraće, mogu se primeniti pojednostavljene procedure kontrole saobraćaja. U poređenju sa zonama građevinskih radova, zone radova na održavanju obično imaju manji intenzitet radnih aktivnosti. Drugim rečima, često je manje radnika u zonama radova na održavanju nego u zonama građevinskih radova. Komunalne zone radova se značajno razlikuju od tipičnih zona radova na izgradnji i održavanju. Komunalni radovi često traju veoma kratko (manje od jednog sata) i uključuju veoma male grupe radnika. U komunalnim zonama radova, radnici i oprema mogu se kretati duž puta veoma malom brzinom. Weng i saradnici su u svom radu prikazali rezultate sprovedene studije i ukazuju na to da prema dobijenim podacima otprilike 75% vozača koji učestvuju u nezgodama u zoni građevinskih radova su muškarci. Vignali i sr. uvideli su da efikasnost saobraćajnih znakova na putevima u zoni radova nije dovoljno istražena tema. Sproveli su studiju na 29 učesnika i proučavali njihove vizuelne fiksacija na saobraćajnim znakovima u zoni radova tokom vožnje od 27 km vangradskim putevima. Rute su prolazile kroz 23 zone radova na putu, uključujući 69 saobraćajnih znakova koji se odnose na radove na putu. Ponašanje vozača prema znakovima radova na putu upoređeno je sa ponašanjem prema stalnim, već postojećim znakovima. Pretpostavljajući da je osnovna uloga znakova u zoni radova da privuku pažnju vozača na izmenjeno okruženje, saobraćajni znakovi u 60% slučajeva nisu bili pogledani od strane posmatranih učesnika. Ovi podaci su još značajniji ako se uzme u obzir da su učesnici nosili uređaj za praćenje očiju, vozili nepoznato vozilo i znali da se njihovo vozačko ponašanje proučava, mada ovaj opis ne uzima u obzir učešće perifernog vida u detekciji i identifikaciji saobraćajnih znakova.

Rezultati sprovedene studije ukazuju da izolovani pojedinačni znakovi izazivaju veću pažnju kod vozača nego niz znakova duž zone radova. Takođe, smatraju da neefikasna signalizacija ne bi omogućila bezbedno zaustavljanje u slučaju iznenadne prepreke na putu. U radu smatraju ograničenjem veličina uzorka, a takođe daju predlog i testiranja geometrije zone radova (dužina obaveštenja učesnika u saobraćaju, tip prvog znaka, primena inovativne opreme, izmenljiva signalizacija itd.).

3. EKSPERTIZE I NEZAVISNE OCENE SAOBRAĆAJNIH NEZGODA

Poslovi veštačenja, u smislu zakona o sudskim veštacima, predstavlja stručne aktivnosti čijim se obavljanjem uz korišćenje naučnih, tehničkih i drugih dostignuća, pružaju sudu ili drugom organu koji vodi postupak potrebna stručna znanja koja se koriste prilikom utvrđivanja, ocene ili razjašnjavanja pravno relevantnih činjenica. Nalaz i mišljenje veštaka saobraćajno-tehničke struke sastoji se od:

1. Osnovni podaci
    1) Podaci o učesnicima i
    2) Podaci o putu I vremenu
2. Nalaz
    1) Povrede,
    2) Oštećenja,
    3) Tragovi,
    4) Mesto sudara,
    5) Brzine I
    6) Vremensko-prostorna analiza
3. Mišljenje
4. Zaključak

Nalaz veštaka daje informacije o tome šta je veštak utvrdio na osnovu raspoloživih dokaza o predmetu veštačenja, dok se mišljenje odnosi na stav veštaka o uzrocima i okolnostima nastanka konkretnog događaja, a posebno o odgovornosti učesnika za nastanak nezgode. Kako bi nalaz, a na kraju i samo mišljenje, veštaka bio verodostojan, adekvatan i potpun, neophodno je ispratiti tačan redosled prikazanog algoritma nalaza i mišljenja. Preskakanjem određenog koraka može dovesti do pogrešnog stava što direktno može uticati na ishod predmetnog događaja.

Prema Pravilniku o sadržini i načinu sprovođenja nezavisne ocene doprinosa javnog puta nastanku, odnosno posledicama saobraćajne nezgode "U slučaju saobraćajne nezgode sa najmanje jednim poginulim licem, Ministarstvo nadležno za unutrašnje poslove dostavlja izveštaj o saobraćajnoj nezgodi nadležnom upravljaču javnog puta, u roku od 60 dana od dana nastanka saobraćajne nezgode." (član 2., stav 1). Sprovođenjem nezavisne ocene, dobija se detaljna analiza uticajnog faktora puta na nastanak saobraćajne nezgode u kojoj je poginulo najmanje jedno lice.

Za potrebe rada prikazane su dve ekspertize saobraćajnih nezgoda u zoni radova i jedna nezavisna ocena saobraćajne nezgode u zoni radova. Cilj prikazanih podataka odnosi se na prikaz uporedne analize ekspertiza i nezavisnih ocena saobraćajnih nezgoda, kao i prikaz različitih mera kojima se mogu otkloniti uočeni problemi, a mogu biti uzroci nastanka saobraćajne nezgode.

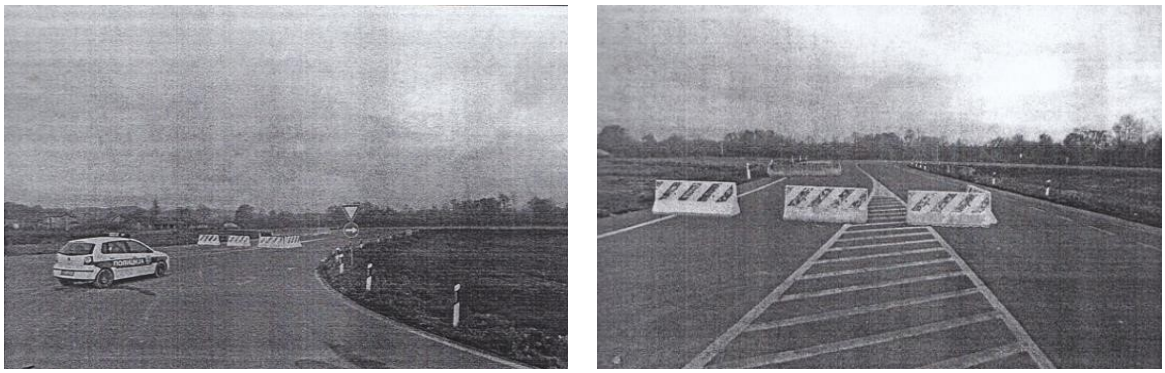
3.1. Ekspertiza saobraćajne nezgode

Analizirana saobraćajna nezgoda dogodila se 2004. godine oko 03:45 časova. Saobraćajna nezgoda se dogodila na Ibarskoj magistrali, u mestu Veliki Crljani, u zoni raskrsnice "Tamnavska petlja". U ovoj saobraćajnoj nezgodi učestvovao je putnički automobil "FIAT Punto" (u daljem tekstu FIAT), kojim je u vreme nezgode upravljao vozač, star 35 godina. U vreme nezgode u FIAT-u, na mestu pored vozača se nalazio suvozač, star 38 godina i na zadnjem sedištu se nalazio lice, staro 33 godine.

Slika 1 *Prikaz lica mesta saobraćajne nezgode na Ibarskoj magistrali*
Izvor: Ekspertiza saobraćajne nezgode, Institut Saobraćajnog fakulteta u Beogradu

Analizom svih okolnosti nastanka ove saobraćajne nezgode konstatovano je da je ova nezgoda nastala kao posledica nebezbednog i nepropisnog obeležavanja, odnosno neobeležavanja novoizgrađenog središnjeg razdelnog ostrva na kolovozu Ibarske magistrale, a što je smanjilo mogućnost i eventualno onemogućilo blagovremeno uočavanje ivica (gabarita) središnjeg razdelnog ostrva i pravac pružanja kolovoznih traka u zoni raskrsnice. Sve to je za posledicu imalo "nalet" FIAT-a na ivicu razdelnog ostrva i udar u metalni stub rasvete, a što je uzročno vezano za nastanak ove saobraćajne nezgode.

Analizirana saobraćajna nezgoda dogodila se 2017. godine oko 04:50 časova u mestu Stublenica, odnosno desna saobraćajna traka namenjena za kretanje vozila iz pravca Lajkovca ka Ubu. U ovoj saobraćajnoj nezgodi učestvovalo je putničko vozilo "MERCEDES", kojim je u vreme nastanka nezgode upravljao vozač, star 68 godina, a u vozilu su takođe bila dva putnika starosti 70 godina. Prema podacima iz Zapisnika o uviđaju, lice mesta saobraćajne opisano je kao izgrađeni deo auto-puta koji predstavlja asfaltnu podlogu, sa obeležene dve kolovozne trake i jednom zaustavnom trakom.



Slika 2 Prikaz lica mesta saobraćajne nezgode na deonici Lajkovac-Ub
Izvor: Ekspertiza saobraćajne nezgode, Institut Saobraćajnog fakulteta u Beogradu

Nakon sagledavanja lica mesta predmetne saobraćajne nezgode upućen je dopis upravljaču puta koji obaveštava da je primećeno odvijanje saobraćaja teretnim vozilima, pošto im signalizacija ne zabranjuje, pa se može steći utisak da se vozila mogu uključiti na predmetni put. Takođe navode da je neophodno postaviti signalizaciju koja će vozačima nedvosmisleno ukazati na činjenicu da se autoput ne može koristiti za kretanje javnog saobraćaja, kao i da su više puta evidentirani događaji u kojima su na predmetnom autoputu oštetila vozila, a da su vozači pretrpeli telesne povrede. Takođe, analizom lica mesta uočeno je da postoji saobraćajni znak koji navodi vozače na autoput koji nije u funkciji, odnosno nije namenjen za kretanje javnog saobraćaja, već se tu nalazi gradilište (zona radova), ali da takođe postoji saobraćajni znak koji ukazuje na obavezan smer pravo, kao i puna neisprekidana horizontalna linija na kolovozu. Ovakav način obeležavanja doveo je do zbunjivanja vozača, kao i jedan od uzroka nastanka saobraćajne nezgode na predmetnoj lokaciji.
Imajući u vidu da nije bilo onemogućeno uključivanje na deo "…auto-puta u izgradnji…", odnosno da postavljenom saobraćajnom signalizacijom učesnicima u saobraćaju nije bilo jasno i nedvosmisleno saopšteno da se radi o delu "…auto-puta u izgradnji…", na strani subjekta nadležnog za saobraćajnu signalizaciju bi stajao propust uzročno vezan za stvaranje opasne situacije i nastanak ove nezgode. Naime, subjekat nadležan za saobraćajnu signalizaciju bio je dužan da saobraćajnom signalizacijom omogući bezbedno vođenje saobraćaja, odnosno da na jasan i nedvosmislen način ukaže učesnicima u saobraćaju da se radi o delu

"…auto-puta u izgradnji…" na koji nije dozvoljen pristup, a što ovde nije bio slučaj, jer je saobraćajna signalizacija ukazivala da se radi o uključenju na auto-put. U cilju izbegavanja opasnih situacija fizičkim preprekama bilo je neophodno onemogućiti pristup na deo "…auto-puta u izgradnji…", a što takođe ovde nije bio slučaj. Eventualno postavljanje odgovarajuće signalizacije, odnosno prepreka koje bi uticale na usporavanje MERCEDES-a pre dolaska do završetka kolovoza na kome je došlo do sudara MERCEDES-a sa neosvetljenim preprekama u vidu "betonskih barijera", moglo bi eventualno imati uticaja na mogućnost izbegavanja nezgode od strane vozača MERCEDES-a i/ili na težinu posledica ove nezgode.

3.2. Nezavisna ocean uticaja puta na nastanak saobraćajne nezgode sa poginulim licima

Analizirana saobraćajna nezgoda se dogodila 2023. godine oko 17:45 časova u mestu Pojate. U ovoj saobraćajnoj nezgodi su učestvovala dva putnička vozila, od kojih je jedno bilo teretno vozila sa poluprikolicom, a drugo vozilo je bilo putničko. Nezgoda se dogodila na delu državnog puta van naselja u zoni radova na putu, u noćnim uslovima vožnje. Putničko vozilo se kretalo desnom kolovoznom trakom gde blagovremeno dobija obaveštenje (uspostavljenom saobraćajnom signalizacijom) o izmeni režima saobraćaja, odnosno o nailasku na deo puta gde se izvode radovi na putu. Nakon zatvaranja preticajne saobraćajne trake, a zatim i zaustavne trake, putničko vozilo se kretalo desnom saobraćajnom trakom, kada nailazi na mesto gde se saobraćajni tok sa desne kolovozne trake preusmerava na kolovoznu traku namenjenu za kretanje vozila iz suprotnog smera. Putničko vozilo na odgovarajući način prati saobraćajnu signalizaciju i nakon prolaska mesta gde se saobraćajni tok kanališe u suprotnu kolovoznu traku, putničko vozilo prelazi u saobraćajnu traku namenjenu za kretanje vozila iz suprotnog smera. Putničko vozilo prelazi u suprotnu saobraćajnu traku tako što prolazi između vertikalnih zapreka koje su postavljene duž razdelne linije i čeonim delom udara u prednju levu čeonu stranu skupa vozila, usled čega, kao posledica jačine sudara, putničko vozilo odgurnuto nekoliko metara unazad.
Stručni tim je mišqewa da je do nastanka saobraćajne nezgode došlo usled propusta vozača putničkog vozila koji se odnosi na nepravilno sagledavanje saobraćajne situacije prilom vožnje u zoni radova, odnosno na mestu preusmeravanja saobraćaja iz kolovozne trake kojom se kretao na suprotnu kolovoznu traku. Put je uticao na nastanak saobraćajne nezgode zbog neadekvatnog upravljanjaa brzinom na omogućenom profile puta u doručju suženje. Imajući u vidu da je upravljanje brzinama ispred mesta preusmeravanja saobraćaja izvedeno samo saobraćajnim znakovima, stručni tim je mišljenja da je promena trase pružanja puta usled devijacije mogla dovesti do potrebe naglog promena stila vožnje. Postavljanje vertikalnih zapreka na aplikativnoj traci uticalo bi na to da se vizuelno smawi profil puta koji vozač može da koristi, odnosno da se vozač putničkog vozila kreće manjom brzinom nego što je to slučaj u postojećem stanju.

4. PREDLOG MERA ZA UNAPREĐENJE BEZBEDNOSTI SAOBRAĆAJA U ZONI RADOVA NA PUTEVIMA

Predlog mera je prikazan kroz faktore bezbednosti saobraćaja, a odnose se na čovek, vozilo, put i okruženje. Iako se tema rada u osnovi odnosi na uticaj faktora put na bezbednost saobraćaja u zoni radova, nemoguće je zanemarite ostale faktore ukoliko želimo da se nivo bezbednosti znatno unapredi.

2.1. Put kao faktor bezbednosti saobraćaja

U zavisnosti od vrste puta, razlikuje se verovatnoća nastanka saobraćajne nezgode. Što je veći broj konflikata između učesnika u saobraćaju, to je veća verovatnoća nastanka saobraćajne nezgode. Iz tog razloga se smatra da su gradske deonice najmanje bezbedni putevi. Kada je u pitanju zona radova, u zavisnosti od lokacije gde se nalazi to je njen način izvođenja kompleksniji. Odnosno, na autoputevima zbog širine kolovoza i zone oko autoputa, lakše je sproveti postepeno obaveštavanje učesnika, kao i njihovo vođenje kroz samu zonu radova (suženje saobraćajnih traka, smanjenje brzine, ponavljanje obaveštenja o zoni radova itd.).
Kako se režim saobraćaja menja i povećava broj konflikata između učesnika, tako je sam proces izvođenja zone radova znatno kompleksniji i odgovorniji. Odnosno, neretko se dešava da ne postoji prostor za ponavljanje obaveštenja, kao i prostor za postepeno vođenje saobraćaja, već samo obaveštenje o početku zone radova i direktnom prolasku pored gradilišta. U ovim situacijama znatno se povećava rizik od nastanka saobraćajne nezgode, kako između vozila u saobraćaju, tako između vozila i radnika i mašina na samom gradilištu. Predlog mera se odnosi na upotrebu svetlosnih saobraćajnih signala uz adekvatno obaveštenje učesnika da nailaze na svetlosni signal (semafor) kako bi prilagodili svoju brzinu. Iako ova mera može prouzrokovati stvaranjem dodatnog zagušenja u saobraćaju, preporučuje se iz razloga što tako štiti sve saobraćajne tokove i same radnike na gradilištu od nastanka nezgode. Neretko tokom izvođenja radova na

određenoj saobraćajnici, dođe da habanja i uništavanja asfalta koji je namenjen za odvijanje saobraćaja. Pre svega, do udarnih rupa dolazi zbog znatno povećanog protoka koji se ostvaruje tokom trajanja radova na putu, a potom i zbog povećanog broja teretnih vozila koji više puta prolaze istom deonicom. Zbog ovakvih situacije treba redovno upravljati brzinama pre početka i tokom izvođenja radova na putu, kako bi se rizik nastanka saobraćajne nezgode znatno smanjio.

2.2. Okolina kao faktor bezbednosti saobraćaja

Osnovni predlog mera koji se odnosi na okolinu kao faktor bezbednosti saobraćaja predstavlja adekvatno postavljanje saobraćajne signalizacije. Kako bi se rizik znatno smanjio, neophodno je sagledati saobraćajnu situaciju i tokom projektovanja same situacije. U praksi postoji verovatnoća da realno stanje nije kao u projektovanom i da pojedini elementi se ne mogu izvesti kako je planirano, ali je potrebno da odgovorno lice sa određenim znanjem i iskustvom sagleda i pronađe adekvatno rešenje kako bi nivo bezbednosti ostao na zadovoljavajućem nivou.
Kao što je napomenuto da postavljanjem semafora može povećati vreme putovanja, kao i vreme čekanja, predložena mera odnosi se na implementaciju inteligentnih transportnih sistema (ITS). Uz ITS tehnologije moguće je obavestiti učesnike u saobraćaju znatno pre početka samih radova, kao i mnogo pre ulaska na samu deonicu gde se nalaze radovi na putu. Ovakav način obaveštavanja jasno bi dao informacije vozačima čak i ukoliko dođe do propusta pri postavljanju signalizacije koja obaveštava o radovima na putu i usmerava saobraćaj na alternativne deonice.
Analizom saobraćajnih nezgoda u zoni radova, često se događaju saobraćajne nezgode u noćnim uslovima. Pored adekvatne saobraćajne signalizacije, neophodna je adekvatna oprema i izvođača radova kako bi bili uočljiviji vozačima. Pored opreme, vrlo je važno bezbedno ponašanje i kretanje samih radnika kroz zonu radova, kao i tokom ulaska i napuštanja iste. Posebno kada se izvode radovi na autoputu, kada radnici predstavljaju pešake, koji se ne očekuju na predmetnom putu. Svaki nebezbedan kretanje radnika može direktno uticati na nastanak saobraćajne nezgode.

3. ZAKLJUČAK

Kako bi se adekvatno sagledala bezbednost saobraćaja neophodno je detaljno analizirati njene faktore koji se odnose na čoveka, vozilo, put i okruženje. Kada se dogodi saobraćajna nezgoda, neophodno je sagledati sve uticajne faktore koji su mogli uticati ili doprineti nastanku saobraćajne nezgode. Ukoliko se zaključi da je uticalo više različitih uticajnih faktora, teško je razdvojiti koji je glavni uzrok, već se može određivati koji je više, a koji manje doprineo nastanku, kao i samim posledicama saobraćajne nezgode.
Analizom konkretnih situacija, neretko se događa da uticaj puta i okoline ima znatan uticaj na nastanak same nezgode, kao i na njene posledice. Prikazane primeri Ekspertiza saobraćajnih nezgoda ukazuju na to da adekvatna saobraćajna signalizacija u zoni radova direktno utiče na nastanak saobraćajne nezgode. Međutim, analizom Primera 1 uočavaju se i propusti koji se odnose na samo projektovano stanje gde se uočavaju propusti u postavljanju znakova, kao i načinu obeležavanja i njihove pozicije. Dok iz Primera 2 uočava se propust u adekvatnom vođenju saobraćaja izvan zone radova, odnosno kako neadekvatna saobraćajna signalizacija zbunjuje učesnike u saobraćaju i navodi na pogrešne manevre i reakcije.
Kao što je već napomenuto, teško je odvojiti uticajne faktore i kategorički tvrditi da je samo jedan uzročnik saobraćajne nezgode. Ovakav pristup se može uvideti analizom Primera 3 koji se odnosi na to da je zona radova bila adekvatno obeležena, postojala je saobraćajna signalizacija, kao i oprema koja reguliše saobraćajne tokove u samoj zoni radova. Osnovni propust se odnosi na nesavesno ponašanje vozača u izmenjenim uslovima saobraćajnog toka, ali se ne može osporiti i način obeležavanja i vođenja saobraćaja kroz samu zonu radova. Pri sprovođenju (izvođenju) zone radova neophodno je sagledati širu sliku u smislu uticaja same zone radova na ostatak saobraćajne mreže i tokova, odnosno da li zona radova utiče na stvaranje uskog grla, kako smanjiti rizik od nastanka saobraćajne nezgode itd. Odnosno, u skladu sa saobraćajnom situacijom gde se izvode radovi, neophodno je na adekvatan način obavestiti učesnika u saobraćaju i voditi kroz zonu radova. Svaka zona radova i promena saobraćajnog toka je specifična situacija i neophodno je tako pristupiti i analizirati kako bi se rizik od nastanka saobraćajne nezgode znatno smanjio.
Unapređenjem sistema koji se sastoji od upravljača puta, preko projektanta i izvođača radova, do samih učesnika u saobraćaja omogućio bi adekvatan i bezbedan način kretanja svi učesnika u saobraćaja kroz zonu radova. Sprovođenjem redovne kontrole i provere radova, kao i analiziranje dobijenih izveštaja sa terena, dobili bi se podaci koji bi predstavljali jedan deo ulaznih podataka za projektovanje i izvođenje narednih radova na putu, kao prikaz problema koji se mogu javiti tokom trajanja izmenjenog režima saobraćaja, odnosno radova na putu.

Literatura

[1] World Health Organization, https://www.who.int
[2] *Zakon o sudskim veštacima* (''Sl. glasnik RS'', br. 44/2010)
[3] *Pravilnik o sadržini i načinu sprovođenja nezavisne ocene doprinosa javnog puta nastanku, odnosno posledicama saobraćajne nezgode* (,,Sl. glasnik RS'', br. 41/18 i 95/18 - dr. zakon)
[4] Lipovac K., Jovanović D., Nešić M., *Osnove bezbednosti saobraćaja*, Beograd, Republika Srbija, 2020.
[5] Vujanić M., Obradović D., Božović M., ,,*Domen rada veštaka saobraćajno-tehničke struke", XI Simpozijum "Analiza složenih saobraćajnih nezgoda i prevara u osiguranju"*, Republika Srbija, Zlatibor, 2012.
[6] Ekspertize saobraćajnih nezgoda, Institut Saobraćajnog fakulteta u Beogradu
[7] Nezavisne ocene saobraćajnih nezgoda, Institut Saobraćajnog fakulteta u Beogradu
[8] Rolison J. ,, *Identifying the causes of road traffic collisions: Using police officers' expertise to improve the reporting of contributory factors data"*, Accident Analysis and Prevention, 2020, 135.
[9] Weng J., Meng Q., *,,Analysis of driver casualty risk for different work zone types"*, Accident Analaysis and Prevention, 2011, 43, 1811-1817

ISKUSTVA PROVERE BEZBEDNOSTI SAOBRAĆAJA U TUNELIMA

Emir Smailović[1,*], Dalibor Pešić[1], Boris Antić[1], Zoran Pešović[2], Ivan Terzić[2], Krsto Lipovac[1]
[1] Saobraćajni fakultet u Beogradu, Vojvode Stepe 305, Beograd, Srbija
[2] Javno preduzeće Putevi Srbije, Bulevar Kralja Aleksandra 282, Beograd, Srbija

Rezime: *Provera bezbednosti saobraćaja (PBS) tunela je jedan od važnih alata koji se trenutno razvija u većem broju zemalja. Cilj sprovođenja ovog alata je sistemsko i kontinuirano smanjivanje rizika nastanka incidenata u tunelima. Sama PBS tunela se može realizovati i kao deo jedinstvenog programa PBS na van gradskim putevima. Iskustva iz zemalja sa većom tradicijom primene ovog alata pokazuju da su efikasnije PBS tunela koje se sprovode samo za tunele i uticajne zone tunela. U 2023. godini, Javno preduzeće Putevi Srbije i Saobraćajni fakultet u Beogradu su sproveli obimna istraživanja i realizovali PBS u tunelima i uticajnim zonama tunela koji se nalaze na državnoj mreži IA reda Republike Srbije. U ovom radu su predstavljena prva iskustva vršenja provere PBS u tunelima. Od metodologije sprovođenja PBS, sastava stručnog tima do praktičnog vršenja i evidentiranih ključnih problema PBS, predstavljena su odabrana iskustva PBS u tunelima. Stečena znanja i iskustva u ovom istraživanju imaju značajan uticaj na unapređenje upravljanja bezbednosti saobraćaja u tunelima, kao i unapređenje metodologije vršenja provera PBS u tunelima.*

Ključne reči: *tuneli, autoputevi, provera bezbednosti saobraćaja, rizik, iskustva.*

EXPERIENCES OF ROAD SAFETY INSPECTION IN TUNNELS

Abstract*: Road safety Inspection (RSI) of tunnels is one of the important tools that is currently being developed in a number of countries. The goal of implementing this tool is to systematically and continuously reduce the risk of incidents occurring in tunnels. The RSI tunnel itself can be implemented as part of the unique RSI program on non-city roads. Experiences from countries with a greater tradition of using this tool show that RSI tunnels that are carried out only for tunnels and tunnel-influenced zones are more effective. In 2023, the Public Enterprise Putevi Srbije and The Faculty of Transport and Traffic in Belgrade conducted extensive research and realized RSI in tunnels and the influential zones of tunnels located on the state network of the IA order of the Republic of Serbia. This paper presents the first experiences of performing the RSI inspection in tunnels. From the methodology of implementing RSI, the composition of the expert team to the practical implementation and recorded key problems of RSI, selected experiences of RSI in tunnels are presented. The knowledge and experience gained in this research have a significant impact on the improvement of traffic safety management in tunnels, as well as on the improvement of the methodology of conducting RSI checks in tunnels.*

Key words: *tunnels, freeways, road safety inspection, risk, experiences.*

1. UVOD

Bezbednost saobraćaja na otvorenim deonicama značajno zavisi od karakteristika trase puta. Putni objekti na vangradskoj putnoj mreži, zbog svojih karakteristika i ograničenja predstavljaju objekte posebnog značaja, zbog čega su zahtevi bezbednog odvijanja saobraćaja značajno veći u odnosu na ostali deo mreže na vangradskim putevima.

Upravljanje tunelima kao jednim od najkompleksnijih putnih objekata na vangradskoj mreži zahteva primenu znanja iz različitih oblasti, koji se integrišu u percepciji vozača. Kako bi se sagledali potencijalni nedostaci na bezbednost saobraćaja, kao alat za unapređenje bezbednosti puta najčešće se koriste provere bezbednosti saobraćaja (PBS). Primena PBS je zakonska, moralna i stručna obaveza upravljača javnog puta, sa ciljem unapređenja nivoa bezbednost saobraćaja putne mreže i razvoja proaktivnog delovanja na drugim sličnim mestima. PBS u tunelima zahteva dodatne ekspertize i sagledavanja funkcionisanja različitih sistema upravljanja, nadzora i delovanja na sisteme bezbednosti saobraćaja. U skladu sa tim, PBS u tunelima zahteva dodatne analize i sagledavanja funkcionisanja sistema u celini, kao i pojedinačnih sistema.

U ovom radu, biće prikazane PBS u tunelima na državnim putevima IA, koje su sprovedene u Republici Srbiji na osnovu domaćeg iskustva u sprovođenju PBS i pomoći eksperata iz inostranstva, odnosno eksperata iz različitih oblasti delovanja. Takođe, provere bezbednosti saobraćaja vršene su u skladu sa međunarodno/regionalno priznatim uputstvima (SEETO, PIARC, i sl.), Pravilnikom o načinu sprovođenja revizije i provere i sastavu stručnog tima za sprovođenje revizije i provere („Sl. glasnik RS“, br. 52/19), Pravilnikom o minimalnim bezbednosnim zahtevima koje tunel na javnom putu mora da ispunjava sa gledišta bezbednosti saobraćaja („Sl. glasnik RS“ br. 51/19), iskustvima sprovođenja inspekcija u Evropi i iskustvima i preporukama iz projekta EcoRoads.

[*] Autor zadužen za korespodenciju: e.smailovic@sf.bg.ac.rs

2. METODOLOGIJA

Provere bezbednosti saobraćaja u tunelima obavljao je nezavisan tim stručnjaka za bezbednost saobraćaja, koji su rezultate provera predstavili u formalnim izveštajima, sa posebnim naglaskom na svaki pod sistem, odnosno sistem, kojim je opremljen tunel. Cilj izveštaja je prikazati potencijalne nedostatke, odnosno slabosti sistema upravljanja bezbednošću saobraćaja u tunelima i prilaznim zonama tunela, kao i potencijalne nedostatke koji mogu uvećati težinu posledica eventualnog incidenta ili saobraćajne nezgode. Pod pojmom incidenta, u ovom smislu podrazumeva se svaki otkaz sistema, odnosno promena u načinu odvijanja saobraćaja.

Tim koji je sprovodio provere bezbednosti saobraćaja sadržao je veliki broj članova, odnosno eminentne domaće stručnjake, ali i eksperte iz inostranstva. Pored saobraćajnih, tim su činili i eksperti iz oblasti građevine, mašinstva, elektrotehnike, protivpožarne zaštite i sl.

U skladu sa usvojenom metodologijom sprovođenja PBS u tunelima, izvršene su provere bezbednosti saobraćaja za deset tunela i uticajne zone tih tunela, a koji su u nadležnosti JP „Putevi Srbije“ na autoputevima.

Prvi koraci u procesu vršenja provera bezbednosti saobraćaja bili su terenski obilasci tunelskih objekata, sprovedeni u dve faze:

- u dnevnim uslovima, snimanjem iz vozila u uslovima redovnog odvijanja saobraćaja i
- pešačenjem sa detaljnim pregledom, proverom, snimanjem i analizom problema, u uslovima obustave saobraćaja.

Poseban aspekt sprovođenja PBS predstavljala je analiza dokumentacione osnove tunelskog objekta i pojedinačnih podsistema. Cilj ovog dela analiza nije bila provera ispravnosti planiranja i projektovanja, već je cilj provere projekata objekata i podsistema, provera postojanja uslova za uspešno upravljanje bezbednošću saobraćaja. Naime, odgovarajuća dokumentaciona osnova celog objekta, kao i pojedinačnih podsistema stvara uslove za uspešno upravljanje stanjem bezbednosti saobraćaja u zoni tunelskog objekta.

Prilikom planiranja provera bezbednosti saobraćaja predviđena je i realizovana koordinirana aktivnost tima za proveru bezbednosti saobraćaja i operatera tunelskih objekata na terenu, kako bi se sproveo zajednički obilazak i terenska provera funkcionisanja pojedinačnih sistema i celokupnog sistema.,

Primenom odgovarajuće metodologije, sveobuhvatno su analizirani svi elementi tunela, prelazne zone između portala tunela i otvorenih deonica i otvorene deonice u neposrednoj blizini tunela, koje se nalaze do 500 m od portala tunela. Rezultati provera su sistematizovani, prema sledećim celinama:

- Funkcija puta;
- Poprečni profil;
- Pružanje puta;
- Kolovoz;
- Raskrsnice;
- Javni i privatni uslužni objekti, servisi, servisni objekti, odmorišta, javni prevoz;
- Potrebe ranjivih učesnika u saobraćaju;
- Saobraćajna signalizacija i ITS;
- Sistem osvetljenja;
- Okolina puta i elementi pasivne bezbednosti saobraćaja;
- Kablovska instalacija i optika;
- Elektroenergetski sistem;
- Telekomunikacioni sistem;
- Hidrotehničke instalacije;
- Sistem ventilacije;
- Mobilna oprema za gašenje početnih požara i
- Instalacije i uređaji za automatsko otkrivanje i dojavu požara i reagovanje u incidentnim situacijama.

Navedene celine pripadaju pojedinačnim poglavljima Izveštaja, gde su identifikovani nedostaci bezbednosti saobraćaja u skladu sa navedenim poglavljima PBS. Specifični problemi bezbednosti saobraćaja svrstani su

u posebna potpoglavlja za obe tunelske cevi, odnosno za pojedinačne cevi tunela. U skladu sa tim, provere bezbednosti saobraćaja obuhvatale su sledeće aktivnosti:

- Identifikovanje nedostataka koji su predmet provere, a koji mogu dovesti do nastanka saobraćajnih nezgoda;
- Opis potencijalnog rizika svakog identifikovanog problema po učesnike u saobraćaju;
- Predlog mera eliminacije i ublažavanje uočenih problema;
- Procena troškova u formi klase za predložene mere.

Definisanje rizika za uočene probleme izvršeno je ekspertskom ocenom uvažavajući vrstu nedostatka, potencijalni uticaj na bezbedno odvijanje saobraćaja, kao i potencijalnu težinu posledica koje mogu nastati. Potencijalni uticaj na bezbedno odvijanje saobraćaja procenjivan je na osnovu postojećih parametara trase i saobraćajnog toka (karakteristike trase, struktura saobraćajnog toka i % učešća TTV u saobraćajnom toku), ponašanja učesnika u saobraćaju u zoni posmatranog objekta (indikatore brzine), istoriju nastalih incidenata koji bi mogli biti povezani sa uočenim nedostatkom (broj i težinu incidenata), kao i eventualne saobraćajne nezgode koje se mogu povezati sa proveravanim objektom. Sagledavajući navedene parametre, ekspertskom ocenom rizik uticaja evidentiranog nedostatka je vrednovan na trorepernoj skali: mali, srednji i visok.

Sistematizacija problema na predstavljeni način obezbeđuje kvalitetnu rekapitulaciju problema i efikasno sagledavanje ključnih nedostataka. Posebno je važna sistematizacija problema prema strukturi izveštaja, odnosno grupi problema, jer se na taj način obezbeđuje sistematičnost u pristupu i otklanjanju nedostataka. Mnogi problemi bezbednosti saobraćaja iz određene grupe su međusobno povezani, pa se rešavanje konkretnog problema ne može sprovesti bez tretiranja i nekog drugog problema.

Izveštaji provere bezbednosti saobraćaja sadrže i podatke o lokacijima predmetnih tunela, saobraćaja, brzinama vozila u saobraćajnom toku u blizini portala tunela, saobraćajnim nezgodama, incidentima u tunelima i uticajnim zonama tunela, kao i informacije o detaljima terenskog obilaska deonice.

Posebna pažnja u Izveštaju posvećena je i analizi incidentnih situacija u tunelima, gde je korišćena baza podataka JP „Putevi Srbije“, u kojoj su evidentirani vanredni događaji i incidente situacije nastale tokom eksploatacije tunela. Baza podataka je dopunjena varijablama „nivo rizika“ koji je za svaki evidentirani događaj procenjivan na osnovu opisa i ostalih varijabli, od strane ekspertskog tima. Pored toga, dodata je i varijabla „uzrok“, sa ciljem identifikovanja kojoj grupi problema pripada vanredni događaj. Uzrok je takođe definisan na osnovu opisa događaja i raspoloživih varijabli. Svrha definisanja uzroka nije ukazivanje na probleme funkcionisanja sistema, već bliže definisanje kojoj grupi faktora pripada određeni vanredni događaj. Zbog toga se raspodela vanrednih događaja prema uzroku ne može posmatrati kao odgovornost održavanja, tehnike i sl., već kao kombinacija celokupnog sistema projektovanja, izgradnje, preuzimanja nadležnosti, održavanja i stanja tehničke opreme, sa bližim opisom kojoj grupi problema pripada.

3. NAJČEŠĆI NEDOSTACI KOJI MOGU UTICATI NA BEZBEDNOST SAOBRAĆAJA

Česta okolnost povezana sa tunelskim objektima i dokumentacionom osnovnom jeste nepostojanje kompletnih projekata iz prethodnih faza projektovanja i izgradnje, pri čemu je posebno značajno nepostojanje dokumentacione osnove iz faze izvođenja. Navedena okolnost je češće povezana sa pojedinačnim podsistemima primenjenim u tunelskom objektu. Razlozi koji dovode do ovakve situacije su vremenski period od realizacije objekta do perioda kada je sprovedena PBS (oko pet godina), različiti pravni subjekti investiraju izgradnju i održavaju objekat, izmene u projektima tokom izgradnje i implementacije podsistema ili se trenutno izrađuju dokumentacije za određene podsisteme. Zbog toga je preporuka tima proveravača u takvim situacijama bila da se privede kraju izrada projektno-tehničke dokumentacije za sve tunelske objekte, odnosno za sve podsisteme ugrađenim u tunelskim objektima.

Kada je u pitanju analiza incidentnih situacija u tunelima i uticajnim zonama tunela koji su bili predmet analize, mogu se sistematizovati sledeća pitanja važna za bezbedno odvijanje saobraćaja u tunelima na autoputevima:

- Najveći broj evidentiranih događaja povezan je sa sezonskim opterećenjem državne mreže puteva;
- Većina otkaza pojedinačnih sistema trajao je manje od dva sata, od čega su mnogi „otkazi“ povezani sa redovnim održavanjem. U tom smislu uslovi saobraćaja su posebno regulisani tokom održavanja, zbog čega smanjena verovatnoća nastanka nekog incidenta. Incidenti koji su trajali duže od dva sata su povezani sa ponašanjem učesnika u saobraćaju (zaustavljeno vozilo) ili sa

sistemom elektro-napajanja (gubitak), kao i sa stanjem na graničnim prelazima usled čega se formiraju kolone u tunelima;
- Kada se posmatraju pojedinačni događaji koji imaju visok stepen opasnosti, ovi događaji se vezuju za prisustvo ranjivih učesnika u saobraćaju, kojima je zabranjeno kretanje autoputem ili sa grubim kršenjem propisa, kao što je kretanje vozila u zabranjenom smeru ili kretanje unazad u tunelu. Navedeni događaji visokog rizika su uzrokovani ponašanjem učesnika u saobraćaju;
- Događaji vezani za spoljašnje uticajne faktore, odnosno vremenske neprilike, pretežno su se odnosili na snežne padavine, pojavu magle ili leda u uticajnoj zoni tunela;

Na osnovu sveobuhvatne analize incidenta koji su nastali u zonama tunelskih objekata na autoputevima, mogu se izdvojiti preporuke za unapređenje stanja bezbednosti saobraćaja, koji su povezani sa incidentima u budućem periodu, i to:
- Redovna analiza i unapređenje scenarija kojim se definišu postupci u slučaju različitih incidenata, sa posebnim osvrtom na incidente izazvane od strane učesnika u saobraćaju. Razvoj dodatnih scenarija ima za cilj sprečavanje mogućih posledica postupanja neodgovornih učesnika u saobraćaju;
- Preispitati mogućnosti razvoja elektro mreže i obezbediti najmanje po dva nezavisna napajanja tunelskog objekta i opreme;
- Povećati nivo pouzdanosti kritičnih podsistema koji stvaraju najveći broj incidentnih događaja, i to: pouzdanost mrežnog napajanja, pozicija znakova VMS-a i poklopce rešetkastih otvora;
- Preduzeti mere u cilju redovnog praćenja stanja vremenskih prilika (vazduha i kolovoza) za praćenje i prognozu vremenskih uslova, kako bi se otklonili ili umanjili negativni uticaji vremenskih neprilika. Navedene okolnosti moraju se uključiti u projektovanje kod budućih tunelskih objekata;
- Unaprediti sisteme detekcije incidenata sa posebnim osvrtom na pešake u tunelskim objektima u kojima se javlja povećano prisustvo pešaka. Razradi algoritme detekcije i delovanja pre nego što pešaci dospeju do portala tunela;

3.1. Poprečni profil

Sagledavajući moguće probleme bezbednosti saobraćaja povezane sa poprečnim profilom, tim za PBS je u tunelskim objektima evidentirano nedostatke kao što su: neodgovarajuća širina ivičnjaka, nebezbedne početke ivica/staza i kod malog broja objekata nedovoljna dužina preglednosti. Naime, dužine zone preglednosti su odgovarajuće za dozvoljenu brzinu i kriterijume koji je primenjuju na vangradskoj putnoj mreži. S obzirom na specifičnost u zonama tunelskih objekata gde se brzina kretanja redukuje na najčešće 80 km/h, kao i činjenice da više od dve trećine vozača putničkih automobila prekoračuje brzinu u tunelskim objektima sa kritičnim elementima preglednosti, preporuka tima proveravača je da se kod budućih projekata koriste komotniji kriterijumi zaustavne preglednosti, uvažavajući specifičnosti odvijanja saobraćaja u tunelima. Postojeće tunelske objekte potrebno je opremiti dodatnom opremom (ITS i svetlosnom signalizacijom), koja upozorava vozača da se prekoračili brzinu u takvim objektima.

Jednostavni problem koji je evidentiran u nekim tunelskim objektima jeste neodgovarajući početak početak evakuacionih staza bilo da se nalaze u zonama portala ili u samoj cevi tunela. Takvi počeci mogu destabilizovati vozila i usled manje greške vozača dovesti do značajnijih posledica takve greške. Na većem broju takvih – pasivno nebezbednih elemenata, vidljivi su i tragovi udara vozila. Pristup bezbednom sistemu podrazumeva izgradnju putnih objekata sa opraštajućim greškama vozača, koje se mogu predvideti i koje su relativno često vremenski ponavljaju, usled velikog protoka.

Slika 1. Nebezbedna ivica evakuacione staze sa leve strane kolovoza

3.2. Saobraćajna signalizacija i ITS

U malom broju tunelskih objekata sprovođenjem provere bezbednosti saobraćaja, evidentirani su problemi bezbednosti saobraćaja povezani sa pozicijom saobraćajnih znakova. Određeni znakovi se nalaze na granicama saobraćajnog profila, zbog čega povremeno dolazi do udara od strane teretnih vozila, oštećenja i pada na kolovoz. U uslovima kompleksnog odvijanja saobraćaja u tunelu, prisustvo takve prepreke može predstavljati veliku opasnost.

Slika 2. Znak za SOS nišu uz ivicu kolovoza

3.3. Okolina puta i elementi pasivne bezbednosti saobraćaja

Posmatrano za elemente pasivne bezbednosti saobraćaja, tim za PBS je evidentirao pasivno nebezbedne niše, koje predstavljaju čvrste prepreke u tunelskom objektu, koje mogu trenutno zaustaviti vozila. Nezgode u takvim okolnostima češće izazivaju teže posledice, zato što dolazi do veće promene brzine tokom sudarnog procesa. Preporuka je takve pasivno nebezbedne niše izbegavati prilikom budućih projektovanja, dok za postojeće niše potrebno odgovarajućim ogradama ublažiti i ograničiti mogućnost udara i zaustavljanja vozila.

Većina tunelskih cevi, koje su bile predmet PBS, imaju po dve saobraćajne trake u cevi, zbog čega se zatvara zaustavna traka pre ulaznog portala. Način zatvaranja zaustavne trake je neodgovarajući kod većine tunelskih cevi, zato što se postavlja New Jersey ograda na nedovoljnoj dužini.

Slika 3. Neadekvatno zatvaranje zaustavne trake New Jersey ogradom nedovoljne dužine

4. Preporuke za buduće provere bezbednosti saobraćaja u tunelima

U Republici Srbiji izražen je trend izgradnje i povećanja broja tunelskih objekata na državnoj mreži puteva. Zbog toga se moraju iskustva upravljanja i unapređenja brzo sistematizovati i formulisati u buduće zahteve za projektovanje i izgradnje. Provera bezbednosti saobraćaja na novim putevima i na novim putnim objektima može doprineti sistematizaciji primera dobre prakse, kao i potencijalne rizike koji nastaju primenom određenog tehnološkog rešenja. Zbog toga je potrebno uskladiti dinamike sprovođenja PBS i implementacije preporuka izveštaja PBS u tunelske objekte, sisteme u objektima, opremljenost i organizaciju praćenja i sprovođenja mera. Dinamiku sprovođenja PBS treba podesiti da se najmanje jednom u periodu od tri godine sprovede provera bezbednosti saobraćaja za kompleksne objekte kao što su tuneli. Evidentiranje i sistematizacija mogućih nedostataka u planiranju i projektovanju predstavljaju važan korak kontinuiranog unapređenja sistema bezbednosti saobraćaja. Upravljač državnih puteva u svom delokrugu rada sistematizuje primere dobre prakse, odnosno dobra tehnološka rešenja, kao i premere koje treba izbegavati u budućoj izgradnji putnih objekata. Unapređenje standarda planiranja i projektovanja infrastrukture učenjem iz primera drugih, kao i sopstvenih primera predstavlja važan korak održivog unapređenja stanja bezbednosti saobraćaja u tunelskim objektima. Postojanje velikog broja različitih i sofisticiranih sistema (za nadzor saobraćaja i pristup objektu, kvalitet vazduha, signalizacija, protivpožarna zaštita i dr.), zahtevaju brzo usvajanje preporuka i primera dobre prakse, što pored unapređenja bezbednosti saobraćaja ima i druge značajne efekte: održivost, racionalnije korišćenje sredstava i slično. Treći važan aspekt unapređenja bezbednosti saobraćaja jeste kadrovsko jačanje kapaciteta upravljača državnih puteva kroz razmenu iskustava sa multidisciplinarnim timom. Naime, opseg rada operatera i upravljača tunelskim objektima je obiman i kompleksan, zbog toga je sagledavanje iskustava eksperata iz različitih oblasti važno pitanje unapređenja celokupnog sistema. Sprovođenje i intenziviranje celokupnog prethodno navedenog procesa jača kapacitete i nivo bezbednosti saobraćaja podiže na veći nivo.

Literatura

1. Antić, B., Pešić, D., Smailović, E., Beronja, S. (2021) Specifičnosti provere bezbednosti saobraćaja u tunelima. Put i saobraćaj, LXVII, 3/2021, 33-38.
2. Smailović, E., Pešić, D., Antić, B., Lipovac, K. (2021) Provera bezbednosti saobraćaja na putevima sa posebnim osvrtom na tunele. XVI Međunarodna konferencija – Bezbednost saobraćaja u lokalnoj zajednici, ISBN 978-86.
3. Pešić, D., Petrović, J., Smailović, E., Radulović, K., Ilić, I. (2023) Specifični problemi bezbednosti saobraćaja u tunelima Šarani i Lipak. 18. Međunarodna konferencija – Bezbednost saobraćaja u lokalnoj zajednici, ISBN 401-16.
4. Lipovac, K., Antić, B., Davidović, J., Smailović, E., Petrović, J., Maksimović, B. (2023) Metodologija sprovođenja provere bezbednosti saobraćaja u tunelima. 18. Međunarodna konferencija – Bezbednost saobraćaja u lokalnoj zajednici, ISBN 15-26.

5. Directive 2004/54/EC on minimum safety requirements for tunnels in the trans-European road network. The European Parliament and of The Council of 29 April 2004.
6. European Commission, 2004, Directive 2004/54/EC.
7. Baza podataka o vanrednim događajima JP „Putevi Srbije“ 2016 – 2023. god.
8. Pravilnik o minimalnim bezbednosnim zahtevima koje tunel na javnom putu mora da ispunjava sa gledišta bezbednosti saobraćaja. Službeni glasnik RS, broj 51/19.
9. Pravilnik o minimalnim bezbednosnim zahtevima koje tunel na javnom putu mora da ispunjava sa gledišta bezbednosti saobraćaja. Službeni glasnik RS, broj 51/19.
10. Pravilnik o načinu upravljanja tunelom („Sl. glasnik RS“, br. 68/2019)
11. Pravilnik o uslovima koje sa aspekta bezbednosti saobraćaja moraju da ispunjavaju putni objekti i drugi elementi javnog puta („Sl. glasnik RS“, br. 50/11).
12. Smernice za sprovođenje provere, JP Putevi Srbije, Beograd, jul 2019.

DISTRIBUCIJA SAOBRAĆAJNIH NEZGODA U ODNOSU NA PROBLEME ISPUNJENOSTI ZAHTEVANE I PRETICAJNE PREGLEDNOSTI

Đorđe Sokić, mast.inž.saob.[1], Mišel Sabo, dipl.inž.građ.

[1] Panpro Team d.o.o., djordje.sokic@panpro.rs

Rezime: *Dosadašnji rezultati istraživanja u svetu koji se odnose na evidentiranje uzroka saobraćajnih nezgoda na putevima, ukazuju na činjenicu da u velikom broju jedan od uzroka treba tražiti i u neadekvatnoj preglednosti. U okviru ovog rada izvršena je prostorna i statistička analiza distribucije saobraćajnih nezgoda u odnosu na probleme ispunjenosti zahtevane i preticajne preglednosti sa idejom utvrđivanja korelacija. Analiza je sprovedena na jednom delu državnog puta IB 22 u R.Srbiji na kojem je prethodno izrađena detaljna analiza preglednosti, korišćenjem inovativnih alata na bazi kretanja virtuelnog vozača u oblaku tačaka koji je kreiran mobilnim laserskim skeniranjem.*

Ključne reči: *saobraćajne nezgode, preglednost, bezbednost*

DISTRIBUTION OF TRAFFIC ACCIDENTS IN RELATION TO PROBLEMS OF FULFILLMENT OF THE REQUIRED AND PASSING SIGHT DISTANCES

Đorđe Sokić, mast.inž.saob.[1], Mišel Sabo, dipl.inž.građ.

[1] Panpro Team d.o.o., djordje.sokic@panpro.rs

Abstract: *So far, the results of research in the world related to the recording of the causes of traffic accidents on the roads indicate the fact that in a large number one of the causes should be sought in inadequate sight distance. As part of this work, a spatial and statistical analysis of the distribution of traffic accidents was carried out in relation to the problems of fulfilling the required and overtaking sight distance with the idea of establishing correlations. The analysis was carried out on a part of the state road IB 22 in the Republic of Serbia, on which a detailed sight distance analysis was previously made, using innovative tools based on the movement of a virtual driver in a cloud of points created by mobile laser scanning.*

Keywords: *traffic accidents, sight distance, road safety*

1. UVOD

Premda su teoretske osnove vezano za pojam preglednosti relativno jednostavne i precizno definisane normativima, njihova kvalifikacija i kvantifikacija kao uticajnog faktora na nastanak saobraćajne nezgode ostaje i dalje nedovoljno istražena, što potvrđuju i ogromne razlike o procenama njihovog učešća (5-40%), koje se mogu naći u različitoj literaturi i podacima.

U okviru ovog rada izvršena je prostorna i statistička analiza distribucije saobraćajnih nezgoda u odnosu na probleme ispunjenosti zahtevane i preticajne preglednosti sa idejom utvrđivanja korelacija. Analiza je sprovedena na deonicama državnog puta IB 22 u R.Srbiji, za koje je prethodno izrađen Elaborat[2] korišćenjem inovativnih alata na bazi kretanja virtuelnog vozača u oblaku tačaka, koji je kreiran mobilnim laserskim skeniranjem.

Tabela 1 - *Deonice DP IB 22, koje su predmet analize*

Oznaka deonice	Oznaka početnog čvora	Oznaka krajnjeg čvora	Dužina deonice (km)	Stacionaža (km)	Naziv početnog čvora	Naziv završnog čvora
02224	2223	2224	6.771	164.641	Kraljevo (Jarčujak)	Mataruška Banja
02225	2224	2225	39.053	203.694	Mataruška Banja	Ušće
			Ukupno [km]	**45.824**		

Podaci iz prethodne tabele preuzeti su iz važećeg referentnog sistema i odgovaraju trajektoriji kretanja vozila kojim je vršeno snimanje tokom kreiranja referentnog sistema, a koja ne koincidira sa osovinom puta. Saglasno

1 Đorđe Sokić: djordje.sokić@panpro.rs

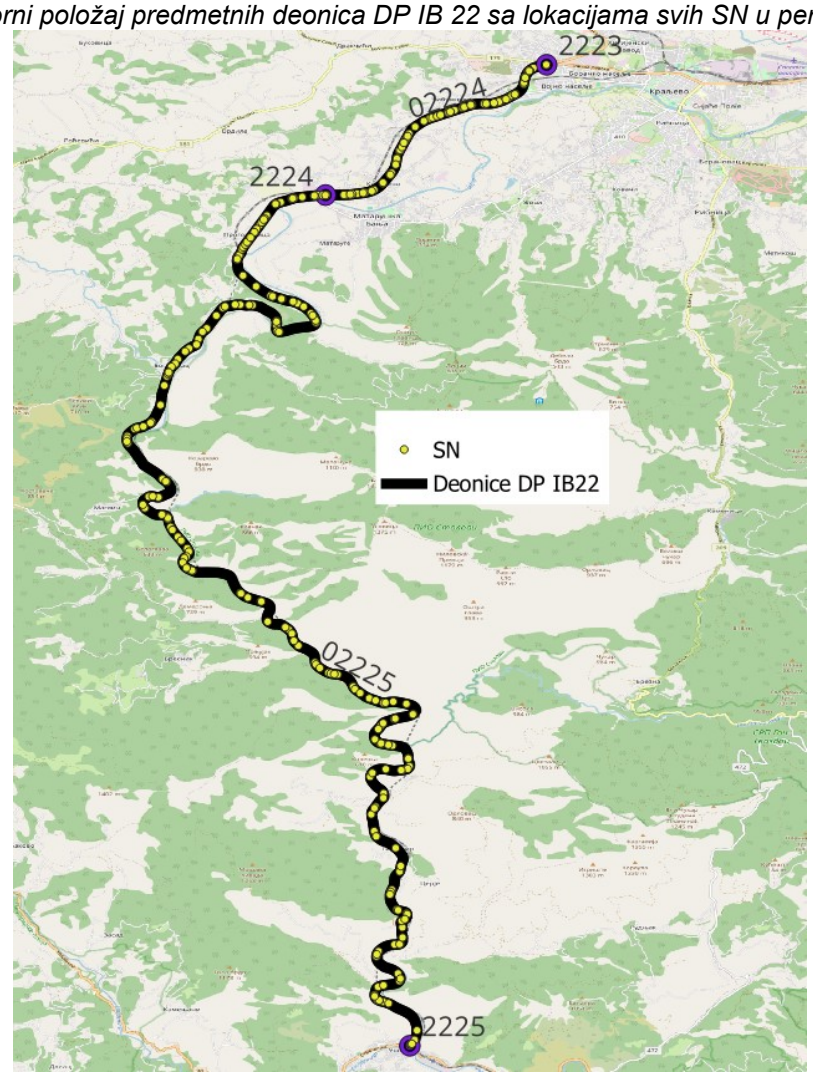
2 Elaborat analize raspoložive preglednosti sa predlogom mera za otklanjanje nedostataka na delu DP IB broj 22, od čvora 2223 do čvora 2225, Kraljevo(Jarčujak)-Ušće (Investitor: JP Putevi Srbije)

potrebi da se u skladu sa važećim Pravilnikom(50/11)[3], izrade dijagrami brzina i preglednosti, tokom izrade Elaborata[2] izvršeno je rekognosciranje osovinskih elemenata, pri čemu je veza sa referentnim sistemom uspostavljena u stacionaži početnog čvora 2223 (Km 157+870). Ovo je uslovilo određene minorne razlike u stacioniranju u odnosu na referentni sistem, koje je prikazano u narednoj tabeli (**Tabela *2***).

Tabela 2 - Stacionaže čvorova referentnog sistema u skladu sa rekognosciranom osovinom

Deonica	Oznaka početnog čvora	Stacionaža početnog čvora	Oznaka krajnjeg čvora	Staionaža krajnjeg čvora	Dužina[m]
02224	2223	157+870	2224	164+640.28	6770.28
02225	2224	164+640.28	2225	203+709.38	39069.10
				Ukupno [km]	**45.839**

Slika 1 - *Prostorni položaj predmetnih deonica DP IB 22 sa lokacijama svih SN u periodu 2016-2022*



2. METODOLOGIJA SPROVEDENOG ISTRAŽIVANJA RADI PRIKUPLJANJA NEOPHODNIH PODATAKA U VEZI SA PRETICANJEM I SAOBRAĆAJNIM NEZGODAMA

Za potrebe ovog rada sprovedena su istraživanja koja se grubo mogu podeliti u tri koraka:

- preuzimanje podataka i rezultata Elaborata[2] sa fokusom na segmente puta u kojima nisu zadovoljene zahtevana i preticajna preglednost u odnosu na postojeća ograničenja brzina;
- preuzimanje i sistematizacija podataka o saobraćajnim nezgodama iz baze podataka Agencije za bezbednost saobraćaja (BP ABS);

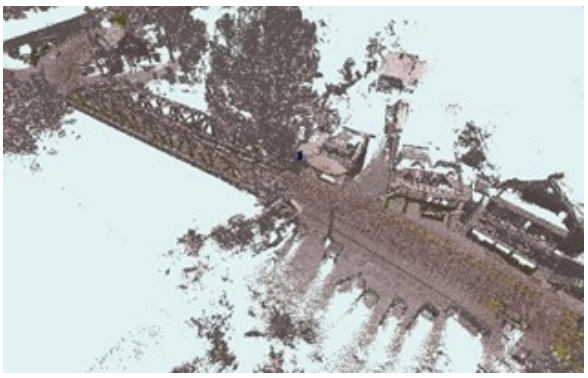
3 Pravilnik o uslovima koje sa aspekta bezbednosti saobraćaja moraju da ispunjavaju putni objekti i drugi elementi javnog puta (Sl.glasnik RS 50/11)

- kreiranje baze podataka od elemenata dobijenih iz prethodnih koraka i njena analiza sa fokusom na prostornu distribuciju saobraćajnih nezgoda.

Prilikom izrade Elaborata[2] izvršeno je snimanje oblaka tačaka, mernom opremom postavljenom na vozilu (slika 1), koja se sastojala od lidaraskog (laserskog) uređaja koji snima oblake tačaka velike gustine i INS (inercijalnog) uređaja koji je povezan sa GNSS antenama i RTK modemom, čija je uloga da georeferencira tačke snimljene lidarskim uređajem (slika 2).
Na osnovu detaljne analize tako dobijenih oblaka tačaka i dodatne analize snimka sferne video kamere, pored definisanja horizontalne i vertikalne osovine saobraćajnice, izrađeno je sledeće:

- dijagrami postojećih ograničenja brzina duž trase za oba smera vožnje;
- dijagrami projektne brzine na bazi rekognoscirane horizontalne i vertikalne geometrije puta;
- dijagrami zahtevane preglednosti za oba smera vožnje računatih na bazi postojećih ograničenja brzina;
- merenje raspoložive preglednosti za oba smera vožnje i izrada dijagrama na bazi kretanja virtuelnog vozača u oblaku tačaka;
- analiza upravljanja brzinama;
- analiza preglednosti (zahtevane i preticajne);
- definisanje predloga mera za otklanjanje nedostataka;
- mapiranje vizura i anvelopa zahtevane i preticajne preglednosti;

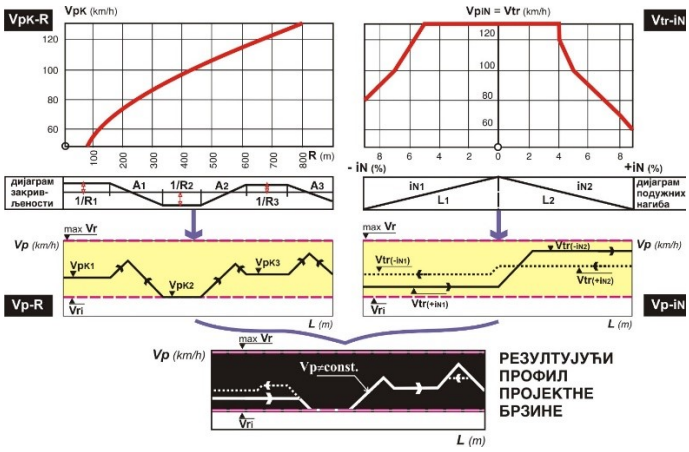
Slika 2. *Merna oprema na autu*



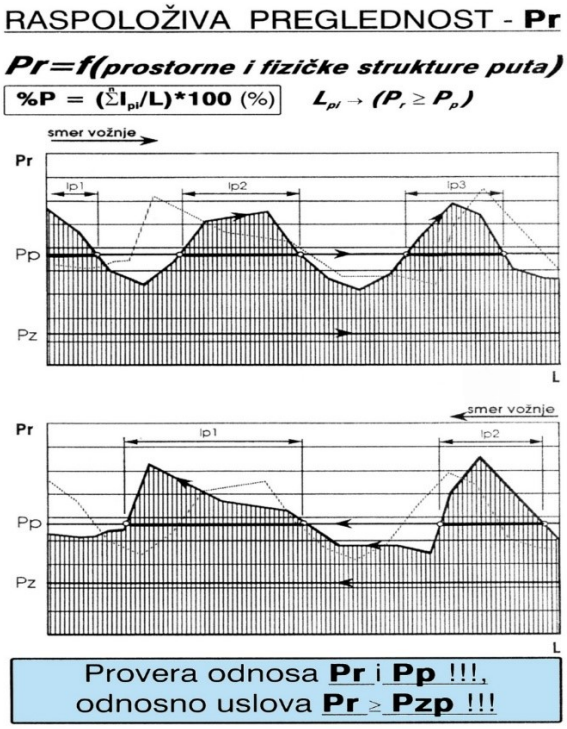
Slika 3. Prikaz dela trase u oblaku tačaka

Primenjena metodologija izrade dijagrama brzina i preglednosti, i utvrđivanja njihovih nedostataka, je u potpunosti pratila obaveze koje proističu iz važećeg Pravilnika(50/11)[3], odnosno algoritma koji je prikazan na sledećim slikama.

Slika 4. - *Konstrukcija rezultujućeg profila projektne brzine*

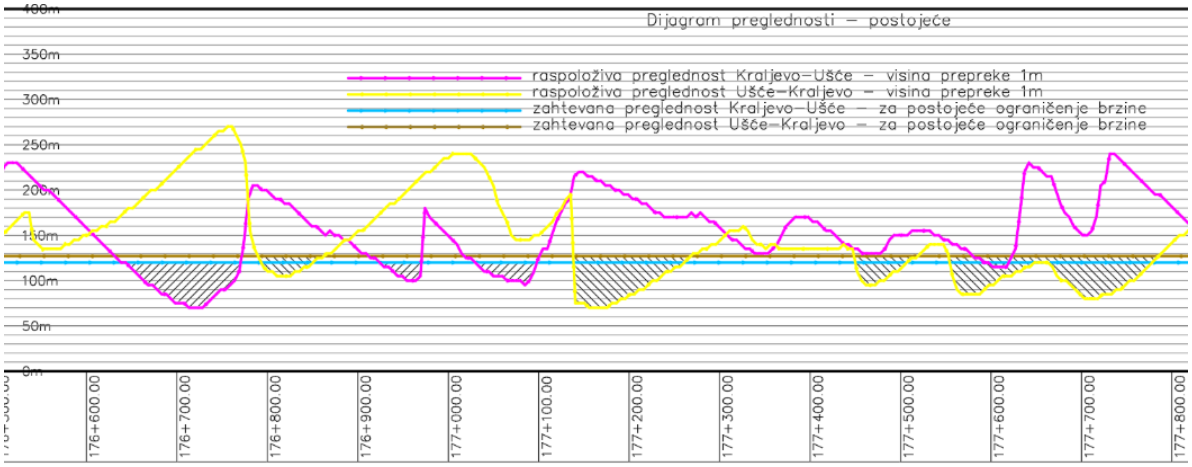


Slika 5. - *Profil raspoložive preglednosti*

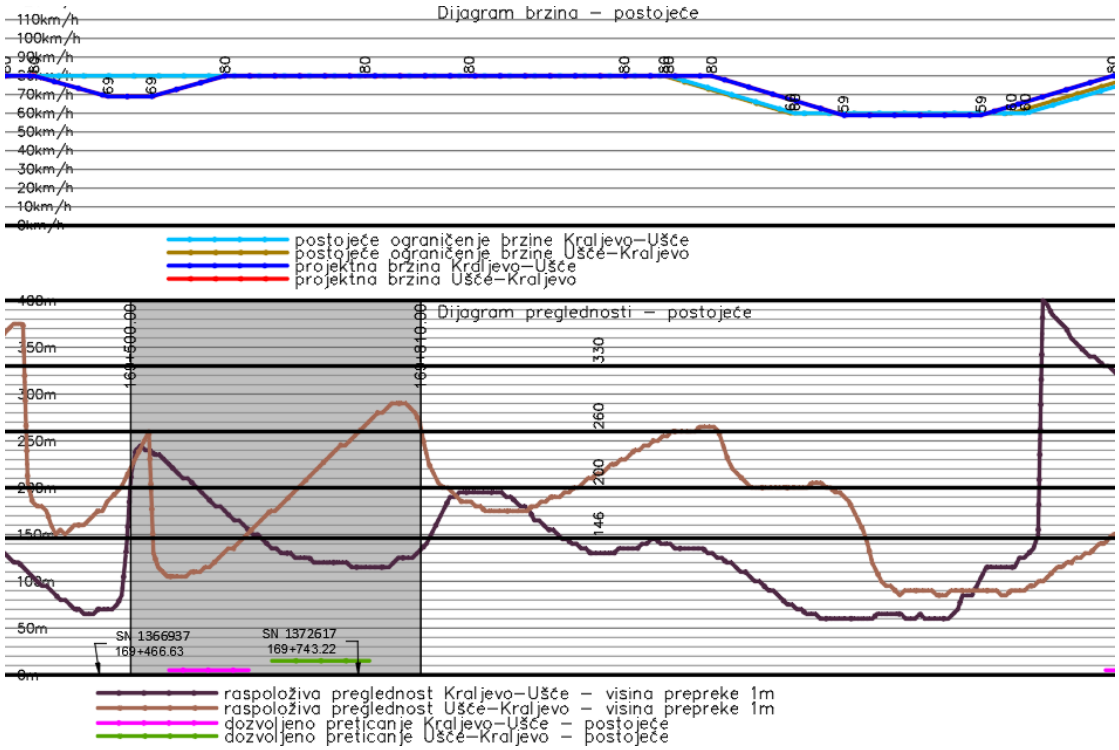


Primeri primene ovog algoritma na dijagramima izrađenim u Elaboratu[2], na kojima su utvrđeni nedostaci zadovoljenja zahtevane i preticajne preglednosti, dati su na sledećim slikama.

Slika 7. *Primer delova trase na kojima nije zadovoljena zahtevana preglednost za postojeća ograničenja brzine*



Slika 6 - *Primer zone, od km 169+500 do 169+810, u kojoj nije zadovoljena preticajna preglednost od 330m za odnos brzina 80-60-80 km/h, srazmerno postojećim ograničenjima brzina*



U drugom koraku je bilo neophodno preuzeti i sistematizovati podatke o saobraćajnim nezgodama koje su se dogodile na posmatranoj deonici državnog puta IB-22. Podaci o karakteristikama saobraćajnih nezgoda preuzeti su iz baze podataka dostupne na internet portalu Agencije za bezbednost saobraćaja za posmatrani period 2016-2022 god.

Konačno, formirana je baza podataka od elemenata dobijenih iz prethodnih koraka i izvšena njena analiza sa fokusom na prostornu distribuciju saobraćajnih nezgoda, kako bi se došlo do zaključaka u kojoj meri problemi sa ispunjenosti zahtevane i preticajne preglednosti utiču na nastanak saobraćajnih nezgoda.

3. REZULTATI ISRAŽIVANJA

Koncept analize stanja bezbednosti zasniva se na vremenskoj i prostornoj distribuciji saobraćajnih nezgoda.

3.1. Vremenska distribucija saobraćajnih nezgoda

U ovom radu analizom je obuhvaćen period od sedam godina, od 2016 do kraja 2022. godine, pri čemu je analizirana vremenska (mesečna) raspodela ukupnog broja saobraćajnih nezgoda kao i broj nezgoda sa nastradalim licima.

Na predmetnim deonicama državnog puta IB-22 Kraljevo-Ušće, u posmatranom periodu zabeleženo je ukupno 346 saobraćajnih nezgoda, od čega je 10 saobraćajnih nezgoda sa poginulim licima, 142 sa povređenim licima, dok je 194 ostalih saobraćajnih nezgoda. Iz tabele (**Tabela *3***) je uočljivo da se najveći broj nezgoda događao 2016. i 2018., respektivno. Najmanji broj saobraćajnih nezgoda je zabeležen 2019. godine.

Tabela 3 - *Broj i vrsta saobraćajnih nezgoda za posmatrane godine*

	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	Σ
SN sa poginulim	0	2	3	0	1	2	2	**10**
SN sa povređenim	30	16	22	20	21	17	16	**142**
SN sa mat. štetom	37	28	34	20	20	25	30	**194**
Ukupno	**67**	**46**	**59**	**40**	**42**	**44**	**48**	**346**

Mesečna vremenska raspodela je rađena sa ciljem da se utvrdi koliko različiti periodi godine utiču na nastanak saobraćajnih nezgoda.

Tabela 4 - *Broj i vrsta saobraćajnih nezgoda za posmatrane mesece*

	jan	feb	mar	apr	maj	jun	jul	avg	sep	okt	nov	dec
SN sa poginulim	0	0	1	2	0	2	1	1	1	1	1	0
SN sa povređenim	12	9	10	12	10	11	10	16	16	19	8	9
SN sa mat. štetom	24	16	18	19	12	20	15	14	13	20	13	10
Ukupno	**36**	**25**	**29**	**33**	**22**	**33**	**26**	**31**	**30**	**40**	**22**	**19**

Na osnovu ove analize se može videti da meseci januar, april i jun, prednjače sa brojem saobraćajnih nezgoda u odnosu na ostale mesece. Ako posmatramo ukupan broj nezgoda vidimo da one svoj maksimum dostižu u oktobru mesecu. Često se kao razlog ovakvih raspodele nezgoda po mesecima dovodi u vezu sa pojačanim sezonskim poljoprivrednim radovima i pojačanog intenziteta saobraćaja i ostalih kretanja. Međutim, budući da predmetna trasa državnog puta najvećim delom prolazi kroz klisuru, koja se ne može dovesti u vezu sa poljoprivrednim aktivnostima, ovo može ukazivati na pojačan uticaj smetnji preglednosti od vegetacije koja je značajno izraženija u tim periodima. Ako posmatramo januar mesec, razlog za povećan broj saobraćajnih nezgoda treba tražiti u uslovima puta i okoline, odnosno u klizavom kolovozu koji je karateristična za ovaj period godine.

Raspodela broja nezgoda sa povređenim licima ima sličnu raspodelu kao i ukupan broj nezgoda s tom razlikom da one svoj rast imaju od avgusta, a svoj maksimum dostižu u oktobru mesecu. Ova činjenica nam govori da se najveći broj nezgoda sa nastradalim licima dogodi upravo u ovom periodu. Kod svih raspodela nakon oktobra dolazi do opadanja broja nezgoda i povređenih sve do januara, nakon čega počinju ponovo da rastu. Jedino se za raspodelu broja poginulih ne može tvrditi da se poklapa sa ostalim raspodelama, zbog činjenice da je broj poginulih gotovo ravnomerno raspoređen tokom čitave godine sa dva ekstrema, meseca aprila i juna, u kojima su se dogodile 2 saobraćajne nezgode sa poginulim licima.

Pored već pomenute činjenice da se uslovi mogu drastično razlikovati u letnjim mesecima uz prisustvo vegetacije uz put u odnosu na zimske uslove, ovakva analiza nije u stanju da to pokaže, zato je neophodno korišćenje adekvatne opreme i alata.

Slika 8. Primer uticaja vegetacije na preglednost

3.2. Prostorna raspodela saobraćajnih nezgoda

Početne analize podataka u formiranoj bazi podataka, vezano za njihovu prostornu distribuciju, dovele su do sledećih rezultata:

- Ukupan broj SN na obe deonice, SN=**346**;
- Dužina deonice 02224 iznosi L=**6.770** km, a deonice 02225 L=**39.069** km;
- Ukupan broj SN sa povređenim i smrtno stradalim na **obe** deonice, SN=**152**;
- Ukupan broj SN sa povređenim i smrtno stradalim na deonici **02224,** SN=**52**;
- Ukupan broj SN sa povređenim i smrtno stradalim na deonici **02225,** SN=**100**;

Tabela 5 – *Prosečne brzine izračunate na osnovu podataka o postojećim ograničenjima brzina po smerovima*

Smer napred [km/h]			Smer nazad [km/h]		
Prosečna brzina na obe deonice	**Prosečna brzina na deonici 02224**	**Prosečna brzina na deonici 02225**	**Prosečna brzina na obe deonice**	**Prosečna brzina na deonici 02224**	**Prosečna brzina na deonici 02225**
67.75	58.14	69.42	70.91	56.04	73.48

Tabela 6 - *Distribucija SN sa povređenim i smrtno stradalim na obe deonice, u odnosu na postojeća ograničenja brzina po smerovima*

V [km/h]	smer napred [SN]	smer nazad [SN]
≤50	43	54
>50	109	98

- Učešće segmenata sa problemima preglednosti, bilo zaustavne, preticajne ili kombinovane, na deonici **02224** za oba smera, L=0%;
- Učešće segmenata sa problemima preglednosti, bilo zaustavne, preticajne ili kombinovane, na deonici **02225** za oba smera, L=100%;

Ovako dobijeni rezultati ukazuju na nekoliko važnih zaključaka:

- prosečna brzina na deonici 02224 je značajno manja u odnosu na prosečnu brzinu na deonici 02225, što je sasvim logično ukoliko se u obzir uzme da se deonica 02224 pretežno proteže kroz naseljene sredine Kraljevo-Čibukovac-Konarevo, sa srazmernim ograničenjima brzina, dok se deonica 02225 pretežno proteže u uslovima van naseljenih sredina Ibarske klisure;
- prosečne brzine po smerovima se značajno razlikuju, što govori o njihovoj velikoj neusaglašenosti duž trase;
- broj saobraćajnih nezgoda sa povređenim i smrtno stradalim na deonici 02224 je nesrazmerno velik u odnosu na njeno učešće u ukupnoj dužini trase, što je u suprotnosti sa opšte prihvaćenim uverenjem da su povećane brzine glavni uzročnik nastanka saobraćajnih nezgoda. Razlog za tako nešto se verovatno krije u činjenici da je mnogo više uticajnih faktora, konfliktnih zona i tačaka, ali i obim saobraćajnih kretanja u naseljenim sredinama;
- na deonici 02224 nisu registrovani problemi preglednosti, što deluje sasvim logično ukoliko se u obzir uzmu karakteristike trase na ovoj deonici i značajno manje dužine zahtevane preglednosti srazmerno ograničenjima brzina u naseljenim sredinama.

Saglasno prethodnim zaključcima, u nastavku analize je pažnja usmerena samo na deonicu 02225. Ipak, na ovom mestu važno je istaći da je predmetno istraživanje tretiralo samo probleme preglednosti duž osovine državnog puta, na način kako to propisuje Pravilnik(50/11)[3] u članu 4., a ne i probleme obezbeđenja trouglova preglednosti na ukrštajima.

Po analogiji na prethodnu tabelu (**Tabela *6***), analizirana je distribucija SN sa povređenim i smrtno stradalim u odnosu na ograničenja brzina za deonicu 02225, ali i brojne druge analize čiji su rezultati dati u nastavku.

Tabela 7 - *Distribucija SN sa povređenim i smrtno stradalim na deonici 02225, u odnosu na postojeća ograničenja brzina po smerovima*

V [km/h]	smer napred [SN]	smer nazad [SN]
≤50	25	28
>50	75	72

Tabela 8 - *Distribucija SN sa povređenim i smrtno stradalim na deonici 02225, na segmentima sa detektovanim problemima preglednosti, u odnosu na postojeća ograničenja brzina po smerovima*

	sa problemima zahtevane preglednosti		sa problemima preticajne preglednosti		sa problemima kombinovane preglednosti	
V [km/h]	**smer napred [SN]**	**smer nazad [SN]**	**smer napred [SN]**	**smer nazad [SN]**	**smer napred [SN]**	**smer nazad [SN]**
≤50	1	0	0	0	1	1
>50	30	31	8	8	38	38

Napominjemo da se podaci o segmentima puta na kojima su detektovani problemi preglednosti, u prethodnoj ali i svim narednim tabelama, odnose na njihovu uniju za oba smera vožnje. Sa stanovišta analize bilo bi poželjno izvršiti i njihovo razvrstavanje po smerovima ali je to nesvrsishodno činiti ukoliko se i podaci o SN sa svojim uticajima nastanka takođe ne mogu razvrstati po smerovima.

U svakom slučaju, na osnovu prethodne tabele se jasno može zaključiti da su problemi preglednosti dominantno izraženi na segmentima puta gde su postojeća ograničenja brzina >50 km/h. Stim u vezi, važno je sagledati kako izgleda učešće postojećih ograničenja brzina na deonici 02225 po smerovima, što je prikazano u sledećoj tabeli.

Tabela 9 - *Distribucija postojećih ograničenja brzina po smerovima na deonici 02225*

	smer napred		smer nazad	
V [km/h]	**dužina [m]**	**% dužine**	**dužina [m]**	**% dužine**
30	364.72	0.93%	549.72	1.41%
40	241	0.62%	216	0.55%
50	6957.38	17.81%	6408.38	16.40%
60	8843	22.63%	1311	3.36%
80	22663	58.01%	30584	78.28%

Ukoliko se zanemari 1 saobraćajna nezgoda koja se dogodila u zoni sa problemom zahtevane preglednosti, gde je postojeće ograničenje brzine za smer napred ≤50 km/h, može se konstatovati da se saobraćajne nezgode na deonici 02225, posmatrano samo sa aspekta od interesa za probleme preglednosti, dešavaju na 80.64%(L=31506m) njene dužine u smeru napred, odnosno 81.64%(L=31895) u smeru nazad.

U sledećoj tabeli prikazana je raspodela segmenata na kojima su detektovani problemi preglednosti na deonici 02225, u odnosu na raspodelu postojećih ograničenja brzina.

Tabela 10 - *Učešće segmenata puta na deonici 02225, na kojima su prepoznati problemi preglednosti*

	zahtevana preglednost L[m]		preticajna preglednost L[m]		kombinovana preglednost L[m]	
	13373		5054		17882	
V [km/h]	**smer napred L[m]**	**smer nazad L[m]**	**smer napred L[m]**	**smer nazad L[m]**	**smer napred L[m]**	**smer nazad L[m]**
≤50	998	695	321	321	1319	1016
>50	12375	12678	4733	4733	16563	16866

Prethodna tabela, između ostalog, ukazuje i na činjenicu da su i na segmentima gde je postojeće ograničenje brzina ≤50 km/h prepoznati problemi preglednosti. Međutim, kao što smo videli iz prethodnih rezultata, na tim segmentima registrovana je samo 1 saobraćajna nezgoda.

U naredne dve tabele prikazano je potencijalno učešće problema preglednosti posmatrano u odnosu na celu deonicu 02225, odnosno njene delove gde su ograničenja brzina >50 km/h.

Tabela 11 – *Potencijalno učešće problema preglednosti u SN sa povređenim i smrtno stradalim (POV+SS) na deonici 02225*

	zahtevana preglednost		preticajna preglednost		kombinovana preglednost	
	napred	nazad	napred	nazad	napred	nazad
a) segmenti sa problemima preglednosti [m]	13373	13373	5054	5054	17882	17882
b) ukupna dužina deonice 02225 [m]	39069.1	39069.1	39069.1	39069.1	39069.1	39069.1
c) % učešće u dužini (a/b*100)	**34.23%**	**34.23%**	**12.94%**	**12.94%**	**45.77%**	**45.77%**
d) broj SN (POV+SS) na segmentima sa problemima preglednosti	31	31	8	8	39	39
e) broj SN (POV+SS) SN na deonici 02225	100	100	100	100	100	100
f) % učešće u SN (d/e*100)	**31.00%**	**31.00%**	**8.00%**	**8.00%**	**39.00%**	**39.00%**

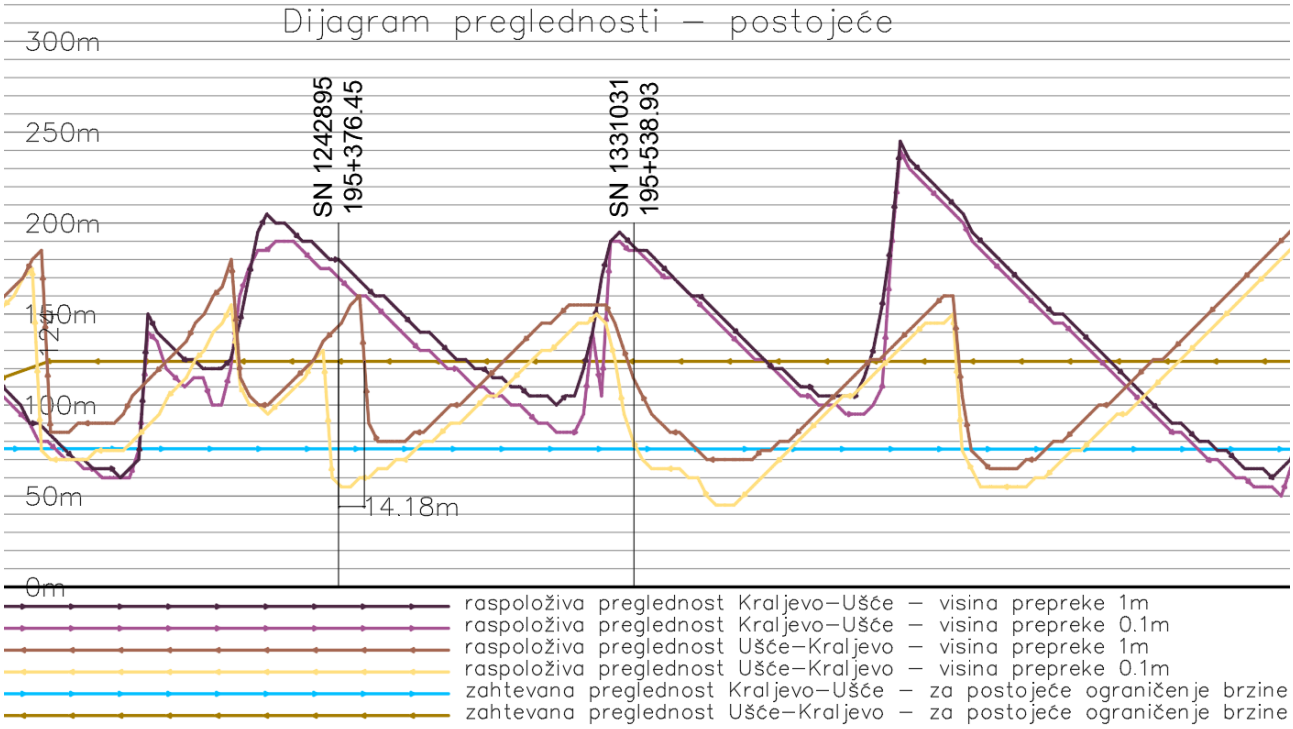
Tabela 12 - *Potencijalno učešće problema preglednosti u SN sa povređenim i smrtno stradalim (POV+SS) na delovima deonice 02225 gde je postojeće ograničenje brzine >50 km/h*

	zahtevana preglednost		preticajna preglednost		kombinovana preglednost	
	napred	nazad	napred	nazad	napred	nazad
a) segmenti sa problemima preglednosti [m]	12375	12678	4733	4733	16563	16866
b) segmenti sa ograničenjem brzine >50 km/h	31506	31895	31506	31895	31506	31895
c) % učešće u dužini (a/b*100)	**39.28%**	**39.75%**	**15.02%**	**14.84%**	**52.57%**	**52.88%**
d) broj SN (POV+SS) na segmentima sa problemima preglednosti	30	31	8	8	38	38
e) broj SN (POV+SS) na segmentima sa ograničenjima brzina >50 km/h	75	72	75	72	75	72
f) % učešće u SN (d/e*100)	**40.00%**	**43.06%**	**10.67%**	**11.11%**	**50.67%**	**52.78%**

Prethodne tabele, osim o velikom potencijalnom uticaju problema preglednosti na nastanak saobraćajne nezgode ne govore mnogo, budući da su vrednosti učešća po dužini, odnosno po broju SN, prilično uravnoteženi. Međutim, daljom analizom podataka utvrđen je određeni broj SN koje su se dogodile u neposrednoj blizini segmenata na kojima su problemi preglednosti utvrđeni na bazi poređenja dijagrama raspoložive i zahtevane preglednosti. Npr., za slučaj analize segmenata **zahtevane** preglednosti, u neposrednoj blizini (<50m) njihovih margina, registrovano je dodatnih **7** SN sa povređenim i smrtno stradalim. Ukoliko se taj broj doda u tabelu (**Tabela 12**), učešće u dužini bi iznosilo **40.39%** za smer napred, odnosno **40.84%** za smer nazad. Isto tako, učešće u broju SN za smer napred bi se popeo na **49.33%,** a za smer nazad na **52.78%**, što ukazuje na akumuliranje SN u zonama problematične preglednosti. Primer jedne takve SN (1242895), prikazan je na sledećoj slici (**Slika *9***), na kojoj se može videti da su problemi zadovoljenja zahtevane preglednosti u smeru nazad veoma izraženi, a SN (1242895) se dogodila na delu gde zahtevana preglednost za visinu prepreke od 1m jeste kratko zadovoljena, ali nije zadovoljena za visinu prepreke od h=0.1m. Na ovom mestu važno je napomenuti da je celokupna analiza rađena spram raspoložive preglednosti za visinu prepreke od h=1.0m i postojeće stanje ograničenja brzina po smerovima, premda važeći Pravilnik(50/11)[3] i Zakon o putevima (Sl.glasnik RS, br.41/2018) definišu obavezu da zahtevana preglednost bude zadovoljena u svakoj tački puta, i to spram **projektne** brzine i visine prepreke od h=**0.1m**. Ukoliko se uporede dijagrami raspoložive preglednosti za različite visine prepreke, lako je uočiti delove koji se značajno

razlikuju, što je posledica pre svega činjenice da čelična zaštitna ograda predstavlja smetnju preglednosti za visinu prepreke od h=0.1m. Na slci (**Slika *10***), može se videti izgled trase u smeru nazad u okolini stacionaže 195+387, sa čeličnom ogradom zaraslom u visoku travu. Daljom proverom zadovoljenosti raspoložive preglednosti za visinu prepreke h=0.1m, u odnosu na visinu prepreke od h=1.0m, utvrđeno je **18** dodatnih SN. Odnosno, ukupan broj SN sa potencijalnim uticajem problema zahtevane preglednosti bi se popeo na ukupno 48(49), što bi povećalo potencijalno učešće tog uticaja na **~65**%.

Slika 9 - *Primer SN (1242895) koja se dogodila u neposrednoj blizini segmenta sa problemom ispunjenja zahtevane preglednosti za visinu prepreke od h=1.0m.*



Slika 10 - *Izgled trase na Km~195+387, u smeru nazad*

Visina prepreke spram koje treba tretirati probleme preglednosti je kompleksan problem koji prevazilazi obim ovog rada, što dokazuje i poseban projekat (Eusight[4]) realizovan od strane EU. Preporuka tog projekta je da visina prepreke za zaustavnu(zahtevanu) preglednost treba da iznosi h=0.4-0.6m, dok je npr. u nemačkim smernicama za projektovanje autoputeva ta visina definisana na h=1.0m.

[4] https://www.cedr.eu/call-2013-safety

Kada su u pitanju marginalne zone segmenata problematične preglednosti, SN koje su se dogodile u tim zonama se opravdano mogu dovesti u vezu sa tim uticajem, ali ne i jednoznačno potvrditi bez daljih dubinskih analiza, ukoliko se u obzir uzmu sledeći argumenti:

- preciznost određivanja koordinata SN;
- preciznost merenja raspoložive preglednosti;
- inercija vozila, odnosno vreme reakcije vozača i nastavak kretanja od momenta kada je nastala incidentna situacija, i sl.

Pored svega prethodnog, važno je istaći da presudnu ulogu u definisanju dužine zahtevane preglednosti imaju brzine kretanja vozila, koje se u ovoj analizi odnose na postojeća ograničenja brzina po smerovima, premda bi detaljnije i preciznije analize morale uzeti u obzir stvarne ekploatacione brzine ili 85% percentil (V_{85}). Međutim, dilema spram kojih brzina zaista treba analizirati probleme preglednosti takođe prevazilazi obim ovog rada. Ipak, takođe je važno istaći da premda mnoge države, pre svega u okviru EU, ne primenjuju koncept projektne brzine već V_{85}, za pouzdano merenje njene distribucije duž trase takođe ne postoje adekvatni alati.

Na kraju ovog istraživanja urađen je pregled, prikazan u narednim tabelama, saobraćajnih nezgoda sa povređenim i smrtno stradalim razvrstan po Vrsti, Tipu, Grupama Tipova i Grupama Uticajnih Faktora, kako za celu deonicu 02225, tako i za segmente sa detektovanim problemima kombinovane (zahtevane+preticajne) preglednosti.

Tabela 13 - *Tabela Vrsta SN*

	na deonici 02225	**sa problemima kombinovane preglednosti**
VRSTA SN	**Broj SN**	**Broj SN**
SN sa povređenim licem	90	35
SN sa poginulim licem	10	4

Tabela 14 - *Tabela Tipova SN*

	na deonici 02225	**sa problemima kombinovane preglednosti**
TIP SN	**Broj SN**	**Broj SN**
Nezgoda sa jednim vozilom – silazak sa kolovoza u krivini	19	9
Najmanje dva vozila – čeoni sudar	13	7
Nezgoda sa jednim vozilom i prevrtanjem	11	6
Najmanje dva vozila koja se kreću u istom smeru – sustizanje	7	2
Nezgoda sa jednim vozilom – silazak ulevo sa kolovoza na pravcu	6	2
Najmanje dva vozila koja se kreću istim putem u suprotnim smerovima uz skretanje ulevo ispred drugog vozila	6	3
Najmanje dva vozila koja se kreću istim putem u istom smeru uz skretanje, skretanje ulevo ispred drugog vozila	5	1
Nezgoda sa jednim vozilom – silazak udesno sa kolovoza na pravcu	5	1
Ostale nezgode sa najmanje dva vozila – suprotni smerovi bez skretanja	5	1
Nezgoda sa jednim vozilom na kolovozu	4	2
Najmanje dva vozila koja se kreću u istom smeru – preticanje	3	2
Nezgode sa učešćem jednog vozila i preprekama na ili iznad kolovoza	2	2
Najmanje dva vozila koja se kreću u istom smeru – uključivanje u saobraćaj	2	
Pešak se kreće duž kolovoza u smeru kretanja vozila	2	1
Najmanje dva vozila koja se kreću istim putem u istom smeru uz skretanje, sudar u sustizanju	2	
Svi preostali tipovi sa učešćem od 1 SN zajedno	8	

Tabela 15 - *Tabela Grupa tipova SN*

	na deonici 02225	sa problemima kombinovane preglednosti
GRUPE TIPOVA SN	**Broj SN**	**Broj SN**
SN sa jednim vozilom	49	22
SN sa najmanje dva vozila – bez skretanja	31	12
SN sa najmanje dva vozila – skretanje ili prelazak	15	4
SN sa pešacima	4	1
SN sa parkiranim vozilima	1	

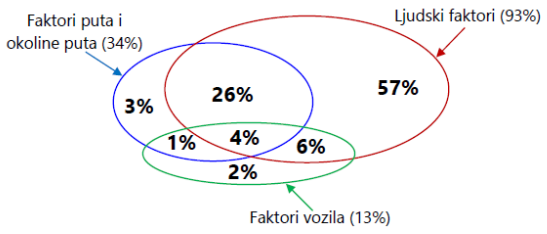
Tabela 16 - *Tabela Grupa uticajnih faktora*

	na deonici 02225	sa problemima kombinovane preglednosti
GRUPE UTICAJNIH FAKTORA	**Broj SN**	**Broj SN**
Preduzimanje nepromišljenih radnji od strane vozača	52	18
Pogrešno izvođenje radnji u saobraćaju od strane vozača	26	9
Uticaj puta i putne okoline	9	5
Propusti vozača zbog lošeg psihofizičkog stanja, nepažnje, rasejanosti	6	5
Uticaj neispravnosti vozila	3	
Propusti vozača zbog neadekvatne vidljivosti, preglednosti, odnosno kompletnog doživljaja viđenja puta i saobraćaja	2	1
Propusti vozača zbog neiskustva, neprimerenog i nepropisnog ponašanja	1	
Propusti pešaka	1	1

Uvidom u prethodne tabele primetno je sledeće:

- U tabeli ***GRUPE UTICAJNIH FAKTORA*** (**Tabela *16***), samo 2 SN su na celoj deonici 02225 svrstane u grupu *'Propusti vozača zbog neadekvatne vidljivosti, **preglednosti**, odnosno kompletnog doživljaja viđenja puta i saobraćaja'*, odnosno u grupu koja direktno upućuje na potencijalni problem preglednosti, od čega samo 1 SN u segmentima na kojima su prepoznati problemi preglednosti. Pri tome se čak ni te 2, odnosno 1, ne moraju nužno odnositi na probleme preglednosti, već npr. na probleme vidljivosti. Sa obzirom na razmere problema preglednosti jednoznačno detektovane na deonici 02225, ovi podaci mogu biti veoma zabrinjavajući i ukazivati na neprepoznavanje uticaja preglednosti na nastanak SN. Ukoliko uzmemo da su pouzdano i nedvosmisleno procenjeni faktori koji su SN svrstali u grupe *'Propusti vozača zbog lošeg pshofizičkog stanja, nepažnje, rasejanosti'*, *'Uticaj neispravnosti vozila'*, *'Propusti vozača zbog neiskustva, neprimerenog i nepropisnog ponašanja'* i *'Propust pešaka'*, koje učestvuju sa ukupno 6 SN, u svih preostalih 33 SN može doći do preklapanja različitih uticajnih faktora, između ostalog i faktor preglednost, kao što to prikazuje naredna slika (**Slika *11***).

Slika 11 - *Uticajni faktori koji doprinose nastanku SN (PIARC, 2003)*

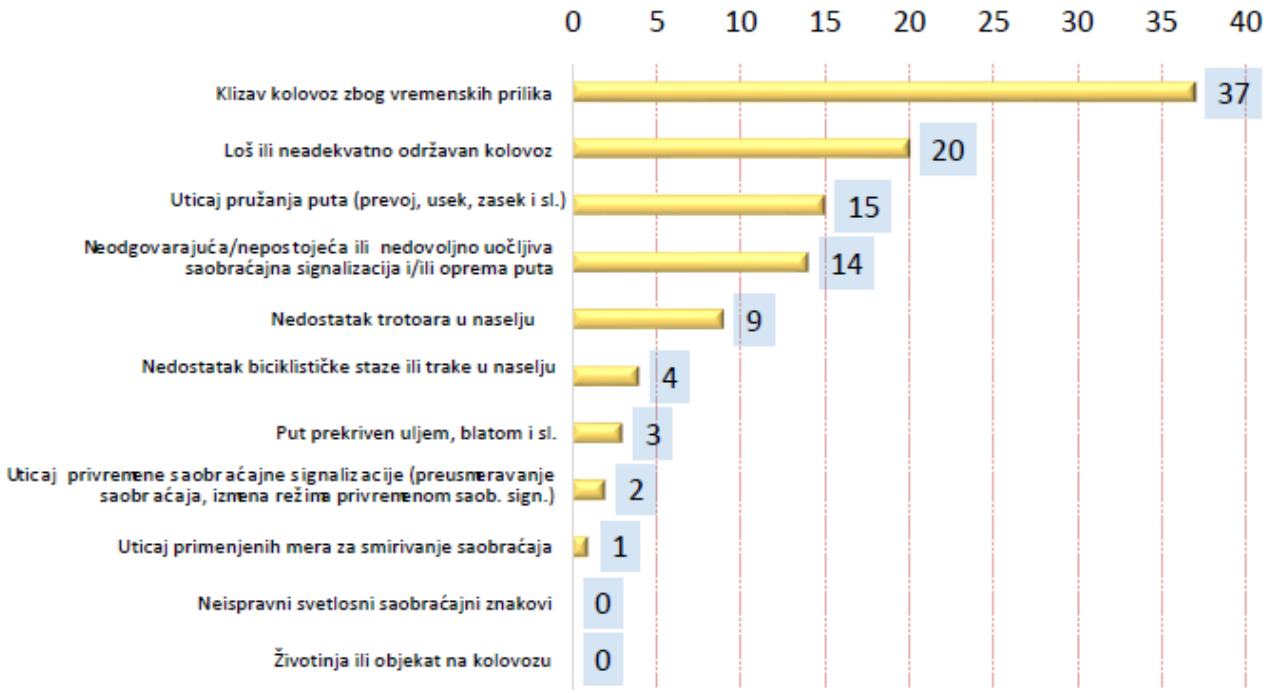


Ovo se naročito odnosi na grupe koje nose najveći broj SN, *'Preduzimanje nepromišljenih radnji od strane vozača'* i *'Pogrešno izvođenje radnji u saobraćaju od strane vozača'*, jer je nepromišljeno i/ili pogrešno izvođenje radnji između ostalog moglo biti uzrokovano lošim sagledavanjem saobraćajne situacije usled neadekvatne preglednosti.

- Posmatrajući podatke u tabelama ***TIPOVA SN (*Tabela *14)*** i ***GRUPE TIPOVA SN (*Tabela *15)***, i izuzimajući 1 SN čiji je faktor nastanka pripisan grupi uticajnih faktora *'Propust pešaka'*, svim drugim tipovima ili grupama tipova se apriori ne može niti pripisati, niti odbaciti učešće uticajnog faktora preglednost puta.

Ukoliko pogledamo narednu sliku (**Slika 12**), preuzetu iz *''Priručnika za sticanje licenci i stručno usavršavanje revizora i proverivača bezbednosti puta''*, koja govori o zastupljenosti uticajnih faktora koji se odnose na *''uticaj puta i putne okoline''* u SN sa poginulim licima u R.Srbiji za 2016. godinu, zapravo se opravdano možemo zapitati da li je *''Uticaj pružanja puta (prevoj, usek, zasek i sl.)''* ispravno imenovan ili ga je jednostavno trebalo nazvati *''Preglednost puta''*.

Slika 12 - *Zastupljenost uticajnih faktora koji se odnose na "uticaj puta i putne okoline'' u SN sa poginulim licima koje su se dogodile na teritoriji R.Srbije u 2016. godini (Izvor:Priručnik za sticanje licenci i stručno usavršavanje revizora i proverivača bezbednosti puta)*



Takođe se možemo zapitati zbog čega je u podacima o SN preuzetim iz BP ABS, uticajni faktor **preglednost**, koji pripada faktorima *''Put i okolina''*, pripisan ljudskim faktorima *''Propusti vozača zbog neadekvatne vidljivosti, preglednosti, odnosno kompletnog doživljaja viđenja puta i saobraćaja''*? Preglednost je zapravo karakteristika puta na isti način kao što su to kolovoz (sa svim svojim različitim stanjima), odvodnjavanje, elementi poprečnog profila i trupa, horizontalana i vertikalna geometrija, poprečni nagibi, saobraćajna signalizacija i oprema, itd., a koja je promenljiva duž trase i direktno zavisna od brzina. Odnosno, ne mogu se propusti u preglednosti pripisati vozaču, kao što mu se ne mogu pripisati ni propusti vezani za stanje kolovoza, greške u vitoperenju, poprečnim nagibima i sl. Adekvatna preglednost je vozaču garantovana Zakonom o putevima a ukoliko se iz različitih razloga ona ne može obezbediti, upravljač puteva je dužan da adekvatno upravlja brzinama. U svakom slučaju, nedosledan tretman ovog faktora može doprineti greškama prilikom statističkih analiza i donošenja zaključaka, što se najbolje može videti u narednoj tabeli (**Tabela *17***), u kojoj je izdvojena SN 1262042, koja je svrstana u dve suštinski različite grupe uticajnih faktora, a svi pobrojani ''različiti'' uticajni faktori se svode na isti – **preglednost**.

Tabela 17 - *SN 1262042 razvrstana po uticajnim faktorima i njihovim grupama*

ID SN	Station	Vrsta SN	Grupe tipova SN (od 2016)	Grupe uticajnih faktora (od 2016)	Uticajni faktori (od 2016)
1262042	191291.53	SN sa povređenim licem	SN SA NAJMANjE DVA VOZILA – BEZ SKRETANjA	Uticaj puta i putne okoline	Uticaj pružanja puta (prevoj, usek, zasek i sl.)
				Propusti vozača zbog neadekvatne vidljivosti, preglednosti, odnosno kompletnog doživljaja viđenja puta i saobraćaja	Uticaj vegetacije (drveće, živa ograda ili neki drugi oblik vegetacije)
					Uticaj pružanja puta na preglednost vozača (prevoj, krivina i sl.)
					Uticaj građevinskih objekata, reklama, saobraćajne signalizacije i sl. na preglednost vozača

Detaljnijom analizom podataka u tabeli (**Tabela *14***), koja se odnosi na Tipove SN, posmatrano sa stanovišta učešća SN koje su se dogodile na segmentima sa detektovanim problemima preglednost u u odnosu na ukupan broj SN, primetno je i sledeće:

- veliko učešće kod svih tipova SN koje se mogu dovesti u vezu sa iznenadnim reakcijama vozača, prilikom kojih se najčešće izazivaju nestabilnosti vozila koje uzrokuju izletanja sa kolovoza u krivinama i/ili prevrtanja. Budući da se iznenadne-zakasnele rekacije vozača zapravo dešavaju usled lošeg sagledavanja saobraćajno opasne situacije, one se svakako mogu dovesti u vezu sa neadekvatnom preglednošću;
- značajno manje učešće kod svih tipova SN za koje se sa velikom pouzdanošću može pretpostaviti da preglednost nije imala bitan uticaj, kao što su SN na pravcima;
- značajno manje učešće kod tipova SN koje se sa velikom pouzdanošću mogu pre dovesti u vezu sa nepažnjom vozača, nego sa problemima preglednosti, kao što su sustizanja;
- učešće >50% kod najopasnijih tipova SN kao što su čeoni sudari i preticanje;
- učešće od 100% u SN sa učešćem jednog vozila i preprekama na ili iznad kolovoza.

4. Z A K LJ U Č A K

Ovaj rad je verovatno prvi u R. Srbiji koji se na sistematski, sveobuhvatan i dokaziv način bavi prostornom distribucijom saobraćajnih nezgoda u odnosu na segmente puta u kojima su utvrđeni problemi ispunjenosti zahtevane i preticajne preglednost, i kao takav može predstavljati dobru podlogu za dalja istraživanja. Prikazani rezultati najviše mogu koristiti upravljačima puta i donosiocima odluka, da nakon utvrđenih problema sa ispunjenošću zahtevane i preticajne preglednosti, pronađu odgovarajuće mehanizme za njihovu eliminaciju. Da bi se dobili još pouzdaniji i precizniji rezultati, neophodno je slična istraživanja sprovesti na većem broju deonica koje se međusobno razlikuju po terenskim, geometrijskim, funkcionalnim, urbanim, saobraćajnim i drugim karakteristikama.

U najvažnije zaključke ovog rada izdvajamo sledeće:

- učešće broja SN koje su se dogodile na segmentima puta sa ograničenjima brzina ≤50 km/h, primerene naseljenim sredinama, je u velikoj nesrazmeri sa njihovim dužinskim učešćem. Odnosno, koncentracija saobraćajnih nezgoda koje su se desile u naseljenim sredinama je mnogo veća nego van njih. Ovo je verovatmo posledica mnogo većeg broja uticajnih faktora i različitih tipova saobraćajnih nezgoda koje se dešavaju u naseljima;
- problemi preglednosti duž trase su mnogo izraženiji na segmentima puta sa ograničenjima brzina >50 km/h, primerene za segmente puta van naseljenih sredina, što je i logično ukoliko se uzme u obzir da dužine zahtevane i preticajne preglednosti koje treba zadovoljiti, eksponencijalno rastu sa porastom brzine;
- od ukupnog broja SN koje su se dogodile na delovima sa ograničenjem brzina >50 km/h, odnosno van naseljenih sredina, ~40% dogodilo se u zonama sa detektovanim problemima kombinovane (zahtevane+preticajne) preglednosti. Ovo učešće rapidno raste ukoliko se dodaju i SN u marginalnim zonama tih segmenata. Takođe, ovo učešće rapidno raste ukoliko se tretira raspoloživa preglednost za visinu prepreke h=0.1m, umesto za h=1.0m;

- od ukupno 10 saobraćajnih nezgoda sa poginulim licima koje su se dogodile na obe posmatrane deonice, njih 4 su registrovane u zonama sa utvrđenim problemima kombinovane (zahtevane+preticajne) preglednosti;
- broj saobraćajnih nezgoda razvrstan po njihovom Tipu, pri čemu u svakom njih preglednost može imati bitan uticajni faktor, je u velikoj nesrazmeri sa podatkom od svega 6 saobraćajne nezgode koje su svrstane u Grupe uticajnih faktora '***Propusti vozača zbog neadekvatne vidljivosti, preglednosti, odnosno kompletnog doživljaja viđenja puta i saobraćaja'*** i ***'Put i okolina'***. Ovo pak ukazuje na nedovoljnu izučenost i poznavanje preglednosti kao uticajnog faktora, što se delimično i može razumeti ukoliko se u obzir uzme da je ovaj uticaj vrlo teško dokaziv ukoliko ne postoje alati za merenje raspoložive preglednosti.

Bez obzira na poteškoće utvrđivanja preglednosti kao uticajnog faktora kod nastanka saobraćajane nezgode, čak i njihov minimalni broj može se smatrati nedopustivo velikim, ukoliko se u obzir uzme da se mogu sprečiti preventivnim delovanjem struke, nezavisno od delovanja okruženja, odnosno šire društvene zajednice.

5. LITERATURA

[1] Elaborat analize raspoložive preglednosti sa predlogom mera za otklanjanje nedostataka na delu DP IB broj 22, od čvora 2223 do čvora 2225, Kraljevo(Jarčujak)-Ušće (Investitor: JP Putevi Srbije);
[2] Pravilnik o uslovima koje sa aspekta bezbednosti saobraćaja moraju da ispunjavaju putni objekti i drugi elementi javnog puta (Sl.glasnik RS, 50/2011);
[3] Pravilnik o saobraćajnoj signalizaciji (Sl.glasnik RS, 85/2017 i 14/2021);
[4] Zakon o putevima (Sl.glasnik RS, 41/2018);
[5] Zakon o bezbednosti saobraćaja na putevima ("Sl. glasnik RS", br. 41/2009, 53/2010, 101/2011, 32/2013 - odluka US, 55/2014, 96/2015 - dr. zakon, 9/2016 - odluka US, 24/2018, 41/2018, 41/2018 - dr. zakon, 87/2018 i 23/2019);
[6] Projektovanje puteva (Građevinski fakultet univerziteta u Beogradu, 1983., autori: Jovan Katanić, Vojo Anđus, Mihailo Maletin);
[7] Priručnik za sticanje licenci i stručno usavršavanje revizora i proveravača bezbednosti puta (Agencija za bezbednost saobraćaja R.Srbija)
[8] Sabo M., Komad M., Sokić Đ., Analiza raspoložive preglednosti na postojećim putevima, (Kongres o putevima, 2022.);
[9] 3D Virtual sight distance analysis using lidar data; https://digital.lib.washington.edu/researchworks/bitstream/handle/1773/43497/2015-S-OSU-81_Michael-Olsen_3D-Virtual-Sight.compressed.pdf?sequence=1&isAllowed=y
[10] EUSight https://www.cedr.eu/call-2013-safety
[11] Self-Enforcing Roadways: A Guidance Report, PUBLICATION NO. FHWA-HRT-17-098, JANUARY 2018; https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/safety/17098/index.cfm
[8] Baza podataka – Agencija za bezbednost saobraćaja R.Srbija; https://www.abs.gov.rs/%D1%81%D1%80/analize-i-istrazivanja/baza-podataka

ANALIZA MEĐUZAVISNOSTI BRZINE I PROTOKA NA DEONICI DVOTRAČNOG PUTA U REPUBLICI SRBIJI

Marijo Vidas[1]
Univerzitet u Beogradu – Saobraćajni fakultet, m.vidas@sf.bg.ac.rs
Vladan Tubić
Univerzitet u Beogradu – Saobraćajni fakultet, vladan@sf.bg.ac.rs
Nemanja Stepanović
Univerzitet u Beogradu – Saobraćajni fakultet, n.stepanovic@sf.bg.ac.rs

Rezime: *Međuzavisnost osnovnih parametara teorije saobraćajnog toka predstavlja osnovu za definisanje nove ili primenu postojeće metodologije za analizu kapaciteta i nivoa usluge putnih objekata. U skladu sa tim i HCM (Highway Capacity Manual) definiše linearnu zavisnost između brzine i protoka u jednom smeru na dvotračnim putevima. Imajući u vidu navedeno, cilj ovog rada predstavlja ispitivanje međuzavisnosti brzine i protoka po smerovima na državnom putu IB 22 na deonici Ripanj – Lipovačka šuma (Barajevo). Ova deonica je izabrana zbog dobrih tehničko-eksploatacionih karakteristika i veličine saobraćajnih zahteva. Podaci o brzini i protoku prikupljani su u desetominutnim intervalima sa automatskog brojača saobraćaja ABS 1140. U sledećem koraku podaci su ekspandirani na časovne vrednosti u cilju ublažavanja velike disperzije brzina, koja je posledica mešovitog saobraćajnog toka. Kao rezultat dobijena je kriva koja se može opisati polinomskim modelom višestruke regresije reda 3.*
Ključne reči: *dvotračni put, slobodna brzina, međuzavisnost brzine i protoka.*

ANALYSIS OF THE RELATIONSHIP BETWEEN SPEED AND FLOW ON A SECTION OF A TWO LANE HIGHWAY IN THE REPUBLIC OF SERBIA

Marijo Vidas[1]
The Faculty of Transport and Traffic Engineering – University of Belgrade, m.vidas@sf.bg.ac.rs
Vladan Tubić
The Faculty of Transport and Traffic Engineering – University of Belgrade, vladan@sf.bg.ac.rs
Nemanja Stepanović
The Faculty of Transport and Traffic Engineering – University of Belgrade, n.stepanovic@sf.bg.ac.rs

Abstract: *The relationship between basic parameters of the traffic flow theory is the basis for defining a new or applying an existing methodology for analyzing the capacity and service level of road facilities. Accordingly, the HCM (Highway Capacity Manual) defines a linear model for speed-flow relationship in one direction on two-lane roads. Bearing in mind the above, the aim of this paper is to examine the interdependence of speed and flow in directions on the state road IB 22 on the section Ripanj - Lipovačka šuma (Barajevo). This section was chosen due to its good technical and operational characteristics and the size of the traffic flow. Speed and flow data were collected in ten-minute intervals from an automatic traffic counter ABS 1140. In the next step, the data were expanded to hourly values in order to mitigate the large dispersion of speeds, which is a consequence of the mixed traffic flow. As a result, a curve was obtained that can be described by a polynomial model of multiple regression of order 3.*
Keywords: *two-way highways, free flow speed, speed-flow relationship*

1. UVOD

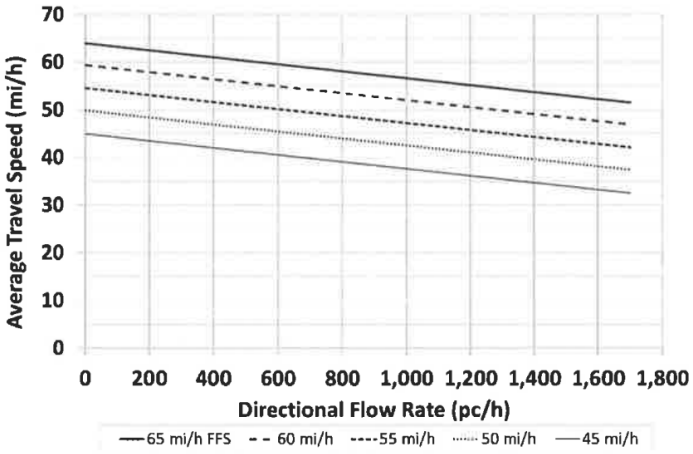
Međuzavisnost između osnovnih parametara saobraćajnog toka: brzina – protok – gustina predstavlja osnovu za definisanje postupaka za analizu kapaciteta i Nivoa Usluge. U zavisnosti od toga da li se analizira deonica dvotračnog puta, višetračnog puta ili autoputa zbog različitih uslova u saobraćajom toku, koji su posledica specifičnosti svakog od ovih putnih objekata, kriva međuzavisnosti između osnovnih parametara ima drugačiji oblik. To se prevashodno odnosi na neosetljivost brzine na povećanje protoka, odnosno na deonicama višetračnih puteva i autoputeva brzina ostaje konstantana i jednaka slobodnoj brzini do neke granične vrednosti protoka. Deonice dvotračnih puteva sa svojim karakteristikama, od kojih je naznačajnija potreba korišćenja soabraćajne trake namenjene za kretanje u suprotnom smeru za sprovođenje manevra preticanja, imaju veću osetljivost brzine na promenu protoka.

[1] Autor zadužen za korespodenciju: m.vidas@sf.bg.ac.rs

U cilju ispitivanja te međuzavisnosti između brzine i protoka fokus ovog rada će biti analiza realnih podataka sa automatskog brojača saobraćaja (ABS) na deonici dvotračnog puta u Republici Srbiji.

2. PREGLED LITERATURE

U američkom priručniku za analizu kapaciteta i Nivoa Usluge (HCM2016) definisana je međuzavisnost između brzine i protoka kao paralelne linije konstantnog nagiba, koji je jednak – 0,0125 km/h za svako vozilo koje prođe kroz posmatrani poprečni presek deonice dvotračnog puta u oba smera (slika 1). Tako definisana međuzavisnost u primeni je od izdanja HCM iz 2000-te godine.



Slika 1. *Međuzavisnost brzine i protoka po HCM 2016*
Source: HCM 2016

Linearni model iz HCM-a ima sledeći oblik:

$$V = V_{sl} - 0{,}0125 \cdot (q_1 + q_2)$$

HCM predstavlja najkorišćeniji priručnik za proračun Nivoa Usluge i kapaciteta i njegova metodologija se koristi u mnogim zemljama na svetu. Jednostavnost predloženog modela u HCM-u koji ne može objasniti razlike između stanja u saobraćajnom toku može biti problem kod njegove primene u lokalnim uslovima. Pregledom literature i inostranih iskustava uočava se da postoji potreba za kalibracijom pomenutog modela ili za razvojem originalnog modela zavisnosti brzine i protoka u zavisnosti od lokalnih uslova. U narednoj tabeli prikazani su neki od tih modela:

Tabela 1. Modeli zavisnosti brzine i protoka u idealnim uslovima

Zemlja	Model zavisnosti brzine i protoka	Literatura
Nemačka	$V_{PA} = 98{,}73 - 0{,}8176\sqrt{q_1}$ (%KV = 0%)	[2]
	$V_{PA} = 100{,}40 - 1{,}0496\sqrt{q_1}$ (%KV = 5%)	
	$V_{PA} = 95{,}17 - 0{,}9554\sqrt{q_1}$ (%KV = 10%)	
	$V_{PA} = 94{,}42 - 1{,}0515\sqrt{q_1}$ (%KV = 20%)	
	$V_{PA} = 93{,}03 - 1{,}0712\sqrt{q_1}$ (%KV = 30%)	
Finska	$V_{PA} = V_{sl} + b_1\sqrt{q_1} + b_2 q_2$	[3]
	$b_1 = -0{,}166 - 0{,}00906 \cdot V_{sl} + 0{,}213 \cdot št$	
	$b_2 = 0{,}015 - 0{,}000191 \cdot V_{sl}$	
Brazil	$V = V_{sl} - 0{,}1398\sqrt{q_1} - 0{,}1810\sqrt{q_2}$	[4]
Argentina	$V = V_{sl} - 0{,}013 \cdot q_1 - 0{,}002 \cdot q_2$	[5]
Egipat	$V = 66{,}97 - 0{,}0172 \cdot q_1 - 0{,}0154 \cdot q_2$	[6]
Španija	$V = 1 \cdot 10^{-8} \cdot q_1^3 - 2 \cdot 10^{-5} \cdot q_1^2 + 0{,}0027 \cdot q_1 + 88{,}729$	[7]
Španija	$V = -1 \cdot 10^{-8} \cdot q_1^3 + 2 \cdot 10^{-5} \cdot q_1^2 - 0{,}0197 \cdot q_1 + 75{,}426$	[7]
Španija	$V = 129{,}265 - 6{,}03 \cdot ln(q_1) - 0{,}314 \cdot \%KV$	[8]
Indija	$V = 64{,}871 - 0{,}008 \cdot q$	[9]

Izvor: [10]

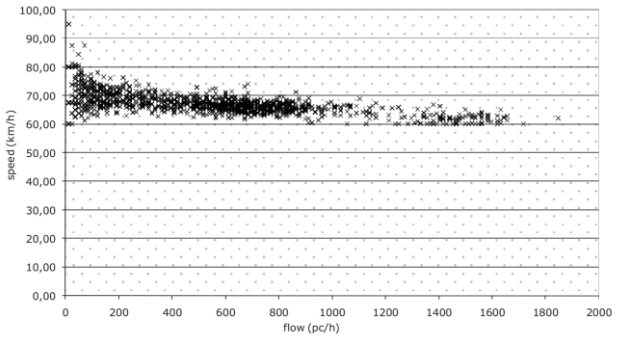
Nemačka ima definisanu sopstvenu metodologiju za analizu uslova u saobraćajnom toku koja je prikazana u Handbuch für die Bemessung von Strassenverkehrsanlagen (HBS) [2]. Za dvotračne puteve po metodologiji iz HBS-a najvažniji pokazatelj je gustina koja se dobija na osnovu količnika protoka i prosečne brzine putničkog automobila (V_{PA}), koja se dobija i modela navedenog u prethodnoj tabeli. Važno je napomenuti da po HBS-u brzina putničkog vozila u idealnim uslovima varira u zavisnosti od strukture saobraćajnog toka, odnosno od procenta komercijalnih vozila (%KV).
Model koji se primenjuje u Finskoj razvijen je na osnovu istraživanja u lokalnim uslovima i tako dobijenih empirijskih podataka [3]. Kriva brzina – protok ima konkavni oblik.
Istraživači iz Brazila [4] i Argentine [5] predložili su lokalne modifikacije metodologije iz HCM 2000. U Brazilu se na osnovu prikupljenih empirijskih podataka sa 11 lokacija i primenom TWOPAS softverskog paketa izvršila kalibracija modela na lokalne uslove. Predložena je konkavna kriva zavisnosti brzine i protoka slična onoj iz Nemačkog priručnika HBS. U Argentini kalibracija metodologije iz HCM-a obavljena je primenom CORSIM softvera, i predložena je linearna međuzavisnost između brzine i protoka. Istraživači u Egiptu [6], Španiji [7-8] i Indiji [9] takođe su na osnovu empirijskih podatak dobijenih u realnim uslovim izvršili kalibraciju HCM-a i predložili modele čije su jednačine prikazane u Tabeli 1.
Romana M. i Nunez M. [7] ispitivali su ovu međuzavisnost na deonicama dvotračnih puteva koje su se međusobno razlikovale po položaju u odnosu na naseljena mesta (gradske, prigradske i vangradske deonica), po kategoriji terena i po saobraćajnom opterećenju (tabela 2).

Tabela 2. Karakteristike deonica

Deonica	PGDS (voz/dan)	Teren
1	26 003	brdovit
2	25 124	ravničarski
3	4 909	planinski

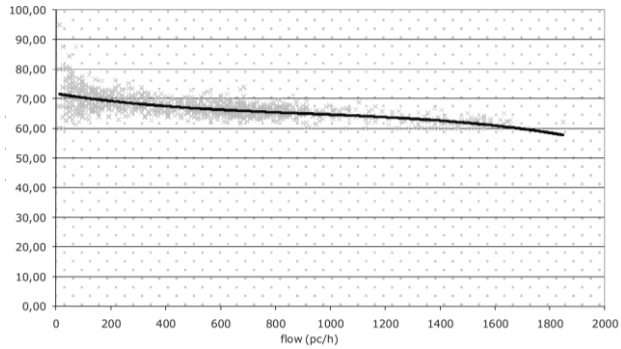
Izvor: [7]

Na osnovu snimljenih podataka za deonicu u ravničarskom terenu dobijen je sledeći grafik (slika 2):



Slika 2. *Podaci o brzini i protoku na deonici u ravničarskom terenu*
Izvor: [7]

Kao rešenje autori su predložili međuzavisnost između protoka i brzine koja se može opisati polinomskim modelom višestruke regresije reda 3, oblik te krive je prikazana na slici 3.



Slika 3. *Polinomski model višestruke regresije 3 reda zavisnosti brzine i protoka*
Izvor: [7]

3. ISTRAŽIVANJE U LOKALNIM USLOVIMA

U cilju definisanja međuzavisnosti brzine i protoka u lokalnim uslovim potrebno je formirati odgovarajuću bazu podataka o posmatrana dva pokazatelja kroz sledeće korake istraživanja:

1. Predmet i cilj istraživanja;
2. Područje istraživanja;
3. Period istraživanja i prikupljanje podataka.

3.1. Predmet i cilj istraživanja

Kao što je ranije napomenuto cilj ovog istraživanja je ispitivanje međuzavisnosti brzine i protoka na saobraćajnoj deonici dvotračnog puta u R. Srbiji. Ova analiza je neophodna radi verifikacije primene postojeće metodologije za analizu kapaciteta i Nivoa Usluge iz HCM-a ili utvrđivanje potrebe za kalibracijom iste.

3.2. Područje istraživanja

Kao osnova za ovu analitičku analizu korišćeni su podaci sa automatskog brojača saobraćaja (ABS) na državnom putu IB reda broj 22 (IB-22) na deonici Ripanj – Lipovačka šuma (Barajevo). Kod odabira putnog pravca i saobraćajne deonice kriterijumi koji su morali biti ispunjeni su sledeći: državni put sa visokim procentom daljinskih kretanja, odgovarajućim nivoom saobraćajnih zahteva i postavljenim automatskim brojačima saobraćaja. Put IB–22 zadovoljava sve ove kriterijume, on spaja Beograd sa Čačkom i Kraljevom, a dalje preko IB–23 sa Crnom Gorom. Do izgradnje državnog puta IA reda broj 2 poznatijeg kao autoput Miloš Veliki posmatrani državni put IB-22 predstavljao je drugi put po važnosti u našoj zemlji. Puštanjem autoputa Miloš Veliki (IA-2) u eksploataciju došlo je do preusmeravanja saobraćajnih tokova i na većini deonica dvotračnog puta IB-22 došlo je do primetnog pada veličine saobraćajnih zahteva. Deonica Ripanj – Lipovačka šuma (Barajevo) zbog blizine Beograda predstavlja jednu od deonica na kojoj je zabeležena najmanja promena saobraćajnih zahteva, iz tog razloga je ona izabrana kao predmetna deonica ovog istraživanja.

Deonica Ripanj – Lipovačka šuma (Barajevo) u zoni postavljenog ABS 1140 ima dobre tehničko eksploatacione karakteristike, približne idealnim uslovima i one su prikazane u tabeli 3, postavljeno ograničenje brzine je 80 km/h.

Tabela 3. Tehničko-eksploatacione karakteristike deonice Ripanj - Lipovačka šuma (Barajevo)

Tehničko eksploatacione karakteristike	
Dužina deonice	2,2 km
Širina kolovoza	8,3 m
Širina saobraćajne trake	3,5 m
Udaljenost bočnih smetnji	0,65 m
Minimalni radijus horizontalne krivine	881 m
Prosečan uzdužni nagib	1,16%
Kritičan uzdužni nagib	-

Na narednim slikama prikazan je geografski položaj i izgled posmatrane saobraćajne deonice.

Slika 4. *Izgled saobraćajne deonice i položaj ABS 1140*
Source: Google Earth

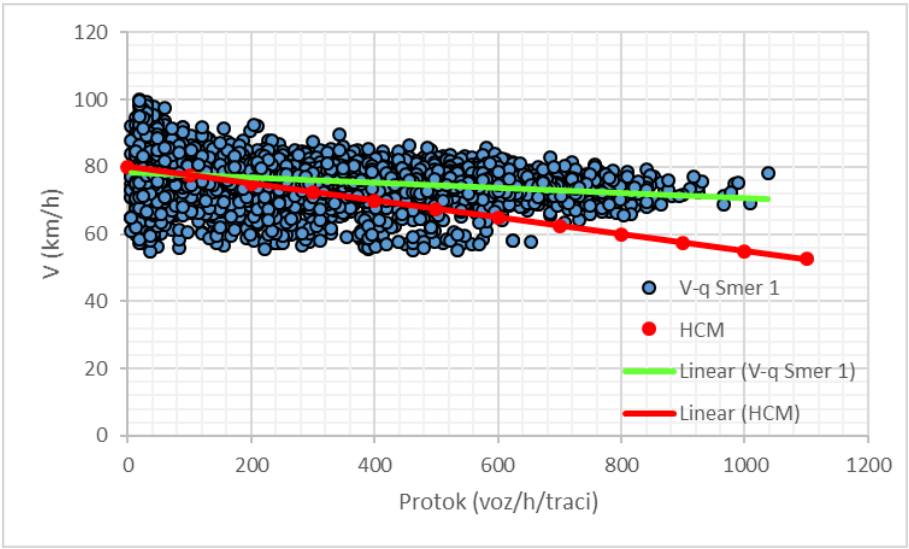
Slika 5. *Geografski položaj deonice*
Source: JP „Putevi Srbije"

3.3. Period istraživanja i prikupljanje podataka

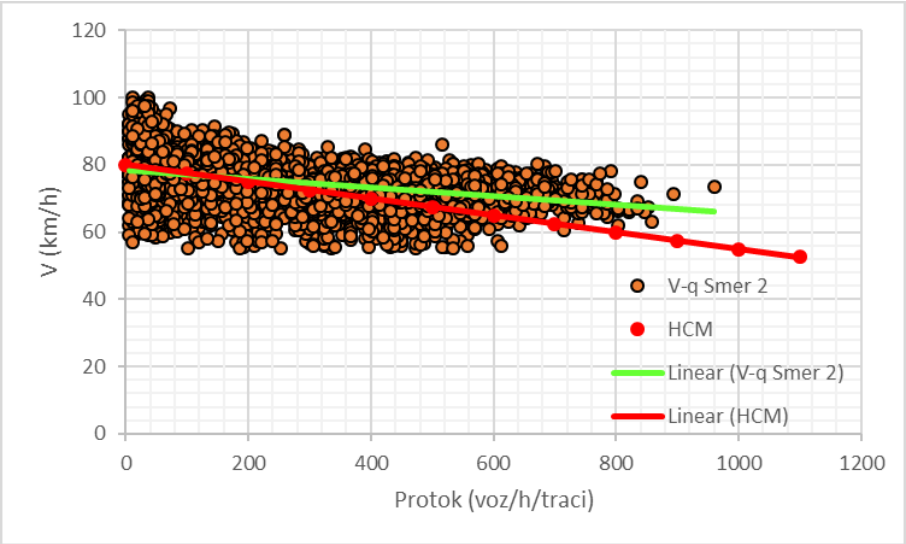
Kao period istraživanja izabran je Januar 2022. godine radi uključivanja i sezonskih tokova u analizu. Podaci o brzini svakog pojedinačnog vozila na posmatranoj deonici po smerovima kretanja u izabranom vremenskom periodu dobijeni su sa automatskog brojača saobraćaja ABS1140 (slika 4.). Korišćenjem podataka sa metereološke stanice, koja se nalazi u neposrednoj blizini, iz uzorka su isključeni periodi sa lošim vremenskim uslovima koji mogu uticati na dobijene podatke o protoku i brzini. Podaci sa metereološke stanice predstavljeni su u 10 minutnim intervalima pa su iz tog razloga i podaci o protoku i srednjim vrednostima brzina posmatrani u istom vremenskom intervalu. Ovaj korak je bio neophodan radi definisanja skupa podataka o brzini i protoku u približno idealnim uslovima, što odgovara uslovima u saobraćajnom toku za koje je definisana međuzavisnost ova dva parametra u metodologiji iz HCM-a.
Tako dobijene vrednosti protoka ekspandirane su na časovne intervale kako bi se umanjio uticaj sporih vozila na časovni protok kao i da bi se dobila ista veličina protoka kao i u inostranim istraživanjima – voz/h/traci.

4. REZULTATI ISTRAŽIVANJA

Nakon obrade podataka dobijenih sa ABS-a i metereološke stanice definisane su funkcionalne zavisnosti protoka q (voz/h/traci) i brzine V (km/h). Na Slikama 6. i 7. prikazane su ove funkcionalne zavisnosti po smerovima na izabranoj saobraćajnoj deonici Ripanj – Lipovačka šuma (Barajevo). Takođe prikazan je linearan model međuzavisnosti brzine i protoka iz HCM-a za slobodnu brzinu od 80 km/h (crvena linija) kao i realna linearna linija trenda dobijena na osnovu realnih podataka (zelena linija)



Slika 6. *Funkcionalna zavisnost V-q u smeru 1 - ka Beogradu*



Slika 7. *Funkcionalna zavisnost V-q u smeru 2 - od Beograda*

Sa prethodno prikazanih grafika funkcionalne zavisnosti V-q može se zaključiti da na posmatranoj deonici vrednosti protoka ne dostižu vrednosti zasićenog toka. Maksimalne vrednosti protoka su u smeru 1 = 1080 voz/h/traci a u smeru 2 = 980 voz/h/traci. U smeru 2 brzina ima veću osetljivost na porast veličine protoka i ima oštriji pad, to se može objasniti činjenicom da u tom smeru posle napuštanja zone ABS-a postoji radijus horizontalne krivine zbog kojeg vozači smanjuju svoju brzinu.
Poređenjem linearnog modela iz HCM-a i realnih linija trenda mogu se izvući sledeći zaključci.
U smeru 1 realna linija trenda ima blaži pad u odnosu na model iz HCM-a, brzina ima manju osetljivost na promenu veličine protoka. Jednačina ima sledeći oblik:

$$V = 78{,}38 - 0{,}0077 \cdot q_1$$

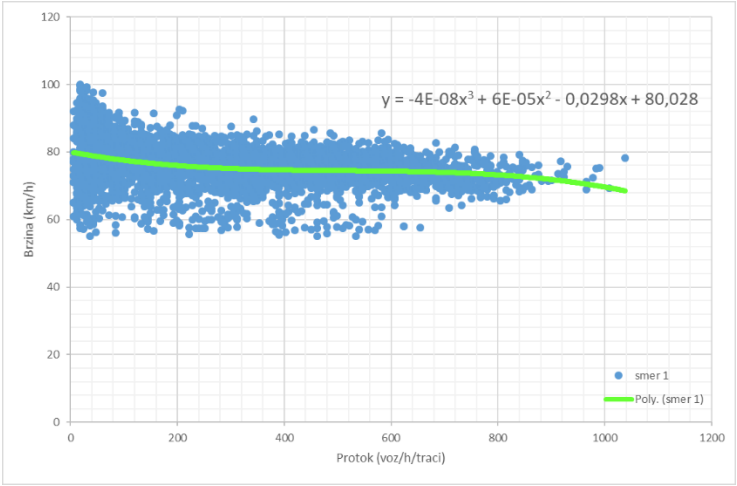
Početna vrednost slobodne brzine u Smeru 1 ima nižu vrednost za 1,62 km/h od HCM-a odnosno iznosi 78,38 km/h. U ovom slučaju se dobija da se za svako vozilo u posmatranom smeru slobodna brzina smanjuje za 0,0077 km/h. Za maksimalnu vrednost protoka od 1080 voz/h/traci po modelu iz HCM-a dobija se brzina od 53 km/h dok na osnovu dobijene linije trenda za realne podatake ta vrednost iznosi 70,1 km/h odosno veća je za 17,1 km/h.
U smeru 2 realna linija trenda ima blaži pad u odnosu na model iz HCM-a, brzina ima manju osetljivost na promenu veličine protoka. Jednačina ima sledeći oblik:

$$V = 78{,}38 - 0{,}0129 \cdot q_2$$

Početna vrednost slobodne brzine u Smeru 2 ima istu vrednost kao i u Smeru 1 78,38 km/h. Svako pojedinačno vozilo u posmatranom smeru smanjuje slobodnu brzinu za 0,0129 km/h. Za maksimalnu vrednost protoka od 980 voz/h/traci po modelu iz HCM-a dobija se brzina 55,5 km/h dok na osnovu dobijene linije trenda za realne podatake ta vrednost iznosi 65,67 km/h odnosno veća je za 10,17 km/h.
Dobijene rezultate treba uzeti sa rezervom zbog specifičnosti smera 2 i relativno nižih brzina kao posledica radijusa horizontalne krivine. U smeru 1 ostvareni su približno idealni uslovi i dobijeni rezultati mogu se porediti sa onima koji se dobijaju primenom metodologije HCM2016.
Postavlja se pitanje da li u različitim uslovima saobraćajnog toka zavisnost između brzine i protoka ima linearan oblik i konstantan pad za svako vozilo. U cilju otklanjanja tog nedostatka istraživači u Španiji predlažu korišćenje polinomskog modela višestruke regresije 3 reda zavisnosti brzine i protoka. Na slici 8. prikazana je primena ove linije trenda na realnim podacima za Smer 1.
Ovaj model ima sledeći opšti oblik:

$$V = A \cdot q_1^3 + B \cdot q_1^2 + C \cdot q_1 + D$$

Na osnovu slike 8. može se zaključiti da je vrednost slobodne brzine za smer 1 u ovom slučaju oko 80 km/h i da se poklapa sa postavljenim ograničenjem brzine. Za maksimalnu vrednost protoka od 1080 voz/h/traci brzina po ovom modelu je 64 km/h što je za 6,01 km/h niža brzina od prikazanog linearnog modela (slika 6).



Slika 8. *Polinomski model višestruke regresije 3 reda zavisnosti brzine i protoka u Smeru 1 – ka Beogradu*

5. ZAKLJUČAK

Utvrđivanje kapaciteta i Nivoa Usluge predstavlja prvi korak u operativnim, projektanskim i planerskim analizama. HCM predstavlja najkorišćeniji priručnik u kome su definisane metodologije za utvrđivanje kapaciteta i Nivoa Usluge. HCM metodlogija za analizu dvotračnih puteva definiše linearnu zavisnost između brzine i protoka u idealnim uslovima. U cilju ispitivanja da li taj model možemo primeniti u lokalnim uslovima izvršeno je istraživanje međuzavisnost između brzine i protoka na deonici dvotračnog puta u R. Srbiji. Posmatrana deonica je deo državnog puta IB broj 22. Deonica Ripanj – Lipovačka šuma (Barajevo) koja sa svojim tehničko eksploatacionim karakteristikama u smeru 1 – ka Beogradu ispunjava te uslove.
Dobijena linearna linija trenda na osnovu realnih podataka u posmatranom smeru se ne poklapa sa modelom iz HCM2016 i ima blaži pad brzine sa porastom veličine protoka. Svako vozilo koje prođe u posmatranom smeru smanjuje slobodnu brzinu za 0,0077 km/h. Na osnovu dobijenih vrednosti može se zaključiti da postoji odstupanje realnih podataka i modela iz HCM-a, da je potrebno dodatno istraživanje na drugim deonicama dvotračnih puteva i sprovođenje regresione analize radi definisanja modela koji bi se koristio u lokalnim uslovima. Radi otklanjanja nedostatka modela iz HCM2016, da u različitim uslovima saobraćajnog toka zavisnost između brzine i protoka ima linearan oblik i konstantan pad za svako vozilo, potrebno je sprovesti analizu i drugih oblika krive ove međuzavisnosti. Kao mogućnost u radu je naveden polinomski model višestruke regresije 3 reda.

Literatura

[1] Transportation Research Board. Highway Capacity Manual. Transportation Research Board, 2016.
[2] Forschungsgesellschaft für Strassen und Verkehrswesen. Handbuch für die Bemessung von Strassenverkehrsanlagen (HBS edition 2015). 2015
[3] Luttinen RT. Level of service on Finnish two-lane highways. Transportation Research Circular E-C018: Fourth International Symposium on Highway Capacity 2000; E-C018: 175–187.
[4] Bessa JEJ, Setti JR. Derivation of ATS and PTSF functions for two-lane, rural highways in Brazil. Procedia – Social and Behavioral Sciences 2011; 16: 282–292. DOI:10.1016/j.sbspro.2011.04.450.
[5] Maldonado MO, Herz M Galarraga J. Modelación de operación en carreteras argentinas y recomendaciones de ajustes al Manual de Capacidad HCM 2010. Transportes 2012; 20(3): 51–61. DOI:10.4237/transportes.v20i3.556.
[6] Hashim IH, Abdel-Wahed TA. Evaluation of performance measures for rural two-lane roads in Egypt. Alexandria Engineering Journal 2011; 50(3): 245–255. DOI:10.1016/j.aej.2011.08.001.
[7] Romana MG, Núñez M. Proposal of an alternative model for speed–flow relationship in two-lane highways. Procedia - Social and Behavioral Sciences 2011; 16: 832–839. DOI:10.1016/j.sbspro.2011.04.502.
[8] Moreno AT, Llorca C, Sayed T, García A. Field evaluation of traffic performance measures for two-lane highways in Spain. Transportation Research Circular 2014; 190: 71–87.
[9] Penmetsa P, Ghosh I Chandra S. Evaluation of performance measures for two-lane intercity highways under mixed traffic conditions. Journal of Transportation Engineering 2015; 141(10): 1–7. DOI:10.1061/(ASCE)TE.1943-5436.0000787.
[10] Moreno AT, Llorca C,Washburn S, Bessa J, Hale D, Garcia A. Modification of the Highway Capacity Manual two-lane highway analysis procedure for Spanish conditions. Journal of Advanced Transportation 2016; DOI: 10.1002/atr.1421

ŠTETE UZROKOVANE NALETOM VOZILA NA DIVLJAČ NA JAVNOJ CESTI – PRIKAZ NORMATIVNIH REŠENJA

mr. sc. Tatjana Potkonjak
SS Gradske skupštine Grada Zagreba - Grad Zagreb
tatjana.potkonjak@zagreb.hr

Sažetak: *Razvoj mreže prometnica te povećanje broja motornih vozila rezultiraju povećanjem broja šteta nastalih naletom vozila na divljač na javnoj cesti. Prometne nesreće uzrokovane naletom vozila na divljač imaju značajan financijski aspekt s obzirom na visinu nastale štete ali i značajan utjecaj na općenitu percepciju sigurnosti cestovnog prometa. Ključni pokazatelj sigurnosti prometa na cestama posve sigurno je broj prometnih nesreća, stoga kada se stanoviti faktor (divljač na cesti) identificira kao uzrok prometnih nesreća sa značajnim posljedicama, tehnička i pravna struka kroz odgovarajuću suradnju moraju ponuditi prihvatljiva rješenja. Kreirane su brojne i različite mjere za sprečavanje šteta od divljači u prometu, ali i modaliteti naknade takvih šteta. Prikaz različitih normativnih rješenja koja se tiču šteta i naknade šteta uzrokovanih naletom vozila na divljač na javnoj cesti, pokušaja iznalaženja optimalnih opcija te problema koji su uočeni na tom području, predmet su ovog rada.*

Ključne riječi: *odgovornost za štetu, divljač, lovište, pretpostavke odgovornosti*

DAMAGES CAUSED BY WILDLIFE - VEHICLE COLLISIONS ON PUBLIC ROADS A REVIEW OF RELEVANT REGULATIONS

mr. sc. Tatjana Potkonjak
City Assembly General Secretariat - The City of Zagreb
tatjana.potkonjak@zagreb.hr

Abstract: *Development of the road network and increase of the number of motor vehicles have resulted in the increasing number of damages caused by wildlife - vehicle collisions on public roads. Considering the extent of damages, car accidents caused by wildlife - vehicle collisions have a significant financial aspect, as well as a significant impact on general perception of the road traffic safety. The most significant key indication of the road traffic safety is a number of traffic accidents. Therefore, when a certain factor, such as wildlife on the road, has been identified as a cause of traffic accidents with significant consequences, technical and legal experts must provide acceptable solutions. Numerous and various measures for preventing damages from wildlife in traffic, as well as modalities of compensation for such damages, have been created. This paper deals with various normative solutions concerning damages and compensation of damages caused by wildlife – vehicle collision on public roads, efforts to provide optimum options and issues identified* in this area.

Key words: *liability for damages, wildlife, hunting ground, legal requirements for liability*

1. UVOD

Učestale izmjene pravnih propisa, ni na kojem pravnom području nisu dobrodošle, budući svaka promjena ukoliko je ozbiljno shvaćena traži i period prilagodbe ali ne samo subjekata u čijoj je nadležnosti njihova provedba već i onih na koje se imaju primjenjivat. Stabilnost pravnog sustava podrazumijeva i stabilnost propisa. Intenzivna normativna aktivnost tijekom dugog niza godina u području odgovornosti za štetu od divljači na javnoj cesti učinit će spornim brojna pitanja koja se tiču ovog uskog područja odgovornosti za štetu i uzrokovati niz problema u praktičnoj primjeni meritornih zakonskih odredaba. Različita interpretacija normi koje reguliraju odgovornost za štetu nastalu od divljači na javnoj cesti a do koje je dolazilo u sudskoj praksi rezultirala je nejedinstvenom i neujednačenom primjenom mjerodavnog prava.

Navedeno je od osobitog značaja u kontekstu činjenice kako su štetni događaji naleta vozila na divljač brojčano vrlo respektabilni što za posljedicu ima nezanemariv broj odštetnih zahtjeva i sudskih postupaka koja se na njih neposredno odnose. Zahtjevi vladavine prava i pravne sigurnosti imanentni svim suvremenim demokratskim društvima jasno su artikulirali stajalište prema kojem svim pravnim subjektima koji ulaze u krug potencijalno odgovornih za štetu nastalu od divljači na javnoj cesti, moraju biti poznati učinci pravnih normi koja uređuju to područje. Oni moraju znati stvarno i konkretno svoja prava i dužnosti kako bi predvidjeli posljedice svog činjenja ili nečinjenja.

2. AKTUALNI NORMATIVNI OKVIR ODGOVORNOSTI ZA NAKNADU ŠTETE POČINJENE OD DIVLJAČI NA JAVNOJ CESTI U REPUBLICI HRVATSKOJ

2.1. Divljač kao dobro od interesa za Republiku Hrvatsku

Pravni status divljači utvrđen je zakonom. Međutim, značaj životinjskog svijeta za Republiku Hrvatsku u naravi proizlazi iz samog Ustava Republike Hrvatske. Odredbom čl. 52. Ustava RH[1] određuje se kako su "*more, morska obala i otoci, vode, zračni prostor, rudno blago i druga prirodna bogatstva*" dobra od interesa za Republiku Hrvatsku. Također se propisuje kako dobra od interesa za Republiku Hrvatsku mogu biti još i „*zemljište, šume, biljni i životinjski svijet, drugi dijelovi prirode, nekretnine i stvari od osobitog kulturnoga, povijesnoga, gospodarskog i ekološkog značenja*" ako su posebnim zakonom određeni kao dobra od interesa za Republiku Hrvatsku. Sukladno Ustavu RH, takve stvari, odnosno dobra imaju osobitu zaštitu Republike Hrvatske. Razvidno je iz navedene ustavne odredbe pravo države da pojedine dijelove prirode zakonom proglasi dobrom od interesa za Republiku Hrvatsku. Istodobno je također razvidno i kako je zakonom potrebno regulirati odnose koji nastaju pri toj dodatnoj zakonskoj zaštiti ali i prava i obveze ovlaštenika na tim dobrima na način kojim se ustanovljuje pravična ravnoteža interesa koji se preklapaju kod takvog posebnog zakonskog režima.

Zakon o lovstvu[2] temeljni je zakonski propis koji ustanovljuje kako je divljač dobro od interesa za Republiku Hrvatsku, da ima njezinu osobitu zaštitu kao i da je ustanovljenje lovišta u interesu Republike Hrvatske. Zakon o lovstvu regulira ujedno i pitanje šteta nastalih naletom vozila na divljač. Dijagnosticiranje brojnih problema vezanih uz štete nastale od divljači te nastojanja da se za iste iznađe odgovarajuće rješenje bilo je posebno je istaknuto i u samom Konačnom prijedlogu tog Zakona (akt klasa: 022-03/18-01/31, ur. broj: 50301-25/27-18-9) od 17. listopada 2018.[3]

---

[1] Za citiranje odredaba Ustava RH u ovom radu koristi se Redakcijski pročišćen tekst Ustava Republike Hrvatske Ustavnog suda Republike Hrvatske, 15. siječnja 2014., objavljen na stranicama tog suda: http://www.usud.hr/uploads/Redakcijski%20prociscen%20tekst%20Ustava%20Republike%20Hrvatske,%20Ustavni%20sud%20Republike%20Hrvatske,%2015.%20sijecnja%202014.pdf (01. 02. 2024.)

[2] "Narodne novine" br. 99/18, 32/19 i 32/20

[3] U konačnom prijedlogu odnosnog Zakona se navodi:

„ *I konačno, kao jedna od važnijih mjera koja se ovim Prijedlogom zakona uređuje je sprječavanje šteta od divljači, kako na poljoprivrednim površinama, tako i u prometu. dosadašnje zakonsko uređenje predmetnog pitanja nije na zadovoljavajući način riješilo problem, te je dovelo do neujednačene sudske prakse, što je u najvećem broju slučajeva rezultiralo dugotrajnim sudskim procesima neizvjesnog ishoda, ali s konačnim ishodom najčešće na štetu ovlaštenika prava lova. Neujednačenom sudskom praksom i dugotrajnim sudskim postupcima, najčešće na štetu lovoovlaštenika, isti su dovedeni u nezavidni položaj suočeni s visokim odštetama i zateznim kamatama, a nezavidnoj situaciji doprinijela je i nezainteresiranost osiguravajućih kuća za osiguravanjem lovišta, odnosno nametanje visokih polica osiguranja. Zbog svega navedenog došlo se do izgledne situacije da pod prijetnjom svega navedenoga dođe do mogućeg gašenja mnogih lovačkih udruga i masovnog povrata lovišta, čime bi Ministarstvo i nadležne jedinice područne (regionalne) samouprave bile suočene s obvezama provedbe mjera za sprječavanje šteta na poljoprivrednim kulturama i značajnim izdacima za naknade za povjeravanje mjera čuvanja lovišta. Predloženim zakonskim rješenjem predmetno područje vezano uz sprječavanje šteta od divljači je jasnije i preciznije uređeno* ***čime se nastoji sve subjekte kojih se tiče predmetno pitanje staviti u ravnopravniji položaj s jasnije određenim njihovim pravima i obvezama.“***

2.2. Zakon o lovstvu – ocjena ustavnosti

Vezano uz pitanje šteta nastalih naletom vozila na divljač Zakonom o lovstvu definirane su dvije moguće situacije koje se odnose na neposrednu odgovornost vozača i ovlaštenika prava lova za štetu nastalu na divljači i vozilu, na način da je propisana odgovornost vozača za štetu na divljači i za štetu na vozilu ukoliko je isti upravljao vozilom suprotno propisima kojima je uređeno područje o sigurnosti prometa na cestama, dok je odgovornost lovoovlaštenika propisana u slučajevima kada se utvrdi da je šteta nastala kao posljedica provođenja lova. Sam Zakon ujedno propisuje kako će se u svim ostalim situacijama koje nisu njime uređene primjenjivati odredbe zakona kojim se uređuju obvezni odnosi. Odredbe čl. 80. st. 6. i 7. Zakona o lovstvu glase:

Članak 80.
……
(6) Za štetu nastalu naletom vozila na divljač odgovara se na sljedeći način:
- vozač ako se utvrdi da je upravljao vozilom protivno odredbama propisa kojima je uređeno područje o sigurnosti prometa na cestama i postojećim prometnim znakovima izričitih naredbi- lovoovlaštenik na čijem je lovištu nastala šteta ako se utvrdi da je šteta nastala zbog provođenja lova.

(7) Lovoovlaštenik je dužan radi smanjenja i otklanjanja mogućnosti nastanka štete nastale naletom vozila na divljač pratiti migraciju divljači te o tome jednom godišnje dostaviti izvješće pravnoj osobi koja upravlja cestama opisanim granicom lovišta.“

Neosporna je i vrlo realna mogućnost nastanka prometne nesreće u kojoj su svi subjekti obuhvaćeni citiranom zakonskom odredbom postupali sukladno svojim zakonom propisanim obvezama, ali je unatoč tome do došlo do naleta vozila na divljač na cesti te posljedično i nastanka štete uzrokovane tom prometnom nesrećom. Krajnje je naime, životno predvidiva situacija u kojoj je vozač upravljao vozilom na način koji je u potpunosti u skladu s propisima koji reguliraju sigurnost prometa na cestama i postojećim prometnim znakovima izričitih naredbi, a da je istovremeno pravna osoba koja gospodari javnom cestom odnosno koncesionar, na zahtjev lovoovlaštenika odnosno lovozakupnika, doista instalirala traženu i propisanu vertikalnu prometnu signalizaciju, pri čemu istrčavanje divljači na cestu zbog kojeg je došlo do prometne nesreće, nije produkt provođenja lova po lovoovlašteniku ili lovozakupniku iz čijeg je lovišta divljač istrčala na cestu. Opisana situacija koja evidentno nije „pokrivena“ odredbama čl. 80. st. 6. i 7. Zakona o lovstvu bila je glavni argument podnositelja prijedloga za pokretanje postupka za ocjenu suglasnosti s Ustavom članka 80. stavka 6. tog zakona o kojoj je odlučivao Ustavni sud Republike Hrvatske (u daljnjem tekstu: Ustavni sud), u predmetu U-I-4249/2018.[4]

Predlagatelj je u prijedlogu za pokretanje postupka za ocjenu suglasnosti zakona s Ustavom RH naveo da je zakonodavac donoseći (gore citirani) stavak 6. članka 80. Zakona o lovstvu postupio protivno vrednotama vladavine prava, jednakosti i socijalne pravde jer sadašnje zakonsko rješenje anulira deliktnu odgovornost lovoovlaštenika i odgovornost po objektivnom kriteriju. Smatra neustavnim obrazloženje Prijedloga Zakona o lovstvu po kojem je namjera bila *"minimalizirati mogućnost odštetnopravne odgovornosti lovoovlaštenika odnosno lovozakupnika"* jer se, u pravilu, radi o manjim novčanim iznosima koji se dosuđuju u takvim parnicama. Posebno smatra neprihvatljivim da kod mnogih ovakvih štetnih događaja nitko neće biti kriv pa oštećenik neće moći namiriti štetu, navodeći upravo gore opisani slučaj u kojem je svaki subjekt obuhvaćen osporavanom odredbom u potpunosti postupao sukladno pozitivnim propisima a do štete na vozilu zbog naleta vozila na divljači je unatoč tome došlo. Po mišljenju predlagatelja osporenom odredbom neosnovano se privilegiraju lovoolaštenici i lovozakupnici u odnosu na vozače.

U postupku povodom odnosnog zaprimljenog Prijedloga Ustavni sud iznio je svoje viđenje obveze zakonodavca pri uređivanju pojedinih instituta. Predmetno viđenje od općenitog je značaja te ga je kao takvog nužno akceptirati i na njega ukazati: „*S ustavnopravnog aspekta jedina obveza zakonodavca je da pri uređivanju pojedinih instituta uvažava zahtjeve koje pred njega postavlja Ustav, a* ***osobito one koji proizlaze iz načela vladavine prava i one kojima se štite određena ustavna dobra i vrednote****. Drugim riječima, njihovo uređenje uvijek mora biti takvo da osigurava ostvarenje legitimnih ciljeva pojedinog postupka, pravnu sigurnost objektivnog pravnog poretka, određenost, pristupačnost, predvidljivost i pravnu izvjesnost normi, te procesnu ravnopravnost položaja stranaka u postupcima u Republici Hrvatskoj u skladu sa zahtjevima koji proizlaze iz vladavine prava, kao najviše vrednote ustavnog poretka Republike Hrvatske koja je temelj za tumačenje Ustava (članak 3. Ustava). Ustavna je zadaća Ustavnog suda osigurati da ti zahtjevi budu poštovan*i.“

[4] Ustavni sud Republike Hrvatske na sjednici 18. lipnja 2019. godine donio je Rješenje kojim se ne prihvaća se prijedlog za pokretanje postupka za ocjenu suglasnosti s Ustavom članka 80. stavka 6. Zakona o lovstvu ("Narodne novine" br. 99/18 i 32/19)

Vezano za konkretni prijedlog za ocjenu ustavnosti osporavane odredbe, Ustavni sud je napomenuo da iako Zakon o lovstvu ne uređuje u cijelosti tu situaciju, ne može se zahtijevati od zakonodavca da zakonom uredi sve situacije do kojih može doći u svakodnevnom životu, već je na sudskoj praksi da iznađe takva rješenja u sudskim sporovima (do kojih može doći) koja će dati odgovor na tu dilemu predlagatelja na način kojim neće prevaliti svu odgovornost na građane već će odštetnu odgovornost za štete od divljači tumačiti sukladno općim načelima odštetne odgovornosti, odnosno na način kojim će pridonijeti razvoju i očuvanju prirodnog bogatstva i raspodjeli tereta odgovornosti za štetu između države, lovoovlaštenika i vozača. Tako u konačnici Ustavni sud nije našao da je da je zakonsko rješenje iz članka 80. stavka 6. Zakona o lovstvu nesuglasno s člankom 3. Ustava, odnosno nije nesuglasno načelu izvjesnosti pravne norme jer je osporena norma dostatno određena, precizna i dostupna kako bi subjekti na koje se primjenjuje mogli prilagoditi svoje postupanje. Dakle, odštetna odgovornost nije isključivo na vozaču ili lovoovlašteniku jer je za određivanje odštete potrebno ispitati ponašanje lovoovlaštenika, vozača i oštećenika u svakom konkretnom slučaju.

Imajući u vidu izneseno stajalište Ustavnog suda u kojem se izravno upućuje na ulogu „sudske prakse“ i njezin zadatak da u situacijama koje nisu izrijekom regulirane zakonom, iznađe odgovarajuća rješenja koja će dati odgovor na sporna pitanja pri čemu naglašava i način iznalaženja takvih odgovora „*tumačeći odštetnu odgovornost za štetu od divljači sukladno općim načelima odštetne odgovornosti“*, nužno je ukazati na značaj sudske prakse u hrvatskom pravnom sustavu. U obavljanju sudske funkcije sudovi su nezavisni i sude na temelju Ustava, zakona, međunarodnih ugovora i drugih važećih izvora prava, kako to definira sam Ustav [5]. U zemlji pisanog prava, kao što je Republika Hrvatska samo su pisana pravila u načelu izvor prava. Osim zakona također su mjerodavni za suđenje i podzakonski normativni akti ukoliko su u skladu s Ustavom Republike Hrvatske i zakonom. U hrvatskom ustavnopravnom kontekstu vezanost nižih sudova za pravna shvaćanja revizijskog suda može se opravdati na način da se propisivanje sustavne i stroge vezanosti za odluke revizijskog suda javlja kao nužan instrument za osiguranje ustavne zadaće Vrhovnog suda Republike Hrvatske u osiguranju jedinstvene primjene zakona i ravnopravnosti građana[6]. Neovisno o činjenici što sudska praksa u pravilu nije važeći izvor prava, odluke sudova u konkretnim predmetima izvor su prava za subjekte na koje se njihova pravomoćnost odnosi. Istovremeno su od nesumnjivog značaja za primjenu propisa stajališta sudske prakse o sadržaju pravnih pravila i pretpostavkama za njihovu primjenu[7].

2.3. Zakon o cestama

Zakon o lovstvu nije jedini propis koji regulira pitanje odgovornosti za štetu nastalu naletom vozila na divljač. Zakon o cestama[8] također se bavi tim pitanjem i svojim odredbama „uvodi“ s obzirom na materiju koja je regulirana tim zakonom „novi subjekt“ u potencijalni obveznopravni odnos odgovornosti za štetu nastalu na javnoj cesti zbog naleta na divljač: pravnu osoba koja upravlja javnom cestom, odnosno koncesionara. Odredba čl.50. Zakona o cestama regulira pitanje „naknade štete od divljači“ glasi:

„*Članak 50.*

(1) Za štetu trećim osobama nastalu na javnoj cesti zbog naleta na divljač odgovara se po osnovi krivnje.
(2) Pravna osoba koja upravlja javnom cestom, odnosno koncesionar odgovara za štetu iz stavka 1. ovoga članka nastalu na javnoj cesti ukoliko javna cesta, na zahtjev osobe koja gospodari lovištem, nije označena prometnom signalizacijom i opremom sukladno posebnim propisima.“

Vezano za prometnu signalizaciju i opremu koja se spominje u čl. 50. Zakona o cestama a tiče se opasnosti, odnosno mogućnost naleta na divljač na javnoj cesti s obzirom na sadržaj Pravilnika o prometnim znakovima, signalizaciji i opremi na cestama[9], neosporno je riječ o prometnom znaku „divljač na cesti“ i „zaštitnim žičanim ogradama“ koje sukladno odredbi čl. 2. st. 2. istog Pravilnika ulaze u kategoriju prometne opreme ceste. Zaštitne žičane ograde su tehnička sigurnosna konstrukcija sa svrhom zaštite prometa od divljači i drugih životinja te sprečavanja prijelaza vozila i pješaka sa okolnih putova na trasu autoceste i ispod nadvožnjaka. Pravilnik definira način postavljanja zaštitne žičane ograde navodeći da pletivo ograde mora biti učvršćeno metalnim klinovima u teren kako bi se spriječilo provlačenje životinja ispod ograde.

[5] Ustav Republike Hrvatske „Narodne novine“ broj 56/1990, 135/1997, 113/2000, 28/2001, 76/2010, 5/2014
[6] Jelinić, Z.: Sudska praksa u građanskim predmetima u sustavu primjene i tumačenja prava *// Aktualnosti građanskog procesnog prava - nacionalna i usporedna pravnoteorijska i praktična dostignuća* / Split: Pravni fakultet Split, 2015. str. 177
[7] Triva S., Dika M.,Građansko parnično procesno pravo, Narodne novine, Zagreb 2004. str.42
[8] „Narodne novine“ br. 84/11, 18/13 (Odluka o nedavanju vjerodostojnog tumačenja) , 22/13, 54/13, 148/13, 92/14, 110/19, 144/21, 114/22
[9] „Narodne novine“ br. 92/2019

Propisani su također sastavni dijelovi ograde te njezina visina na način da se definira kako visina zaštitne žičane ograde iznosi minimalno 2 m[10]. Aktualnim Zakonom o cestama definirani su pravni subjekti nadležni za upravljanje, građenje i rekonstrukciju javnih cesta. Sukladno odredbi čl. 26. st. 1. Zakona o cestama poslovi održavanja javnih cesta u smislu toga Zakona jesu, između ostalih, planiranje održavanja i mjera zaštite javnih cesta i prometa na njima i redovito i izvanredno održavanje javnih cesta. Upravitelj ceste u obvezi je osigurati da izvođač radova održavanja ceste, obavlja poslove redovitog održavanja ceste na način da istu čisti i nadopunjuje, zamjenjuje ili popravlja dotrajalu, oštećenu, manjkavu ili nestalu prometnu signalizaciju i opremu nosećih dijelova odnosno konstrukcije, da prometnu signalizaciju i opremu na cesti održava tako da se osigura njena potpuna funkcionalnost i vidljivost, kao i udovolji svim zahtjevima koji proizlaze iz pozitivnih propisa kojima je regulirana sigurnost cestovnog prometa, kao i prometna signalizacija i oprema na cestama a prema čl. 26. Pravilnika o održavanju cesta[11].

S obzirom na temu ovog rada i posljedice naleta na divljač na autocesti, na tu javnu cestu stavlja se poseban naglasak. Zakon o cestama definira autoceste kao javne ceste s tehničkim karakteristikama autoceste određenim propisima kojima se uređuje sigurnost prometa na cestama, koje imaju funkciju povezivanja Republike Hrvatske u europski prometni sustav, ostvarivanja kontinuiteta E-ceste (međunarodnim i međudržavnim sporazumima određena kao europska cesta), prometnog povezivanja regija Republike Hrvatske, omogućavanja tranzitnog prometa, a koje su razvrstane kao autoceste sukladno tom Zakonu. Zakon o cestama u odredbi čl. 80. st. 1. nominira izrijekom pravni subjekt nadležan za upravljanje, građenje, rekonstrukciju i održavanja autocesta, navodeći da su to Hrvatske autoceste, društvo s ograničenom odgovornošću, osim onih autocesta kojima upravlja koncesionar sukladno odredbama Zakona o cestama. Stoga je evidentno da pojava divljih životinja, odnosno životinja na prostoru autoceste predstavlja veliku opasnost od prometnih nesreća s velikim materijalnim štetama, tjelesnim ozljedama pa i gubicima ljudskih života nastalih kao posljedica sraza vozila sa životinjom na kolniku autoceste S druge strane valja imati u vidu i negativan utjecaj izgradnje autocesta na prirodna staništa životinja. Postavljanje fizičkih zapreka poput žičanih ograda duž autoceste nameće se kao prijeka potreba, koja je evidentno prepoznata i prilikom normativnog uređenja opreme na autocestama. Upravo je obveza postojanja zaštitne žičane ograde u svrhu zaštite prometa od divljači i drugih životinja na trasi autoceste, odnosno njezino pravilno postavljanje te postojanje ili izostanak oštećenja na istoj, s obzirom na stajališta sudske prakse, od osobitog stava pri formiranju ključnih stajališta kod utvrđivanja odgovornosti pravnih subjekata – za štetu nastalu naletom vozila na divljač na autocesti.

3. Prometne nesreće uzrokovane naletom vozila na divljač na autocesti – stajališta sudske prakse

Vrhovni sud Republike Hrvatske (u daljnjem tekstu: Vrhovni sud) zauzeo je ključna stajališta o nizu pitanja koja se odnose na prometne nesreće uzrokovane naletom vozila na divljač na autocesti još 2012. godine. Naime, u presudi Rev-x 230/12-2 od 8. studenog 2012., kojom se prihvaća revizija i preinačuje presuda drugostupanjskog suda u postupku koji se ticao naknade štete na vozilu nastale 27. kolovoza 1996. naletom vozila na autocesti na zeca koji je pretrčavao kolnik, Vrhovni sud iznio je stajalište kako teret dokaza da su poduzete sve radnje radi odvijanja nesmetanog i sigurnog prometa bile na strani tuženika tj. Hrvatskih autocesta d.o.o. Također je ukazano kako činjenica da policija, a niti stranke kritičnog dana nisu izvršile pregled zaštitne ograde te da je tuženik (Hrvatske autoceste d.o.o.) po svojim radnicima izvršio ophodnju spornog dijela autoceste, ne znači da ne postoji odgovornost tuženika, niti pak znači da propusta u održavanju zaštitne ograde nije bilo. Posebno je istaknuta činjenica da se divljač ne smije nalaziti na prostoru autoceste, pri čemu upravo zaštitna ograda služi da spriječi dolazak divljači na kolnik autoceste. Prema stavu suda već činjenica da se zec nalazio na prostoru kolnika autoceste znači da je isti ili prošao kroz nekakvu rupu ili procjep koji postoji na tom dijelu autoceste, ili pak da sama zaštitna ograda nije bila

[10] Nužno je ukazati kako je ranije važeći Pravilnik o prometnim znakovima, signalizaciji i opremi na cestama („Narodne novine“ br. 33/05, 64/05, 155/05, 14/11, 25/15) bitno drugačije uređivao lokacije na koje se zaštitne žičane ograde postavljaju. Naime, u čl. 94. ranije važećeg Pravilnika propisivalo se kako se zaštitne žičane ograde postavljaju uz autoceste, brze ceste, ostale ceste prema potrebi. Takvo definiranje postavljanja zaštitnih žičanih ograda izazvalo je dosta prijepora u praksi u kontekstu upita što točno znači mogućnost postavljanja zaštitnih žičanih ograda uz „ostale ceste prema potrebi“ i gdje su granice tih potreba, odnosno što kada su one u koliziji s drugim potrebama o kojima također treba voditi računa moguće je utvrditi iz presude Županijskog suda u Varaždinu Gž-2603/14-4 od 21.4.2015. u kojoj se navodi: **„***Nema nikakve dileme da je neživotno i u neskladu s prihvaćenim standardima održavanja cesta i protivno mnogobrojnim interesima i potrebama stanovništva ograđivati državne ceste od susjednih nekretnina (prostora) da se spriječi pristup divljači na cestu, pa u tom smislu nepostavljanje zaštitne ograde koja nije propisani standard zaštite prometa na cestama te vrste (prema odredbi čl. 94. Pravilnika zaštitne žičane ograde postavljaju se uz autoceste i brze ceste) ne može se tretirati kao propust drugotuženika*.“ Sud je stoga u predmetnoj pravnoj stvari zauzeo stav kako: „*Nepostavljanje zaštitne ograde uz državnu cestu kako bi se spriječio pristup divljači na cestu ne može se tretirati propustom pravne osobe odgovorne za održavanje cesta“.*

[11] „Narodne novine" br. 90/14

postavljena na pravilan način, a za što po načelu pretpostavljene krivnje odgovara tuženik tj. Hrvatske autoceste d.o.o. Neovisno o činjenici što su se nakon donošenja te presude Vrhovnog suda iz 2012., propisi na kojima se ista temeljila promijenili[12] odnosno donošeni su novi, stajalište zauzeto u toj presudi o odgovornosti pravne osobe koja upravlja autocestom, odnosno koncesionara u slučaju naleta vozila na divljač na autocesti dosljedno je primjenjivano u brojnim kasnije donesenim sudskim odlukama[13]. U tom kontekstu osobito se ukazuje na sadržaj Presude i Rješenja Vrhovnog suda Rev 873/2017-2 od 16. veljače 2021. U toj presudi je Vrhovni sud iznio stajalište kako je koncesionar autoceste „*dužan po potrebi poduzimati i mjere koje su **veće od onih propisanih pravnim propisima** na koje se poziva*“. Tuženik je naime, tijekom postupka, iznio stav kako je postupajući po zakonskim propisima (Zakon o prostornom uređenju i gradnji, Pravilnik o održavanju i zaštiti javnih cesta, Pravila i tehnički uvjeti za ophodnju javnih cesta) izvršio sve za siguran i neometan promet autocestom zbog čega nema njegove krivnje za nastanak štete. Šteta je nastala 2008. godine na autocesti u prometnoj nesreći u kojoj je vozačica upravljajući automobilom te izbjegavajući nalet na srnu ili jelena na autocesti skrenula iz desne trake u lijevu i zabila se u zaštitnu ogradu. Na predmetnoj autocesti bila je postavljena tipska ograda visine do 1,40 metara, nije bilo zelenih mostova, tuženik je obavljao ophodnju 9 puta u 24 sata, Zadnji pregled ograde obavljen je 15 dana prije nesreće te je ista pregledana idući dan nakon nesreće pri čemu nisu uočena oštećenja ograde, Međutim na predmetnoj autocesti od 2004. do predmetne nesreće 2008. zabilježeno je 50 upada divljih životinja na autocestu od čega je u 21 slučaja došlo do sraza sa životinjom.

Uzevši u obzir sve relevantne činjenice Vrhovni sud je u spomenutim odlukama Rev 873/2017-2 od 16. veljače 2021. istakao u bitnom kako je : „*u konkretnom slučaju utvrđeno da se na kolniku autoceste našla srna ili jelen pa upravo ta činjenica da se divljač našla na kolniku autoceste, ukazuje ili da je rupa ili procjep u zaštitnoj ogradi postojao ili da zaštitna ograda nije bila pravilno postavljena ili da ograda od visine od 1,40 metara nije dovoljno visoka da spriječi ulaz divljači, jer da je bila, tada se ne bi moglo dogoditi da se divljač nađe na prostoru kolnika autoceste*“. Nadalje se navodi da: „*činjenica da je na istoj autocesti u razdoblju od 4 godine (do predmetne nesreće) zabilježeno čak 50 uleta divljači na autocestu ukazuje na veliku učestalost pojave divljači na autocesti te da nije riječ tek o slučajnosti kao i na činjenicu da tuženik nije poduzeo sve potrebne mjere kako bi sukladno odredbi čl. 23. st. 1. ZJC osigurao neometan i siguran promet na autocesti. Pri tome treba imati u vidu i da se na autocesti postižu velike brzine (čak do 130 km/h) pa izbjegavanje divljači može imati kobne posljedice (u ovom slučaju 2 osobe smrtno stradale i jedna teško ozlijeđena) **zbog čega je tuženik kao koncesionar dužan po potrebi poduzimati i mjere koje su veće od onih propisanih pravnim propisima na koje se poziva tuženik**. Stoga činjenica da je postojala ograda visine 1,40 metara te da tuženik obavlja redovite preglede zaštitne ograde i do 9 puta dnevno, ali iz vozila pri brzini od 80 do 90 km/h, nisu dovoljne za zaključak da je do nesreće došlo bez tuženikove krivnje*“.

3.1 Odgovornost lovačkog društva za štetu nastalu naletom vozila na divljač na autocesti

Imajući u vidu sadržaj odredbe čl. 50. st. 2. Zakona o cestama prema kojoj pravna osoba koja upravlja javnom cestom, odnosno koncesionar odgovara trećim osobama za štetu nastalu na javnoj cesti zbog naleta na divljač ukoliko, na zahtjev osobe koja gospodari lovištem, nije označena prometnom signalizacijom i opremom sukladno posebnim propisima u praksi se postavilo i pitanje postoji li odgovornost lovačkog društva za štetu nastalu naletom vozila na divljač na autocesti, ukoliko ono nije postavilo takav zahtjev. Pojavili su se naime, slučajevi u praksi u kojima se naknada štete nastale naletom vozila na divljač na autocesti, potraživala od lovačkog društva.

Trgovački sud u Rijeci iznio je svoje stajalište o tom pitanju u presudi P.86/2020-31 od 29. siječnja 2021. godine. Do štete na vozilu došlo je uslijed naleta vozila na divljač-lisicu na autocesti pri čemu nisu postojale okolnosti koje bi upućivale na odgovornost vozača. Istaknuto je u navedenoj presudi : *„..u konkretnom slučaju nesporno riječ o autocesti. Pravna osoba koja upravlja predmetnom autocestom dužna je, sukladno odredbama Zakona o sigurnosti prometa na cestama i Pravilnika, opremiti autocestu odgovarajućom*

[12] Zakonom o cestama što ga je Hrvatski sabor donio 8. srpnja 2011. godine stavljen je izvan snage Zakon o javnim cestama »Narodne novine« br. 180/04., 82/06., 138/06., 146/08., 152/08., 38/09., 124/09., 153/09. i 73/10, dok je Pravilnika o održavanju i zaštiti javnih cesta „Narodne novine“ br. 14/91 stavljen izvan snage Pravilnikom o održavanju i zaštiti javnih cesta objavljenim u „Narodnim novinama“ br. 25/98, međutim i taj Pravilnik iz 1998. godine više nije na snazi budući je danom stupanja na snagu Pravilnika o odražavanju cesta „Narodne novine“ br. 90/14 isti stavljen izvan snage.

[13] Presuda Županijskog suda u Varaždinu, Stalna služba u Koprivnici Gž-612/2021-2, od 21. 12. 2021. i dr,

zaštitnom žičanom ogradom radi zaštite prometa na autocestama od divljači i drugih životinja cijelom dužinom autoceste. Dakle, to je zakonska obveza osobe koja upravlja autocestom. Sukladno zakonskim odredbama, autocestom se ne smiju kretati životinje, a posebno iz razloga što se autocestom kreću vozila pri većim brzinama. Stoga se autocesta niti ne označava signalizacijom koja će sudionike upozoravati na opasnost od mogućeg naleta divljači. Upravo zbog toga je pravna osoba dužna ograditi autocestu, a koja obveza pravne osobe ne ovisi o tome jesu li takav zahtjev postavile osobe koje gospodare lovištem uz autocestu. Iz navedenog proizlazi ***da lovačka društva kao osobe koje upravljaju lovištem (uz autocestu) nisu dužne toj pravnoj osobi postaviti zahtjev za postavljanjem prometne signalizacije na autocesti budući da autocesta mora biti opremljena odgovarajućom zaštitnom ogradom cijelom svojom dužinom upravo kako bi zaštitila promet od divljači i drugih životinja****. Prema tome, iz svega navedenog sud utvrđuje da uopće ne postoji odgovornost lovačkog društva za nastalu štetu. Upravo činjenica da se divlja životinja-lisica našla na kolniku autoceste ukazuje da je postojala rupa ili procjep u zaštitnoj ogradi ili da zaštitnu ogradu pravna osoba koja upravlja javnom cestom nije bila pravilno postavila jer u suprotnom se ne bi moglo dogoditi da se divljač nađe na prostoru kolnika autoceste. Lovačko društvo nije ovlašteno, niti dužno kontrolirati je li žičana ograda uz autocestu pravilno postavljena te je li održavana, već je to isključivo zakonska obveza pravne osobe koja upravlja javnom cestom. Iz toga također proizlazi da ne postoji odgovornost lovačkog društva za nastalu štetu.“*

3.2 Prigovori u postupcima radi naknade štete uzrokovane naletom vozila na divljač

Analiza brojnih presuda u kojima se odlučivalo o postavljenim tužbenim zahtjevima za naknadu štete nastale naletom vozila na divljač na autocesti, jasno ukazuje na dosljedno iznošenje od strane tuženika tj. pravne osobe koja upravlja autocestom odnosno koncesionara gotovo istovrsnih prigovora kojima se nastoji osporiti istaknuti tužbeni zahtjev.

Ključni prigovori pravne osobe koja upravlja autocestom odnosno koncesionara, a kojima oni osporavaju svoju odgovornost za štetnu nastalu naletom vozila na divljač na autocesti u bitnom se svode na egzaktno pozivanje na propise kojima je regulirana materija građenja, rekonstruiranja i održavanja autocesta. Otklanja se postojanje kauzalnog neksusa, uzročno-posljedične veze između dužnog postupanja, odnosno izostanka dužnog postupanja i nastanka štetnog događaja, na način da se ukazuje kako:

-je autocesta čitavom dužinom ograđena zaštitnom žičanom ogradom, sukladno Projektu prometne signalizacije i opreme i u skladu s Općim tehničkim uvjetima i važećim hrvatskim normama kao i projektu izgradnje predmetne dionice autoceste a da se održava u skladu s Pravilnikom o održavanju cesta, sukladno odredbama Zakona o cestama te Pravilnikom o prometnim znakovima, signalizaciji i opremi na cestama, dok se postavlja na temelju projekta, a za predmetnu dionicu autoceste da je izdana Uporabna dozvola nakon što je utvrđena tehnička ispravnost odnosno nakon što da je utvrđeno da je izvedeno stanje predmetne građevine sukladno svim projektima izgradnje;

-se autocesta redovito pregledava, a po potrebi, ograda popravlja ili zamjenjuje;

-u slučajevima kada nema evidentiranih oštećenja u na zaštitnoj žičanoj ogradi niti prokopima ispod ograde je nesporno kako je zaštitna ograda bila funkcionalna u smislu sprječavanja ulaska životinja na zatvoreni prostor autoceste;

-da predmetnog dana (kada je došlo do naleta vozila na divljač) prilikom ophodnje dionice autoceste, gdje se dogodila prometna nesreća, nisu postojala niti su primijećena nikakva oštećenja, a pogotovo ne oštećenje zaštitne žičane ograde kao i da se svako oštećenje mora evidentirati;
-su ophodarske službe u cijelosti postupile sukladno propisima i pravilima struke glede održavanja i zaštite javnih cesta u skladu s Pravilnikom o održavanju cesta[14] i Pravilnikom o ophodnji javnih cesta[15] te sukladno odredbama Zakona o cestama, kojima je propisana svaka radnja koju su osobe nadležne za održavanje ceste dužne poduzeti prilikom održavanja javne ceste;

[14] „Narodne novine“ br. 90/14 i 3/21
[15] „Narodne novine“ br. 75/14 i 7/21

-da autoceste ulaze u kategoriju cesta na kojima se ophodnja obavlja svakodnevno od 00,00 do 24,00 h i to na način da ophodarska služba u određenim vremenskim razmacima obilazi autoceste i intervenira, ukoliko uoči da su nastupile okolnosti koje ugrožavaju sigurnost prometa;

-vozač, vlasnik vozila nije dokazao da je pravna osoba koja upravlja autocestom dokazala da je učinjen neki propust, odnosno da nije učinjena dužna radnja koja bi spriječila nalet vozila na divljač;

- nalet vozila na divljač nije mogao biti spriječen mjerama i radnjama koje se poduzimaju temeljem navedenih propisa, kojima su definirane obveze osobe, odnosno koncesionara a u pogledu održavanja javnih cesta.

Pravna osoba koja upravlja autocestom odnosno koncesionar u nakani da od sebe otkloni odgovornost permanentno i dosljedno se poziva na uredno ispunjavanje svih obveza i aktivnosti koje su dužni poduzimati na temelju pozitivnih propisa koji reguliraju relevantnu materiju. Međutim, pri tom gube iz vida činjenicu na koju im sudovi kontinuirano ukazuju: divljač se ne smije naći na prostoru autoceste. Jedan od zakonskih imperativa u projektiranju, gradnji, rekonstrukciji i održavanju javnih cesta je omogućavanje sigurnog prometovanja svih sudionika u prometu. Akcentiranje sigurnosti prometa razvidno je i kod definiranja redovitog i izvanrednog održavanja cesta.

U kontekstu iznesenih prigovora u kojima se navodi kako su poštivani svi propisi koji reguliraju pojedine radnje i aktivnosti te činjenice kako sudovi unatoč tim prigovorima ističu presudni zakonski imperativ vezan za projektiranje, gradnju i održavanje javnih cesta: *„omogućavanje sigurnog prometovanja svih sudionika u prometu“*, moguće je zaključiti kako to otvara nove potencijalne aspekte tog zahtjeva. Je li dostatno tek puko zadovoljavanje u naravi provedbenih propisa ukoliko se njima nije ostvario generalni zahtjev za sigurnim prometovanjem?

4. Odgovornost za štetu nastalu naletom vozila na divljač u sudskoj praksi susjednih zemalja

Imperativni normativni zahtjev kako ceste moraju biti projektirane, izgrađivane, opremane i štićene na način da odgovaraju zahtjevima sigurnosti u prometu, nije imanentan samo hrvatskom pravnom sustavu, kao što ni problematiziranje odgovornosti za štetu nastalu naletom vozila na divljač na autocesti nije pitanje koje se ekskluzivno pojavljuje pred hrvatskim sudovima. Prisutnost tog pravnog problema u okruženju razvidna je i iz sudske prakse susjednih zemalja. Uvid u nju vodi prema konkluziji o postojanju gotovo identičnog stava u pogledu odgovornosti za štetu nastalu naletom na divljač na autocesti u odnosu na permanentno isticani stav Vrhovnog suda iz 2012. godine. Niže navedene presude nadležnih sudskih tijela susjednih zemalja jasno pokazuje kako su i njihovi nižestupanjski sudovi imali različita stajališta vezana uz odgovornost za štetu uzrokovanu naletom vozila na divljač, u odnosu na stavove višeg suda.

Tako je Višje sodišče v Ljubljani u predmetu II Cp 1466/2011 u svojoj odluci od 11. 1. 2012.[16] zauzelo stajalište koje je u potpunosti sukladno stavu Vrhovnog suda Republike Hrvatske iz 2012. Stavu prema kojem već sama činjenica da se divljač našla na autocesti ukazuje kako postojeća zaštitna ograda ne ispunjava svoju svrhu, odnosno da ne sprječava ulaz divljači na cestu pa da stoga nisu osigurani traženi uvjeti za siguran promet na autocesti ali i da je teret dokaza da su osigurani uvjeti za siguran promet na autocesti na pravnom subjektu koji njome upravlja. Višje sodišče v Ljubljani konstatiralo je u predmetnoj presudi: *„Utvrđeno činjenično stanje, da se već nekoliko puta dogodilo da se divljač nađe na autocesti, dokazuje osnovanost prigovora tužitelja kako mjere zaštite na autocesti nisu bile dostatne. Sukladno članku 20. „Pravilnika o vrstah vzdrževalnih del na javnih cestah in nivoju rednega vzdrževanja javnih cest“[17], cestovni uređaji i uređenja moraju se održavati na način da je zajamčeno njihovo besprijekorno funkcioniranje. Svrha zaštitne ograde koja sprječava pristup divljači autocesti je zabraniti divljači pristup autocesti. Jedino tako mogu se osigurati sigurni uvjeti za njezine korisnike. Sukladno članku 20. navedenog Pravilnika drugotuženik je dužan odmah otkloniti uzroke koji to sprječavaju, a ako to nije moguće provesti privremena rješenja i odgovarajuće mjere osiguranja. Budući da je divljač već nekoliko puta bila na autocesti, očito je da zaštitna ograda od divljači ne ispunjava svoju svrhu, odnosno ne funkcionira savršeno.*

[16] http://pisrs.si/Pis.web/sodnaPraksaRSSearch?search=srna&filter=&chosenFilters=visje&od=&do=&page=2&scrollTop=250 (04. 03. 2024.)
[17] Uradni list RS, št. 62/1998 s spremembami in dopolnitvami.

Stoga je prigovor tužitelja na nedovoljne mjere osiguranja tuženika opravdan. Ovim je utvrđena protupravnost postupanja drugotuženika i to propuštanje dužnosti iz točke 7. drugog stavka članka 13. i članka 20. odnosnog Pravilnika, uslijed čega postojeći uvjeti za siguran promet nisu zajamčeni na autocesti. Čak i da je srna ušla na autocestu na čvorištu, što je prvostupanjski sud uzeo u korist drugotuženika, to potvrđuje osnovanost prigovora tužitelja o neprimjerenosti tuženikovih zaštitnih mjera i neprikladnom osiguranju autoceste.“

Odgovarajuće stajalište o odgovornosti za štetu nastalu naletom vozila na divljač na autocesti na tragu onog koji je zauzeo Vrhovni sud Republike Hrvatske odnosno Višje sodišče v Ljubljani zauzeo je i Vrhovni kasacioni sud Republike Srbije u presudi Rev 4860/2020 od 18.02.2021.[18] kojom je preinačio drugostupanjsku presudu Apelacionog suda u Beogradu Gž 2982/20 od 04.06.2020. godine i potvrdio presudu Drugog osnovnog suda u Beogradu P 4024/18 od 25.12.2019. godine. Prvostupanjski sud tj. Drugi osnovni sud u Beogradu u presudi P 4024/18 od 25.12.2019. zauzeo je stav kako nalet vozila na divlju životinju autocesti ne može predstavljati činjenicu koja se nije mogla predvidjeti ni izbjeći ili otkloniti, budući je subjekt kojem je povjereno upravljanje autocestom bio u obavezi poduzeti sve radnje koje se tiču redovnog održavanja kako bi spriječio situaciju kojom bi dolazilo do nastanka štete naletom vozila na životinje te kako ne bi došlo do prometne nesreće da je zaštitna ograda u konkretnom slučaju bila adekvatno ograđena budući životinja ne bi mogla ući u prostor autoceste. Drugostupanjski sud nije bio takvog stava. Međutim, prema stajalištu Vrhovnog kasacionog suda, prvostupanjski sud pravilno je primijenio materijalno pravo za razliku od drugostupanjskog suda.

Konstatirano je naime, u navedenoj revizijskoj presudi Vrhovnog kasacionog suda Republike Srbije kako je čl. 15. st. 2. Zakona o javnim putevima propisano da osoba koja upravlja „javnim putom“ odgovara za štetu njegovim korisnicima zbog propuštanja pravovremenog obavljanja pojedinih radova na redovnom održavanju propisanih tim zakonom, odnosno zbog izvođenja tih radova suprotno propisanim tehničkim uvjetima i načinu njihova izvođenja. Divlja svinja na koju je naletjelo vozilo našla se na prostoru na kojem se nije smjela zateći. Sud konstatira kako je riječ o autocesti koja mora biti ograđena kako bi spriječila ulaz životinja a sve u cilju sigurnosti odvijanja prometa te kako je očito da je životinja prošla na mjestu koje nije bilo dobro zaštićeno za ulazak na autocestu te koje pripada zaštitnom pojasu. Teret dokaza da su poduzete sve mjere u svrhu sprječavanja kretanja životinje po kolovozu autoceste i zaštićenom pojasu je na subjektu kojem je povjereno upravljanje autocestom.

5. Odstupanja od pravnog shvaćanja Vrhovnog suda Republike Hrvatske

Unatoč tome što je Vrhovni sud još 2012. godine iznio stajalište vezano za teret dokazivanja u pogledu poduzimanja svih radnji radi sigurnog odvijanja prometa autocestom kao i stav o značaju same činjenice da se divljač našla na autocesti u kontekstu propusta pravnog subjekta nadležnog za upravljanje i održavanje autoceste (*osobito u dijelu koji se tiču stanja i održavanja zaštitne ograde*) te usprkos okolnosti da je to stajalište potvrđeno u nizu kasnije donesenih presuda iako su se one temeljile na izmijenjenim pravnim propisima, neophodno je ukazati kako su u pojedinim slučajevima sudovi, osobito nižestupanjski zauzimali i drugačije stavove.

U postupku P-505/2020 u kojem se potraživala naknada štete pretrpljena uslijed naleta vozila na srndaća koji je pokušao pretrčati autocestu. Trgovački sud u Zagrebu je ocijenio da je tuženik Hrvatske autoceste d.o.o. dokazao da je u ovoj pravnoj stvari poduzeo sve potrebne mjere potrebne za nesmetano odvijanje prometa ali je unatoč tome, došlo je do istrčavanja divljači na kolnik, sud je stoga ocijenio da njegove odgovornosti za štetu nema, a s obzirom na to da je kolnik auto ceste bio zaštićen žičanom ogradom koja je u dužini od po 500 m u oba smjera pregledana neposredno nakon štetnog događaja i na kojoj tom prilikom nisu zamijećena oštećenja niti je pronađeno mjesto koje bi omogućilo pristup divljači na cestu. Pored toga je konstatirano kako je na predmetnoj dionici autoceste na dan štetnog događaja od 19.00 do 7.00 h izvršena ophodnja autoceste tri puta sukladno Pravilniku o ophodnji javnih cesta. U konačnici u presudi od 19. svibnja 2021. utvrđeno da činjenica preskakanja ograde od srndaća i njegov dolazak na autocestu predstavlja nepredvidivu okolnost na koju tuženik (Hrvatske autoceste d.o.o.) nikako nije mogao utjecati.

[18] https://www.vk.sud.rs/sr-lat/rev-48602020-31281 (03. 03. 2024.)

Drugostupanjski sud tj. Visoki trgovački sud u žalbenom postupku preinačio je predmetnu presudu Trgovačkog suda u Zagrebu P- 505/2020 od 19, svibnja 2021. te u obrazloženju svoje presude postavlja niz, životno krajnje osnovanih upita, dajući logične i smislene odgovore na njih. „*Može li tuženik kao pravna osoba koja upravlja javnom cestom i/ili lovačko društvo kao pravna osoba koja gospodari lovištem, baš apsolutno spriječiti da ijedna divlja životinja dođe do javne ceste? Ne mogu. Može li vozač vozila na javnoj cesti unaprijed poduzeti mjere koje će spriječiti svaku mogućnost nastupanja prometne nezgode zbog naleta na neočekivanu divljač na cesti? Ne može. Je li tuženik odgovoran što se srndać u noćnim satima i pored postavljene žičane ograde uz cestu na obje strane, pojavio na javnoj autocesti? Je li vozač oštećenog vozila odgovoran što nije očekivao srndaća na cesti i zato što nije unaprijed prilagodio brzinu uvjetima na cesti i takvoj mogućnosti? Na ta pitanja se često ne mogu dati ni jednoznačni niti pouzdani odgovori, pa odatle i možebitne različite sudske odluke u odnosu na drugačije konkretne okolnosti".*

U konačnici Visoki trgovački sud detaljno je obrazložio svoj stav zbog kojeg je i preinačio prvostupanjsku presudu: *Kod činjenice da iz rezultata dokaznog postupka (proizlazi da nastala šteta nije krivnja vozača njegovog vozila), sama činjenica da se na javnoj cesti kojom upravlja tuženik u vrijeme nezgode i pored postojanja zaštitne ograde te i pored obilazaka ophodarskih prvotuženikovih službi, dogodila nezgoda zbog naleta na srndaća, po ocjeni ovog suda ukazuje na vjerojatni tuženikov čin ili propust (nepažnju; čl. 1049. ZOO-a). Prvotuženikov propust se očituje u stanju njegove zaštitne žičane ograde uz cestu koja je na neki, točno neutvrđeni način, na ovom ili nekom drugom nepregledanom dijelu javne ceste, zbog njenog oštećenja ili izvedbe, ostala propusna za srndaće. Postojanje građevinske i uporabne dozvole za izvedbu ove ograde i njene tehnički predviđene karakteristike, ne mijenjaju činjenicu da je srndać prošao kroz ovu ogradu ili je možda preskočio. Odatle i zaključak o tome da tuženik i pored postavljanja zaštitne ograde uz cestu zbog njene propusnosti, nije poduzeo zaštitne mjere u mjeri koja bi ovog srndaća spriječile da dođe na javnu cestu. Ili drugim riječima, tuženik u pogledu postavljanja ove ograde nije postupio na pravilan način. Tuženik unatoč suprotnim tvrdnjama i ocjeni prvostupanjskog suda, do zaključenja glavne rasprave nije dokazao da tome nije bilo tako. Propusnost žičane ograde uz autocestu za srndaća prvotuženikova ophodarska služba zasigurno ne može utvrditi prilikom ophodnje, pa niti spriječiti, posebno ne u večernjim i noćnim satima. Zato prvotuženikove tvrdnje o provedbi česte ophodnje na javnoj cesti te ophodarski dnevnici čiji sadržaj jedino potvrđuje da je ophodnja vršena, a ne i kako je vršena, po ocjeni ovog suda ne mogu popraviti njegov pravni položaj u ovoj pravnoj stvari. Je li u pitanju oštećenje (otvor) ili općenito propusnost prvotuženikove zaštitne ograde, bilo zbog njene tehničke izvedbe, oštećenja ili dodatno, zbog spretnosti i okretnosti srndaća koji je eventualno u stanju preskočiti je, činjenica je da se srndać u ovoj pravnoj stvari našao na javnoj cesti pred tužiteljevim vozilom te da je udarom vozila u srndaća na cesti došlo do imovinske štete na vozačevoj strani."*

6. Osiguranje jedinstvene primjene zakona

Prema čl. 26. Ustava Republike Hrvatske svi su građani Republike Hrvatske i stranci jednaki pred zakonom i sudovima. Pravna norma morala bi se u svim jednakim slučajevima primjenjivati na isti način. Unatoč tome što se u Republici Hrvatskoj ne primjenjuje sustav presedana tj. precedentnog prava. Hrvatski Ustav jamči neovisnost sudstva i prema ustavnoj odredbi suci sude samo na temelju Ustava i zakona. Međutim, hrvatskim zakonodavnim okvirom predviđeno je od stane sudova razmatranje spornih pravnih pitanja, ujednačavanje sudske prakse te pitanja važna za primjenu propisa iz pojedinih pravnih područja. Sukladno tome, kako je evidentno da unatoč vrlo bogatoj sudskoj praksi u sferi odgovornost za štetu nastaloj naletom na divljač na autocesti, egzistiraju sporna pitanja koja se primarno tiču odgovornosti za štetu pravne osobe koja upravlja autocestom te tereta dokazivanja relevantnih činjenica, javila se potreba da pravno shvaćanje o njima zauzme i Odjel trgovačkih i ostalih sporova Visokog trgovačkog suda Republike Hrvatske. Pravno shvaćanje o tim pitanjima zauzeto je na sjednici odnosnog Odjela 20. prosinca 2022. godine i glasi: „*Za naknadu štete nastale naletom divljači na vozilo na autocesti pravna osoba koja upravlja autocestom odgovara **po načelu predmnijevane krivnje.** Kada je utvrđeno da se divljač nalazila na kolniku autoceste samim time dokazan je propust u održavanju autoceste od strane pravne osobe koja upravlja autocestom. Na tuženiku je teret dokazivanja da nije bilo njegovih propusta u održavanju autoceste pri čemu tužitelj nije dužan konkretizirati svaki pojedini propust ili štetnu radnju zbog kojih se divljač zatekla na kolniku autoceste".*

Kod razmatranja pitanja jedinstvene primjene zakona potrebno je ukazati i na ustavnu ulogu Vrhovnog suda Republike Hrvatske, da kao najviši sud u Republici Hrvatskoj osigurava jedinstvenu primjenu zakona

i ravnopravnost građana. Od osobitog značaja za ostvarenje te uloge Vrhovnog suda je revizija[19], izvanredni pravni lijek predviđen Zakonom o parničnom postupku. U kojoj mjeri je, vezano uz pitanja odgovornosti za štetu nastalu od naleta na divljač na cesti, odnosno autocesti prisutno odstupanje odluka nižih sudova u odnosu na odluku Vrhovnog suda iz 2012., odnosno u kojoj mjeri sudska praksa viših sudova nije jedinstvena, evidentno proizlazi iz činjenice da je Vrhovni sud samo tijekom 2022. godine dopustio niz revizija protiv presuda zbog pravnih pitanja koja se upravo tiču odgovornosti za štetu nastalu naletom na divljač, odnosno životinje na autocesti:

a) u sjednici održanoj 29. ožujka 2022. (Revd 1307/2022) dopuštena je revizija tužitelja protiv presude Visokog trgovačkog suda Republike Hrvatske broj Pž-519/2020-3 od 28. prosinca 2021. zbog slijedećih pravnih pitanja:
1. *da li sama činjenica da se životinja, u konkretnom slučaju pas, našla na kolniku autoceste, a što je uzrokovalo prometnu nezgodu naletom vozila na psa, ukazuje na propust pravne osobe odgovorne za upravljanje i održavanje autoceste da vodi brigu i poduzimati primjerene mjere i radnje koje bi omogućile odvijanje sigurnog i nesmetanog prometa na autocesti, posebice u vidu postavljanja i održavanja zaštitne ograde oko autoceste*
2. *da li činjenica da su djelatnici pravne osobe odgovorne za upravljanje i održavanje autoceste izvršili ophodnju dijela autoceste na kojem je došlo do udara vozilom u psa te da u ophodarskom dnevniku nije evidentirano oštećenje zaštitne ograde na dan štetnog događaja, predstavlja dokaz o nepostojanju propusta u održavanju autoceste od strane pravne osobe odgovorne za upravljanje i održavanje autoceste;*

b) u sjednici održanoj 9. veljače 2022. (Revd 508/2022-2) dopuštena je revizija tužitelja protiv presude Visokog trgovačkog suda Republike Hrvatske poslovni broj Pž-1286/2020-2 od 23. kolovoza 2021., zbog pravnog pitanja koje se u bitnom svodi na sljedeće: "*Koji se kriteriji odgovornosti primjenjuju na štete nastale od motornog vozila u pogonu na divljači u razdoblju nakon stupanja na snagu Zakona o izmjenama i dopunama Zakona o lovstvu ("Narodne novine", br. 75/09), dakle nakon 8. srpnja 2009.";*

c) u sjednici održanoj 26. siječnja 2022. dopušteno je tuženiku podnošenje revizije protiv presude Županijskog suda u Zadru poslovni broj Gž-1071/2021-2 od 13. rujna 2021. zbog materijalnopravnog pitanja: „*Ekskulpira li nepostupanje osobe ovlaštene upravljati javnom cestom po zahtjevu iz čl. 50. Zakona o cestama („Narodne novine“ broj 84/11,18/13,22/13, 54/13,148/12 i 92/14) lovoovlaštenika od odgovornosti za nastalu štetu naletom automobila na divljač u smislu odredbe čl. 82.st.1. Zakona o lovstvu („Narodne novine“ br. 140/05,75/09,153/09 i 14/14)?“;*

d) u sjednici održanoj 19. siječnja 2022., dopušteno je tužitelju podnošenje revizije protiv presude Visokog trgovačkog suda Republike Hrvatske poslovni broj Pž-6948/2019-3 od 1. prosinca 2020. zbog pravnog pitanja: „*Dokazuje li činjenica da se divljač našla na kolniku autoceste propust pravne osobe odgovorne za upravljanje i održavanje autoceste, posebice u vidu postavljanja i održavanja zaštitne ograde autoceste, te je li u toj situaciji teret dokaza da su poduzete sve radnje radi nesmetanog i sigurnog odvijanja prometa autocestom na tuženiku - pravnoj osobi koja gospodari autocestom ili je na tužitelju teret dokaza da postoji određeni propust tuženika?".*

7. Zaključak

Opisano stanje posve različitog tumačenja jedne zakonske norme u izravnoj je suprotnosti s Ustavom zagarantiranom vladavinom prava i pravnom sigurnošću. Naime, zahtjevi pravne sigurnosti i vladavine prava traže da pravna norma bude dostupna subjektima na koje se odnosi te ujedno za njih predvidljiva, takva da isti mogu doista konkretno znati svoja prava i obveze te sukladno toj spoznaji prilagoditi svoje ponašanje. Ustavni sud u svojoj Odluci U-I/722/2009. iskazao je stav kako smatra nespornim da adresati pravne norme ne mogu stvarno i konkretno znati svoja prava i dužnosti te predvidjeti posljedice svojeg ponašanja ako pravna norma nije dovoljno određena i precizna. Istaknuto je pri tom kako zahtjev za određenošću i preciznošću pravne norme predstavlja "*jedan od temeljnih elemenata načela vladavine*

[19] Vrhovni sud Republike Hrvatske dopustit će reviziju ako se može očekivati odluka o nekom pravnom pitanju koje je važno za odluku u sporu i za osiguranje jedinstvene primjene prava i ravnopravnosti svih u njegovoj primjeni ili za razvoj prava kroz sudsku praksu, a osobito: ako je riječ o pravnom pitanju o kojem odluka suda drugog stupnja odstupa od prakse revizijskog suda, ili ako je riječ o pravnom pitanju o kojem nema prakse revizijskog suda, pogotovo ako sudska praksa viših sudova nije jedinstvena, ili ako je riječ o pravnom pitanju o kojem sudska praksa revizijskog suda nije jedinstvena, ili ako je o tom pitanju revizijski sud već zauzeo shvaćanje i presuda se drugostupanjskoga suda temelji na tom shvaćanju, ali bi – osobito uvažavajući razloge iznesene tijekom prethodnoga prvostupanjskoga i žalbenoga postupka, zbog promjene u pravnom sustavu uvjetovane novim zakonodavstvom ili međunarodnim sporazumima te odlukom Ustavnoga suda Republike Hrvatske, Europskoga suda za ljudska prava ili Suda Europske unije – trebalo preispitati sudsku praksu (čl. 385. a Zakona o parničnom postupku).

prava" (presuda Europskog suda u predmetu Beian protiv Rumunjske, 6. prosinca 2007., zahtjev br. 30658/05, § 39: "... constitue l'un des éléments fondamentaux de l'Etat de droit") i ključan je za postanak i održanje legitimiteta pravnog poretka. Ustavni sud također je u istoj Odluci posebno naveo kako zahtjev za određenošću i preciznošću pravne norme nije samo semantički zahtjev koji traži da se odnos između njezina adresanta i adresata odvija uz što manje komunikacijske neodređenosti. Ti su zahtjevi temeljna mjerila za normativnu regulaciju svih slučajeva u kojima odgovor na pitanje iznalaženja i tumačenja mjerodavnog prava ne bi bio jednoznačan. Ustavni sud ujedno ističe da se zahtjevi za određenošću i preciznošću pravne norme moraju smatrati sastavnim dijelom načela vladavine prava na području svih grana prava jer bi njihovo zanemarivanje ugrozilo druge sastavnice načela pravne sigurnosti kao dijela načela vladavine prava, osobito zahtjeve za jedinstvenom primjenom prava te poštovanjem učinaka pravomoćnih presuda i drugih odluka tijela državne i javne vlasti.

Literatura:

1. Bulka, Z., Odgovornost za štetu koju počini divljač, Hrvatska pravna revija, srpanj-kolovoz 2006., str. 48.-51.
2. Crnić, I., Zakon o obveznim odnosima, V. izdanje, Zagreb, Organizator, 2012.
3. Crnić, J., Komentar Ustavnog zakona o Ustavnom sudu Republike Hrvatske, Narodne novine, Zagreb, 2002.
4. Gavella, N. et al.: Stvarno pravo, Zagreb, 1998.
5. Jelinić, Z.: Sudska praksa u građanskim predmetima u sustavu primjene i tumačenja prava // *Aktualnosti građanskog procesnog prava - nacionalna i usporedna pravnoteorijska i praktična dostignuća* / Split: Pravni fakultet Split, 2015. str. 173-200
1. Jelušić, D., Odgovornost za naknadu štete pričinjene od divljači na javnoj cesti – (materijalno) pravne dvojbe, Hrvatska pravna revija, ožujak 2015., str. 12.-20.
2. Jelušić, D., Odgovornost za naknadu štete koju prouzroči divljač i životinje strogo zaštićenih divljih svojti, Hrvatska pravna revija, listopad 2009., str. 4.-10.
3. Jelušić, D., Ustavnopravno shvaćanje Ustavnog suda o kriteriju odgovornosti lovoovlaštenika i lovozakupnika za naknadu štete pričinjene od divljači na javnoj cesti, Hrvatska pravna revija, srpanj-kolovoz 2015., str. 5.-10.
4. Klarić, P.: Odštetno pravo, Narodne novine, Zagreb, 2003.
5. Krapac, D.,: Kazneno procesno pravo – Institucije, Zagreb, 2014.
6. Leder, D., Komparativni prikaz odgovornosti za naknadu štete od divljači na javnoj cesti u hrvatskom i slovenskom pravu s posebnim osvrtom na kriterij odgovornosti osoba koje gospodare lovištem, Hrvatska pravna revija, studeni 2015., str. 26-34.
7. Leder, D., Naknada štete od divljači na javnoj cesti, Hrvatska pravna revija, veljača 2014., str. 21-27.
8. Matijević, B., Odgovornost za štetu u djelatnosti lovstva, Hrvatska pravna revija, prosinac 2009., str.1.-12.
9. Milivojević, Antoliš, L. et al.: Prekršajno pravo, Zagreb, 2012.
10. Triva S., Dika, M., Građansko parnično procesno pravo, Narodne novine, Zagreb 2004.
11. Vrkljan, J., Model prepoznavanja opasnih dionica na javnim cestama u područjima učestale pojave divljači, doktorska disertacija, Fakultet prometnih znanosti Zagreb, 2020.

Izvori sudske prakse:

1. http://curia.europa.eu/
2. http://www.ingbiro.com/default.aspx?ReturnUrl=%2fsudska%2fdefault.aspx
3. http://www.iusinfo.hr/CaseLAws/TOC.aspx
4. http://pisrs.si/Pis.web/sodnaPraksaRS
5. http://sudskapraksa.vsrh.hr/supra/
6. http://www.usud.hr/default.aspx
7. https://www.vrh.sud.rs/sr-lat/sudska-praksa

АНАЛИЗА УТИЦАЈА ВРЕМЕНСКИХ УСЛОВА НА БРЗИНУ КРЕТАЊА: ПРИМЕР СЛУЧАЈА ДВОТРАЧНОГ ПУТА (ДП IB – 22)

Драган Пантелић[1]
Саобраћајни факултет – Универзитет у Београду, draganpantelic7@gmail.com
Маријо Видас
Саобраћајни факултет – Универзитет у Београду, m.vidas@sf.bg.ac.rs

Резиме: *Утицај временских услова на основне параметре саобраћајног тока, дуги низ година представљао је предмет проучавања многих научних истраживања. Добри временски услови укључујући сунчано време са добром видљивошћу, омогућавају већу брзину кретања, док лоши временски услови попут падавина (киша, снег) утичу на смањење брзине. Имајући у виду наведено, циљ овог рада представља анализа утицаја снежних падавина на промену брзине саобраћајног тока, на државном путу IB 22 на деоници Бућин гроб – Горњи Милановац (Неваде). Емпиријско истраживање је обухватало анализу реалних података о брзинама возила са аутоматског бројача саобраћаја АБС 1037, док су подаци о временским приликама преузети са метеоролошке станице Рудник. Као резултат истраживања добијена је осетљивост промене брзине саобраћајног тока, при различитим временским условима. На крају рада, кроз дискусију и закључке приказани су резултати компаративне анализе промене брзине саобраћајног тока при повољним и неповољним временским условима.*

Кључне речи: *брзина саобраћајног тока, проток, временски услови, снежне падавине*

ANALYSIS OF THE IMPACT OF WEATHER CONDITIONS ON THE SPEED OF MOVEMENT: EXAMPLE OF THE CASE OF A TWO-LANE ROAD (DP IB – 22)

Dragan Pantelić[1]
The Faculty of Transport and Traffic Engineering – University of Belgrade, draganpantelic7@gmail.com
Marijo Vidas
The Faculty of Transport and Traffic Engineering – University of Belgrade, m.vidas@sf.bg.ac.rs

Abstract: *The influence of weather conditions on the basic parameters of the traffic flow has been the subject of many scientific studies for many years. Good weather conditions, including sunny weather with good visibility, allow a higher speed of movement, while bad weather conditions such as precipitation (rain, snow) affect the reduction of speed. Bearing in mind the above, the aim of this paper is the analysis the impact of snowfall on the change in the speed of the traffic flow, on the state road IB 22 in the section Bućin grob - Gornji Milanovac (Nevade). Empirical research included the analysis of real vehicle speed data from the ABS 1037 automatic traffic counter, while weather data were taken from the Rudnik meteorological station. As a result of the research, the sensitivity of the change in the speed of the traffic flow, under different weather conditions, was obtained. At the end of the paper, through discussion and conclusions, the results of a comparative analysis of the change in the speed of the traffic flow in favorable and unfavorable weather conditions are presented.*

Keywords: *speed of traffic flow, flow, weather conditions, snowfall*

1. УВОД

Саобраћајни ток подразумева истовремено кретање више возила на истом путу у одређеном поретку. За описивање саобраћајних токова и законитости кретања возила у саобраћајном току на путној мрежи неопходно је анализирати одређене параметре. Брзина као један од основних параметара саобраћајног тока има утицај на ефикасност, време путовања, безбедност у саобраћају, економичност и трошковне анализе. У исто време она представља индикатор Нивоа Услуге при датом саобраћајном захтеву и главни критеријум у димензионисању и вредновању пројектних решења. Њена просечна вредност у великој мери зависи од интензитета саобраћаја. Међутим, поред интензитета, постоји и свеобухватан скуп саобраћајних услова који такође узрокују зависност брзина као што су временске прилике, вожња у дневним и ноћним условима, стање коловоза итд.

Климатске промене могу имати различите утицаје на многе сфере друштва и економије представљајући важне изазове за светску економију на глобалном нивоу. Међутим, чини се да су

[1] Autor zadužen za korespodenciju: email: draganpantelic7@gmail.com

саобраћај и транспорт у великој мери изостављени, а они и те како могу бити погођени. Пре свега, присуство временских неприлика попут кише, снега и високих температура, може повећати трошкове одржавања путева. Такође, могу имати значајан утицај на број и тежину саобраћајних незгода и појаву саобраћајних загушења. Поред наведеног, кишне или снежне падавине могу имати и директне импликације на добробит саобраћајних корисника, с обзиром да поменути временски услови могу довести до повећаних временских губитака, па чак и одустајања од путовања.

Присуство магле, прашине, кише, снега или дима у атмосфери утиче на отежане услове вожње. Од средине двадесетог века уочено је да временски услови имају посебан утицај на функционисање путне мреже због промена у понашању возача при различитим временским условима. Од 1970-их година, неколико студија се фокусирало на квантитативне процене утицаја перформанси транспортног система у неповољним временским условима у САД. Они су потврдили да неповољни временски услови могу значајно смањити брзину, а тиме и капацитет на разматраној деоници пута (Weng и др. 2013). Овакве резултате потврдила су многа истраживања заснована на емпиријским методама (Hranac и др. 2006) и методама симулације (Lieu и Lin, (2004); Zhang и др. (2004)). Од свих неповољних временских услова, снег има најзначајнији утицај на понашање у вожњи и перформансе возила због двоструког утицаја површине пута и проблема са видљивошћу (Wang и др. (2011)). Тачније, снег се расипа и укључује велику количину падавина у видном пољу возача. Поред тога, ако је снег довољно тежак, он прекрива површину коловоза, заклањајући хоризонталну и вертикалну сигнализацију. У случају да температура и наредног дана буде ниска, последично долази до залеђивања коловоза што доводи до нове опасности и повећаног ризика од саобраћајних незгода.

Иако је утврђено да неповољни временски услови негативно утичу на параметре саобраћајног тока, разумевање односа између брзине, протока и временских услова важно је из неколико разлога, укључујући пружање одговарајућих информација возачима и управљачима путева. Развијено је неколико студија како би се утврдило како на саобраћајни ток утичу различити временски услови, као што су киша, снег, магла или мокар коловоз. Ови временски услови су променљиви, у зависности од испитиване климе, локације и временског интервала који се разматра. Такође, важно је истаћи поглавље 22 Приручника о капацитету аутопутева - Highway Capacity Manual (HCM 2000) које пружа информације о смањењу брзине и капацитета, услед кише или снега слабог и јаког интензитета. Приручник препоручује смањење капацитета за 5% – 10% и 25% – 30% и смањење брзина од 3% – 10% и 20% – 35%, услед слабог и јаког снега. Међутим, приручник не узима у обзир ове ефекте према количини падавина, што је важно за управљаче путева да оптимизују искоришћење капацитета и брзине због предвиђених падавина користећи уређаје интелигентних транспортних система (ITS) (нпр. портале са изменљивом сигнализацијом, ramp metering и др.) (Datla и Sharma, 2008).

Узимајући наведено у обзир, циљ овог рада представља анализа услова у саобраћајном току на деоници Буђин Гроб – Горњи Милановац (Неваде), стављајући фокус на анализу промене брзине кретања возила у условима са снежним падавинама и у периоду без падавина. Све податке, неопходне за анализу, било је потребно прикупити из постојећих база података, који се односе на податке забележене уз помоћ аутоматског бројача саобраћаја и метеоролошке станице који су постављени у непосредној близини деонице. Добијени резултати истраживања могу представљати корисну основу управљачима путева у спровођењу зимског одржавања као и у предикцији смањења саобраћајних незгода.

2. ПРЕГЛЕД ЛИТЕРАТУРЕ

Најчешћи типови студија којима се изучава утицај временских неприлика, попут снега, на промену брзине у саобраћајном току, односи се на макроскопске студије. Ове студије у обзир узимају одређене деонице, односно сегменте коловоза са више утврђених информација о времену, како би се истражила детаљна корелација између временских услова и параметара саобраћајног тока. Информације о времену обично подразумевају јавно доступне изворе података као што су путно-метеоролошке станице или камере за визуелно посматрање. Примери таквих студија приказани су у наставку рада, узимајући у обзир истраживања спроведена на територији градова Европе, Америке и Азије, са посебним освртом на истраживања спроведена на територији Републике Србије.

2.1. Истраживања у Европи

У досадашњој литератури, развијено је неколико студија утицаја различитих временских услова, попут кише, снега, магле и мокрог коловоза на саобраћајни ток у Европским државама. Познато је да

поменути временски услови могу бити променљиви, у зависности од климе, локације и разматраног временског интервала, што може имати различите ефекте у зависности од посматране државе.

На пример, Аутори Camacho и др. (2010) су спровели истраживање на 15 локација у северозападној Шпанији, које процењује смањење брзине слободног тока узроковано лошим временским условима, укључујући кишу, снег, брзину ветра и губитак видљивости. Посматран је временски период од 3 године (2006. – 2008. године), укључујући податке у интервалима од по 15 минута, прикупљене од стране метеоролошких станица. Посматрајући сва четири разматрана параметра, аутори су дошли до закључка да падавине снега имају највећи утицај на промену слободне брзине чије смањење варира од 9,0 km/h до 13,7 km/h. Супротно овим налазима, аутори Sabir и др. (2008) су анализирајући утицај временских неприлика на кретање путничким аутомобилом у Холандији, дошли до сазнања да кишне падавине имају највећи утицај на смањење брзине, а затим и снежне падавине које брзину смањују за око 7%. Поред наведеног, брзина путничких аутомобила у различитим условима видљивости (дневно светло, сумрак, мрак, вештачко светло) и различитим временским условима (ведро време, киша, снег) утврђена је коришћењем података о саобраћају и временским приликама који су се прикупљали у сатним интервалима током приближно 2 године на 25 локација у Шведској. Наиме, аутори Jägerbrand и Sjöbergh (2016) су истраживањем најутицајнијих услова видљивости и временских услова на промену брзине возила, дошли до закључка да на путевима без осветљења није било разлике у брзини возила између дневног светла и мрака (0,1%), али је брзина возила била знатно мања у мраку за време кише и снега (−1,4% и −3,8%, респективно). Анализе брзине возила и разлика у брзини између дневног светла, сумрака и мрака, са и без осветљења пута, нису откриле разлике које се могу приписати условима осветљења. Међутим, брзина возила је смањена због кише или снега и смањење је било веће на путевима без осветљења него на путевима са осветљењем.

2.2. Истраживања у Америци

Због специфичног географског положаја, зимске временске услове на територији Сједињених Америчких Држава (САД), обично карактеришу обилне снежне падавине и екстремно ниске температуре. Такве временске неприлике неретко могу узроковати отежане услове вожње, па чак и прекид или одлагање путовања, што значајно може утицати на основне параметре саобраћајног тока, чему сведоче истраживања приказана у наставку.

Аутори Ibrahim и Hall (1994) су обрађивали податке о саобраћају прикупљене са аутопута у Онтарију (Канада) користећи методе мултиваријабилне регресионе анализе и открили да је дошло до смањења брзине за 3% – 5% у условима са слабим снегом и смањења брзине од 30% до 40% са јаким снегом. Односно проценили су пад слободне брзине од 3 km/h при условима слабог снега, а од 38 km/h до 50 km/h при условима јаког снега. Са друге стране, спроводећи анализу утицаја временских неприлика на параметре саобраћајног тока и Ниво услуге на руралном међудржавном аутопуту у Ајдаху (САД), аутори Kyte и др. (2001) су дошли до закључка да су највећи утицај на брзину кретања путничких аутомобила имале снежне падавине, а затим брзина ветра и кишне падавине. Наиме, резултати њиховог истраживања указују да површина коловоза прекривена снегом смањује брзину за 16,4 km/h. Имајући исти циљ, Agarwal и Souleyrette (2005) су се у свом истраживању бавили утицајем кише, снега и различитих услова површине коловоза, на саобраћајни ток аутопута у близини градова близанаца (Twin Cities) познатијим по два највећа града Минеаполису и Сент Полу (САД). Добијени резултати указују да јак снег (више од 0,5 инча/сат) знатно утиче на смањење капацитета од 19% до 27% и на смањење брзине од 11% до 15%.

Супротно наведеним резултатима студија, аутори Datla и Sharma (2008) су својим истраживањем спроведеним у Алберти (Канада) дошли до сазнања да временске неприлике попут снега, првенствено утичу на смањење протока саобраћаја. Наиме, они су прикупљањем података са АБС-а, за посматрани временски период од 11 година (од 1995. до 2005. године), уз помоћу регресионог модела, дошли до закључка да утицај кише и снега на брзину и густину није толико значајан као што је наведено у Приручнику за капацитет аутопутева (HCM 2000). Попут претходног, користећи приступ линеарне регресије, Donaher (2014) је развио два различита модела за брзине на руралним и градским аутопутевима у Онтарију (Канада) користећи параметре као што су брзина ветра, видљивост, снег и температура. Након извршене анализе за шест зимских сезона, аутор је закључио да је брзина прилично осетљива на временске услове снега у поређењу са видљивошћу и температуром. Такође, анализом утицаја снежних олуја на брзину кретања возила током 27,25 часова у Ајови (САД), аутори Knapp и др. (2000) су уочили да је смањење просечне брзине од 16,7% присутно као последица зимских олуја. Такође, идентификован је пад брзине слободног тока од приближно 11%, као и смањење

просечне брзине од 11,64 km/h када је површина пута била прекривена снегом. Још једно истраживање спроведено у Ајови (САД) имало је за циљ да представи утицај временских услова на брзину возила на руралним путевима. Аутори Сао и др. (2013) су употребом података о временским условима, површини пута и условима у саобраћајном току у интервалу од по 15 минута, спровели регресиону анализу, којом су закључили да је јак снег довео до пада брзине од 20,47 km/h до 22,19 km/h.

Слично томе, аутори Kumar и Wang (2006) су у својој студији разматрали аутопутеве у Орегону (САД) и Монтани (САД) како би истражили утицаје на брзину током лоших временских прилика. Њихов фокус био је на моделовању процентуалне промене брзине између посматране брзине током временских неприлика и основне брзине. Прикупљањем података о брзини на три локације руралних аутопутева у Монтани, вршено је за све четири посматране сезоне. Аутори су анализом дошли до резултата који указују да падавине снега утичу на смањење просечне брзине од 9,8 km/h до 18,9 km/h. За разлику од претходно наведеног, аутори Hainen и др. (2012) су теренским истраживањем покушали да открију утицај снежних падавина на промену брзине. Наиме, они су употребом Bluetooth читача на аутопуту I-65 у Индијани (САД) имали за циљ да процене утицај зимских услова на средњу брзину. За потребе истраживања, разматрана је деоница пута у дужини од 100 km током нормалних временских услова (ведро време) и током снежних падавина (олује). Резултати су показали да је током зимске олује средња просторна брзина пала за приближно 32 km/h у односу на почетну од отприлике 105 km/h, што је једнако смањењу средње просторне брзине за око 31%.

2.3. Истраживања у Азији

Спроведена истраживања о утицају неповољних временских услова у државама Азије углавном су се фокусирала на управљање аутопутевима и анализом безбедности саобраћаја. Само неколико студија у Кини се бавило анализом понашања возача током лоших временских услова. Иако је познато да неповољни временски услови несумњиво отежавају услове вожње, још увек је предмет истраживања у којој мери оне утичу на понашање возача и самим тим и на карактеристике саобраћајног тока.

Аутори Weng и др. (2013) су на основу поређења података о токовима саобраћаја и параметара при различитим интензитетима снега у данима са снежним падавинама и данима са нормалним временским условима, уочили промену параметара саобраћајног тока на брзој саобраћајници у Пекингу (Кина). Употребом реалних података са детектора, емпиријски резултати истраживања показују да просечне брзине на брзој саобраћајници под јаким снежним падавинама имају пад од 10 – 20 km/h у односу на оне у нормалним временским условима, док капацитет пута опада за око 33%. Посматрајући период са јаким снегом, аутори су уочили да је просечна брзина током дана опала за око 28%. Слично томе, истраживање спроведено у граду Нагаока (Јапан) имало је за циљ да прикаже утицај снега на брзину путовања. Наиме, аутори Ito и др. (2019) су првобитно проценили кумулативне снежне падавине на површини пута користећи слике камера, након чега су анализирали везу између снежних падавина (снежне падавине по сату, процењене кумулативне снежне падавине на путу), структуре пута и брзине. Резултат регресионог модела указује да ће снежне падавине значајно утицати на брзину на брзим саобраћајницама и путевима са контролом приступа. Међутим, иако постоји разлика између брзина, која је последица опрезније вожње и смањења ризика од настанка незгода, резултати указују да ће возачи ипак брзину одржати на вредности од 50 km/h. Такође, аутори указују да је утицај снега на брзину много већи током вршних сати, у односу на ванвршне периоде током дана. Поред наведеног, аутори Hong и др. (2015) су спровели студију која је имала за циљ да испита утицај временских услова и операције уклањања снега на брзину кретања, како би се утврдили узроци настанка саобраћајног загушења на територији града Сапора (Јапан). Поредећи брзине у различитим временским периодима, током фебруара (зимски услови) и током октобра (јесен), уочили су да је просечна брзина око 10 km/h мања зими него у јесен.

2.4. Истраживања у Србији

Иако последњих година временске услове током зимског периода, на територији Србије, карактеришу изразито високе температуре за посматрано доба године, поједина подручја у западном делу земље била су више изложена снежним падавинама. Имајући то у виду, поједини аутори су спровели истраживања са фокусом на утицај снежних падавина на промену брзине и протока саобраћаја, чији резултати су приказани у наставку рада.

Аутори Stojanović и Tubić (2019) су спровели истраживање са циљем да се испита утицај снежних падавина на промену просечних брзина на двотрачним ванградским деоницама Бела Земља – Сушица

и Честробродица – Пожега, током зимских месеци у 2019. години. Поређењем просечних брзина у нормалним условима и приликом снежних падавина, посматрајући период од седам дана у оба случаја, аутори су уочили идентичну осетљивост брзине приликом падавина на обе деонице. Односно, на деоници Бела Земља – Сушица забележен је пад брзине од 8 km/h (11%), док је на деоници Честробродица – Пожега пад брзине износио 7 km/h (10%). Такође, аутори истичу да је највећи пад брзине уочен у четвртак и петак на обе деонице. Попут претходног, истраживање спроведено од стране аутора Tubić и Stepanović (2022) односило се на анализу утицаја снежних падавина на проток и брзину у саобраћајном току на деоницама државног пута IB реда на Пештерској висоравни. Наиме, аутори су посматрали три деонице на територији Сјенице, односно деонице Аљиновићи – Сјеница, Сјеница – Сушица и Сушица – Дуга Пољана. Поредећи период од 7 дана у току једне недеље без падавина и период од 7 дана у току друге недеље са падавинама, уочено је да интензивне снежне падавине утичу на смањење просечних брзина у распону од 9 – 18% у зависности од разматране деонице. Тачније, највећи пад брзине забележен је на деоници Аљиновићи – Сјеница (17,5%), затим на деоници Сушица – Дуга Пољана (11%), док је најмањи пад забележен на деоници Сјеница – Сушица (8,5%).

2.5. Упоредна анализа утицаја снежних падавина на брзину

Свака од претходно анализираних студија снежне падавине и временске услове перципира на различите начине. Док већина аутора у обзир узима само утицај снежних падавина, поједини аутори разматрају и утицај снега на површини коловоза, али и утицај падавина снега у различитим условима видљивости. То значајно утиче на начин прикупљања података, која поред података добијених од стране метеоролошких станица и аутоматских бројача саобраћаја, укључује и податке добијене камерама, али и путем bluetooth читача. Спровођењем претежно емпиријских истраживања, неретко је случај да су анализе података засноване на регресионим моделима. С тим у вези, Табела 1 указује на резултате појединих студија, спроведених у различитим временским периодима, укључујући истраживања реализована на свим разматраним континентима, укључујући и Србију, у циљу њиховог поређења.

Табела 1. *Анализа утицаја снежних падавина на смањење брзине*

Континент	Аутори	Град (Држава)	Период истраживања	Временски услови	Смањење брзине [km/h] (%)
Америка	Ibrahim и Hall, (1994)	Онтарио (Канада)	1990 – 1991	Слаб снег	3 km/h (3% – 5%)
				Јак снег	38 km/h – 50 km/h (30% – 40%)
Европа	Camacho и др. (2010)	Шпанија	2006 – 2008	Слаб снег	9 km/h
				Јак снег	13,7 km/h
Америка	Hainen и др. (2012)	Индијана	2010 – 2011	Слаб снег	/
				Јак снег	32 km/h (31%)
Азија	Weng и др. (2013)	Пекинг (Кина)	2009 – 2010	Слаб снег	/
				Јак снег	10 km/h – 20 km/h (28%)
Азија	Hong и др. (2015)	Сапора (Јапан)	2013	Слаб снег	10 km/h
				Јак снег	/
Европа	Jägerbrand и Sjöbergh, (2016)	Шведска	2012 – 2014	Слаб снег	3,8%
				Јак снег	/
Европа	Stojanović и Tubić (2019)	Пожега (Србија)	2019	Слаб снег	7 km/h (10%)
				Јак снег	/
		Ужице (Србија)	2019	Слаб снег	8 km/h (11%)
				Јак снег	/
Европа	Tubić и Stepanović (2022)	Сјеница (Србија)	2020	Слаб снег	9 – 18%
				Јак снег	/

Прегледом досадашње литературе, резултати већине спроведених истраживања указују да је брзина у значајној мери зависна од интензитета падавина. Већина студија указује да се промена брзине значајно разликује у условима слабог и јаког снега. Такође, у већини студија је фокус био на анализи утицаја слабог снега на промену брзине, чији резултати упућују на приближно једнаке налазе, што указује да је понашање возача приликом вожње услед слабијих снежних падавина идентично у скоро свим посматраним државама. По угледу на претходно приказане студије, овај рад ће применом емпиријског истраживања покушати да утврди у којој мери је значајан утицај снежних падавина на просечну брзину кретања.

3. МЕТОДОЛОГИЈА ИСТРАЖИВАЊА

Да би се утврдило стање система потребно је дефинисати методологију истраживања. За потребе овог истраживања методологијом се дефинише:

- Предмет и циљ истраживања
- Подручје истраживања
- Време истраживања
- Прикупљање података
- Метод истраживања, начин обраде и анализе података

3.1. Предмет и циљ истраживања

Циљ овог истраживања представља анализа утицаја снежних падавина на промену брзине саобраћајног тока, на државном путу IВ реда број 22 на деоници Буђин гроб – Горњи Милановац (Неваде). Основни задатак се огледа у доношењу закључака о томе колико и на који начин снежне падавине утичу на функционисање саобраћајног тока на дефинисаном подручју истраживања. На основу података добијених са аутоматског бројача саобраћаја (АБС-а) и са метеоролошке станице Рудник, потребно је анализом података приказати резултате утицаја снежних падавина, на промену брзине саобраћајног тока на ванградском двотрачном путу.

3.2. Подручје истраживања

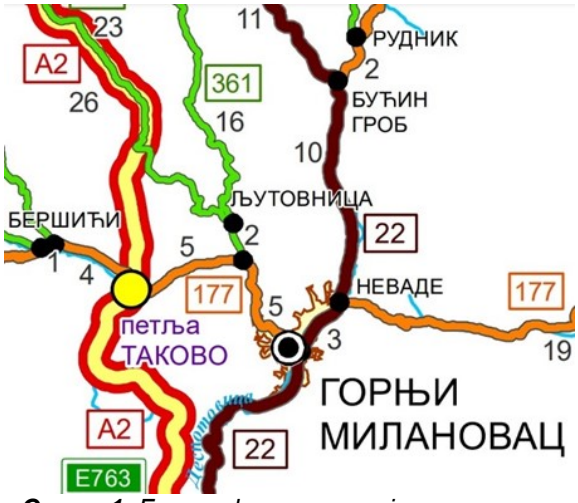
Подручје истраживања овог рада представља деоница државног ванградског двотрачног пута Буђин Гроб – Горњи Милановац (Неваде), дужине 9,572 km, која је део Државног пута IБ реда 22 (некадашњи магистрални пут М – 22), који се назива и Ибарска магистрала. ДП IБ реда 22 полази од Београда и пружа се кроз следеће општине и градове Лазаревац, Лајковац, Љиг, Горњи Милановац, Чачак, Краљево, Рашка, Нови Пазар и завршава се на државној граници са Црном Гором (гранични прелаз Мехов Крш) и има укупну дужину од 298,648 km. Избор деонице је био условљен удаљеношћу до најближе метеоролошке станице, због релевантности података о временским приликама.

Посматрани ДП IБ реда 22 био је веома прометан до 2016. године и изградње аутопута Милош Велики, посебно у летњим и зимским месецима, пошто повезује Београд са туристичким одредиштима у југозападној Србији (Златибор, Копаоник, Врњачка бања, Тара) и даље са местима на Црногорском приморју. На посматраној деоници Буђин Гроб – Горњи Милановац (Неваде), у 2017. години долази до смањења ПГДС-а за 82,61% у односу на претходну годину, услед прерасподеле токова на новоизграђени аутопут Милош Велики.

Деоница Буђин Гроб – Горњи Милановац (Неваде) има добре техничко – експлоатационе карактеристике пута, које одређују способност пута да прими одређену врсту и величину саобраћаја који ће се по њему реализовати. У наставку је дат приказ техничко – експлоатационих карактеристика посматране деонице и географски положај деонице Буђин Гроб – Горњи Милановац (Неваде) (Слика1).

Техничко – експлоатационе карактеристике посматране деонице су:

Ширина коловоза = 8,2m
Ширина саобраћајне траке = 3,5m
Ширина бочних сметњи = 0,6m
Просечан уздужни нагиб = 1,8%
Просечан критичан уздужни нагиб = 5,97%
Дужина просечног критичног уздужног нагиба = 684m
Минимални радијус хоризонталне кривине = 279m
Стање коловоза = 5



Слика 1. *Географски положај посматране деонице*
Извор: https://www.putevi-srbije.rs

3.3. Време истраживања

Истраживање је извршено за укупно 36 неузастопних дана у 2019., 2020. и 2021. години. Истраживање је обухватило 18 парова дана, што предсатвља 18 дана са снежним падавинама и 18 дана са идеалним временским условима, које карактерише сунчано време са сувим коловозом и без падавина. За парове дана су узети исти дани у седмици у оквиру истог месеца, само са различитим временским приликама. У наредној табели (Табела 2) приказани су дани који су посматрани у истраживању.

Табела 2. *Списак дана*

Дани са снежним падавинама	Дани без падавина	Дан у седмици
26.11.2020.	19.11.2020.	Четвртак
28.11.2020.	14.11.2020.	Субота
11.01.2021.	04.01.2021.	Понедељак
13.01.2021.	20.01.2021.	Среда
14.01.2021.	21.01.2021.	Четвртак
16.01.2021.	02.01.2021.	Субота
17.01.2021.	24.01.2021.	Недеља
10.03.2021.	31.03.2021.	Среда
16.12.2021.	23.12.2021.	Четвртак
22.01.2022.	01.01.2022.	Субота
24.01.2022.	03.01.2022.	Понедељак
25.01.2022.	04.01.2022.	Уторак
26.01.2022.	05.01.2022.	Среда
28.02.2022.	21.02.2022.	Понедељак
01.03.2022.	29.03.2022.	Уторак
06.03.2022.	27.03.2022.	Недеља
07.03.2022.	28.03.2022.	Понедељак
12.03.2022.	26.03.2022.	Субота
27.01.2023.	06.01.2023.	Петак
29.01.2023.	08.01.2023.	Недеља
28.02.2023.	21.02.2023.	Понедељак
04.12.2023.	25.12.2023.	Уторак

3.4. Прикупљање података

За потребе истраживања преузети су релевантни подаци о брзини у оба смера вожње из базе података Јавног предузећа „Путеви Србије“, са АБС 1037 Мајдан, који се налази на координатама (N) 44°05'12,7" и (E) 20°28'46", у насељу Мајдан. Подаци се односе на брзину кретања сваког појединачног возила и на тренутак преласка преко детектора. Подаци су класификовани на 10 – минутне интервале у данима без падавина и у данима са снежним падавинама, јер се подаци о падавинама на метеоролошким станицама бележе у том интервалу.
Такође, са сајта RWIS (Road Weather Information System) преузети су подаци о временским приликама у посматраним данима са метеоролошке станице Рудник, која се налази на координатама (N) 44°08' и (E) 20°31', на истоименој планини на надморској висини од 700 m. Аутоматски бројачи саобраћаја непрекидно бележе податке о протоку и брзини у реалном времену током читаве године. Подаци могу бити изведени на минутном, часовном, дневном, месечном, годишњем нивоу, а у зависности од потреба истраживања и за свако возило појединачно. На основу података добијених са АБС-а прецизно се аналитички могу идентификовати и услови у саобраћајном току у одређеном временском периоду. На наредним сликама (Слика 2 - 3) приказан је изглед и положај аутоматског бројача саобраћаја (АБС-а) 1037 Мајдан.

Слика 2. *Изглед АБС-а 1037 Мајдан*
Извор: https://www.putevi-srbije.rs

Слика 3. *Положај АБС-а 1037 Мајдан*
Извор: https://www.google.com/maps/

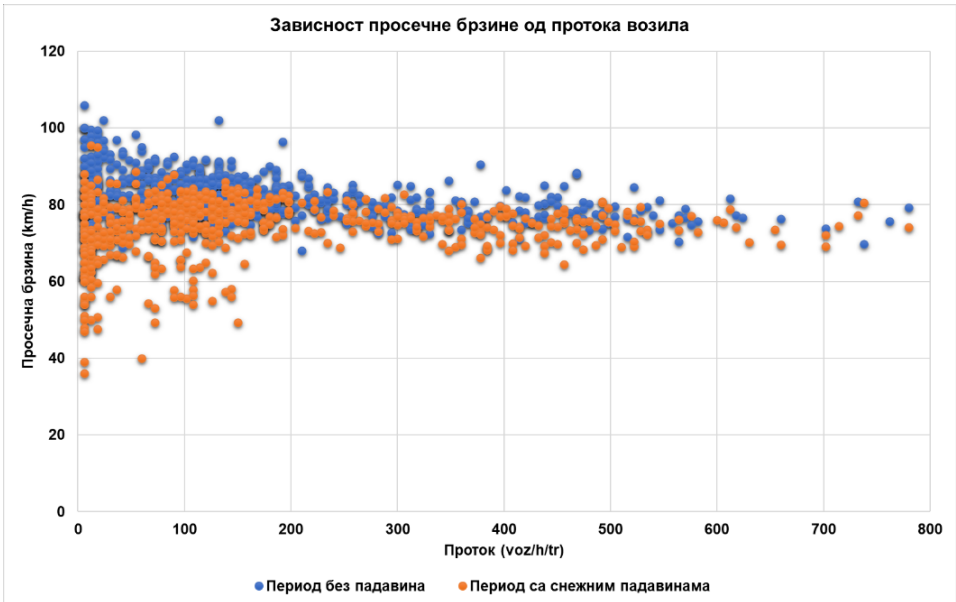
3.5. Метод истраживања, начин обраде и анализе података

Метод истраживања подразумева истраживања заснована на статистичкој обради података о брзинама кретања возила у саобраћајном току, коришћењем података о временским условима, добијених са метеоролошке станице. С тим у вези, први корак у овом раду обухватао је детекцију дана са снежним падавинама и одговарајућим данима са добрим временским условима, тј. без падавина. Након тога је помоћу података са АБС-а уследило издвајање просечних брзина кретања возила за 10-минутне интервале за све дане истраживања. За крај су адекватном статистичком обрадом и анализом, графички и табеларно презентовани резултати о утицају снежних падавина на брзину кретања.

4. РЕЗУЛТАТИ ИСТРАЖИВАЊА

Подаци су класификовани у 10-минутне интервале (који су касније претворени у часовне) и издвојени су интервали са снежним падавинама и период пола сата након престанка снежних падавина који су коришћени у анализи. За издвојене интервале пронађени су одговарајући интервали у данима без падавина који ће бити даље коришћени у анализи. Из узорка су искључени интервали у којима се проток возила разликовао за више од 200 возила/час у паровима интервала. Ово је одрађено да би се смањила дисперзија података и упоредно посматрали приближно слични услови у саобраћајном току. Односно умањили утицаји величине протока на разлику у брзинама.

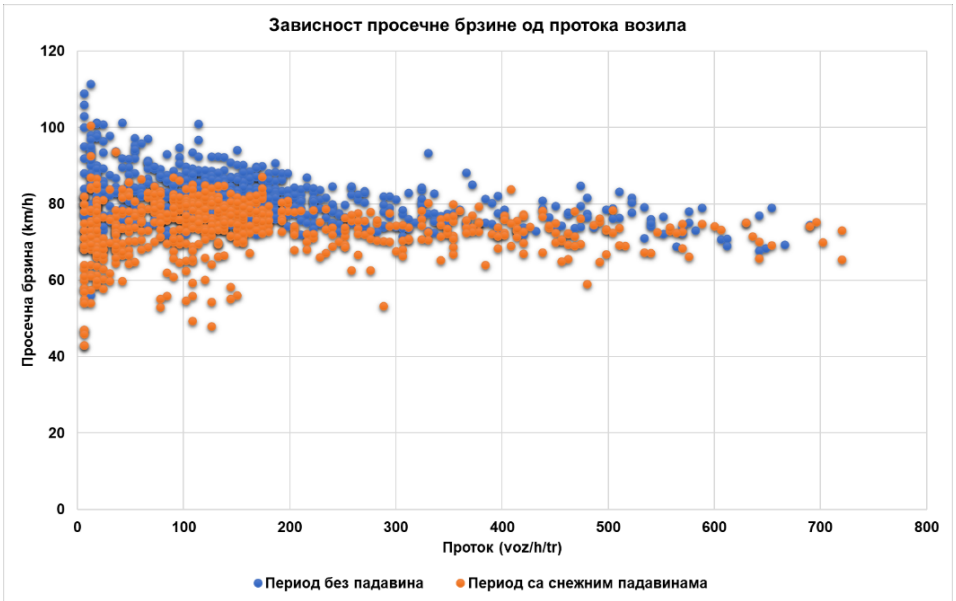
У смеру 1 Буђин Гроб – Горњи Милановац (Неваде) посматрана су 631 10-минутна интервала, а у смеру 2 Горњи Милановац (Неваде) – Буђин Гроб 636 10-минутна интервала, који су претворени у часовне интервале. Истраживање је урађено посебно за сваки смер кретања, али је извршен и приказ за оба смера кретања заједно. На графицима је извршен приказ зависности брзине и протока за различите временске прилике, период са снежним падавинама и период без падавина. Док је у табели приказана вредност просечне брзине кретања, смањење просечне брзине и проценат смањења по смеровима и укупно за оба смера. С тим у вези, на Графикону 1 приказана је зависност просечне брзине у периоду са снежним падавинама и у периоду без падавина од протока возила у смеру 1 Буђин Гроб – Горњи Милановац (Неваде).



Графикон 1. *Зависности просечне брзине од протока возила у смеру 1*

Анализом зависности просечне брзине од протока возила у смеру 1 уочава се јасна разлика у брзинама кретања возила у условима са снежним падавинама и условима без падавина. Тачније, присутна је већа просечна брзина при идеалним временским условима. Такође, при мањим вредностима протока (до 200 voz/h/tr) приметна је већа разлика у просечним брзинама, при различитим временским условима. Са друге стране, при већим вредностима протока (преко 200 voz/h/tr) та разлика је мања, односно доводи до мање дисперзије брзина. На овакве резултате последично утиче слаб снег, односно снежне падавине мањег интензитета које су допринеле незнатној промени понашања возача приликом вожње.

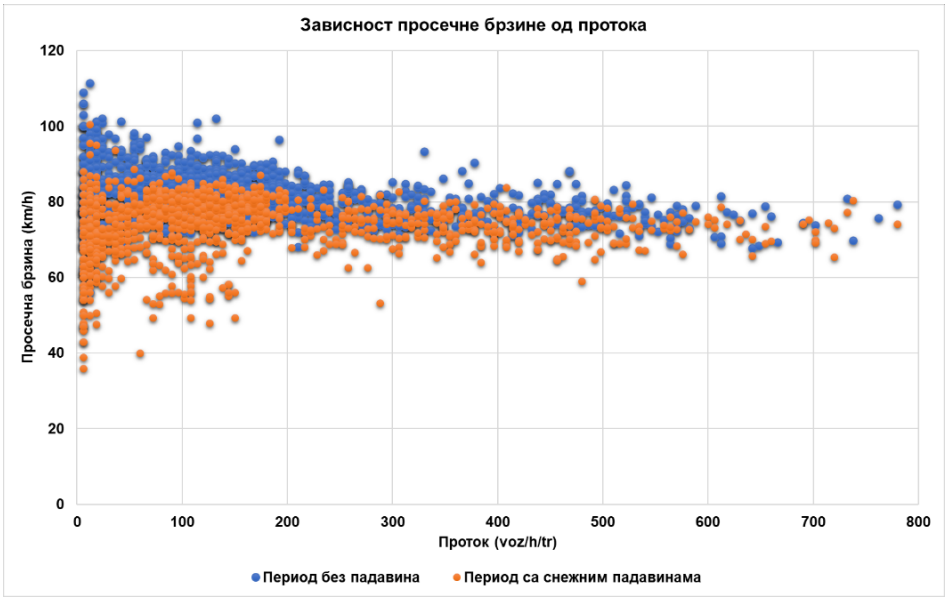
На Графикону 2 приказана је зависност просечне брзине у периоду са снежним падавинама и у периоду без падавина од протока возила у смеру 2 Горњи Милановац (Неваде) – Бућин Гроб.



Графикон 2. *Зависности просечне брзине од протока возила у смеру 2*

Слично резултатима у смеру 1, анализом зависности просечне брзине од протока возила у смеру 2 уочава се јасна разлика у брзинама кретања возила у условима са снежним падавинама и условима без падавинама. Тачније, присутна је већа просечна брзина при идеалним временским условима. Такође, при мањим вредностима протока (до 300 voz/h/tr) приметна је већа разлика у просечним брзинама, при различитим временским условима. Са друге стране, при већим вредностима протока (преко 300 voz/h/tr) та разлика је мања, односно доводи до мање дисперзије брзина. На овакве резултате последично утиче слаб снег, односно снежне падавине мањег интензитета које су допринеле незнатној промени понашања возача приликом вожње.

Након приказане анализе за оба смера појединачно, на Графикону 3 приказана је зависност просечне брзине у периоду са снежним падавинама и у периоду без падавина од протока возила на деоници Бућин Гроб – Горњи Милановац (Неваде) за оба смера обједињено.



Графикон 3. *Зависности просечне брзине од протока возила у оба смера*

Анализом обједињених података зависности просечне брзине од протока возила у оба смера, добијени су очекивани резултати. Односно, потврђују се претходно добијени резултати који указују на јасну

разлику у брзинама кретања возила у условима са снежним падавинама и условима без падавинама. Тачније, указују да је већа просечна брзина при идеалним условима без падавина. Такође, максималне забележене брзине кретања одговарале су минималним вредностима протока. Са повећањем протока долази до смањења просечне брзине кретање возила.

У Табели 3 приказане су вредности просечне брзине кретања, смањење просечне брзине и проценат смањења у периодима без падавина и у периодима са снежним падавинаам по смеровима и укупно за оба смера.

Табела 3. *Просечна брзина кретања*

Vpros (km/h)	Период без падавина	Период са снежним падавинама	Δ	%
Смер 1	82,61	74,51	8,10	9,80%
Смер 2	81,88	73,76	8,12	9,92%
Укупно	82,24	74,13	**8,11**	**9,86%**

За време периода са снежним падавина брзина се, углавном, благо линеарно смањивала са повећањем вредности протока. Док је током периода без падавинама вредност брзине расута. Разлике у брзинама у периоду са и без падавина су биле приметне. У оба смера разлике у брзинама кретања возила су износиле око 8km/h. На основу података у претходној табели може се закључити да у условима са снежним падавинама долази до смањења просечне брзине кретања за 8,11 km/h или за 9,86% укупно за оба смера, у смеру 2 се јавља још веће смањење од 9,92%.

На Графикону 4 приказана је дисперзија просечних брзина у периоду са снежним падавинама и у периоду без падавина на деоници Бућин Гроб – Горњи Милановац (Неваде).

Графикон 4. *Дисперзија брзина у периодима са снежним падавинама и без падавина*

На основу упоредне анализе, закључак је да се у условима са снежним падавинама значајно смањио проценат возача који возе брзинама у класи 80-90 km/h (смањење за 35,36%), док се са друге стране повећао проценат возача који возе брзинама у класама од 60-70 и 70-80 km/h (повећање за 16,89% и 21,23% респективно).

5. ЗАКЉУЧЦИ И ПРЕПОРУКЕ

Утицај временских услова на основне параметре саобраћајног тока, дуги низ година представљао је предмет проучавања многих научних истраживања. Добри временски услови укључујући сунчано време са добром видљивошћу, омогућавају већу брзину кретања, док лоши временски услови попут падавина (киша, снег) утичу на смањење брзине. Имајући то у виду, циљ овог истраживања представљала је анализа утицаја снежних падавина на промену брзине саобраћајног тока, на државном путу IB реда

број 22 на деоници Буђин гроб – Горњи Милановац (Неваде). Основни задатак се огледа у доношењу закључака о томе колико и на који начин снежне падавине утичу на услове у саобраћајном току на дефинисаном подручју истраживања. На основу података добијених са аутоматског бројача саобраћаја (АБС-а) 1037 Мајдан и са метеоролошке станице Рудник, спроведена је анализа на основу које је дат приказ резултата утицаја снежних падавина на промену брзине на ванградском двотрачном путу.

За потребе истраживања подаци су класификовани по данима и сатима у периодима без падавина и периодима са снежним падавинама за 36 дана, током различитих месеци. Обрада и приказ података су урађени за сваки смера кретања посебно за читав период истраживања. Такође, подаци су класификовани у 10-минутне интервале (који су касније претворени у часовне) и издвојени су интервали са снежним падавинама и период пола сата након престанка снежних падавина који су коришћени у анализи. За издвојене интервале пронађени су одговарајући парови интервала у данима без падавина који ће бити даље коришћени у анализи. Из узорка су искључени интервали у којима се проток возила разликовао за више од 200 возила/час у паровима интервала. Ово је одрађено да би се смањила дисперзија података и упоредно посматрали приближно слични услови у саобраћајном току. Односно умањили утицаји величине протока на разлику у брзинама.

Подаци су дали очекиване резултате. На основу анализираних података и графичких приказа долази се до закључка да је просечна брзина кретања мања током периода са снежним падавинама у односу на период без падавина. Максималне забележене брзине кретања одговарале су минималним вредностима протока. Са повећањем протока долази до смањења просечне брзине кретање возила. Такође, за време периода са снежним падавина брзина се, углавном, благо линеарно смањивала са повећањем вредности протока. Док је током периода без падавинама вредност брзине расута. Разлике у брзинама у периоду са и без падавина су биле приметне. У оба смера разлике у брзинама кретања возила су износиле око 8 km/h.

На основу података у Табели 3 може се закључити да у условима са снежним падавинама долази до смањења просечне брзине кретања за 8,11 km/h или за 9,86% укупно за оба смера, у смеру 2 се јавља још веће смањење од 9,92%. Овако добијени резултати се поклапају са препорученим вредностима из HCM 2000, где се при условима слабог снега усваја смањење брзине од 3% до 10%. Сличне резултате су добили и Camacho и др., (2010), Hong и др., (2015), Stojanović и Tubić (2019) и Tubić и Stepanović (2022). Такође, на основу упоредне анализе дисперзија просечних брзина у идеалним (без падавина) и снежним временским условима, закључак је да се у условима са снежним падавинама значајно смањио проценат возача који возе брзинама у класи 80 – 90 km/h (смањење за 35,36%), док се са друге стране повећао проценат возача који возе брзинама у класама од 60 – 70 и 70 – 80 km/h (повећање за 16,89% и 21,23% респективно).

Услед недовољне истражености на ову тему отварају се многобројне могућности и нова питања која наводе на размишљање о креирању различитих модела којим би се дефинисале зависне променљиве (брзина, проток, капацитет, времена путовања итд.) у функцији временских услова. Развој одговарајућих модела у облику дијаграма би представљало криве између независних променљививих (временских услова) и зависних променљивих (саобраћајних параметара) са дефинисаним коефицијентима корелације и детерминације за различите услове засићености саобраћајних токова. Међутим, постојање ограничења у погледу доступности и релевантности података са метеоролошких станица намећу потребу за техничким и технолошким унапређењем како би се закључци изводили са минималном дозвољеном грешком. Такаће, било би значајно испитати и утицај интензитета падавина (кише,снега), магле и видљивости на параметре саобраћајног тока.

6. ЛИТЕРАТУРА

[1] Agarwal, M., & Souleyrette, R. R. (2005). Impact of Weather on Urban Freeway Traffic Low Characteristics and Facility Capacity. https://www.researchgate.net/publication/228720996

[2] Camacho, F. J., García, A., & Belda, E. (2010). Analysis of Impact of Adverse Weather on Freeway Free-Flow Speed in Spain. Https://Doi.Org/10.3141/2169-16, 2169, 150–159. https://doi.org/10.3141/2169-16

[3] Cao, L., Thakali, L., Fu, L., & Donaher, G. (2013). Effect of Weather and Road Surface Conditions on Traffic Speed of Rural Highways.

[4] Datla, S., & Sharma, S. (2008). Impact of cold and snow on temporal and spatial variations of highway traffic volumes. Journal of Transport Geography, 16(5), 358–372. https://doi.org/10.1016/J.JTRANGEO.2007.12.003

[5] Donaher, G. (2014). Impact of Winter Road Conditions on Highway Speed and Volume. https://uwspace.uwaterloo.ca/handle/10012/8241
[6] Hainen, A. M., Remias, S. M., Brennan, T. M., Day, C. M., & Bullock, D. M. (2012). Probe vehicle data for characterizing road conditions associated with inclement weather to improve road maintenance decisions. IEEE Intelligent Vehicles Symposium, Proceedings, 730–735. https://doi.org/10.1109/IVS.2012.6232276
[7] Hong, S., Hagiwara, T., Takeuchi, S., & Lu, B. (2015). Effects of Weather Conditions and Snow Removal Operations on Travel Speed in an Urban Area. Https://Doi.Org/10.3141/2482-12, 2482, 90–101. https://doi.org/10.3141/2482-12
[8] Hranac, R., Sterzin, E., Krechmer, D., Rakha, H. A., & Farzaneh, M. (2006). Empirical Studies on Traffic Flow in Inclement Weather. United States. Federal Highway Administration. http://hdl.handle.net/10919/55110
[9] Ibrahim, A., & Hall, F. (1994). Effect of adverse weather conditions on speed-flow-occupancy relationships. https://trid.trb.org/View/425358
[10] Ito, J., Suzuki, S., Sano, K., & Hatoyama, K. (2019). Impact of Snowfall and Road Structure on Travel Speedin Winter in Niigataprefecture, Japan. Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies, 13, 1728-1742.
[11] Jägerbrand, A. K., & Sjöbergh, J. (2016). Effects of weather conditions, light conditions, and road lighting on vehicle speed. SpringerPlus, 5(1), 1–17. https://doi.org/10.1186/S40064-016-2124-6/FIGURES/7
[12] Knapp, K. K., Kroeger, D., Giese, K., & Education, I. S. University. C. for T. R. and. (2000). Mobility and Safety Impacts of Winter Storm Events in a Freeway Environment. https://doi.org/10.21949/1503647
[13] Kumar, M., & Wang, S. (2006). Impacts of Weather on Rural Highway Operations - Showcase Evaluation #2.
[14] Kyte, M., Khatib, Z., Shannon, P., & Kitchener, F. (2001). Effect of Weather on Free-Flow Speed. Https://Doi.Org/10.3141/1776-08, 1776, 60–68. https://doi.org/10.3141/1776-08
[15] Lieu, H. C., & Lin, S. M. (2004). Benefit Assessment of Implementing Weather-Specific Signal Timing Plans by Using CORSIM. Https://Doi.Org/10.3141/1867-23, 1867, 202–209. https://doi.org/10.3141/1867-23
[16] Sabir, M., van Ommeren, J., Koetse, M. J., & Rietveld, P. (2008). Welfare Effects of Adverse Weather through Speed Changes in Car Commuting Trips. SSRN Electronic Journal. https://doi.org/10.2139/SSRN.1269333
[17] Stojanović, S., Tubić, V. (2019). Uticaj vremenskih neprilika na brzine vozila na vangradskim dvotračnim putevima. Put i životna sredina. Vrnjacka Banja, Serbia, October 23-25, 2019, str. 253-265
[18] Tubić, I., & Stepanović, N. (2022). Influence of weather conditions on the traffic flow parameters on Pešter plateau. Put i Saobraćaj, 68(1), 35–41. https://doi.org/10.31075/pis.68.01.06
[19] Wang, W., Mao, Y., Jin, J., Wang, X., Guo, H., Ren, X., & Ikeuchi, K. (2011). Driver's various information process and multi-ruled decision-making mechanism: A fundamental of intelligent driving shaping model. International Journal of Computational Intelligence Systems, 4(3), 297–305. https://doi.org/10.1080/18756891.2011.9727786
[20] Weng, J., Liu, L., & Rong, J. (2013). Impacts of snowy weather conditions on expressway traffic flow characteristics. Discrete Dynamics in Nature and Society, 2013. https://doi.org/10.1155/2013/791743
[21] Zhang, L., Holm, P., Colyar, J., & Industries, I. (2004). Identifying and Assessing Key Weather-Related Parameters and Their Impacts on Traffic Operations Using Simulation. https://doi.org/10.21949/1503647

АНАЛИЗА ПРЕКОРАЧЕЊА БРЗИНА НА ПРОЛАСКУ АУТОПУТА КРОЗ БЕОГРАД, ДЕОНИЦА ПЕТЉА БЕОГРАД – ПЕТЉА БУБАЊ ПОТОК

Милош Тубић, дипл. инж. саобр.[1]
[1]Саобраћајни факултет, tubic1701@gmail.com
Лазар Стојановић, дипл. инж. саобр.[2]
[2]Саобраћајни факултет, stojanoviclazar652@gmail.com
Др Немања Степановић, дипл. инж. саобр.[3]
[3]Саобраћајни факултет, n.stepanovic@sf.bg.ac.rs

Резиме: Са проблемом прекорачења ограничене брзине се суочавају све земље и он је генерално присутан на свакој путној мрежи. С обзиром да су околности и мотиви прекорачења брзине од стране возача на путевима са мешовитим локалним, изворно циљним и даљинским токовима различити, циљ рада је да се изврши анализа поштовања ограничене брзине, а самим тим и подобност постављених ограничења на проласку аутопута кроз Београд. Модификованом методом покретног осматрача, уз помоћ android апликације извршена су истраживања реалних брзина у условима слободног и нормалног тока. У анализи су коришћени и подаци о часовним протоцима и брзинама са аутоматских бројача саобраћаја из релевантних база ЈП „Путеви Србије". Синтезна анализа обухватила је два аспекта прекорачења брзине: просторно и временско прекорачење брзине. Резултати истраживања су показали да постоји велика дисперзија брзина возила у току и да значајан проценат возача не поштује постављено ограничење брзине у слободном и нормалном току. Један од узрока високог процента прекорачења односи се на кредибилитет дефинисане ограничене брзине. Други узрок је чињеница да у специфичним условима тока није дефинисан савремени концепт управљања брзинама на проласку аутопута кроз Београд. Неопходно је дефинисати адекватне концепте управљања брзинама, односно преиспитати кредибилитет постављених фиксних ограничења.

Кључне речи: ограничење брзине, услови у току, кредибилитет ограничења брзине.

ANALYSIS OF SPEEDING ON THE HIGHWAY PASSING THROUGH BELGRADE, DOBANOVCI - BUBANJ POTOK SECTION

Miloš Tubić, B.Sc. T.E.[1]
[1]Faculty of Transport and Traffic engineering, tubic1701@gmail.com
Lazar Stojanović, B.Sc. T.E.[2]
[2]Faculty of Transport and Traffic engineering, stojanoviclazar652@gmail.com
Dr Nemanja Stepanović, B.Sc. T.E.[3]
[3]Faculty of Transport and Traffic engineering, n.stepanovic@sf.bg.ac.rs

Abstract: All countries face the problem of exceeding the speed limit and it is generally present on every road network. Given that the circumstances and motives of speeding by drivers on roads with mixed local, original target and remote flows are different, the aim of the work is to analyze the observance of the limited speed, and therefore the suitability of the set restrictions on the passage of the highway through Belgrade. With the modified method of the mobile observer, with the help of the android application, researches of real speeds in free and normal flow conditions were carried out. Data on hourly flows and speeds from automatic traffic counters from the relevant databases of JP "Roads of Serbia" were also used in the analysis. The synthesis analysis included two aspects of speeding: spatial and temporal speeding. The results of the research showed that there is a large dispersion of vehicle speeds in the flow and that a significant percentage of drivers do not respect the set speed limit in a free and stable flow. One of the reasons for the high percentage of overruns is related to the credibility of the defined speed limit. Another reason is the fact that the modern concept of speed control on the highway passing through Belgrade has not been defined in specific flow conditions. It is necessary to define adequate speed management concepts, that is, to review the credibility of the set fixed limits.

Keywords: speed limit, traffic conditions, credibility of speed limits.

[1] Тубић Милош, дипл. инж. саобраћаја, студент мастер академских студија, Универзитет у Београду - Саобраћајни факултет, Војводе Степе 305, Београд, Србија, tubic1701@gmail.com
[2] Стојановић Лазар, дипл. инж. саобраћаја, студент мастер академских студија, Универзитет у Београду - Саобраћајни факултет, Војводе Степе 305, Београд, Србија, stojanoviclazar652@gmail.com
[3] Доц. др Степановић Немања, дипл. инж. саобраћаја, Универзитет у Београду - Саобраћајни факултет, Војводе Степе 305, Београд, Србија, n.stepanovic@sf.bg.ac.rs

1. УВОД

Брзина као један од основних параметара саобраћајног тока, има изузетан значај са аспекта ефикасности (време путовања) и безбедности (настанак и последице саобраћајних незгода). Брзина возила у саобраћајном току представља квалитативну меру за оцењивање услова саобраћаја на постојећој и будућој мрежи. Са аспекта ефикасности саобраћајног процеса, брзина утиче на мобилност, транспорт робе, потрошњу горива, емисију штетних материја, буку и квалитет живота целокупног друштва. Брзина такође представља срж проблема и у безбедности саобраћаја. Јаке корелације су утврђене између брзине и ризика од незгода, као и између брзине и тежина последица саобраћајних незгода (Aarts and van Schagen, 2006; Elvik et al., 2004). Велика дисперзија брзина возила у току посебно се истиче као проблем у безбедности саобраћаја. Већа разлика у брзинама возила кореспондира већем броју саобраћајних незгода (Aarts and van Schagen, 2006; Montella et al., 2015) и тежини последица истих (Yu and Abdel-Aty, 2014a, 2014b). Управљање брзинама означава процес обезбеђивања оне вредности брзине која има за циљ да омогући хармонизован саобраћајни ток, односно да минимизира дисперзију брзина возила у току.

Ограничења брзине се сматрају кључним елементом ефикасног управљања брзинама. Међутим, прекорачења ограничених брзина су веома честа. У Европи, генерално, 40% до 60% возача не поштује постављено ограничење брзине и најчешће око 10% до 20% возача прекорачује дозвољену брзину за више од 10 km/h (OECD, 2006). Разлози за прекорачење брзине су различити и могу се односити на привремене мотиве (нпр. журба), карактеристике личности (нпр. агресивност возача), карактеристике возила, пута и околине (SWOV, 2012) и перцепције безбедне брзине путовања (зависи од геометрије и околине пута, временских услова итд.) (Wilmot & Khanal, 1999). Значај анализе прекорачења брзине огледа се у утврђивању броја и узрока прекорачења, као и идентификовању локација на којима је овај проблем доминантан ради побољшања услова у саобраћају.

Један од кључних фактора који утиче на избор брзине је кредибилитет постављеног ограничења брзине (OECD, 2006; Van Schagen et al., 2004; Van Nes et al., 2008). Goldenbeld и van Schagen (2007) наводе да се генерално може претпоставити да ће возачи возити у складу са постављеним ограничењем брзине ако га сматрају разумним или „кредибилним". Насупрот томе, ако постављено ограничење брзине није у складу са ограничењем које возачи сматрају одговарајућим, према карактеристикама пута, онда оно може бити игнорисано, а читав систем управљања брзинама доведен у питање.

Сходно претходно наведеном, циљ овог рада је да се изврши анализа поштовања ограничења брзине у условима слободног и нормалног тока, кроз просторно и временско прекорачење ограничене брзине, на проласку аутопута кроз Београд, односно од петље Београд до петље Бубањ Поток.

2. МЕТОДОЛОГИЈА ИСТРАЖИВАЊА

У оквиру рада извршено је 8 мерења брзине (4 по смеру) у реалним условима, на проласку аутопута кроз Београд, уз помоћ адекватне Android апликације која има могућност прецизног снимања брзине у току вожње. Поред снимања брзине у свакој секунди кретања, апликација бележи и податке о реалном времену, локацији (координате), броју сателита и има могућност лоцирања ограничења брзине и зона забрањеног претицања. Мерења брзине су извршена модификованом методом покретног осматрача, односно возило осматрач се кретало у саобраћајном току опонашајући репрезентативно возило у току.

Како би се обезбедила већа поузданост дуж предметне деонице извршено је мерење по смеровима. Емпиријска истраживања су спроведена 12.03.2024. (уторак) у периоду од 05h до 07h, 20.03.2024. (среда) у периоду од 06h до 07h, 26.03.2024. (уторак) у периоду од 11h до 13h на путном правцу петља Бубањ Поток – петља Београд, односно петља Београд – петља Бубањ Поток.

Android апликација за снимање брзина захтева конекцију са минимум 6 сателита, што је у овом случају било испуњено, јер је време током којег су истраживања спроведена било сунчано. Просечан број сателита који је пратио кретање возила покретног осматрача био је 18, док је минимум био 7 сателита. Грешка која се јавља у позиционирању са наведеним бројем конектованих сателита је у процесу мерења брзина прихватљива.

Такође, у оквиру рада су спроведена истраживања у различитим условима саобраћајног тока. Спроведена су истраживања у условима слободног и нормалног саобраћајног тока, што подразумева мерење у ванвршним периодима саобраћајног оптерећења.

Одлука о меродавним данима, временским периодима спровођења истраживања, као и издвајању валидних резултата, донета је на основу реалних података о часовном протоку са АБС 1268/69 који се налази на деоници 1201/1202 со1 петља Београд – петља Змај (табела 1). За потребе ове анализе коришћени су подаци из марта 2024. године из релевантних база ЈП „Путеви Србије".

Табела 1. *Подаци са АБС 1268/1269*

Датум	Време	Трака	q (воз/h/траци)	Q (воз/h)	Vpr_{tr} (km/h)	V_{pr} (km/h)
12.03.	5:00-6:00	Возна	384	544	94	100
		Претицајна	160		113	
	6:00-7:00	Возна	665	1,315	94	103
		Претицајна	650		113	
20.03.	6:00-7:00	Возна	707	1,302	94	103
		Претицајна	595		113	
26.03.	11:00-12:00	Возна	1,054	2,186	88	96
		Претицајна	1,132		104	
	12:00-13:00	Возна	1,052	2,206	88	96
		Претицајна	1,154		104	

Поред наведеног, утврђена је слободна брзина за категорију путничких аутомобила по одсецима и по смеровима предметне аутопутне деонице. За утврђивање слободне брзине примењен је иновирани Новокласични поступак за прорачун капацитета и нивоа услуге саобраћајница. У овом поступку, утицај на слободну брзину могу имати ширина коловоза, радијус хоризонталне кривине и уздужни нагиб. У конкретном случају, ширина коловоза и радијус хоризонталне кривине нису имали утицај на слободну брзину. На одсеку петља Ласта - петља Бубањ Поток је евидентиран утицај уздужног нагиба на слободну брзину путничких аутомобила.

Како би се добиле веродостојне вредности слободне брзине путничких аутомобила, интегрисан је утицајни фактор уливно/изливних рампи. Овај фактор није део Новокласичног поступка, али је његов утицај евидентиран у HCM-овом (*Highway Capacity Manual*) приручнику за прорачун капацитета и нивоа услуге основних одсека аутопутева из 2010. године. На потезу од петље Змај до петље Ласта утврђена је густина уливно/изливних рампи од 1,82 рампи/km, која има утицај на базну слободну брзину (130km/h) и редукована је за 10km/h. На потезу од петље Бубањ Поток до петље Ласта и од петље Змај до петље Београд је веће растојање између петљи, па је самим тим добијена мања вредност густине уливно/изливних рампи од 0,51 рампи/km, чији је утицај минималан, па самим тим нема утицаја на слободну брзину путничких аутомобила.

Анализирани потез аутопута који пролази кроз Београд, је ради једноставније анализе подељен на 10 одсека које су одређене на основу петљи које се налазе на путу, а то су Бубањ Поток – Ласта, Ласта – Коњарник (Медаковић), Коњарник (Медаковић) - Аутокоманда, Аутокоманда - Мостар, Мостар - Сава Центар, Сава Центар -Генекс, Генекс - Тошин Бунар, Тошин Бунар - Змај, Змај – Аеродром и Аеродром - петља Београд. Петље које нису укључене су имале мањи значај у овом раду, због тога што у зонама ових петљи не долази до промене у ограничењу брзине, а то су Душановац, Хитна Помоћ, Арена, Бежанијска Коса и Икарбус.

3. РЕЗУЛТАТИ ИСТРАЖИВАЊА

У наредним табелама и на графиконима приказани су резултати који су добијени истраживањем брзина на терену.

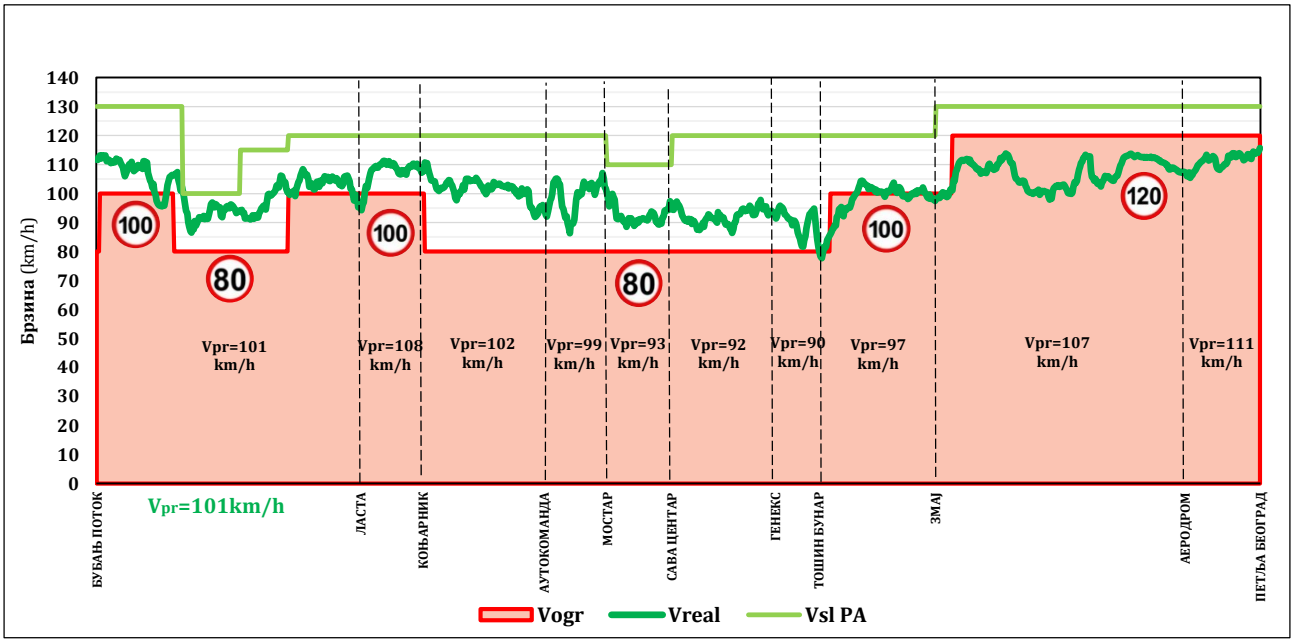
3.1. Профил брзине у условима слободног тока

У табели 2 су приказани резултати мерења на потезу аутопута у смеру петља Бубањ Поток - петља Београд, које је спроведено 12.3.2024. у периоду 6:02-6:20, конкретно у условима слободног тока. Добијени резултати показују да се на делу потеза петља Бубањ Поток - петља Београд, на ком важи ограничење од 80 km/h, на 99,8% (12,701 m) дужине деонице не поштује постављено ограничење

брзине, док се временски посматрано не поштује 99,2% (476 s). На делу где важи ограничење брзине од 100 km/h, на 75,8% (6,337 m) дужине деонице се не поштује постављено ограничење брзине, док се временски посматрано не поштује 74,1% (226 s). На делу деонице на ком важи ограничење од 120 km/h вози се у складу са ограниченом брзином. Просечна брзина репрезентативног возила током овог мерења је износила 101 km/h. Графичка интерпретација профила брзине са важећим ограничењима брзине на потезу петља Бубањ Поток – петља Београд је приказана на графикону 1.

Табела 2. *Просторно и временско прекорачење у условима слободног тока у смеру петља Бубањ Поток – петља Београд*

Ограничење брзине	СМЕР 1 петља Бубањ Поток - петља Београд					
	Просторно прекорачење (%)	У прекорачењу (m)	Укупно (m)	Временско прекорачење (%)	У прекорачењу (s)	Укупно (s)
80	**99,8%**	12701	12729	**99,2%**	476	480
100	**75,8%**	6637	8760	**74,1%**	226	305
120	0,0%	0	8519	0,0%	0	283
Укупно	**64,2%**	**19278**	**30008**	**65,7%**	**702**	**1068**



Графикон 1. *Профил брзине у условима слободног тока са важећим ограничењима брзине у смеру петља Бубањ Поток – петља Београд*

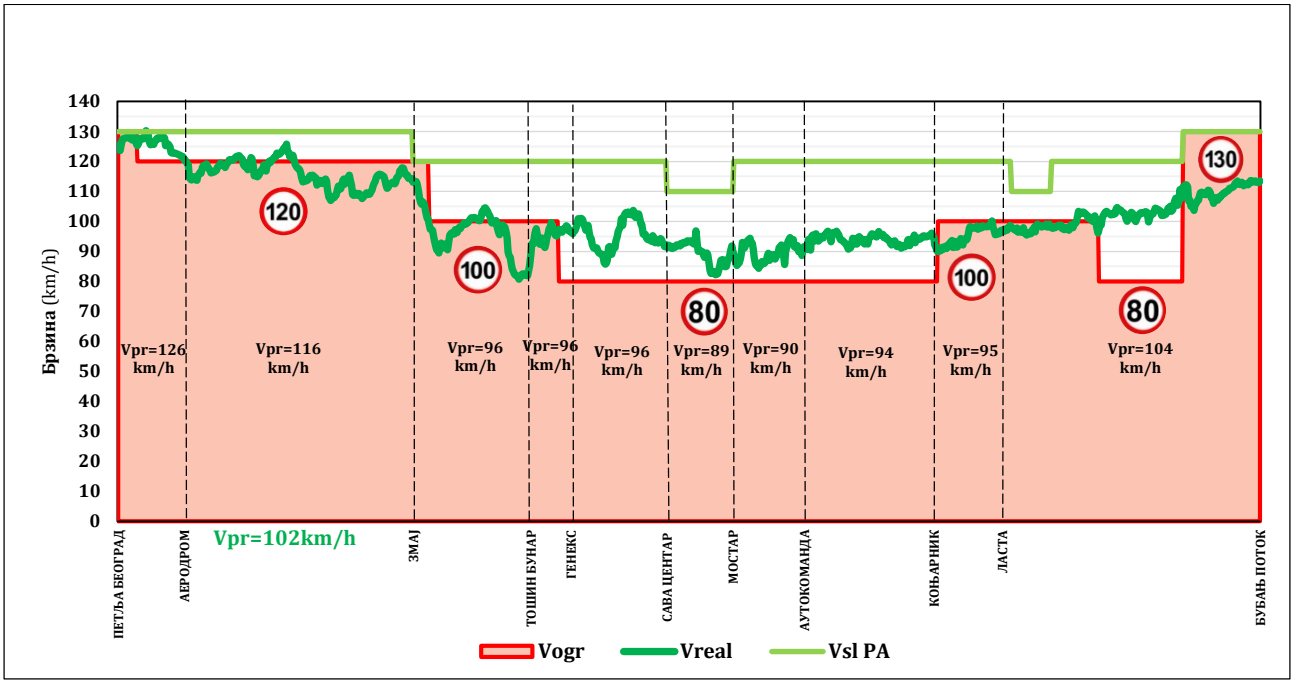
На основу претходне табеле и претходног графикона, може се доћи до закључка да се на делу деонице где важи ограничење брзине од 120 km/h, конкретно непосредно након петље Змај па до петље Београд, у потпуности поштује постављено ограничење брзине. Разлог оваквом резултату се може пронаћи у чињеници да возачи излазе из зоне градских услова вожње и да су под утицајем претходних ограничења брзине (80 km/h и 100 km/h), као и честе полицијске контроле на претходном делу пута. Такође, добијени резултат се може приписати чињеници да је минималан утицај других возила на кретање у условима слободног тока, па возач има могућност да сам бира брзину којом ће се кретати у складу са карактеристикама пута, возила и сопствене перцепције о адекватној брзини.

У табели 3 су приказани резултати мерења на потезу аутопута у супротном смеру, односно петља Београд – петља Бубањ Поток, које је спроведено 20.3.2024. у периоду 6:17-6:34, у условима слободног тока. Добијени резултати показују да се на делу потеза петља Београд - петља Бубањ Поток, на ком важи ограничење од 80 km/h, на 100,0% (11,287 m) дужине пута не поштује постављено ограничење брзине, такође се и временски посматрано не поштује 100,0% (429 s). На делу са ограничењем брзине од 100 km/h, на 16,5% (1,187 m) дужине пута не поштује се постављено ограничење брзине, док се временски посматрано не поштује 15,6% (42 s).

На делу са ограничењем брзине од 120 km/h, на 32,9% (2890 m) дужине пута се не поштује постављено ограничење брзине, док се временски посматрано не поштује 31,1% (84 s). На делу потеза на ком важи ограничење брзине од 130 km/h не постоји ни просторно ни временско прекорачење ограничене брзине. Просечна брзина репрезентативног возила током овог мерења је износила 102 km/h. Графичка интерпретација профила брзине са важећим ограничењима брзине на потезу петља Београд – петља Бубањ Поток је приказана на графикону 2.

Табела 3. *Просторно и временско прекорачење у условима слободног тока у смеру петља Београд – петља Бубањ Поток*

Ограничење брзине	СМЕР 2 петља Београд - петља Бубањ Поток					
	Просторно прекорачење (%)	У прекорачењу (m)	Укупно (m)	Временско прекорачење (%)	У прекорачењу (s)	Укупно (s)
80	**100,0%**	11287	11287	**100,0%**	429	429
100	**16,5%**	1187	7176	**15,6%**	42	269
120	**32,9%**	2890	8776	**31,1%**	84	270
130	0,0%	0	2838	0,0%	0	90
Укупно	**51,1%**	**15364**	**30042**	**53,1%**	**562**	**1058**



Графикон 2. *Профил брзине у условима слободног тока са важећим ограничењима брзине у смеру петља Београд – петља Бубањ Поток*

На основу претходне табеле и претходног графикона, може се доћи до закључка да се на делу деонице где важи ограничење брзине од 120 km/h, конкретно непосредно након петље Београд па до петље Змај, не поштује постављено ограничење брзине у већој мери у односу на мање ограничење од 100 km/h, као и у односу на ограничење брзине од 120 km/h у смеру од петље Бубањ Поток до петље Београд. Разлог прекорачења брзине на делу где је ограничење 120 km/h се може пронаћи у томе што возачи у посматраном смеру прелазе са ванградских услова вожње (и ограничења од 130 km/h) на градске услове вожње, па је неопходно одређено време за адаптацију и редукцију брзине.

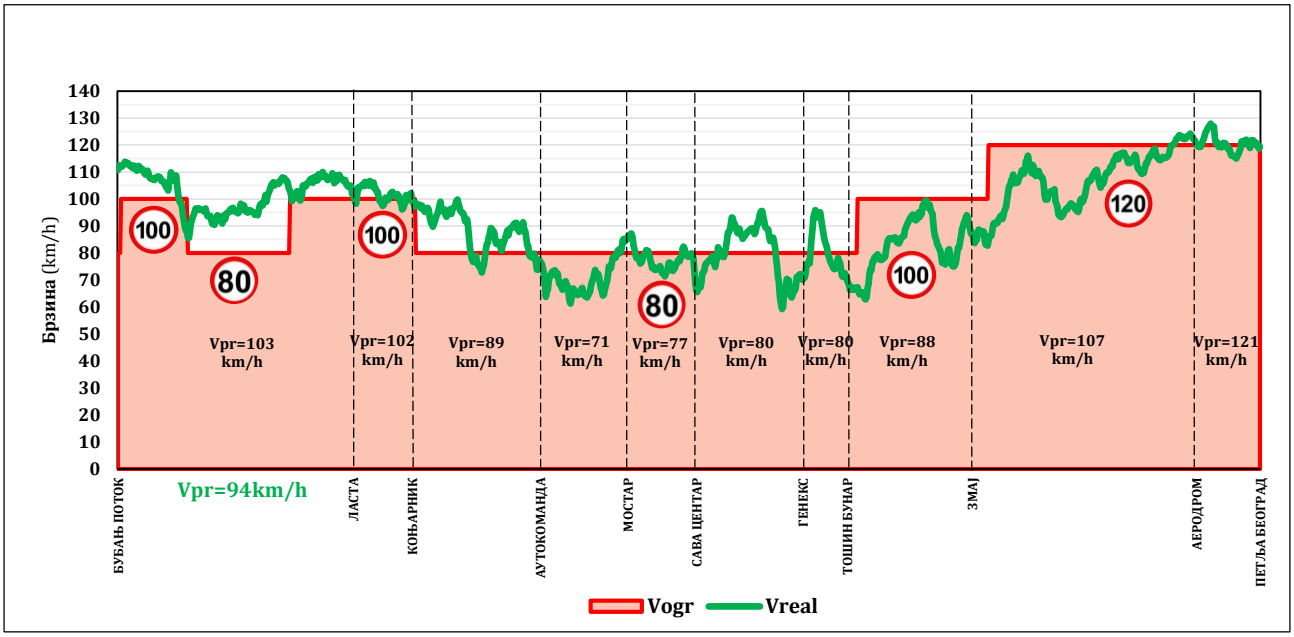
3.2. Профил брзине у условима нормалног тока

У табели 4 су приказани резултати мерења на потезу аутопута у смеру петља Бубањ Поток – петља Београд, које је спроведено 26.3.2024. у периоду 11:41-12:01, у условима нормалног тока. Добијени резултати показују да се на делу потеза петља Бубањ Поток – петља Београд, на ком важи

ограничење од 80 km/h, на 60,2% (7,739 m) дужине пута не поштује постављено ограничење брзине, док се временски посматрано не поштује 54,3% (302 s). На делу са ограничењем брзине од 100 km/h, на 54,4% (4,789 m) дужине пута се не поштује постављено ограничење брзине, док временски се посматрано не поштује 49,2% (162 s). На делу потеза на ком важи ограничење од 120 km/h, на 24,3% (2,076 m) дужине пута се не поштује постављено ограничење брзине, док се временски посматрано не поштује 22,0% (61 s). Просечна брзина репрезентативног возила током овог мерења је износила 94 km/h. На графикону 3 је приказан профил брзине у условима нормалног тока са важећим ограничењима брзине на потезу аутопута од петље Бубањ Поток до петље Београд.

Табела 4. *Просторно и временско прекорачење у условима нормалног тока у смеру петља Бубањ Поток – петља Београд*

Ограничење брзине	СМЕР 1 петља Бубањ Поток - петља Београд					
	Просторно прекорачење (%)	У прекорачењу (m)	Укупно (m)	Временско прекорачење (%)	У прекорачењу (s)	Укупно (s)
80	**60,2%**	7739	12859	**54,3%**	302	556
100	**54,4%**	4789	8807	**49,2%**	162	329
120	**24,3%**	2076	8559	**22,0%**	61	277
Укупно	**48,3%**	**14574**	**30192**	**54,1%**	**629**	**1162**



Графикон 3. *Профил брзине у условима нормалног тока са важећим ограничењима брзине у смеру петља Бубањ Поток – петља Београд*

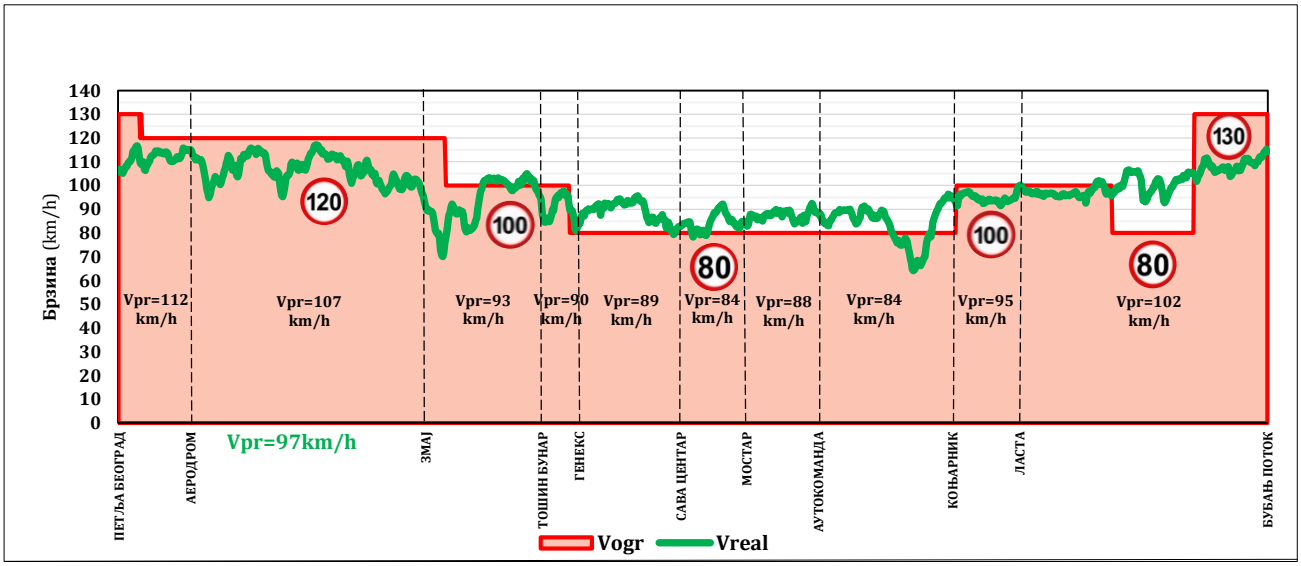
На основу претходне табеле и графикона може се доћи до закључка да је дошло до смањења просторног и временског прекорачења у поређењу са мерењем у условима слободног тока, за посматрани смер. Разлог смањења прекорачења у односу на слободан ток је логична последица с обзиром да услови из слободног тока прелазе у нормалан ток, где возачи имају већу интеракцију са другим возачима и самим тим не могу у потпуности да се крећу жељеном брзином, али и даље постоји значајно просторно и временско прекорачење за ограничене брзине од 80 и 100 km/h.

С обзиром на то да су распони часовног протока, који одговарају различитим условима у саобраћајном току, велики, након мерења која су спроведена у условима нормалног тока за смер петља Београд – петља Бубањ Поток, установљено је да су добијени резултати за слободан ток који тежи нормалном и нормалан ток који тежи засићеном току. У наставку рада, ова два случаја су независно анализирана.

У табели 5 су приказани резултати мерења на потезу аутопута у смеру петља Београд – петља Бубањ Поток, које је спроведено 12.3.2024. у периоду 6:25-6:44, у условима слободног тока који тежи нормалном. Добијени резултати показују да се на делу анализираног потеза, у условима слободног тока који тежи нормалном, на ком важи ограничење од 80 km/h, на 91,0% (10,243 m) дужине пута не поштује постављено ограничење брзине, док се временски посматрано не поштује 89,3% (408 s). На делу са ограничењем брзине од 100 km/h, на 20,4% (1,474 m) дужине пута се не поштује постављено ограничење брзине, док се временски посматрано не поштује 19,0% (52 s). На деловима потеза са ограничењем од 120 km/h и 130 km/h, нема прекорачења брзине. Просечна брзина репрезентативног возила током овог мерења је износила 97 km/h. Графичка интерпретација профила брзине са важећим ограничењима брзине на анализираном потезу је приказана на графикону 4.

Табела 5. *Просторно и временско прекорачење у условима слободног тока који тежи нормалном у смеру петља Београд – петља Бубањ Поток*

Ограничење брзине	СМЕР 2 петља Београд - петља Бубањ Поток					
	Просторно прекорачење (%)	У прекорачењу (m)	Укупно (m)	Временско прекорачење (%)	У прекорачењу (s)	Укупно (s)
80	**91,0%**	10243	11253	**89,3%**	408	457
100	**20,4%**	1474	7241	**19,0%**	52	273
120	0,0%	0	8742	0,0%	0	297
130	0,0%	0	2840	0,0%	0	94
Укупно	**39,9%**	**11717**	**30047**	**41,0%**	**460**	**1121**



Графикон 4. *Профил брзине у условима слободног тока који тежи нормалном са важећим ограничењима брзине у смеру петља Београд – петља Бубањ Поток*

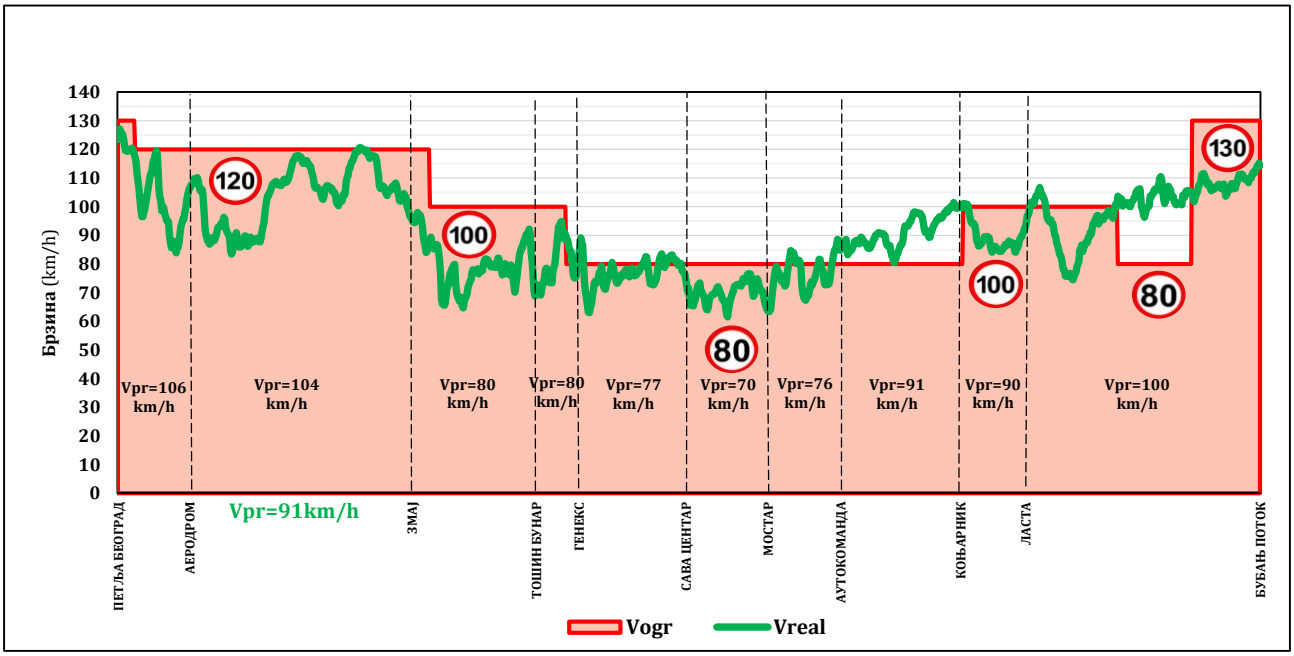
На основу претходне табеле и графикона, може се закључити да се у посматраном смеру проценат прекорачења у зони ограничења од 80 km/h смањује са порастом саобраћаја. У зонама ограничења од 100 km/h се проценат прекорачења повећао, док је у зонама ограничења од 120 km/h дошло до значајног смањења прекорачења са 32,9% у условима слободног тока на 0% у условима слободног тока који тежи нормалном. У зонама ограничења од 130 km/h нема промене у прекорачењу.

У табели 6 су приказани резултати мерења на потезу аутопута у смеру петља Београд – петља Бубањ Поток, које је спроведено 26.3.2024. у периоду 12:06-12:26, у условима нормалног тока који тежи засићеном. Добијени резултати показују да се на делу потеза петља Београд – петља Бубањ Поток, у условима нормалног тока који тежи засићеном, на ком важи ограничење од 80 km/h, на 60,4%% (6,938 m) дужине пута не поштује постављено ограничење брзине, док се временски посматрано не поштује 54,4% (269 s). На делу са ограничењем брзине од 100 km/h, на 9,5% (682 m) дужине пута се не поштује постављено ограничење брзине, док се временски посматрано не поштује 7,9% (24 s). На читавом делу потеза на ком важе ограничења брзине од 120 km/h и 130 km/h, не

постоје значајна прекорачења. Просечна брзина репрезентативног возила током овог мерења је износила 91 km/h. Графичка интерпретација профила брзине са важећим ограничењима брзине на потезу петља Београд – петља Бубањ Поток је приказано на графикону 5.

Табела 6. *Просторно и временско прекорачење у условима нормалног тока који тежи засићеном у смеру петља Београд – петља Бубањ Поток*

Ограничење брзине	СМЕР 2 петља Београд - петља Бубањ Поток					
	Просторно прекорачење (%)	У прекорачењу (m)	Укупно (m)	Временско прекорачење (%)	У прекорачењу (s)	Укупно (s)
80	**60,4%**	6938	11485	**54,4%**	269	494
100	**9,5%**	682	7195	**7,9%**	24	305
120	**1,9%**	167	8804	**1,6%**	5	309
130	0,0%	0	2776	0,0%	0	90
Укупно	**25,8%**	**7787**	**30227**	**24,9%**	**298**	**1198**



Графикон 5. *Профил брзине условима нормалног тока који тежи засићеном са важећим ограничењима брзине на потезу аутопута петља Београд – петља Бубањ Поток*

На основу претходне табеле и претходног графикона може се доћи до закључка да је дошло до значајног смањења прекорачења за све зоне ограничења брзине, у поређењу са претходним мерењима у посматраном смеру. Такође, приметан је и значајан утицај уливно/изливних рампи у зонама петљи, као и зона преплитања. У овим зонама долази до велике осцилације, турбуленције у току и смањења брзине кретања.

4. ДИСКУСИЈА РЕЗУЛТАТА

Како би се спровела упоредна анализа добијених реултата, у табели 7 су груписане мерењем утврђене вредности просторног и временског прекорачења у условима слободног тока. У табели 8 су груписане мерењем утврђене вредности просторног и временског прекорачења у условима нормалног тока. Резултати су приказани по смеровима, односно петља Бубањ Поток – петља Београд (смер 1) и петља Београд – петља Бубањ Поток (смер 2).

Табела 7. *Упоредна анализа просторног и временског прекорачења у условима слободног тока*

Ограничење брзине	СМЕР 1 (Слободан ток)		СМЕР 2 (Слободан ток)	
	Просторно прекорачење (%)	Временско прекорачење (%)	Просторно прекорачење (%)	Временско прекорачење (%)
80	**99,8%**	**99,2%**	**100,0%**	**100,0%**
100	**75,8%**	**74,1%**	16,5%	15,6%
120	0,0%	0,0%	**32,9%**	**31,1%**
130	/	/	0,0%	0,0%
Укупно	**64,2%**	**65,7%**	**51,1%**	**53,1%**
Просечна брзина	**101 km/h**		**102 km/h**	

На основу резултата из претходне табеле, може се закључити да су у зони ограничења брзине од 80 km/h возачи непрестано у прекорачењу брзине, посматрано у оба смера. Одсуство интеракције са другим возилима доводи до тога да се возачи крећу жељеном брзином која је већа од ограничене. У условима слободног тока, посматрано у оба смера, може се закључити да је ограничење од 80 km/h некредибилно. Добијени резултати прекорачења за зоне од 100 km/h и 120 km/h се значајно разликују по смеровима. Разлог оваквим резултатима се може наћи у чињеници да, посматрано у смеру 1, возачи прелазе из градских услова вожње у ванградске, а идаље су под утицајем претходног ограничења (80 km/h) и честе полицијске контроле, на потезу између петље Коњарник и петље Генекс. У супротном смеру, возачи из ванградских услова вожње (ограничење брзине од 130 km/h) постепено улазе у градске услове вожње. То подразумева време потребно за адаптацију и за редукцију брзине, што се може приметити на основу прекорачења брзине у зони ограничења од 120 km/h.

Табела 8. *Упоредна анализа просторног и временског прекорачења у условима нормалног тока*

Ограничење брзине	СМЕР 1 (Нормалан ток)		СМЕР 2 (Слободан→Нормалан ток)		СМЕР 2 (Нормалан→Засићен ток)	
	Просторно прекорачење (%)	Временско прекорачење (%)	Просторно прекорачење (%)	Временско прекорачење (%)	Просторно прекорачење (%)	Временско прекорачење (%)
80	**60,2%**	**54,3%**	**91,0%**	**89,3%**	**60,4%**	**54,4%**
100	**54,4%**	49,2%	20,4%	19,0%	9,5%	7,9%
120	24,3%	22,0%	0,0%	0,0%	1,9%	1,6%
130	/	/	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Укупно	**48,3%**	**54,1%**	**39,9%**	**41,0%**	**25,8%**	**24,9%**
Просечна брзина	**94 km/h**		**97 km/h**		**91 km/h**	

На основу резултата из претходне табеле, може се закључити да је у условима нормалног тока генерално дошло до смањења прекорачења брзине у односу на мерење у условима слободног тока. Изузетак представља зона ограничења од 120 km/h, где је дошло до већег прекорачења брзине у односу на мерење у условима слободног тока. Закључак аутора је да је у зони ограничења од 120 km/h дошло до прилагођавања брзине кретања опонашаног возила брзини остатка тока, за разлику од услова слободног тока где је возач у потпуности могао да се креће жељеном брзином, која не мора нужно бити максимална. Поређењем графикона 1 и графикона 3 може се уочити значајнији утицај уливно/излливних рампи у зонама петљи (у условима нормалног тока), који се манифестује кроз осцилације и смањење брзине.

Упоредном анализом резултата свих мерења у смеру 2 (у условима слободног тока, слободног који тежи нормалном току и нормалног који тежи засићеном) може се доћи до закључка да са повећањем величине протока, долази до прогресивног смањења прекорачења ограничене брзине за све вредности ограничења. Аутори рада су, на основу спроведене анализе просторног и временског прекорачења ограничене брзине, дали и препоруке у погледу управљања брзинама на разматраном потезу.

5. ЗАКЉУЧАК

Кредибилно ограничење брзине се дефинише као ограничење брзине које је у складу са перцепцијом возача условљеном путним и саобраћајним условима. Кредибилитет ограничења није апсолутна мера, већ представља скалу која варира од „веома кредибилних" до „веома некредибилних" ограничења брзине. Ако ограничење брзине није кредибилно, постоје две могућности да се проблем реши: променити (прилагодити) постојеће ограничење брзине или мењати елементе пута и околине. Редефинисање постојећег ограничења брзине може значити повећање или смањење, али се свакако не сме нарушити безбедност учесника у саобраћају.

Веома је важно преиспитати постојећа ограничења брзине како би се осигурала њихова конзистентност са локалним условима и повећао њихов кредибилитет. Анализа подобности постављених ограничења брзина би требало да узме у обзир факторе као што су функционални ранг пута, геометрија пута, ниво развијености околине пута и присуство рањивих учесника у саобраћају.

Спроведено истраживање је показало да возачи у великој мери не поштују постављено ограничење брзине и да је неопходно испитати кредибилитет (подобност) постављених ограничења брзине на проласку аутопута кроз Београд, посебно ограничења брзине од 80 km/h, с обзиром на постојање контроле приступа и одличних техничко-експлоатационих карактеристика деоница. Резултати показују да ограничење брзине од 80 km/h, у различитим условима саобраћајног тока, возачи не поштују у распону од 60%-100% дужине (времена) путовања. Са аспекта осталих ограничења брзине, прекорачење је мање, али постоји. Такође, резултати показују да возачи пре свега возе у складу са условима у току и да је поштовање ограничене брзине у условима нормалног тока, доминантно у функцији протока возила.

Генерално, најзначајнији проблем на предметном потезу представља зона ограничења од 80 km/h која се простире од петље Коњарник (Медаковић) до петље Генекс. Као што је већ наведено, просторно и временско прекорачење ограничене брзине у овој зони је неприхватљиво, што доводи у питање његову кредибилност. С обзиром на то да се ради о најоптерећенијем делу анализираног потеза, ограничење брзине од 80 km/h, у условима већег протока (засићеног тока), представља брзину којом ће се постићи највећа проточност и ефикасност. У свим другим случајевима, када је могуће кретати се већим брзинама, ограничење брзине од 80 km/h може довести у питање како кредибилитет тог ограничења, тако и кредибилитет свих других ограничења.

Треба истаћи и то да је реализацијом ових истраживања прикупљен релативно мали, али инцијално задовољавајући узорак који није довољан како би се оценио кредибилитет постављеног ограничења брзине. За утврђивање кредибилитета је неопходан много већи узорак са укључивањем и стања засићеног и форсираног тока, која се свакодневно јављају у вршним периодима од 07-11 и 14-18 часова. Како би се дефинитивно утврдио кредибилитет ограничења брзине на предметном потезу, препорука је да се спроведу детаљнија истраживања.

Пролазак аутопута кроз Београд, односно потез од петље Београд до петље Бубањ Поток, представља најважнију саобраћајницу у Београду, чија ефикасност има утицај на целу уличну мрежу Београда. Како би се на ефикасан начин управљало саобраћајем на овој саобраћајници, неопходно је имати прецизне и ажурне податке о саобраћају. На предметном потезу од петље Београд до петље Бубањ Поток, постоји само један АБС 1268/1269 који се налази на деоници петља Београд-петља Змај. На основу података са овог бројача није могуће добити реалне податке (о протоку, брзинама возила и др.) у самом центру Београда, с обзиром на број приступних тачака и њихов интензитет. Закључно са тим, аутори рада сматрају да је неопходно постављање довољног броја аутоматских бројача саобраћаја на потезу од петље Београд до петље Бубањ Поток, што представља само предуслов за успешно управљање саобраћајем на овом потезу.

Потенцијални недостатак прикупљања података о брзинама возила само са аутоматских бројача саобраћаја је у томе што се измерене брзине односе само на пресек (на локацију АБС, односно малу зону око АБС). На тај начин се не добијају комплетни подаци о брзини кретања возила. Па је самим тим, један од циљева овог рада, био да се укаже на потенцијал методе покретног осматрача. Овом методом се могу прикупити подаци о профилу брзине на целој деоници, просторном и временском прекорачењу, као и идентификовати потенцијалне проблематичне локације на мрежи са аспекта брзине. Недостатак овог метода је то што је потребно доста времена и обучених истраживача како би се добио репрезентативан узорак.

Како би се одговорило саобраћајним захтевима у свим периодима дана и различитим условима у саобраћајном току, аутори предлажу динамичко управљање брзинама по потезима. Како би се овај систем имплементирао неопходно је поставити велики број сензора који би омогућили прикупљање података у реалном времену. Употребом ИТС система и свих прикупљених података са детектора, омогућила би се различита ограничења брзина у условима слободног тока, која би се редуковала са растом протока и погоршањем осталих параметара саобраћајног тока (интервала слеђења, заузетости детектора итд.). Такође, предлаже се и управљање саобраћајем по тракама. Као мање захтевнија и потенцијално мање ефикасна мера може се размотрити фиксно ограничење брзине које се разликује по саобраћајним тракама (нпр. у возној траци 80 km/h, а у претицајној 100 km/h). Наравно, треба детаљније испитати потенцијалне предности и недостатке овог решења.

Литература

[1] Aarts, L., van Schagen, I. (2006). Driving speed and the rate of road crashes: a review of recent studies. Accident Analysis & Prevention, 38, 215–224.
[2] Elvik, R., Christensen, P., and Amundsen, A. (2004). Speed and road accidents: an evaluation of the power model. TØI Report 740/2004, Oslo, Norway.
[3] Goldenbeld, C., & van Schagen, I. (2007). The credibility of speed limits on 80 km/h rural roads: The effects of road and person(ality) characteristics. Accident Analysis & Prevention, 39(6), 1121–1130.
[4] Montella, A., Imbriani, L.L. (2015). Safety performance functions incorporating design consistency variables. Accident Analysis and Prevention, 74, 133–144.
[5] Organisation for Economic Co-operation and Development and European Conference of Ministers of Transport. (2006). Speed management, Paris, France.
[6] SWOV. (2012). SWOV Fact Sheet - Speed Choice: the influence of man, vehicle, and the road, Leidschendman, Netherland.
[7] Van Nes, N., Houtenbos, M., & Van Schagen, I. (2008). Improving speed behaviour: the potential of in-car speed assistance and speed limit credibility. IET Intelligent Transport Systems, 2(4), 323-330.
[8] Van Schagen, I. N. L. G., Wegman, F. C. M., & Roszbach, R. (2004). Safe and credible speed limits: A strategical exploration. R2004-12. Leidschendam: SWOV Institute for Road Safety Research.
[9] Wilmot, C. G., & Khanal, M. (1999). Effect of speed limits on speed and safety: A review. Transport Reviews, 19(4), 315–329.
[10] Yu, R., Abdel-Aty, M. (2014a). Analyzing crash injury severity for a mountainous freeway incorporating real-time traffic and weather data. Saf. Sci. 63, 50–56.
[11] Yu, R., Abdel-Aty, M. (2014b). An optimal variable speed limits system to ameliorate traffic safety risk. Transport. Res. Part C: Emerg. Technol. 46, 235–246.
[12] Публикација бројање саобраћаја на државним путевима Србије, ЈП „Путеви Србије”, Београд, 2024.
[13] Тубић В., Видас М., Степановић Н., „Основе теорије саобраћајног тока”, Универзитет у Београду, Саобраћајни факултет, 2023.
[14] Миленковић М., Тубић В., и ост., „Анализа подобности постављених ограничења брзине на проласцима државних путева кроз Београд”, Универзитет у Београду, Саобраћајни факултет, 2017.
[15] Тубић В., Челар Н., „Анализа брзина на путној и уличној мрежи у Републици Србији”, Универзитет у Београду, Саобраћајни факултет, 2017.

ANALIZA EFEKTA REKONSTRUKCIJE NESEMAFORIZIRANOG RASKRIŽJA U KRUŽNO ZA RAZLIČITE PROMETNE UVJETE– STUDIJA SLUČAJA IZ RIJEKE, HRVATSKA

Irena Ištoka Otković[1], Aleksandra Deluka-Tibljaš[2], Sanja Šurdonja[2]
[1] Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Građevinski i arhitektonski fakultet Osijek
[2] Sveučilište u Rijeci, Građevinski fakultet

Rezime: *U ovome radu je prikazana lokacija jednog manjeg urbanog kružnog raskrižja, vanjskog radijusa 15 m, smještenog na županijskog cesti preko koje se odvija tranzitni promet između dva grada te je trenutno dnevno opterećenje oko 11000 voz/dan. Istovremeno raskrižje ima i funkciju u ishodišno-odredišnom prometu jer preko 2 manje opterećena privoza povezuje stambeno naselje/trgovačku zonu sa spomenutom županijskom cestom. Na raskrižju su provedena mjerenja brzine i količine prometa prije i nakon rekonstrukcije u kružno raskrižje. Osim temeljem navedenih podataka dva su rješenja raskrižja uspoređena i dodatno za različite scenarije očekivanog povećanja prometa na lokaciji. Izradom modela prometne mikrosimulacije (VISSIM) analizirane su obje varijante raskrižja u postojećim uvjetima prema stvarnim podacima i budućim – pretpostavljenim uvjetima kroz pokazatelje razine uslužnosti, vremenskih gubitaka, dužine kolone vozila, dolaznih brzina, potrošnje goriva i pokazatelja zagađenja zraka.*

Ključne reči: *rekonstrukcija raskrižja, brzine, mikrosimulacije, ocjena efekata*

ANALYSIS OF THE EFFECTS OF RECONSTRUCTION OF A NON-SIGNALIZED INTERSECTION INTO A ROUNDABOUT FOR DIFFERENT TRAFFIC CONDITIONS – CASE STUDY FROM RIJEKA, CROATIA

Irena Ištoka Otković[1], Aleksandra Deluka-Tibljaš[2], Sanja Šurdonja[2]
[1] Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, Faculty of Civil Engineering and Architecture, Osijek
[2] University of Rijeka, Faculty of Civil Engineering

Abstract: *The location of a small urban roundabout, with an outer radius of 15 m, located on a county road that carries transit traffic between two cities and currently has a daily load of about 11,000 veh/day, is presented in this paper. At the same time, the intersection also has a function in origin-destination traffic, because it connects the residential area/shopping area with the mentioned county road via 2 less loaded approaches. Speed and traffic load were measured at the intersection before and after the reconstruction into a roundabout. In addition to the above data, the two intersection solutions were also compared for different scenarios of the expected increase in traffic load at the location. By creating a traffic microsimulation model (VISSIM), both variants of the intersection were analyzed in existing conditions according to real data and future - assumed conditions through indicators of level of service, delays, vehicle queue length, operational speeds, fuel consumption and air pollution indicators.*

Keywords: *intersection reconstruction, speed, microsimulation, evaluation of effects*

1. UVOD

Rekonstrukcija standardnih raskrižja u razini, semaforiziranih ili nesemaforiziranih, u kružna raskrižja je u urbanim sredinama u Hrvatskoj najčešće motivirana potrebom za povećanjem kapaciteta dok je na izvangradskoj mreži glavni motiv povećanje sigurnosti prometa. Prema važećoj tehničkoj regulativi u Hrvatskoj, Smjernice za projektiranje kružnih raskrižja na državnim cestama [1] postoji obaveza da se u fazi planiranja (ili projektiranja) za sve lokacije na kojima je jedno od rješenja raskrižja kružno raskrižje provjeri opravdanost primjene ovog tipa raskrižja. Definirano je ukupno 8 kriterija prema kojima se provodi postupak provjere koji, pokazuje se, mogu dati kvalitetan odgovor na pitanje opravdanosti primjene kružnih raskrižja u određenim prometnim, prostornim i sigurnosnim uvjetima [2].

U vrijeme intenzivne implementacije kružnih raskrižja brojne su zemlje uvele njihov sustavni monitoring i na temelju dugoročno prikupljanih podataka provele tzv. „before-after“ analize koja su temelj za unaprjeđenje planiranja i projektiranja ove vrste raskrižja [3,4]. U Hrvatskoj su smjernice za projektiranje kružnih raskrižja

[1] Irena Ištoka Otković: iirena@gfos.hr

na snazi 10-tak godina te su od tada prema uputama iz smjernica rekonstruirana brojna raskrižja, samo na županijskim (regionalnim) cestama u Rijeci i okolici njih 20-tak. Iako sada već čitav niz godina u funkciji, sustavna analiza rekonstruiranih raskrižja koja bi uključila analizu pokazatelja sigurnosti i kapaciteta nije provedena. Podaci o sigurnosti prometa koji se redovito prikupljaju i objavljuju u Hrvatskoj pokazuju porast broja prometnih nesreća na kružnim raskrižjima u posljednjih 8 godina što je očekivano s obzirom na na intenzivnu implementaciju raskrižja ovoga tipa u tom periodu. Broj prometnih nesreća na kružnim raskrižjima je tako 2022. godine bio za 35% veći nego 2016. godine, u istom periodu broj poginulih je varirao između 0 i 3 godišnje [5].

Tzv. „before-after" studije koje su provedene sustavno na velikom broju kružnih raskrižja u drugim zemljama Europske unije i u SAD-u bazirane su u velikom dijelu na analizi prometnih nesreća, a kroz studije su identificirani različiti parametri prema kojima se može pratiti prije svega sigurnost odvijanja prometa na kružnim raskrižjima [6]. Pokazalo se da se parametri koji utječu na sigurnost prometa na kružnim raskrižjima mogu grupirati u prometne, geometrijske i parametre okoliša. Radi se o parametrima koji se prikupljaju na stvarnim lokacijama kružnih raskrižja u duljem periodu [7].

Kao mogući alat za analizu funkcioniranja kružnih raskrižja nakon izvedbe s ciljem utvrđivanja postizanja očekivanih efekata implementacije kružnog raskrižja te kako bi se analizirali mogući scenariji povećanja prometna u budućnosti koriste se i prometne mikrosimulacije. Brojni su primjeri korištenja modela prometnih mikrosimulacija u kojima se efikasno analizira funkcioniranje kružnih raskrižja, u odnosu na druge moguće tipove raskrižja (semaforizirana, nesemaforizirana), kroz analizu prosječne duljine čekanja, duljine repova, operativnih brzina, zagađenja i sl. [8,9].

Modeli prometnih mikrosimulacija za izvedena kružna raskrižja temeljeni na stvarnim pokazateljima odvijanja prometa (količina, struktura, brzina) prikupljeni na lokacijama izvedenih kružnih raskrižja omogućavaju vrlo realnu procjenu funkcioniranja kružnog raskrižja i identificiranje mogućnosti za unaprjeđenje teorije i prakse projektiranja kružnih raskrižja.

Na širem području Grada Rijeke je posljednjih 8 godina izgrađeno preko 20 kružnih raskrižja samo na kategoriji županijskih (regionalnih) cesta. Raskrižja su locirana na rubovima ili unutar urbanog prostora manjih gradova i općina u pravilu sa dvojakim ciljem – kontrole brzine i smanjenja broja prometnih nesreća te osiguravanje povoljnih uvjeta odvijanja prometa u smislu kapaciteta. Dio raskrižja je rekonstruiran na mjestu prethodnog nesemaforiziranog raskrižja u razini dok se dijelom radi o novim lokacijama raskrižja. U ovome radu je prezentirana detaljna analiza jednog od rekonstruiranih raskrižja – urbanog kružnog raskrižja vanjskog radijusa 15 m. Glavni razlog rekonstrukcije ovoga raskrižja je bila velika brzina koja se na mjestu priključka sporednih smjerova (iz stambenog naselja i trgovačke zone) te očekivano povećanje prometa sa sporednih smjerova dogradnjom objekata trgovačke namjene i onih za stanovanje. Na raskrižju su provedena mjerenja brzine i količine prometa prije i nakon rekonstrukcije u kružno raskrižje te je moguć uvid u vremensku distribuciju prometa i brzina unutar 24 sata. Za predmetno raskrižje su izrađeni modeli prometne mikrosimulacije (VISSIM) analizirane su obje varijante raskrižja u postojećim uvjetima prema stvarnim podacima i budućim – pretpostavljenim uvjetima kroz pokazatelje razine uslužnosti, utjecaja na okoliš te sigurnosti – brzine.

Cilj istraživanja je usporediti obje varijante izvedbe raskrižja na mjestu na kojem raskrižje treba optimalno zadovoljiti potrebe tranzitnog i ishodišno-odredišnog prometa odnosno mora optimalno zadovoljiti funkciju kapaciteta i sigurnosti odvijanja prometa u planiranom projektnom periodu/uz očekivane promjene u prometnim tokovima.

2. METODOLOGIJA

2.1. Opis lokacije

Za potrebe prikupljanja podataka i daljnje analize odabrano je kružno raskrižje na županijskoj cesti u neposrednoj blizini grada Rijeke, koje je 2021.godine rekonstruirano iz klasičnog nesemaforiziranog raskrižja u jednotračno kružno raskrižje. Prije rekonstrukcije, radilo se o nesemaforiziranom četverokrakom raskrižju, na kojem je glavni smjer (na Slici 1 smjer 1-3 i 3-1) bio značajno prometno opterećeniji od sporednih.

Slika 1: *Odabrano raskrižje za analizu: prije rekonstrukcije - klasično nesemaforizirano (lijeva slika) i nakon rekonstrukcije - kružno raskrižje (desna slika)*

U užoj zoni raskrižja, privoz 1 i 3 su bili trotračni privozi, s po 2 trake dovoza (zasebna traka za lijeve skretače te kombinirana traka za smjer ravno i desno) i 1 trakom odvoza. Sporedni privozi su bili dvotračni, s po jednom trakom dovoza i odvoza. Pješački prijelazi postojali su na 3 od 4 privoza raskrižju. Na privozu 1 glavnog pravca postojale su autobusne stanice s ugibalištem (i na dovozu i na odvozu), često zauzete parkiranim vozilima. Na dovozima 1 i 3 glavnog pravca postojale su optičke bijele crte upozorenja kao mjera smirenja prometa.

Nakon rekonstrukcije, sva 4 privoza kružnom raskrižju su dvotračna dvosmjerna, a primjenjeni geometrijski elementi kružnog raskrižja prikazani su u Tablici 1. Iznimka je privoz 2 na kojem postoji kratki by-pass koji omogućuje desno skretanje iz 2-1, bez ulaska u kružno raskrižje. Na privozu 1 zadržane su pozicije autobusnih stajališta s ugibalištem. Na kružnom raskrižju dodan je i pješački prijelaz na privozu 2, koji kod klasičnog nesemaforiziranog raskrižja nije postojao.

Tablica 1. *Geometrijski elementi kružnog raskrižja*

privozi raskrižja	oznaka	1	2	3	4
vanjski radijus kružnog raskižja [m]	R_v			15	
širina kružnog kolnika [m]	u			6.5	
širina ulaza [m]	e_{ul}	5.2	5.6	5.6	4.7
ulazni radijus [m]	R_{ul}	12.5	12.6	18	
širina izlaza [m]	e_{iz}	6.5	4.9	6.5	4.5
izlazni radijus [m]	R_{iz}	-	15	11.1	18.5
radijus središnjeg otoka (uključujući i povozni dio) [m]	R_s	8.5	8.5	8.5	8.5
širina povoznog dijela središnjeg otoka [m]	t	2	2	2	2
kut ulaza [°]	ϕ	42	22	38	46
defleksija [m]	d	6.7	6.9	7	6.3

2.2. Terenska mjerenja

Na raskrižju su provedena terenska mjerenja kojima su prikupljeni podaci o prometnom opterećenju i operativnim brzinama u zoni raskrižja, prije rekonstrukcije raskrižja isključivo na glavnom pravcu, a nakon rekonstrukcije u kružno raskrižje na svim privozima raskrižja.

Terenska su mjerenja provedena pomoću brojača prometa (Datacollect SRD), postavljenih ili na stup ulične rasvjete ili na stup prometnog znaka, čime je osigurano minimalno ometanje prometnog toka.

Prije rekonstrukcije, brojači su postavljeni na glavnom pravcu na udaljenostima 40-50 m od ulaza u nesemaforizirano raskrižje. Nakon rekonstrukcije, mjerenje je ponovljeno na istim tim pozicijama te dodatno

na neposrednim ulazima u kružno raskrižje (udaljenost do 15 m od zaustavne linije). Ovako ponovljena mjerenja (na udaljenostima 40-50 m od ulaza u raskrižje) omogućila su usporedbu operativnih brzina i prometnog opterećenja prije i nakon rekonstrukcije. Dodatno postavljeni brojači prometa na neposrednim ulazima/izlazima iz kružnog raskrižja omogućili su provjeru potencijalnog smanjenja brzine ulaskom/izlaskom iz kružnog raskrižja.

Slika 2: *Pozicije mjerenja operativnih brzina na primjeru privoza 1 raskrižja.*

U nastavku, u Tablici 2 prikazani su podaci o prometnom opterećenju i operativnim brzinama prije i nakon rekonstrukcije raskrižja.

Tablica 2. *Prometno opterećenje i operativne brzine na raskrižju prije i nakon rekonstrukcije*

privozi raskrižja		1	2	3	4
dnevno prometno opterećenje prije rekonstrukcije [voz/dan]	ulaz	4677	nije mjereno	4040	nije mjereno
	izlaz	4074	nije mjereno	4934	nije mjereno
dnevno prometno opterećenje nakon rekonstrukcije [voz/dan]	ulaz	4944	1023	4380	272
	izlaz	3587	1909	6188	974
vršno jutarnje opterećenje nakon rekonstrukcije (7h -8h) [voz/sat]	ulaz	420	36	292	35
	izlaz	241	122	542	39
noćno opterećenje nakon rekonstrukcije (00h-6h) [voz]	ulaz	87	9	68	3
	izlaz	56	39	106	8
prilazna brzina prije rekonstrukcije [km/h]	V85 - 24 h	76	nije mjereno	78	nije mjereno
prilazna brzina nakon rekonstrukcije [km/h]	V85 - 24 h	75	nije mjereno	59	36
	V85 - JVS	74	nije mjereno	58	36
	V85 - noćni period	77	nije mjereno	66	41
odlazna brzina prije rekonstrukcije [km/h]	V85 - 24 h	78	nije mjereno	77	nije mjereno
odlazna brzina nakon rekonstrukcije [km/h]	V85 - 24 h	75	nije mjereno	56	38
	V85 - JVS	75	nije mjereno	55	39
	V85 - noćni period	85	nije mjereno	62	43
ulazna brzina [km/h]	V85 - 24h	50	43	62	44
	V85 - JVS	49	42	61	44
	V85 - noćni period	53	64	70	45
izlazna brzina [km/h]	V85 - 24h	55	44	58	45
	V85 - JVS	55	45	57	45
	V85 - noćni period	58	47	62	49

Osim terenskih mjerenja, pribavljene su podloge izvedenog stanja raskrižja, prije i nakon rekonstrukcije, na kojima je bilo moguće odrediti vrijednosti primijenjenih geometrijskih elemenata.

2.3. Mikrosimulacijsko modeliranje

Primjenom mikrosimulacijskog modeliranja napravljeni su modeli raskrižja prije (klasično raskrižje) i nakon rekonstrukcije (jednotračno kružno raskrižje), a efekti rekonstrukcije analizirani su za izbrojano prometno opterećenje i za povećanje prometnog opterećenja jutarnjeg vršnog sata, kako bi se utvrdila funkcionalnost oba tipa raskrižja u izmijenjenim prometnim uvjetima. Analiziran je utjecaj povećanja prometnog opterećenja za 50% za privoze 1 i 3 i 100% za privoze 2 i 4 jer se na privozima 2. i 4. očekuje dogradnja stambenih, donosno, trgovačkih kapaciteta koja će uvjetovati povećanje prometa na trenutno značajno manje opterećenim smjerovima.

Analiza efekata rekonstrukcije na pokazatelje prometnog toka, zagađenje i potrošnju goriva, napravljena je primjenom mikrosimulacijskog prometnog modeliranja. Zbog stohastičke prirode prometnog toka analizirano je deset različitih scenarija nailaska vozila za isto prometno opterećenje. Zbog usporedivosti rezultata analizirano je istih 10 scenarije nailaska vozila za raskrižja prije i nakon rekonstrukcije, a to je postignuto istom početnom vrijednošću generatora slučajnih brojeva (42) i istim inkrementom (10). Odabrani pokazatelji usporedbe i ocjene opisani su u tablici 3.

Tablica 3. *Odabrani pokazatelji za ocjenu efekata rekonstrukcije*

Pokazatelj	Jedinica	Opis
Q_{LEN}	m	dužina kolone vozila je srednja dužina kolone vozila u odabranom vremenskom intervalu (uključujući i intervale bez kolone vozila) koja se pojavljuje u simulaciji raskrižja (svih privoza), a simuliraju se prometni uvjeti vršnog opterećenja u trajanju od 3600 sekundi
$Q_{LEN\ max}$	m	maksimalna dužina kolone vozila je najveća kolona vozila koja se pojavljuje u simulaciji raskrižja (svih privoza), a simuliraju se prometni uvjeti vršnog opterećenja u trajanju od 3600 sekundi
Kašnjenja	s/voz	ukupni prosječni vremenski gubitci po vozilu su vremenski gubitci uzrokovani svim utjecajnim parametrima, kao što su prometno opterećenje, struktura, vrsta konfliktnih tokova, prometna regulacija, vrijeme reakcije prometnih sudionika, dinamički uvjeti svakog entiteta (brzina vožnje, ubrzanje, usporenje, brzina pješaka), sigurnosni razmak, utjecaj infrastrukturnih elemenata i dr.
STOPS	broj	prosječni broj zaustavljanja svakog vozila u prometnom toku koje je uzrokovano prometnim uvjetima, regulacijom prometa, konfliktnim tokovima i dr.
STOP Delay	s/voz	prosječni vremenski gubitci po vozilu uzrokovani zaustavljanjem, su mjera složenosti pojedinih prometnih situacija i interakcija
Razina usluge	kategorija	razina uslužnosti iskazana kategorijski od A do F je kvalitativan pokazatelj prometnih uvjeta i rangiran je u šest razina, pri čemu su uvjeti odvijanja prometa razine A najbolji i sukladni su kretanju vozila u slobodnom toku, a razina F praktično znači stajanje ili vrlo sporo forsirano kretanje u koloni vozila. Temelj za ocjenu razine uslužnosti je koristički orjentiran parametar iskazan kroz srednje vremenske gubitke
Broj vozila	broj	broj vozila koji je prošao kroz raskrižje u 3600 sekundi. VISSIM se ne drži striktno unesenog prometnog opterećenja, nego odnosa prometnog opterećenja pojedinih privoza i prometnih struja, pa je taj podatak pokazatelj kapaciteta raskrižja
EMISIJA CO	gr/h	emisija ugljikovog oksida za cijelo raskrižje u promatranom vremenu simulacije
EMISIJA NOx	gr/h	emisija dušikovih oksida za cijelo raskrižje u promatranom vremenu simulacije
EMISIJA VOC	gr/h	emisija organskih čestica za cijelo raskrižje u promatranom vremenu simulacije
Potrošnja goriva	US gal lqd	ukupna potrošnja goriva za cjelokupni promet u promatranom vremenu za infrastrukturno rješenje raskrižja

Dinamički pokazatelji analizirani su kroz kriterij dolaznih brzina na privozima, a kao kritični dolazni pravci analizirane su brzine privoza 1 i 3, u dvije točke svaki pravac – 70m od raskrižja i ispred pješačkog prijelaza za raskrižja prije i nakon rekonstrukcije i za različitu prometnu potražnju vozila. Napravljene su baze podataka izmjerenih brzina u vremenskom intervalu od 60 sekundi u ukupnom trajanju od 3600 sekundi (1 sat) za svih 10 analiziranih scenarija nailaska vozila za jutarnji vršni sat. Uspoređene su srednje vrijednosti srednje vremenske brzine, iako VISSIM daje mogućnost analize i srednje prostorne (harmonijske) brzine. Za svako infrastrukturno rješenje i prometnu potražnju uspoređemo je 60 podataka srednjih vremenskih brzina, kao aritmetička sredina srednjih vremenskih brzina svih analiziranih scenarija.

Primjenom statističkih alata analiziran je utjecaj rekonstrukcije na dolazne brzine vozila.

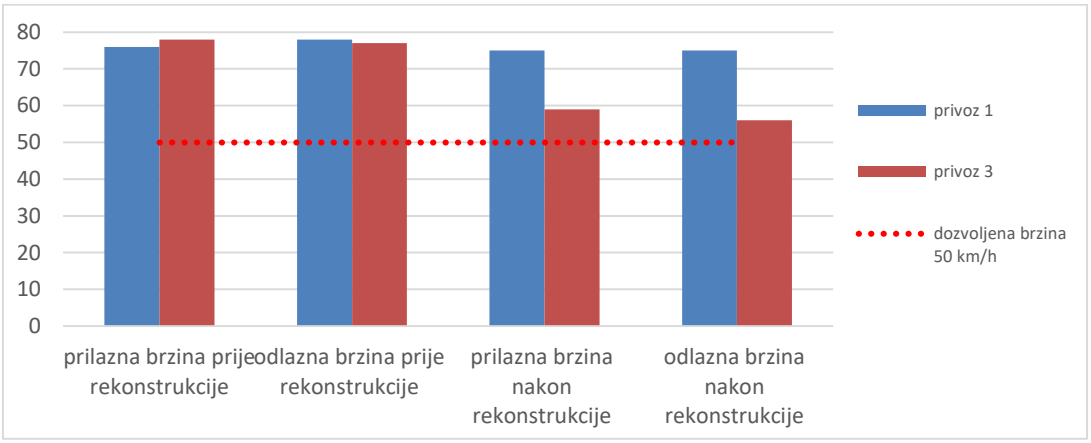
3. REZULTATI

3.1. Rezultati terenskih mjerenja

Na temelju prikupljenih podataka o prometnom opterećenju na raskrižju (Tablica 1), vidljivo je da je ukupno dnevno prometno opterećenje na kružnom raskrižju približno 11.000 voz/dan. Prema primijenjenim geometrijskim elementima, ovo kružno raskrižje spada u grupu malih urbanih kružnih raskrižja, na kojima je očekivana operativna brzina 30 km/h, a okvirni kapacitet do 15.000 voz/dan.

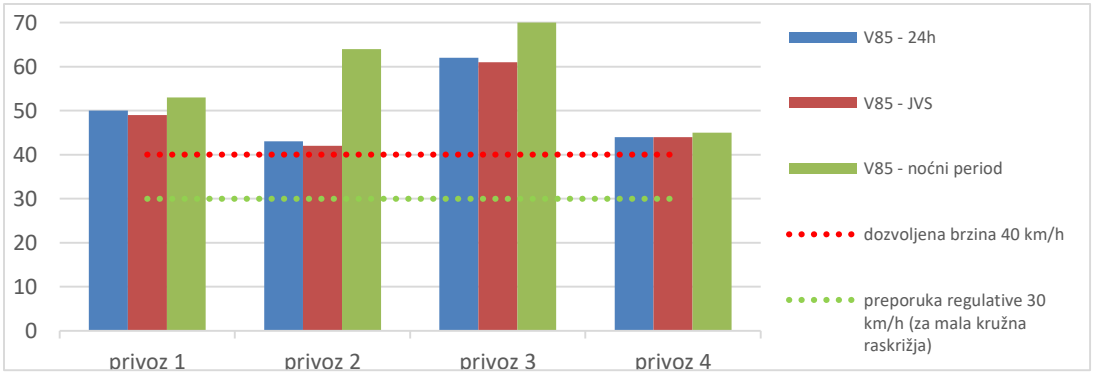
Opterećenje glavnog smjera, i prije rekonstrukcije, a nakon rekonstrukcije i više, značajno premašuje prometno opterećenje sporednog smjera, koje iznosi oko 13% dnevnog opterećenja raskrižja. Za takav odnos prometnih opterećenja glavnog i sporednog smjera nije preporuka primjena kružnog toka, osim ukoliko je na takvoj lokaciji kružni tok opravdan sa aspekta prometne sigurnosti [1].

Podaci o operativnim brzinama na glavnom pravcu na raskrižju, prikazani u Tablici 2 i na Slici 3 pokazuju prekoračenje ograničenja brzine (50 km/h) više od 50% prije rekonstrukcije raskrižja. Rekonstrukcija u kružno raskrižje nije utjecala na smanjenje operativne brzine na privozu 1, koja je i dalje 50% veća u odnosu na ograničenje. Do smanjenja nakon rekonstrukcije je ipak došlo na privozu 3, gdje se operativna brzina smanjila za 32% u odnosu na operativnu brzinu prije rekonstrukcije ali je još uvijek gotovo 20% veća od ograničenja.



Slika 3. *Usporedba operativnih brzina V85 na glavnom pravcu, mjerenih 40-50 m od ulaza u raskrižje*

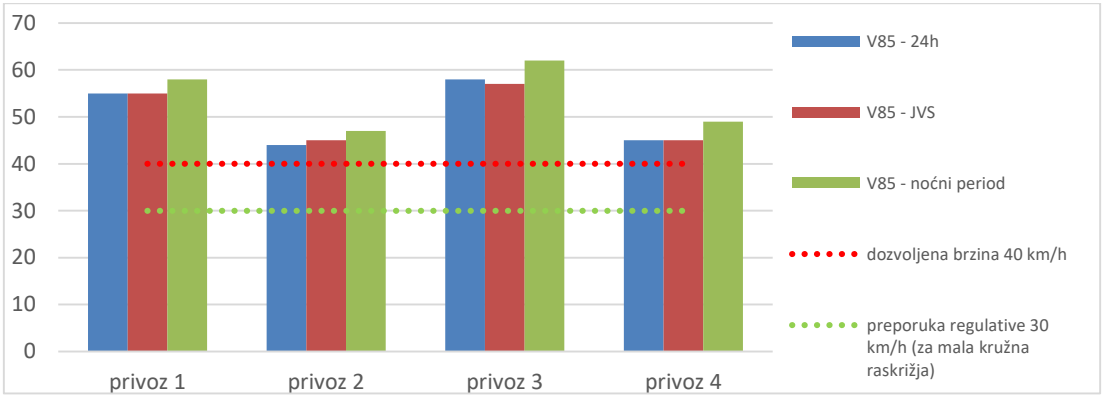
Prema podacima prikazanim na Slici 4 vidljivo je da su brzine ulaska u kružni tok u vršnom satu (V85-JVS) vrlo slične dnevnim brzinama ulaska u kružni tok (V85-24h). Vidljivo je i očekivano povećanje brzine u noćnom razdoblju (V85-noćni period) zbog manjeg prometnog opterećenja (na sva 4 privoza). Postotak tog povećanja je u prosjeku 18%, iako je na jednom od sporednih pravaca zabrinjavajući, čak 49%. Sve prikazane ulazne brzine prekoračuju preporuku 30km/h za operativne brzine na malim kružnim raskrižjima, pa čak i ograničenje brzine u zoni raskrižja od 40km/h.



Slika 4. *Operativne brzine na ulazu u kružno raskrižje*

Slično kao i na ulazu u kružno raskrižje, i brzine na izlazu iz kružnog raskrižja (Tablica 2, Slika 5) su u vršnom satu (V85-JVS) vrlo slične dnevnim brzinama izlaska iz kružnog toka (V85-24h). Povećanje brzine u noćnom razdoblju (V85-noćni period) zbog manjeg prometnog opterećenja (na sva 4 privoza) manje je (u prosjeku je 7%) u odnosu na povećanje brzine koje je prisutno na ulazu. Ipak, kao i kod ulaza u kružno raskrižje, sve

prikazane izlazne brzine prekoračuju preporuku 30km/h za operativne brzine na malim kružnim raskrižjima, te ograničenje brzine u zoni raskrižja od 40km/h.



Slika 5. *Operativne brzine na izlazu iz kružnog raskrižja*

3.2. Rezultati mikrosimulacija

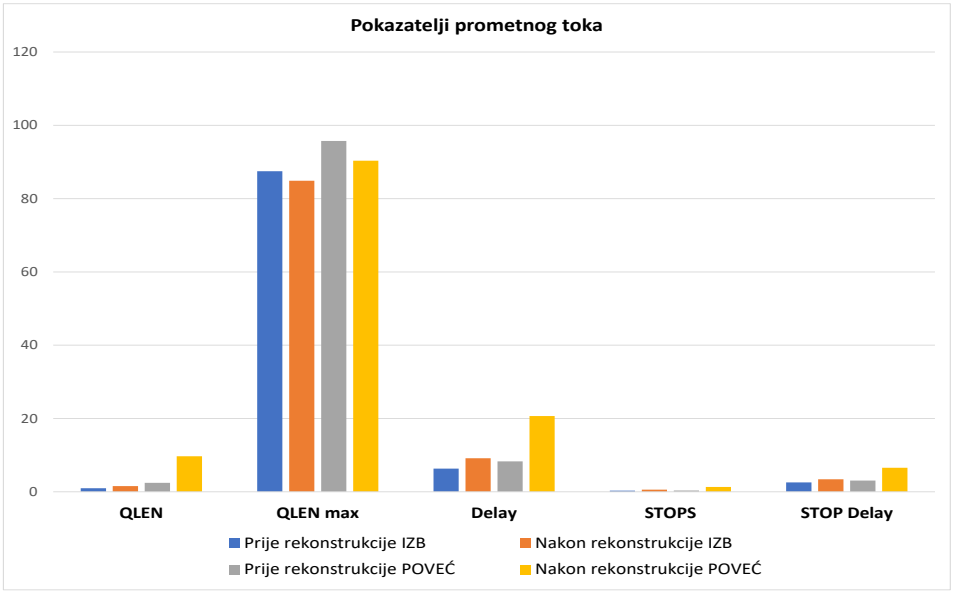
3.2.1. Analiza pokazatelja prometnog toka, aerozagađenja i potrošnje goriva

Usporedba rješenja raskrižja za odabrane pokazatelje za raskrižje prije i nakon rekonstrukcije za izbrojani promet (Prije rekon IZB, Nakon rekon IZB), prije i nakon rekonstrukcije za povećanji promet (Prije rekon POV, Nakon rekon POV) za jutarnji vršni sat, prikazana je u Tablici 4.

Tablica 4. *Usporedba rješenja raskrižja prije i nakon rekonstrukcije prema odabranim parametrima*

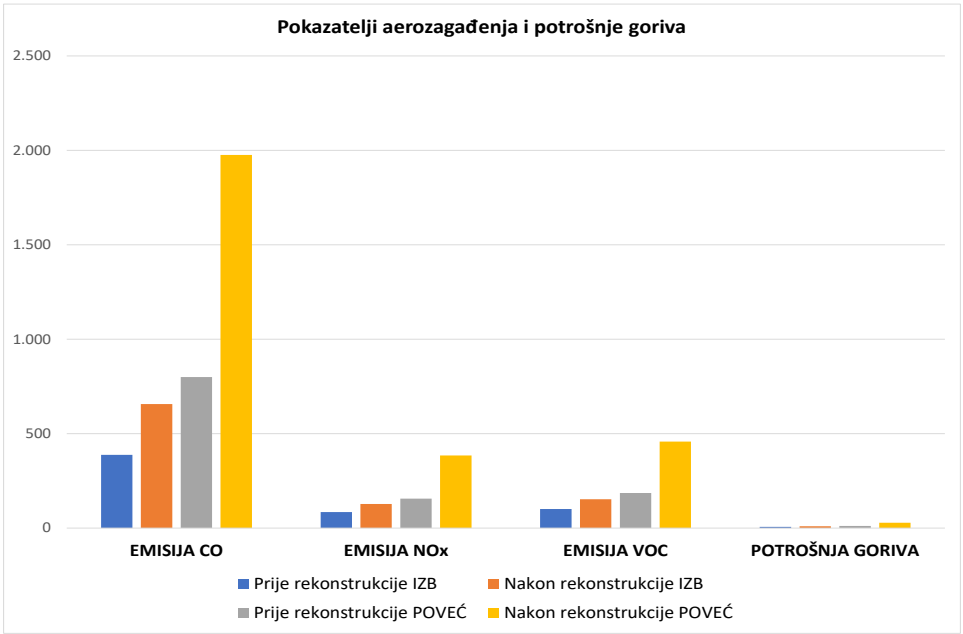
	Prije rekon IZB	Nakon rekon IZB	Prije rekon POV	Nakon rekon POV
PROSJEČNO				
Q_{LEN} [m]	0,63	1,2	1,85	5,99
Q_{LEN} max [m]	63	68,24	90	86,62
Kašnjena [s/voz]	5	8,09	7	16,40
STOPS [broj]	0,22	0,45	0,33	0,99
$STOP_{kašnjenja}$[s/voz]	1,57	2,48	2,35	5,31
Razina usluge	A	A/B	A	C
Broj vozila [broj]	780	777	1203	1195
Emisija CO [gr/h]	388	569,08	728	1522,42
Emisija NOx [gr/h]	75,41	110,72	141,61	296,21
Emisija VOC [gr/h]	89,82	131,89	168,69	352,83
Potrošnja goriva [gal]	5,55	8,14	10,41	21,78
MAKSIMALNO				
Q_{LEN} [m]	0,96	1,55	2,43	9,71
Q_{LEN} max [m]	87,5	84,89	95,74	90,33
Kašnjena [s/voz]	6,32	9,14	8,28	20,65
STOPS [broj]	0,29	0,56	0,36	1,31
$STOP_{kašnjenja}$[s/voz]	2,54	3,41	3,04	6,53
Razina usluge	A	A/B	A/B	C
Broj vozila [broj]	821	820	1249	1242
Emisija CO [gr/h]	388	656,82	799,96	1976,29
Emisija NOx [gr/h]	84,74	127,79	155,64	384,51
Emisija VOC [gr/h]	100,94	152,23	185,40	458,02
Potrošnja goriva [gal]	6,23	9,40	11,44	28,27

Usporedba maksimalnih pokazatelja prometnog toka i maksimalnih pokazatelja zagađenja i potrošnje goriva za različite scenarije nailaska vozila prikazane su na Slikama 6 i 7.



Slika 6. *Maksimalni pokazatelji prometnog toka za analizirane scenarije nailaska vozila*

Analiza maksimalnih pokazatelja prometnog toka je pokazuje jednoznačne rezultate – u varijanti kada je raskrižje riješeno kao kružno prosječna duljina repa i čekanja je za povećano prometno opterećenje veća nego kod standardnog raskrižja u razini. Ovo može biti posljedica toga što kružno raskrižje ne prepoznaje glavni smjer, odnosno, niti jedan prometni tok nema prednost prolaska bez zaustavljanja što je slučaj kod nesemaforiziranih raskrižja u razini.



Slika 7. *Maksimalni pokazatelji zagađenja i potrošnje goriva za analizirane scenarije nailaska vozila*

Usporedba pokazatelja zagađenja i potrošnje goriva za standardno i kružno raskrižje u istim uvjetima pokazuje da oba analizirana tipa nepovoljnije rezultate uslijed postojećeg i povećanog prometnog opterećenja na kružnom raskrižju. Posebno su efekti izraženi na kružnom raskrižju gdje značajno raste emisija CO, NOx i VOC.

3.2.2. Analiza brzina

U okviru rada napravljena je statistička analiza i usporedba brzina za jutarnji vršni sat i za sve četiri promatrane točke mjerenja brzina, a to su točke koje su udaljene 70 m od raskrižja i ispred pješačkih prijelaza privoza 1 i 3, prije i poslije rekonstrukcije i za izbrojani i povećani promet.

Pristupni pravac 1

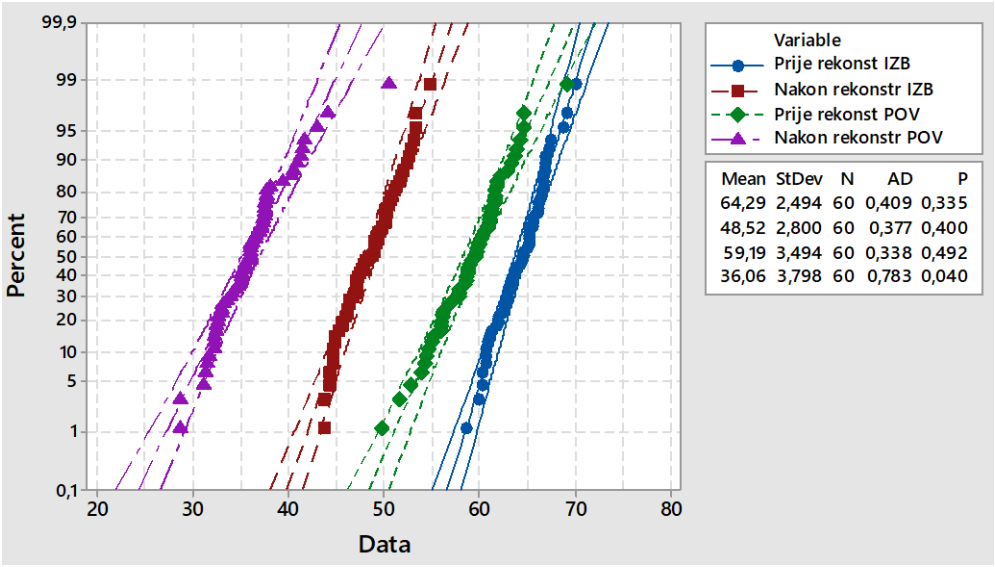
U Tablici 5 prikazani su osnovni statistički pokazatelji usporedbe raskrižja prema kriteriju dolaznih brzina, prije i poslije rekonstrukcije za postojeći i povećani promet za obje promatrane točke prikupljanja podataka – 70m od raskrižja i ispred pješačkog prijelaza.

Napravljena je provjera da li podatci slijede normalnu raspodjelu, primjenom Anderson-Darling testa, a nulta hipoteza je da podatci slijede normalnu raspodjelu i usvojeni prag značajnosti je 0,05. Rezultati su prikazani na Slici 8 i 9, te u Tablici 5.

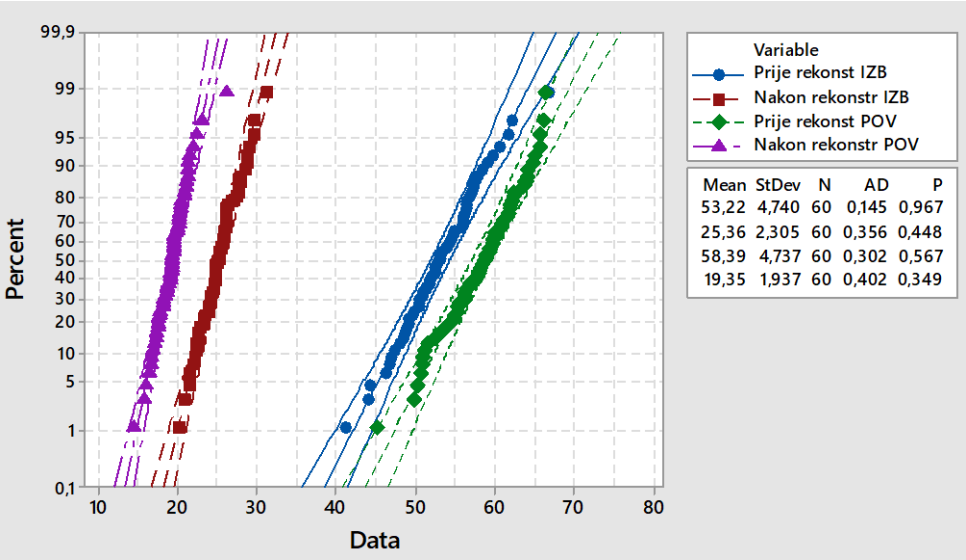
Tablica 5. *Deskriptivna statistika za privoz 1*

	N	Mean	StDev	Min	Max	Median	A-D	p
				70m od raskrižja				
Prije rekonst IZB	60	64,29	2,49	58,56	70,20	64,55	0,409	0,335
Nakon rekonstr IZB	60	48,52	2,80	43,68	54,82	48,71	0,377	0,400
Prije rekonst POV	60	59,19	3,49	49,81	69,09	56,51	0,338	0,492
Nakon rekonstr POV	60	36,06	3,80	28,68	50,50	33,14	0,783	0,040
				Ispred pješačkog prijelaza				
Prije rekonst IZB	60	53,22	4,74	41,38	66,96	53,17	0,145	0,967
Nakon rekonstr IZB	60	25,36	2,31	20,33	31,34	25,16	0,356	0,448
Prije rekonst POV	60	58,39	4,74	45,27	66,46	58,83	0,302	0,567
Nakon rekonstr POV	60	19,34	1,94	14,56	26,31	19,33	0,402	0,349

Grafikoni vjerojatnosti za sve četiri grupe podataka prikazani su na Slikama 8 i 9.



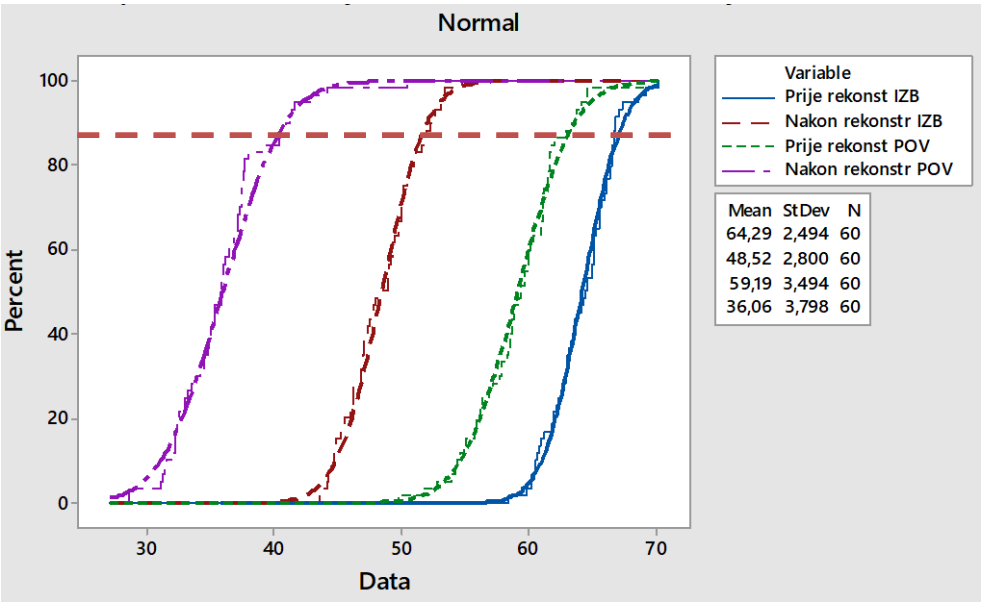
Slika 8. *Dijagram vjerojatnosti za sve grupe podataka za privoz 1, 70 m prije raskrižja*



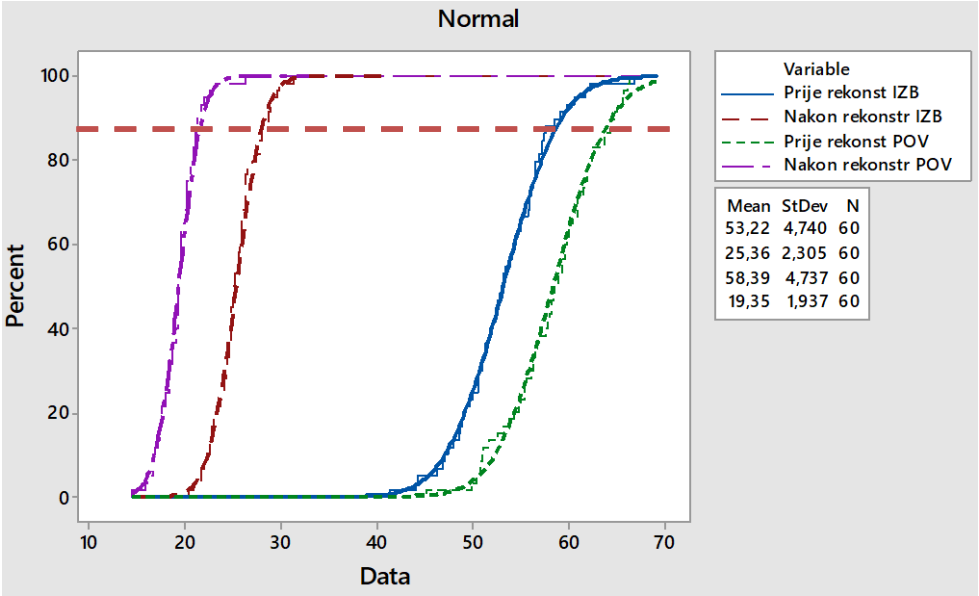
Slika 9. *Dijagram vjerojatnosti za sve grupe podataka za privoz , ispred pješačkog prijelaza*

Sukladno rezultatima Anderson-Darling testa hipoteza o normalnoj raspodjeli podataka ne može se odbaciti.

Normalizirani dijagram kumulativne raspodjele brzina sa obilježenim 85-tim percentilom V_{85} prikazan je na Slikama 10 i 11. Brzine su prikazane u km/h.



Slika 10. *Normalizirana kumulativna raspodjela brzina za sve četiri grupe podataka, 70m od raskrižja*



Slika 11. *Normalizirana kumulativna raspodjela brzina za sve četiri grupe podataka, ispred pješačkog prijelaza*

Za provjeru statistički značajne razlike između brzina prije i poslije rekonstrukcije za izbrojani i povećani promet napravljen je t-test. Nulta hipoteza je da ne postoji statistički značajna razlika između brzina prije i poslije rekonstrukcije, a alternativna hipoteza je da je razlika statistički značajna. Usvojeni prag značajnosti je 0,05. Rezultati za izbrojani i povećani promet prikazani su u Tablici 6.

Tablica 6. *Rezultati t-testa za privoz 1*

	70 m od raskrižja		ispred pješačkog prijelaza	
	t-test	p-vrijednost	t-test	p-vrijednost
Izbrojani promet	32,57	0,000	40,95	0,000
Povećani promet	34,73	0,000	59,09	0,000

Sukladno rezultatima prikazanim u Tablici 6, brzine se prije i nakon rekonstrukcije statistički se značajno razlikuju za oba prometna opterećenja.

Pristupni pravac 3

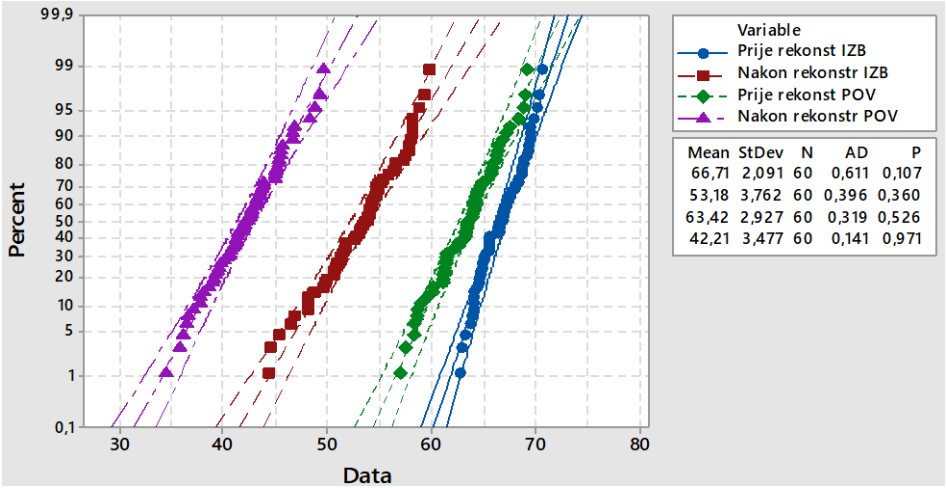
U Tablici 7 prikazani su osnovni statistički pokazatelji usporedbe raskrižja prema kriteriju dolaznih brzina, prije i poslije rekonstrukcije za postojeći i povećani promet za obje promatrane točke prikupljanja podataka.

Provjera raspodjele podataka napravljena je istim testom, sa istom nultom hipotezom i pragom značajnosti kao za privoz 1. Rezultati su prikazani na Slikama 12 i 13 i u Tablici 7.

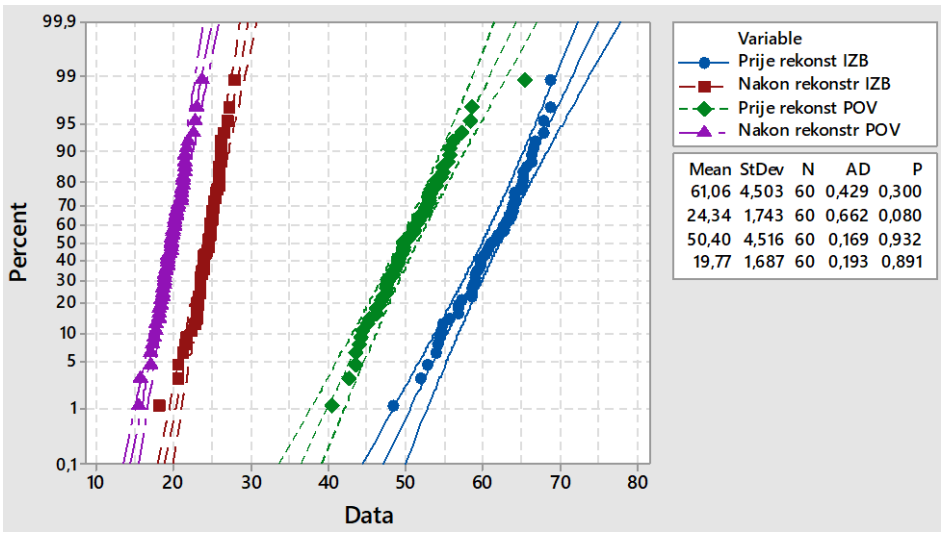
Tablica 7. *Deskriptivna statistika za brzine za privoz 3*

	N	Mean	StDev	Min	Max	Median	A-D	p
				70m od raskrižja				
Prije rekonst IZB	60	66,71	2,09	62,84	70,66	66,79	0,611	0,107
Nakon rekonstr IZB	60	53,18	3,76	44,31	59,84	53,74	0,396	0,360
Prije rekonst POV	60	63,42	2,93	57,04	69,17	63,57	0,319	0,526
Nakon rekonstr POV	60	42,21	3,48	34,55	49,73	42,31	0,141	0,971
				Ispred pješačkog prijelaza				
Prije rekonst IZB	60	61,06	4,50	48,47	68,82	61,16	0,429	0,300
Nakon rekonstr IZB	60	24,34	1,74	18,22	27,92	24,66	0,662	0,080
Prije rekonst POV	60	50,40	4,52	40,54	65,38	49,77	0,169	0,932
Nakon rekonstr POV	60	19,77	1,69	15,57	23,69	19,76	0,193	0,891

Grafikoni vjerojatnosti za sve četiri grupe podataka prikazani su na Slikama 12 i 13.



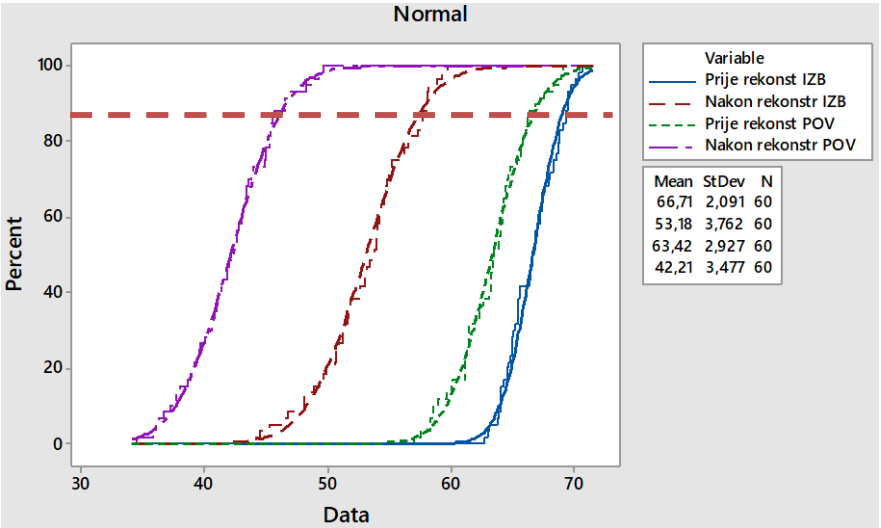
Slika 12. *Dijagram vjerojatnosti za sve grupe podataka za privoz 3, 70 m od raskrižja*



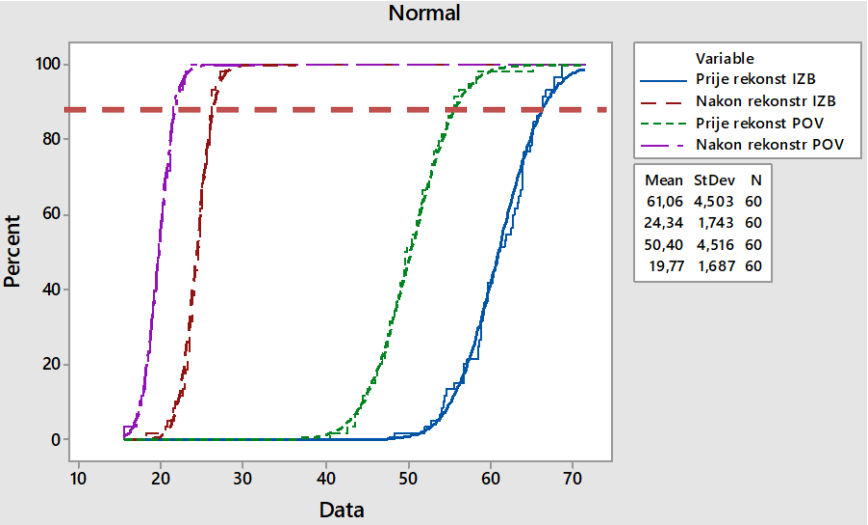
Slika 13. *Dijagram vjerojatnosti za sve grupe podataka za privoz , ispred pješačkog prijelaza*

Sukladno rezultatima Anderson-Darling testa hipoteza o normalnoj raspodjeli podataka ne može se odbaciti.

Normalizirani dijagram kumulativne raspodjele brzina sa obilježenim 85-tim percentilom V_{85} prikazan je na Slikama 14 i 15. Brzine su prikazane u km/h.



Slika 14. *Normalizirana kumulativna raspodjela brzina za sve četiri grupe podataka, 70 m od raskrižja*



Slika 15. *Normalizirana kumulativna raspodjela brzina za sve četiri grupe podataka, ispred pješačkog prijelaza*

Za provjeru statistički značajne razlike između brzina prije i poslije rekonstrukcije za izbrojani i povećani promet napravljen je t-test. Nulta hipoteza je da ne postoji statistički značajna razlika između brzina prije i poslije rekonstrukcije, a alternativna hipoteza je da je razlika statistički značajna. Usvojeni prag značajnosti je 0,05. Rezultati za izbrojani i povećani promet prikazani su u Tablici 8.

Tablica 8. *Rezultati t-testa za privoz 3*

	70 m od raskrižja		ispred pješačkog prijelaza	
	t-test	p-vrijednost	t-test	p-vrijednost
Izbrojani promet	24,35	0,000	19,77	0,000
Povećani promet	36,15	0,000	49,22	0,000

Sukladno rezultatima prikazanim u Tablici 8, brzine se prije i nakon rekonstrukcije statistički značajno razlikuju za oba prometna opterećenja.

4. DISKUSIJA I ZAKLJUČAK

U radu je prikazana analiza odabrane lokacije raskrižja izvedenog kao četverokrako nesemaforizirano raskrižje u razini prije rekonstrukcije i nakon rekonstrukcije u kružno raskrižje. Raskrižje je rekonstruirano prema postavkama iz hrvatskih Smjernica za projektiranje kružnih raskrižja na državnim cestama koje su na snazi 10-tak godina.

Prikazani su podaci o stvarno izmjerenim brzinama prije i nakon rekonstrukcije raskrižja te je na temelju stvarnih podataka o količini i brzini prometa na lokaciji izrađen model prometne mikrosimulacije (VISSIM) za oba tipa raskrižja.

Iz stvarno izmjerenih podataka operativne brzine (V_{85}) na prilazu te ulazu i izlazu iz kružnoga raskrižja može se zaključiti da implementacija kružnog raskrižja nije dovela do očekivanog efekta utjecaja na brzinu kretanja vozila. Brzina se do neke mjere smanjila no i dalje je značajno iznad dozvoljene. Posebno su zabrinjavajuće brzine koje se postižu noću kada je količina prometa vrlo mala te vozači mogu kroz kružno raskrižje proći neovisno o drugim vozilima i kada na kretanje vozila utječe samo oblikovanje raskrižja. Pokazuje se da vozači tada biraju ravniju putanju prolaza i razvijaju izrazito velike brzine.

Izrađeni modeli u VISSIMU-u su poslužili analizi postojeće situacije te potencijalne situacije u kojoj dolazi do povećanja količine prometa. Imajući u vidu da su brzine jutarnjeg vršnog sata (V_{85}-JVS) vrlo slične brzinama mjerenim u 24 sata (V_{85}- 24h) modelirane su brzine za mjerodavni vršni sat. Rezultati dobiveni modelom se razlikuju od onih izmjerenih na terenu i pokazuju značajan efekt kružnog raskrižja na smanjenje brzine kretanja (V_{85}) prije i na ulazu u kružno raskrižje. Navedeno se može tumačiti time što VISSIM model unatoč stohastičkoj prirodi simulacija na kojoj se temelji ne uzima u obzir mogućnost vožnje mimo pravila kretanja kružnim raskrižjem. Naime zakrivljenost trajektorije kretanja koja utječe na razvoj brzine kada vozilo nema smetnju u

vidu drugog vozila unutar kružnog toka je u VISSIM modelu uvijek unutar dozvoljenih granica dok u stvarnosti vozači svoj put kroz raskrižje mogu ostvariti korištenjem povoznog dijela središnjeg otoka te tako proći kraće i brže. VISSIM je koncipiran na principu izbjegavanja pogreške, kako u konfliktnoj zoni, tako i u pravilima vožnje i zadanim brzinama. Zadana brzina u VISSIM-u je medijana raspodjele, ali ne uključuje situaciju da 50% vozača vozi brže od administrativno zadane brzine. To je potrebno imati na umu, kao i lokalne specifičnosti, kada se analiziraju rezultati mikrosimulacija. Kod analize varijatnih rješenja obično nije potrebna kalibracija modela, ali u nastavku istraživanja, usporedba varijatnih rješenja planira se napraviti kalibriranim modelom za specifične uvjete vožnje na promatranom raskrižju.

Model izrađen u VISSIM-u je ukazao i na problem raskrižja na kojima postoji izrazito istaknut glavni smjer jer kod standardnih raskrižja takav – glavni smjer ima prednost prolaska bez zaustavljanja što na kružnom raskrižju nije slučaj zbog čega je njihovo čekanje i posljedično razina uslužnosti lošija. Rezultati usporedbe pokazatelja prometnog toka, aerozagađenja i potrošnje goriva prije i nakon rekonstrukcije su očekivani.

Navedeno upućuje na potrebu detaljnije analize stvarnih uvjeta odvijanja prometa na kružnim raskrižjima u projektnoj fazi i nakon njihove izgradnje, imajući u vidu lokalne specifičnosti prometne mreže, načina vožnje i ciljeve rekonstrukcije.

Literatura

[1] Deluka-Tibljaš, A., Tollazzi, T., Barišić, I., Babić, S., Šurdonja, S., Renčelj, M., & Pranjić, I. (2015). Smjernice za projektiranje kružnih raskrižja na državnim cestama. Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci.

[2] Kozić, M., Šurdonja, S., Deluka-Tibljaš, A., Karleuša, B., & Cuculić, M. (2017). Criteria for urban traffic infrastructure analyses–case study of implementation of Croatian Guidelines for Rounabouts on State Roads. Road and Rail Infra-structure IV.

[3] De Brabander, B., Nuyts, E., & Vereeck, L. (2005). Road safety effects of roundabouts in Flanders. Journal of Safety Research, 36(3), 289-296.

[4] Ambros, J., Novák, J., Borsos, A., Hóz, E., Kieć, M., Machciník, Š., & Ondrejka, R. (2016). Central European comparative study of traffic safety on roundabouts. Transportation research procedia, 14, 4200-4208.

[5] Ministarstvo unutarnjih poslova RH: Bilten o sigurnosti cestovnog prometa 2016., 2022. https://mup.gov.hr/pristup-informacijama-16/statistika-228/statistika-mup-a-i-bilteni-o-sigurnosti-cestovnog-prometa/bilteni-o-sigurnosti-cestovnog-prometa/287330, 10.2.2024.

[6] Gross, F., Lyon, C., Persaud, B., & Srinivasan, R. (2013). Safety effectiveness of converting signalized intersections to roundabouts. Accident Analysis & Prevention, 50, 234-241.

[7] Riccardi, M. R., Augeri, M. G., Galante, F., Mauriello, F., Nicolosi, V., & Montella, A. (2022). Safety Index for evaluation of urban roundabouts. Accident Analysis & Prevention, 178, 106858.

[8] Bayrak, O. Ü., & Bayata, H. F. (2020, October). Multi-criteria decision-based safety evaluation using microsimulation. In Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Transport (Vol. 173, No. 5, pp. 345-357). Thomas Telford Ltd.

[9] Kłos, M., & Sobota, A. (2019). Performance evaluation of roundabouts using a microscopic simulation model. Zeszyty Naukowe. Transport/Politechnika Śląska, (104), 57-67.

RSA NA LOKALNOM PUTU SA PROMENLJIVIM POPREČNIM PRESEKOM

Riste Ristov[1] Slobodan Ognjenovic[2], Vasko Gacevski[3], Ivona Nedevska - Trajkova[4], Zlatko Zafirovski[5]
[1]Asist. m-r, Univerzitet Sv. Ćirila i Metodija u Skoplju, Građevinski fakultet, ristov@gf.ukim.edu.mk
[2]Van. Prof. d-r Univerziteta Sv. Ćirila i Metodija u Skoplju, Građevinski fakultet, ognjenovic@gf.ukim.edu.mk
[3]Asist. m-r, Univerzitet Sv. Ćirila i Metodija u Skoplju, Građevinski fakultet, gacevski@gf.ukim.edu.mk
[4]Asist. m-r, Univerzitet Sv. Ćirila i Metodija u Skoplju, Građevinski fakultet, nedevska@gf.ukim.edu.mk
[5]Van. Prof. d-r Univerziteta Sv. Ćirila i Metodija u Skoplju, Građevinski fakultet, zafirovski@gf.ukim.edu.mk

Rezime: Revizija bezbednosti na putevima (RSA) je prepoznata kao jedan od najefikasnijih i najisplativijih inženjerskih alata koji mogu da minimiziraju rizik i ozbiljnost posledica saobraćajnih nezgoda koje mogu biti rezultat projekata putne infrastrukture. Predstavlja nezavisnu, formalnu i sistematsku proveru projektne dokumentacije u cilju utvrđivanja problema koji mogu doprineti nastanku saobraćajnih nezgoda ili težim posledicama ukoliko dođe do saobraćajnih nezgoda.
Predmet ovog rada je analiza bezbednosti saobraćaja koja je zabeležena u RSA izveštaju u fazi Projektne dokumentacije za sanaciju i rekonstrukciju kolovoza i trotoara na lokalnom putu od raskrsnice sa R2133 do mosta na Lipkovskom jezeru u opštini Lipkovo.
U radu su istaknute sve nesigurne lokacije iz projektne dokumentacije za put i navedena moguća preporučena poboljšanja za njih. Pored bezbednosnog aspekta, kroz prikazani nivo projektovanja vide se i sve slabosti tehničke dokumentacije koje značajno doprinose lošem kvalitetu performansi.

Ključne reči: *Revizija, bezbednost, puteve, rizik, kolvoz, proektovanje.*

RSA ON LOCAL ROAD WITH VARIABLE CROSS SECTION

Riste Ristov[1] Slobodan Ognjenovic[2], Vasko Gacevski[3], Ivona Nedevska – Trajkova[4], Zlatko Zafirovski[5]
[1]Assist. MSc, University Ss. Cyril and Methodius in Skopje, Faculty of Civil Engineering Skopje, ristov@gf.ukim.edu.mk
[2]Associate professor, University Ss. Cyril and Methodius in Skopje, Faculty of Civil Engineering Skopje, ognjenovic@gf.ukim.edu.mk
[3]Assist. MSc, University Ss. Cyril and Methodius in Skopje, Faculty of Civil Engineering Skopje, gacevski@gf.ukim.edu.mk
[4]Assist. MSc, University Ss. Cyril and Methodius in Skopje, Faculty of Civil Engineering Skopje, nedevska@gf.ukim.edu.mk
[5]Associate professor, University Ss. Cyril and Methodius in Skopje, Faculty of Civil Engineering Skopje, zafirovski@gf.ukim.edu.mk

Abstract: Road safety audit (RSA) is recognized as one of the most effective and cost-effective engineering tools that can minimize the risk and severity of the consequences of traffic accidents that can result from road infrastructure projects. It represents an independent, formal and systematic inspection of project documentation in order to identify problems that can contribute to the occurrence of traffic accidents or more serious consequences if traffic accidents occur.
The subject of this paper is the road safety analysis noted in the RSA report in the Project documentation phase for the rehabilitation and reconstruction of roadway and sidewalk on a local road from the intersection with R2133 to the Lipkovo lake bridge in Lipkovo Municipality.
In the paper, all unsafe locations from project documentation for the road are highlighted and possible recommended improvements are listed for them. In addition to the safety aspect, all the weaknesses in the technical documentation that significantly contribute to poor performance quality can be seen through the level of design shown.

Keywords: Audit, safety, roads, risk, pavement, design.

1. INTRODUTION

[1] Riste Ristov: ristov@gf.ukim.edu.mk

Road safety audit is recognized as one of the most effective and cost-effective engineering tools that can minimize the risk and severity of the consequences of traffic accidents that can result from road infrastructure projects.

A Road Safety Audit (RSA) is an independent, formal and systematic review of project documentation in order to identify problems that may contribute to road accidents or more serious consequences if road accidents occur. Since the Road Safety Audit is carried out in the early phases of the project (project documentation phase, pre-opening phase and/or post-opening phase), it is a proactive measure to improve traffic safety.

In this paper, the Road Safety Audit in the phase of Project documentation for the rehabilitation and reconstruction of carriageway and sidewalk on a local road in the Republic of North Macedonia is elaborated.

The specific questions that arise in relation to safety are grouped into eight groups:

- Road and environment function
- Cross sections
- Geometric stretching of the route
- Intersections
- Public and private services, service facilities and resorts, public transport
- Vulnerable road users
- Traffic signs, markings and road lighting
- Road environment and elements of passive safety

The purpose of this paper is to show the importance and the way of conducting the Road Safety Audit (RSA) in local roads and the possibilities that the responsible parties can apply.

2. LOCATION AND DESCRIPTION OF THE PROJECT SOLUTION

The road is located in the northern part of RN Macedonia near the village of Lipkovo with a length of about 3.5 km. The thoroughfare is partly managed as a city street (1650 m), and partly as a non-urban road, it is in use and has an existing asphalt road structure (1879 m).

After conducting a field survey and recording an updated geodetic base of the road, it was established that the existing width of the thoroughfare is variable, ranging from 4.0-4.5 m, and in certain places up to 5.0 m. The urban section consists of a profile that has sidewalks of variable width on both sides of the roadway. The non-urban profile is characterized by a shoulder with a width of 0.75 m, a gutter of 1.5 m, a berm of about 0.5 m. The road currently provides access to existing residential buildings and to private plots.

The following parameters have been taken as the basic technical elements of the thoroughfare in accordance with the requirements specified in the Project Program:

- Design speed 40 km/h
- Road width 5.00 m (4.50 m)
- Sidewalk width ≈ 1.50 m
- Shoulders with a width of 1.0 m (0.75 m)
- Channels with a width of 0.3 m
- Gutters with a width of 0.5 m
- Pedestrian path on the right side, 700 m long and 2.0 m wide
- Transverse slope in direction and curve - according to existing slopes of the road in question.

The design solution envisages the rehabilitation and reconstruction of the roadway structure by retaining a part of the existing roadway width of 4.50 m (5.0 m). Also, the project solution includes the reconstruction of the sidewalk by widening certain parts where possible with a width of up to 1.5 m, that is, keeping the existing width of sidewalks on sections where there are limiting factors (objects, etc.). There is no provision to change the existing geometry of the local thoroughfare, taking into account the spatial geometric possibilities as well as the existing approaches to buildings.

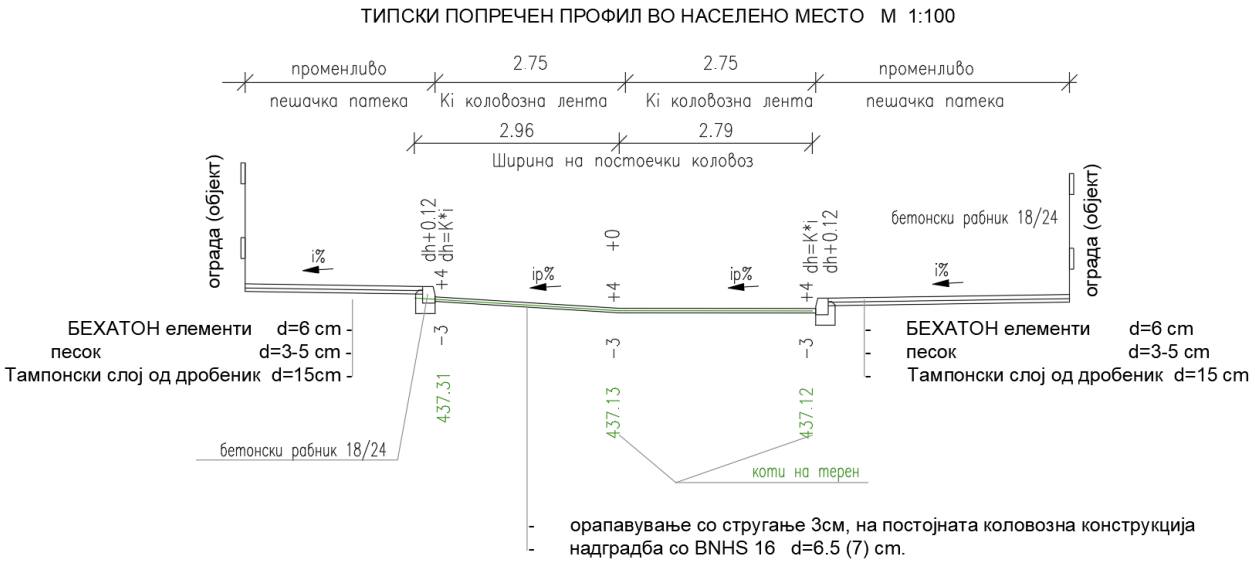


Figure 1. *Typical cross section of the local thoroughfare in urban area*
Source: Author

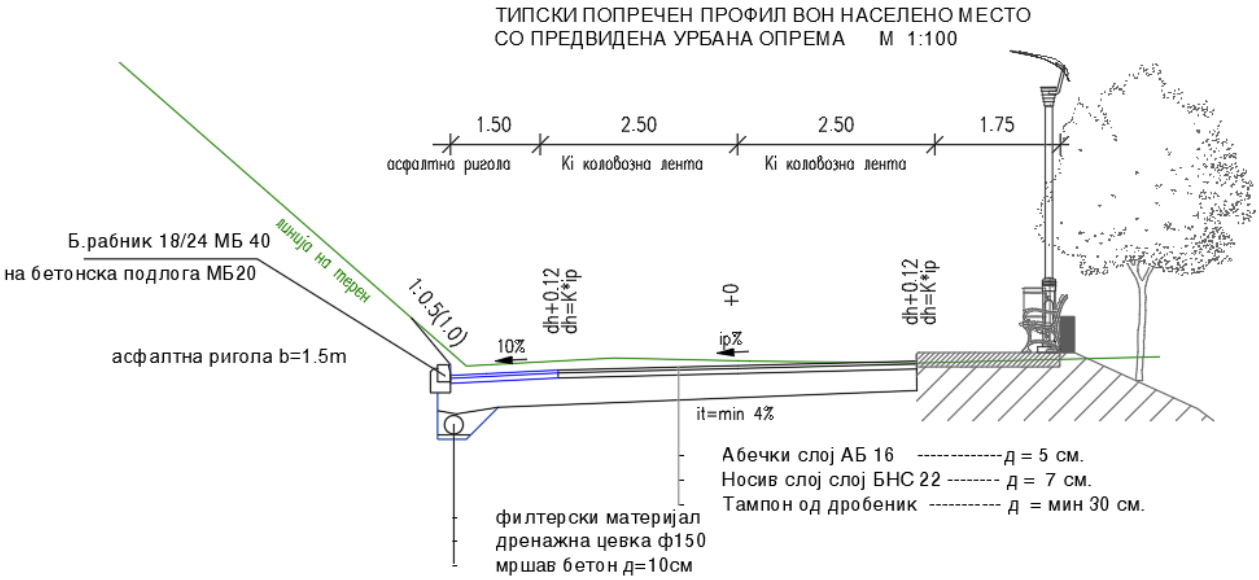


Figure 2. *Typical cross section of the local thoroughfare in non-urban area with planned urban equipment*
Source: Author

3. SPECIFIC QUESTIONS ON ROAD SAFETY

There are more specific questions that are divided into several groups depending on the characteristics.

Function of the road:

- Speed mismatch
  On the section, a mismatch of the permitted speeds was determined in relation to the geometry of the road and the environment in the cross section. Considering the geometry of the road on this section and the current speeds of the vehicles, the consequences of traffic accidents can be serious and light bodily injuries in the case of traffic accidents with pedestrians or minor injuries and material damage in the case of side collisions with other vehicles. The section out of the settlement, on the other hand, is characterized by a geometry (situation, longitudinal and transverse profile) that significantly deviates from the boundary elements according to the rulebook in terms of the calculated speed.

Cross sections:

- Slope protection
  In the non-urban area, there are steep terrain slopes that are not protected. During the inspection of the route, locations were already seen where there is scattered rock material on the roadway.
- Widening of roadway
  Along the length of the non-urban section, there are horizontal curves that do not allow a heavy goods vehicle (HGV) to pass completely into the traffic lane without exiting it. When two vehicles diverge (HGV with HGV, HGV with PV, etc.) from the opposite direction, a side or direct collision is possible, or a complete running of the road is possible.

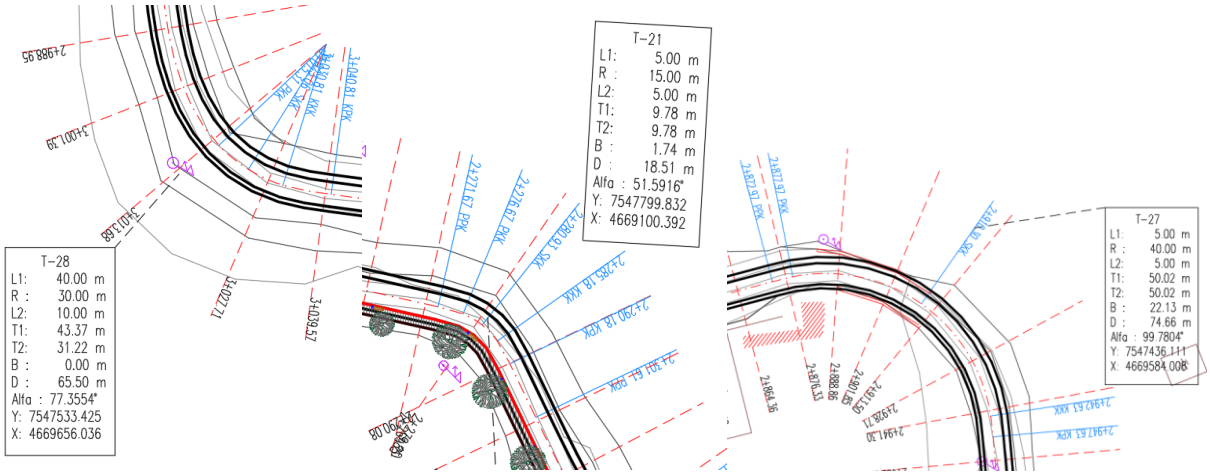


Figure 3. *Locations where there is insufficient diverge width*
Source: Author

Road tracing:

- Hidden curves
  In the project, horizontal curves with a radius of 15 - 70 m are observed, which are located directly behind the vertical convex curves, and which are hardly noticeable for drivers. In this regard, these curves can surprise drivers and affect traffic safety.

Intersections:

- Insufficient visibility in the area of intersections along a city street
  Visibility in the zone of intersections along the street in question may be compromised due to illegal parking of vehicles. In addition to safety problems, illegally parked vehicles hinder the movement of pedestrians on the sidewalk, so they need to move on the roadway.
- Connections to the main street
  Along the entire city street, there are a large number of connections from smaller streets, which are usually the collective exit of several residential houses. All these connections are performed without entry-exit radii and could not be treated as large junctions.

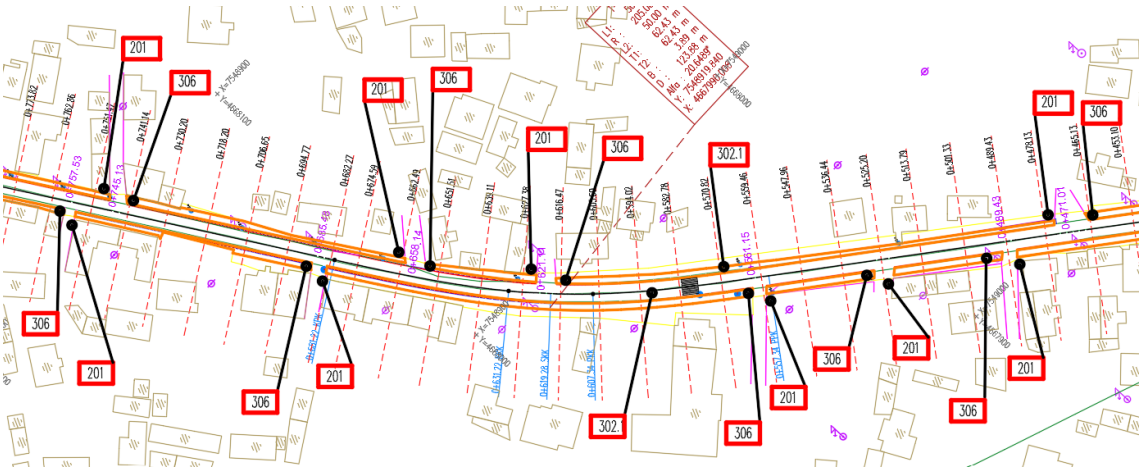


Figure 4. *Connections to the main street*
Source: Author

Vulnerable road users :

- Location of pedestrian crossing and vehicle entrance to school

  It has been noted that the position of a pedestrian crossing remains at the existing position in front of the entrance for vehicles in the school yard, with the fact that the pedestrian crossing is elevated in the projected condition. At this location, there is a possibility of accidents with a vulnerable group of road users resulting in bodily injuries.

Traffic signaling and road lighting:

- Horizontal signaling (edge line in city conditions)

  Along the entire length of the city thoroughfare, an additional white unbroken edge line is provided next to the curbs of the sidewalks. The placement of this line in city conditions additionally, unnecessarily, narrows the traffic lane and thus visually leads the driver to enter in the opposite direction.
- Inadequate marking of overtaking sections

  Overtaking is allowed on about 90% of the length of the non-urban thoroughfare, even in locations where it should not be acceptable. In addition to the inappropriately placed horizontal signaling at the places where it stops, there is no harmonized vertical signaling that will follow each change.

Elements of passive safety:

- Insufficient length of protective fence

  On the non-urban part of the thoroughfare, the fence provided by the technical solution is too short in length and it will not provide sufficient protection for drivers from running off.

Figure 5. *Road profile near the river Kumanovka*
Source: Author

4. MEASURES TO IMPROVE SAFETY

The following is a proposal for construction and traffic works that will contribute to increasing the safety of the road:

- Zonal speed limit to 30 km/h in the rural part, while in the suburban section the speed should be reduced from 50 (40) km/h with an additional speed limit only on the smaller curves according to the radius.
- To lower the slopes to a safe inclination where the collapse would be reduced to the lowest risk, or to protect the slopes from landslides with a galvanized steel mesh.
- To create expansions with an appropriate width according to the road design regulations and for them to make track curves of characteristic types of vehicles that can travel on this local road.
- To envisage traffic signaling that will consist of danger signs (with an additional board for the description of the danger), signs for express orders, notification signs and additional equipment such as convex mirrors for seeing vehicles from the opposite direction.
- Installation of vibrational strips on both sides before the curves with a traffic mirror in order to improve the visibility in the curve zone. In addition, placement of chevrons on the outer side of a curve is also necessary.

- Installation of elastic columns in the area of all intersections on the street in question, which would prevent illegal parking and improve visibility in the area of an intersection.

Figure 6. *An example of placing an elastic column*
Source: Author

- Removal of road signs with the right of way in the connection zone and the signs with code 201 (intersections with road with right of way) to be replaced by signs with STOP and the inscription "STOP" on the roadway.
- Complete planning of the traffic solution of the non-urban thoroughfare, while following the instructions and recommendations from the rulebook and standard for traffic signals. The horizontal signaling should be designed with adequate thickness and correct arrangement of broken lines. Everywhere to determine the length of visibility using determined lengths of lines of sight according to design speed. Analogous to the established overtaking locations, an adequate length of warning line should be applied everywhere. Vertical signaling should fully correspond to the horizontal position of the lines.
- To redesign the technical solution for protective fences and to define fences with an appropriate level of protection and with a length that will cover all dangerous locations on the right side of the road.

5. CONCLUSION

During the design, construction and supervision of roads of a lower rank, there are weaknesses in terms of safety, which result in the endangerment of road users. Despite the standard design rules and regulations regarding roads, safety is often neglected due to administrative or financial reasons. In addition, in RN Macedonia, as well as in other countries in the region, there is a deficiency in the area of the authorizations of civil engineers where there are no restrictions regarding the areas of action and work. This means that anyone can work in any area, regardless of whether their base profession is structural, infrastructure or hydro-construction. Such omissions mostly lead to uncontrolled design, construction and supervision and finally to unsafe roads and a large number of traffic accidents with serious consequences. Because of this, it is necessary to conduct a Road Safety Audit in order to identify all the shortcomings and propose appropriate measures.

In this paper, it is shown how Safety Audit is applied to a local road with a variable cross-section. On the basis of the Project documentation for the rehabilitation and reconstruction of the carriageway and sidewalk of the thoroughfare in the RN Macedonia, more specific safety issues have been elaborated, which are divided into eight groups. For each specific issue, appropriate measures to improve safety are proposed, where the redesign of the protective fences and the traffic solution would cost the most financially. In addition to the specified issues and measures in this paper, others may be added depending on the road itself.

Literature

[1] RSA on main design for rehabilitation and reconstruction of carriageway and sidewalk of local road from connection with R2133 to bridge with Lipkovsko lake L=3.53km in municipality Lipkovo (2023).
[2] Road Traffic Safety Law: Official Gazette of the Republic of Macedonia no. 169/15 and 226/15.
[3] Ministry of Transport & Communications of Macedonia: Rulebook for traffic signs, equipment and road signals (2020)
[4] PESR of NM: Technical instruction vehicles restraint systems application on the state roads in the Republic of North Macedonia (2018)
[5] Public enterprise Roads of Serbia: Manual of road safety audits (2009).
[6] Donceva R. 2011. *Roads, Book 1*. Faculty of civil engineering in Skopje.
[7] Federal Highway Administration: Road safety fundamentals, 2017
[8] Ristov R., Ognjenović S., Nedevska I. (2016). Metode i tehničke mere za povećanje sigurnosti u saobraćaju u Makedoniji, Drugi srpski kongres o putevima, Beograd.
[9] Agrawal A., Menon G.R. 2017. *Road traffic and safety*, Nova Science Pub Inc.
[10] Yannis G., Cohen S. 2016 *Traffic safety*, Wiley-ISTE; 1st edition.

PROCES PROJEKTOVANJA PRISTUPNOG PUTA I PLATOA VETRENJAČE U DRENU

Riste Ristov[1] Slobodan Ognjenovic[2], Vasko Gacevski[3], Ivona Nedevska - Trajkova[4], Zlatko Zafirovski[5]
[1]Asist. m-r, Univerzitet Sv. Ćirila i Metodija u Skoplju, Građevinski fakultet, ristov@gf.ukim.edu.mk
[2]Van. Prof. d-r Univerziteta Sv. Ćirila i Metodija u Skoplju, Građevinski fakultet, ognjenovic@gf.ukim.edu.mk
[3]Asist. m-r, Univerzitet Sv. Ćirila i Metodija u Skoplju, Građevinski fakultet, gacevski@gf.ukim.edu.mk
[4]Asist. m-r, Univerzitet Sv. Ćirila i Metodija u Skoplju, Građevinski fakultet, nedevska@gf.ukim.edu.mk
[5]Van. Prof. d-r, Univerziteta Sv. Ćirila i Metodija u Skoplju, Građevinski fakultet, zafirovski@gf.ukim.edu.mk

Rezime: *Mnoge zemlje ulažu velika sredstva u energiju vetra kako bi se izborile sa klimatskim promenama i obezbedile snabdevanje energijom. To je čist izvor i postaje isplativiji s tehnološkim napretkom i povećanim kapacitetom po instaliranoj jedinici.*
Energija vetra kao izvor energije je atraktivna alternativa fosilnim gorivima. Međutim, vetroelektrane se obično grade u nerazvijenim ruralnim područjima sa izazovnom topografijom. Pored toga, nedostatak putne mreže koja vodi do lokacije i unutar same lokacije predstavlja značajne izazove za planiranje izgradnje vetroelektrana. Zbog toga je izbor najprikladnijeg pristupnog puta od suštinskog značaja u ukupnom planiranju izgradnje vetroparka.
Ovaj rad predstavlja sveobuhvatan pogled na proces projektovanja i fokusiraće se na odabir trasa pristupnih puteva radi optimizacije opšte izgradnje vetroparka. Predstavljen je integrirani okvir za projektiranje vetroelektrana, te je istaknut problem izbora optimalnog pristupnog puta. Na kraju, prikazan je numerički primjer, uključujući zaključke, ograničenja i predloge za buduća istraživanja.

Ključne reči: Vetrenjača, proces izgradnje, osnovni projekat, putna mreža, projektovanje puteva.

PROCESS OF DESIGNING AN ACCESS ROAD AND A WINDMILL PLATEAU IN DREN

Riste Ristov[1] Slobodan Ognjenovic[2], Vasko Gacevski[3], Ivona Nedevska – Trajkova[4], Zlatko Zafirovski[5]
[1]Assist. MSc, University Ss. Cyril and Methodius in Skopje, Faculty of Civil Engineering Skopje, ristov@gf.ukim.edu.mk
[2]Associate professor, University Ss. Cyril and Methodius in Skopje, Faculty of Civil Engineering Skopje, ognjenovic@gf.ukim.edu.mk
[3]Assist. MSc, University Ss. Cyril and Methodius in Skopje, Faculty of Civil Engineering Skopje, gacevski@gf.ukim.edu.mk
[4]Assist. MSc, University Ss. Cyril and Methodius in Skopje, Faculty of Civil Engineering Skopje, nedevska@gf.ukim.edu.mk
[5]Associate professor, University Ss. Cyril and Methodius in Skopje, Faculty of Civil Engineering Skopje, zafirovski@gf.ukim.edu.mk

Abstract: Many countries invest heavily in wind energy to tackle climate change and secure energy supplies. It is a clean source and becomes more cost-effective with technological advancement and increased capacity per unit installed.
Wind energy as a power source is an attractive alternative to fossil fuels. However, wind farms are typically constructed in undeveloped rural areas with challenging topography. In addition, the lack of a road network leading to the site and within the site itself poses significant challenges to the planning of wind farm construction. Therefore, selecting the most appropriate access road route is essential in the overall planning of wind farm construction.
This paper presents a comprehensive view of the design process and will focus on selecting access road routes to optimize the general wind farm construction. An integrated framework for wind farm design is presented, and the problem of optimal access road selection is highlighted. Finally, a numeric example is shown, including conclusions, limitations, and suggestions for future research.

Keywords: *Windmill, construction process, basic design, road network, road design.*

[1] Riste Ristov: ristov@gf.ukim.edu.mk

1. INTRODUCTION

Wind energy is one of the most relevant renewable energy systems. However, planning and constructing a wind farm becomes more and more complicated. Regulation on distance, acoustic emission, shadow flicker, and bird strike prevention increases the degree of complexity. This results in fewer and less available locations. The optimization of wind farms deals with many different challenges and restrictions. One example is access to a wind turbine or wind farm. Access roads are determined to be 3 % of the initial investment costs [1, 2]. Those roads must be passable at all times. In some cases, the access roads need to be constructed, especially for the wind farm, resulting in an increased investment cost.
An optimal layout of a wind farm's access roads consists of straight roads connecting the turbines directly and an existing road network. Nonetheless, the curvature of the roads and construction sites of the wind turbine must be considered to use the access roads fully. This has been researched during the design and construction of similar access roads for windmills in Republic of North Macedonia.
This paper aims to investigate the influence of access roads on a wind farm layout optimization with minimal Levelled Cost of Energy (LCOE). Placing the wind turbine closer to existing roads or closer to each other leads to reduced road investment cost while the Annual Energy Product (AEP) is reduced. Consequently, the access roads are introduced as an additional aspect during the optimization. Furthermore, the access roads are designed such that it is possible to construct the wind turbines simultaneously while no construction site obstructs another one. This paper presents the development of a new road network while optimizing the cross sections, layout and longitudinal profile, taking in consideration passability check of long vehicles, drainage and quantities.

2. GENERAL PROJECT DETAILS

The research subject is the technical documentation for an access road for heavy goods vehicles that will enable connection from the existing local road to the village of Dren with the locations where the windmills will be installed.

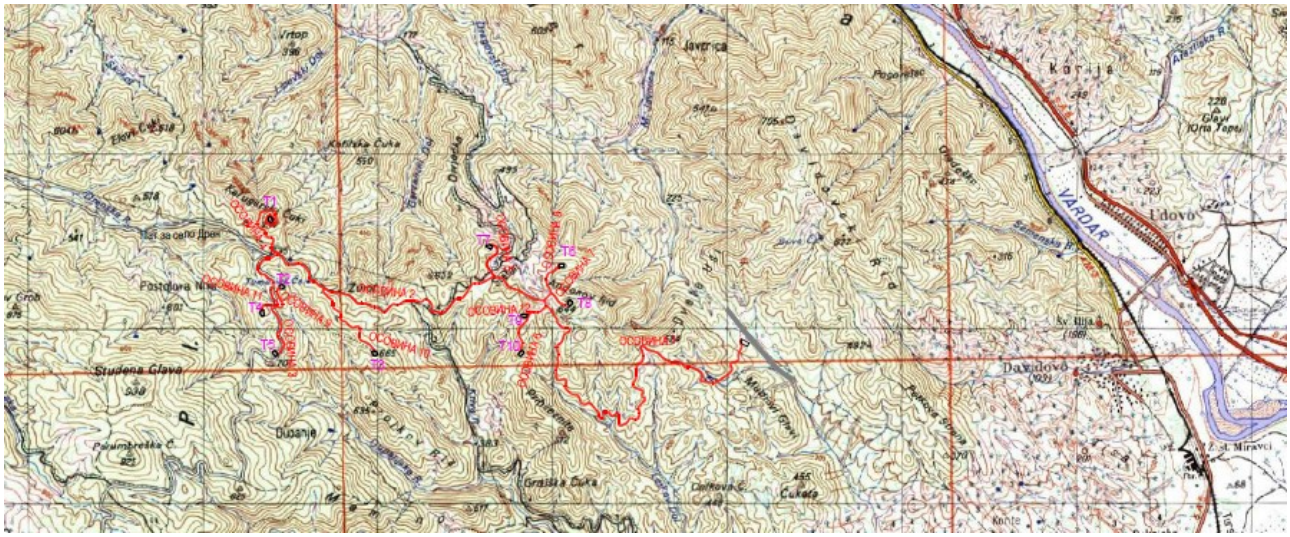


Figure 1. *Location of the access road*
Source: Basic design for an access road in Dren

During the preparation of the basic design, topographic maps in scale R = 1:25 000 and a base obtained by the tachymetric recording of the existing condition were used as design bases. The recorded geodetic base is made on a scale of R = 1: 1000, on which the actual field condition is defined. During the field shooting, a wider band is covered concerning the foreseen contents, which will enable possible changes during the design. Objects of this character as objects with application in various and specific conditions do not have strict regulations regarding the border elements. Instead, the geometric characteristics of the route are defined according to the needs and requirements determined by the Investor. The minimal applied radius of the curves on the access road is Rmin = 25m. The longitudinal inclination of the levels is in the range of 0.5% to 14.0%.
Typical cross-sections of the road have fixed width, and they are with the following dimensions:

- Road lane……2 x 3.0 = 6.0 m
- Shoulder…… 2 x 1.0 = 2.0 m
  Total: 8.0 m

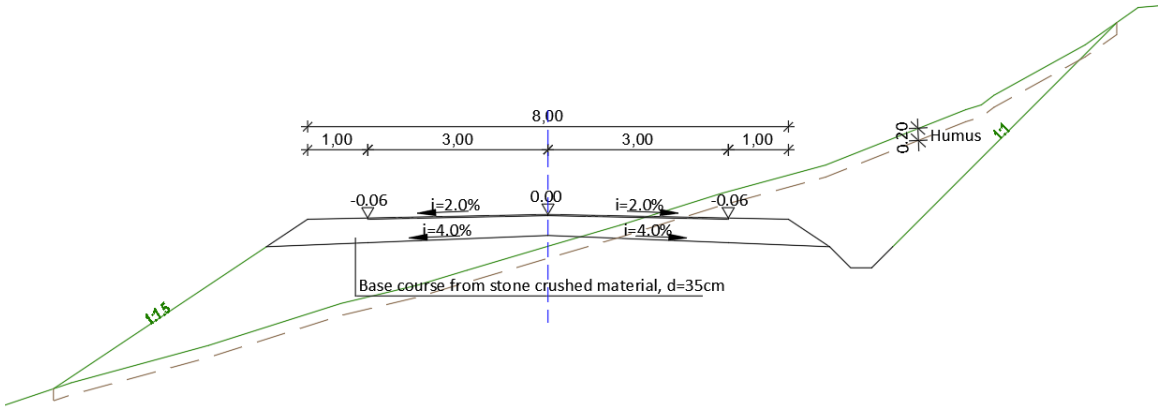


Figure 2. *Typical cross – section in side cut*
Source: Basic design for an access road in Dren

The embankment is planned to be constructed with a slope of 1:1.5. On steep slopes of 12%, the shaping of the hull would be performed with an auxiliary embankment (next to the scissors of the main one) with a crown width of 3.0 m (sufficient for the initial installation of the mechanization). The embankment would usually take place on the side of the main hull. After obtaining the width for filling in the main embankment greater than 3.0 m, the auxiliary embankment would be removed. The material from it would be used for the primary embankment.
The applied road structure will mainly serve only for securing the hull of the road during the delivery of the equipment for the construction of the windmills.
The adopted road construction is as follows:

- Base course from stone crushed material……. d = 35 cm

2.1. Layout plan and longitudinal profile of the road

For a definite horizontal and vertical shaping of the route, geodetic surveys were done on an updated geodetic base M 1: 1000, which provides accurate data on the micro-location of the route. Therefore, the immediate withdrawal and construction of the road axis is a function of the limitations and conditions offered by the terrain in which it is traced.
During the design process of the layout plan, the recommendations of the equipment supplier are taken into consideration, as follows:

1. Dead-end roads are constructed or locations where loaded transports must turn around prior to delivery to the Installation Area. Turning Areas are required to avoid reverse driving. The turning areas for cranes and unloaded trucks are also considered.
2. Roads and junctions are designed to allow component deliveries from one direction; however, they also allow for access from both directions for crane relocation purposes. Therefore, Crane relocation vehicles can travel directly between each Hardstand. If not, mitigation methods must be mutually agreed upon.
3. Offloading the nacelle with self-offloading transport equipment may require that the Site Road be extended 35 m beyond the end of the Hardstand.The route is guided towards the zeroterrain line, ensuring that it at least enters the private plots.

During the levelling, fixed points are accepted as beginning parameters, such as the local road Dren and the endpoints of the location, the plateau of the windmills.
When choosing the elements of the layout plan, it is considered that the route is maximally integrated into the terrain configuration along its entire length.
The selected radii of the horizontal curves were made by the Investor's recommendations and the catalogue for specific terrain conditions.

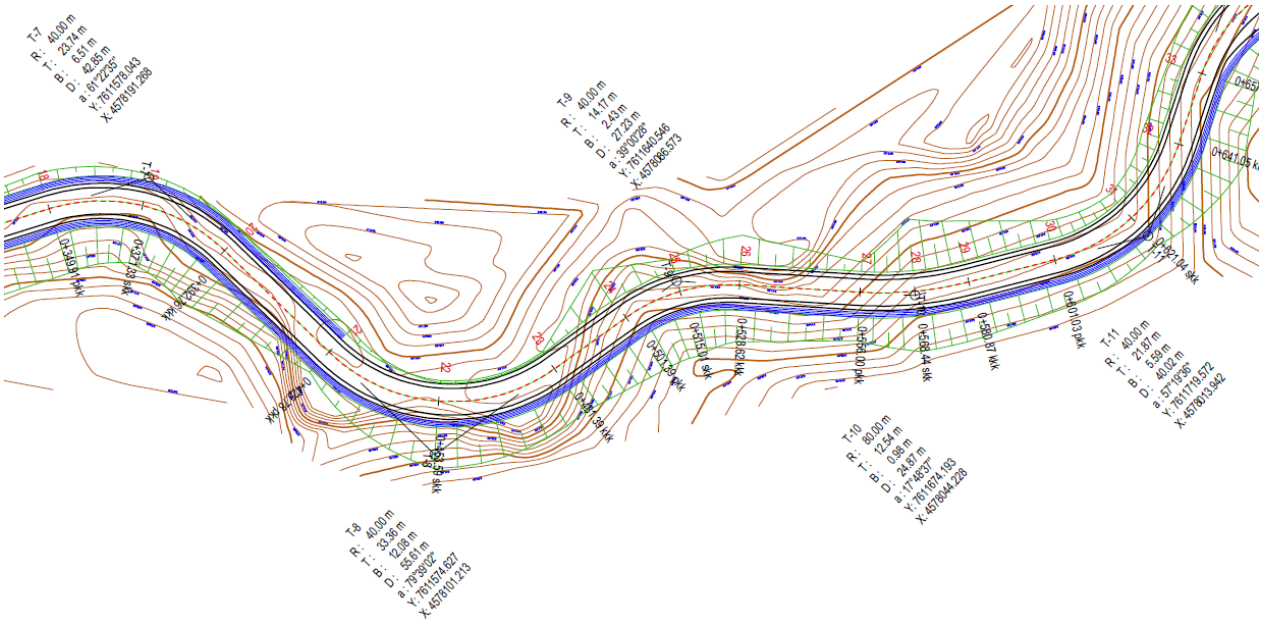


Figure 3. *Layout plan with horizontal curves*
Source: Basic design for an access road in Dren

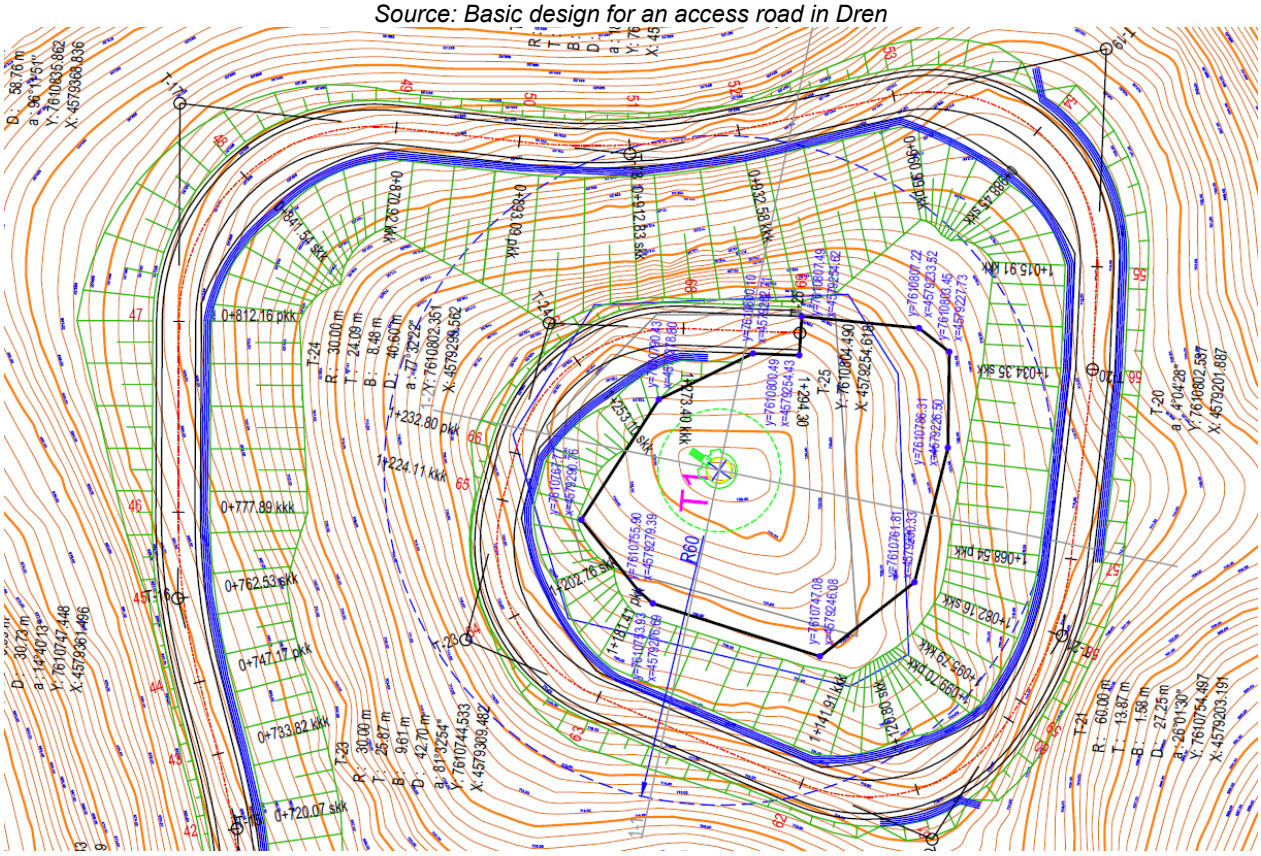


Figure 4. *Layout plan of plateau*
Source: Basic design for an access road in Dren

The plateau formation is designed according to the Contractor's needs and the construction organization. Four auxiliary cranes should be installed for installing the leading crane and storage space for the windmill blades. The longitudinal slopes are within the allowed limits according to the valid regulations for road design, i.e., from 0.5% minimum for drainage to a maximum of 14.0%.
The radiuses of the vertical curves along the whole section are within allowed limits according to the catalogue for specific terrain conditions for road design and range from Rmin = 200m to Rmax = 25,000m.
Special consideration has been taken to avoid supporting structures when defining the longitudinal slopes.

2.2. Relevant design vehicles

The geometric elements in the design are made depending on the dimensions of the relevant vehicles that will deliver the equipment:

- Heavy freight vehicle with trailer and dimensions 78.0 x 2.5 m and a turning radius R = 25.0 m
- Heavy freight vehicles with a trailer and dimensions 18.0 x 2.5 m and a turning radius R = 12.0 m.

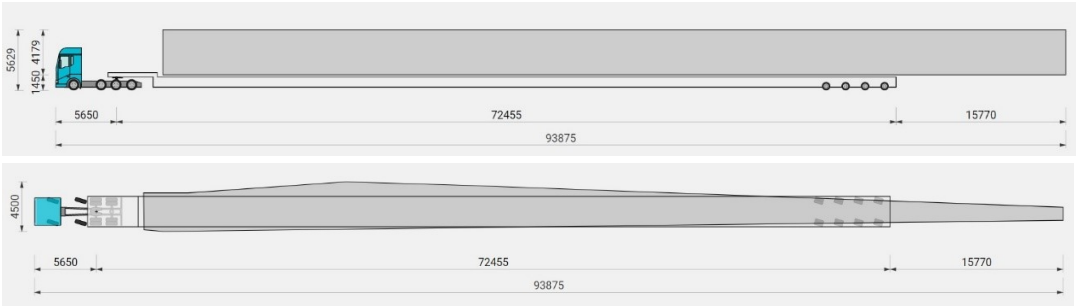


Figure 5. *Overall length of vehicle*
Source: Basic design for an access road in Dren

2.2.1. Passability check for relevant design vehicles

Due to the significant length of the relevant vehicles, it was necessary to check the passability of the vehicle along the designed access road and plateau.
The analysis was made by applying a track curve, which established that the defined design elements in a layout plan and longitudinal profile provide adequate passability of the vehicle.
In the place where the vehicle gauge exits from the road, the slopes must be racked in the scope so that there is no gap between the stomach of the vehicle and the existing ground.

2.3. Drainage

A hydrological analysis was made for the planned location according to the current location precipitation, and the types and positions of the culverts were defined from it.
For the most part, the road's route is guided along the ridge of the hill. For that reason, there are no large catchment areas, which results in the need for pipe culverts with a diameter of Ø300 to Ø600.
Due to the culverts' easier maintenance (cleaning), they are all standardized on diameter Ø1000.
The small number of vehicles planned to move on the road allows pouring surface water into the excavation and discharging it when the profile is in the embankment. This overflow of water along the road is allowed on sections with a maximum length of 50 m. In places where longer sections of 50 appear in the excavation, the application of trapezoidal ditches with a bottom width of 35 cm is mandatory.

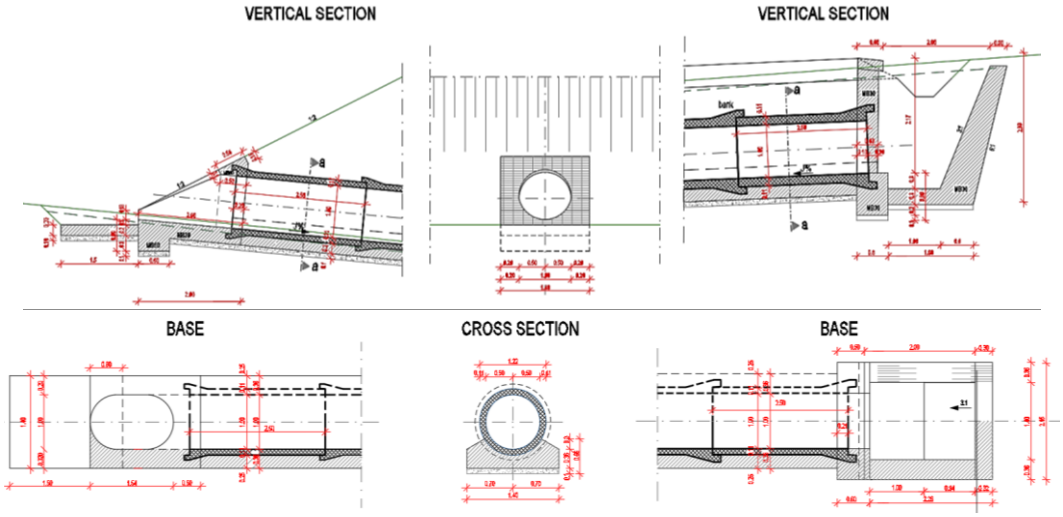
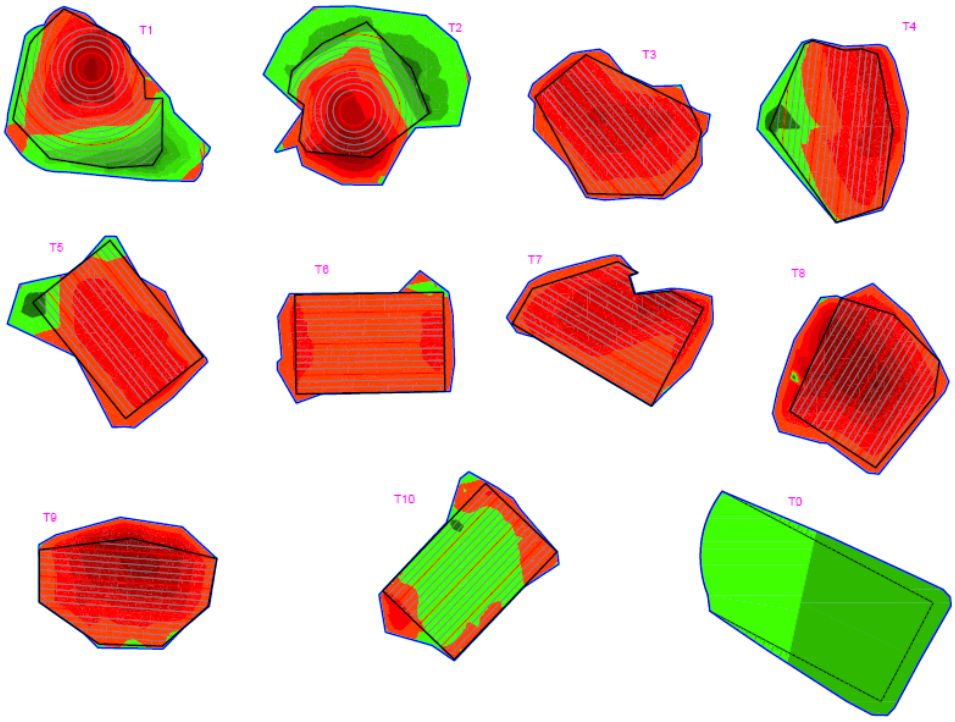


Figure 5. Pipe culvert Ø1000 in vertical section and base

Source: Basic design for an access road in Dren

2.4. Quantities

The quantities determined for the roads are calculated with a standard procedure using the Trapezoidal Method, which is based on the assumption that the mid area of a pyramid is half the average area of the ends. The determination of the volumes in the part of the plateau is made by subtracting the benchmark area (terrain) concerning the projected area (bed and slopes). By calculating the volumes for the plateau, as the most significant quantities to be calculated, the areas for excavation or embankment in layers can be defined. This way of presenting the surfaces enables a more precise construction organization. It can be specified in layers as far as it corresponds to the available mechanization of the contractor.



Elevations Table

Number	Minimum Elevation	Maximum Elevation	Color
1	-10.000	-8.000	
2	-8.000	-6.000	
3	-6.000	-4.000	
4	-4.000	-2.000	
5	-2.000	0.000	
6	0.000	2.000	
7	2.000	4.000	
8	4.000	6.000	
9	6.000	8.000	
	8.000	10.000	

Cut/Fill Summary

Name	Cut Factor	Fill Factor	2d Area	Cut	Fill	Net
VOL 1	1.000	1.000	3745.12sq.m	5122.56 Cu. M.	3885.83 Cu. M.	1236.73 Cu. M.<Cut>
VOL 2	1.000	1.000	4202.84sq.m	5837.26 Cu. M.	3884.98 Cu. M.	1952.28 Cu. M.<Cut>
VOL 3	1.000	1.000	3035.76sq.m	8820.03 Cu. M.	0.01 Cu. M.	8820.02 Cu. M.<Cut>
VOL 4	1.000	1.000	3197.28sq.m	6032.18 Cu. M.	692.54 Cu. M.	5339.64 Cu. M.<Cut>
VOL 5	1.000	1.000	3148.48sq.m	5451.69 Cu. M.	486.66 Cu. M.	4965.03 Cu. M.<Cut>
VOL 6	1.000	1.000	2886.96sq.m	3390.58 Cu. M.	3.12 Cu. M.	3387.46 Cu. M.<Cut>
VOL 7	1.000	1.000	2922.88sq.m	8497.01 Cu. M.	0.07 Cu. M.	8496.94 Cu. M.<Cut>
VOL 8	1.000	1.000	3473.67sq.m	16024.42 Cu. M.	7.28 Cu. M.	16017.14 Cu. M.<Cut>
VOL 9	1.000	1.000	2956.08sq.m	12171.33 Cu. M.	10.36 Cu. M.	12160.97 Cu. M.<Cut>
VOL 10	1.000	1.000	2851.99sq.m	741.10 Cu. M.	1313.16 Cu. M.	572.06 Cu. M.<Fill>
VOL 0	1.000	1.000	5128.32sq.m	000.00 Cu. M.	15384.23 Cu. M.	15384.23 Cu. M.<Fill>
Totals			37549.59sq.m	72088.17 Cu. M.	25668.24 Cu. M.	61804.16 Cu. M.<Cut>

Figure 7. *Graphic representation of volumes*
Source: Basic design for an access road in Dren

3. CONCLUSION

The research shows design and construction beyond the standard tracing method for local roads. The road elements are conditioned by the defined relevant vehicle, the terrain configuration, and the construction organization.
This way of designing and organizing a construction site can be applied for a significantly lower volume of construction activities and a significantly lower traffic volume. Although the relevant traffic here is minimal, it still significantly influences the choice of structural elements. This proves that even the seemingly easy macadam road should be designed at the highest level.
When designing and constructing access roads to a wind farm, the cost of the distributed equipment should also be considered as it significantly complicates the project. Any mistake made by the route designer can result in significant distribution problems, which may eventually cause millions of unforeseen costs (an impossibility for free maneuvers of the vehicle, damage to the equipment - blades, windmill body, turbine, etc.).

The production of different types of wind turbines with variable propeller size indicates the application of different types of transport vehicles, that lead to the adaptation of the geometrical elements of the road depending on the organization of construction sites. Future research should be aimed at finding suitable variations of road solutions and construction sites.

Literature

[1] Wallasch AK, Lüers S., Rebennack S., Ekkert M. 2013 Kostensituation der Windenergie an Land in Deutschland Deutsche WIndGuard
[2] Krohn S., Morthorst PE., Awerbuch S. 2009 Economics of Wind Energy European Wind Energy Association
[3] Siemens Gamesa Renewable Energy, 2021 Site Specific Requirements General Part
[4] Bild Urban, 2021 Main design for wind farm in Bogdanci – access roads
[5] Drumnahough Wind Farm, 2020 Drumnahough Wind Farm Planning Documents
[6] Redington Wind Farm Project, 2006 Basis of Design for the Roadways to Access Wind Turbines
[7] Nordex sales documents, 2017 Transport, access roads and crane requirements for the K08 delta wind turbines
[8] Lingaitis, L. P.; Vaiciunas, G. 2002. An optimization model of traction rolling stock operation, Journal of Maintenance and Reliability 3(15): 26–30.

УРБАНИСТИЧКО ПЛАНИРАЊЕ И БЕЗБЕДНОСТ САОБРАЋАЈА

Александар Павловић, Дарија Павловић[1]
[1] ЦИС инжењеринг доо, info@cisinzenjering.rs

Резиме: *Везу између урбанистичке документације и безбедности саобраћаја не треба посебно доказивати зато што урбанистичка документација непосредно утиче на безбедност саобраћаја а самим тим и на спречавање саобраћајних незгода. Циљ овог рада је свакако указивање и истицање ове везе, али и указивање вредности различитих параметара и њихов међусобни однос који се јављају у систему „Урбанистичка документација – Безбедност саобраћаја“. У оквиру рада презентовани су резултати интерне студије која је спроведена од стране аутора. Поред претходно посматраног периода (2011-2015. године) посматрани су подаци из периода 2015-2019. и 2019-2023.године. Поред већег временског периода посматрања извршено је и проширивање параметара обраде.*

Кључне речи: Урбанистичка документација, безбедност саобраћаја

URBAN PLANINIG AND TRAFFIC SAFETY

Aleksandar Pavlovic, Darija Pavlovic[2]
[1] CIS engineering doo, info@cisinzenjering.rs

Abstract: *The connection between urban planning documentation and traffic safety does not need to be proven separately, because urban planning documentation directly affects traffic safety and, therefore, the prevention of traffic accidents. The aim of this paper is certainly to indicate and emphasize this connection, but also to indicate the values of various parameters and their mutual dependence that appear in the "Urban documentation - Traffic Safety" system. The paper presents the results of an internal study made by the author. In addition to the previously observed period (2011-2015), data from the period 2015-2019 were observed. and 2019-2023. In addition to a longer period of observation, the processing parameters were expanded.*

Keywords: Urban planing, traffic safety

1. УВОД

У оквиру рада презентовани су резултати интерне студије која је спроведена од стране аутора. Студијом је извршено проширивање анализе која је извршена у претходном раду (Павловић А., 2020) и која је обухватала посматрани период од 2011-2015.године. У овој студији, поред наведеног периода, посматрани су и подаци из периода 2015-2019. и 2019-2023.године. Поред већег овећег обухвата временског периода извршено је и проширивање параметара обраде.
Проблеми који су директно утицали на истраживање су величине предметних области, недостатак података, као и непостојање или мали број доступних истраживања на тему међусобног односа урбанистичког планирања и безбедности саобраћаја.
Другу групу проблема који су уочени у току истраживања представљају проблеми који се појављују код сагледавања области урбанизма и саобраћаја у оквиру законске регулативе Републике Србије. Ови проблеми се углавном јављају код спровођења и имплементације урбанистичке и пројектне документације у пракси (Павловић А., 2019).
С обзиром на обимност предметних области и велики број уочених проблема, немогуће је сваком проблему посветити посебну пажњу и због тога су у овом раду презентовани само резултати који се тичу међусобног односа урбанистичке документације и безбедности саобраћаја.

2. МАТЕРИЈАЛ И МЕТОДЕ

Рад је израђен по већ усвојеној методологији која препознаје две главне области које се требају довести у међусобни однос и као главни носиоци тих области су:

- Урбанистичка документација и
- Стање безбедности саобраћаја.

[1] Александар Павловић, aleks.pavlovic@gmail.com

Овом методологијом је предвиђено засебно анализирање одабраних података у оквиру ове две главне области након чега је извршено утврђивање међусобног односа и тражење законитости међусобног утицаја.
Ради прављења основе за израду студије извршено је прикупљање и анализирање одређених параметара и то:

- Општи параметри: број и величина ЈЛС, број становника по km2 и број регистрованих возила,
- Урбанистичка документација у ЈЛС кроз посматрање стручног тима на изради урбанистичке документације,
- Стање безбедности саобраћаја у ЈЛС кроз посматрање броја саобраћајних незгода, броја погинулих лица, броја саобраћајних незгода по ЈПВ (јединици путничког возила), броја погинулих по ЈПВ, густине саобраћајног тока и др. у Републици Србији.

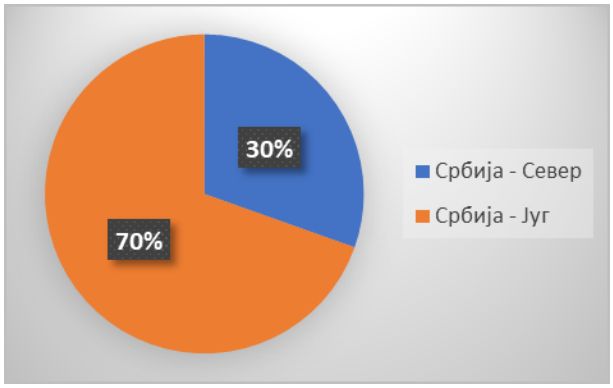
Сви прикупљени подаци су посматрани у међусобном процентуалном односу региона Србија – Север и Србија – Југ и у односу на њихово учешће на нивоу Републике Србије. Подаци са А.П. Косова и Метохије су недоступни и из тог разлога нису узети у разматрање, а због специфичности региона Београд ни тај регион није анализиран.

3. РЕЗУЛТАТИ

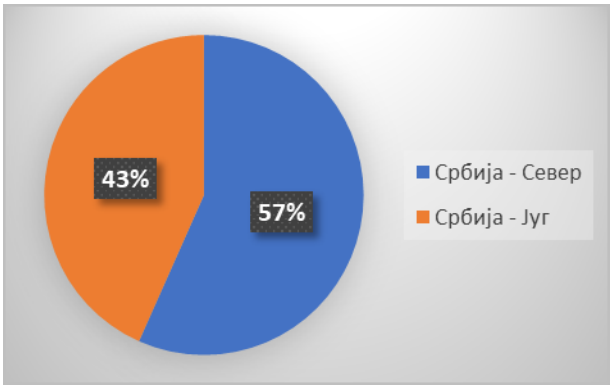
3.1. Општи параметри

Приликом прикупљања и анализирања општих параметара установљено је да међусобни процентуални однос између региона износи:

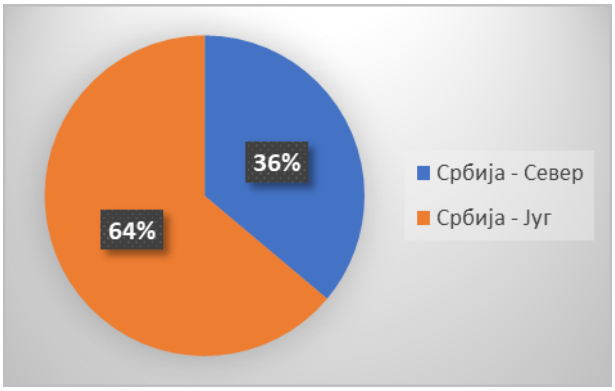
- У погледу броја ЈЛС регион Србија – Север заузима 30%, регион Србија – Југ 70% (Слика 1),
- У погледу броја становника по km2 регион Србија – Север заузима 57%, а регион Србија – Југ 43% (Слика 2),
- У погледу регистрованих моторних возила регион Србија – Север заузима 36%, а регион Србија – Југ 64% (Слика 3),
- У погледу регистрованих моторних возила сведених на ЈПВ регион Србија – Север заузима 36%, а регион Србија – Југ 64% (Слика 4),
- У погледу дужине путева регион Србија – Север заузима 15%, а регион Србија – Југ 85 % (Слика 5),
- У погледу броја становника, Србија – Север заузима 33 %, а региона Србија – Југ 67 % у међусобном односу региона (Слика 6).



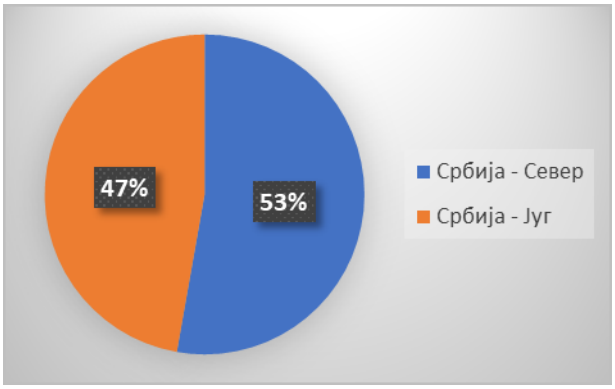
Слика 1. *Међусобни однос посматраних региона у погледу броја ЈЛС*



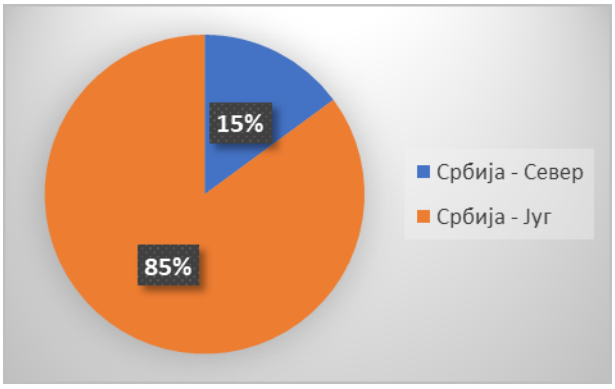
Слика 2. *Међусобни однос посматраних региона у погледу броја становника по квадратном километру*



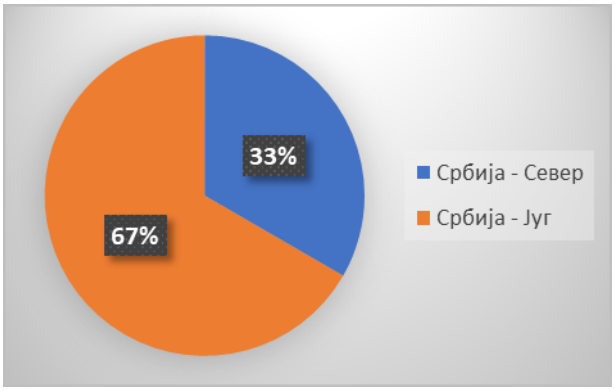
Слика 3. *Међусобни однос посматраних региона у погледу броја регистрованих возила*



Слика 4. *Међусобни однос посматраних региона у погледу броја возила сведених на ЈПВ*



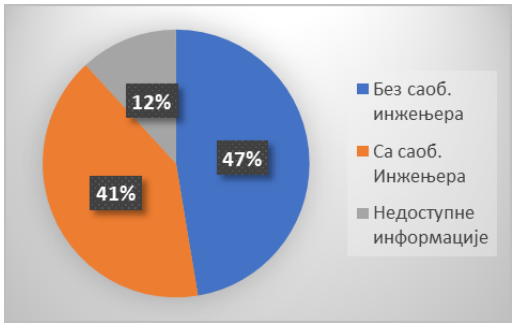
Слика 5. *Међусобни однос посматраних региона у погледу укупне дужине путева*



Слика 6. *Међусобни процентуални однос посматраних региона у погледу броја становника*

3.2 Анализа и приказ стања урбанистичке документације у ЈЛС

На основу прикупљених података, на посматраном узорку од 152 ЈЛС, установљено је да 47% ЈЛС је израдило урбанистичку документацију без ангажовања саобраћајних инжењера на изради, 41% ЈЛС је израдило документацију која је у свом стручном тиму имала ангажованог дипломираног саобраћајног инжењера на изради, док за 12% ЈЛС подаци нису доступни (Слика 7)[3].
Ради бољег приказа стања урбанистичке документације дат је и приказ стања унутар самих региона (Слика 8).
Посматрањем прикупљених података унутар региона Србија - Север установљено је да се у оквиру овог региона налази 22% ЈЛС које поседују усвојену урбанистичку документацију на чијој изради није ангажован дипломирани саобраћајни инжењер, 69% ЈЛС поседује урбанистичку документацију на чијој изради је ангажован саобраћајни инжењер, док код 9% ЈЛС нису доступне информације (Слика 8, лево).
Анализирањем података региона Србија – Југ, можемо видети да 58% ЈЛС поседује урбанистичку документацију која је израђена без ангажовања дипломираног саобраћајног инжењера, а 29% поседује урбанистичку документацију на чијој изради је био ангажован дипломирани саобраћајни инжењер, а за 9% ЈЛС нема доступних информација (Слика 8, десно).
Међусобни процентуални однос посматраних региона у погледу израђене урбанистичке документација на којој су учествовали саобраћајни инжењери и на којој нису приказан је на слици 9.



Слика 7. *Процентуални приказ израђене урбанистичке документације у односу на ангажовање дипломираног саобраћајног инжењера на нивоу Републике Србије*

[3] За регион Београд нису прикупљани подаци па је претпостављено да све ЈЛС у овом региону имају израђену урбанистичку документацију која је у свом тиму имала ангажованог дипл. саоб. инж.

Слика 8. *Процентуални приказ израђене урбанистичке документације унутар региона*

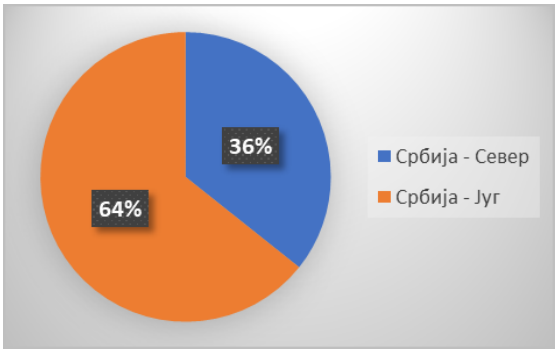
Слика 9. *Приказ процентуалног односа између региону у погледу урбанистичке документације*

3.3 Анализа и приказ стања безбедности саобраћаја у ЈЛС

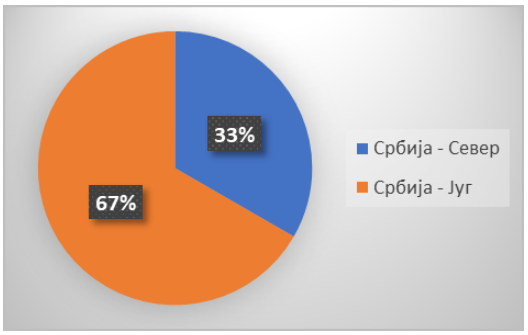
У оквиру ове анализе као главни параметри за приказ стања безбедности саобраћаја у ЈЛС посматрани су број саобраћајних незгода (СН) и број погинулих по ЈЛС у Републици Србији по предметним регионима. Да би смо имали јаснији увид у стање безбедности саобраћај извршено је проширење анализе посматрањем средње густине тока, броја саобраћајних незгода и броја погинулих у односу на ЈПВ и броја саобраћајних незгода по километру пута.
Довођењем у међусобни однос посматраних региона у погледу броја саобраћајних незгода можемо утврдити да регион Србија – Север заузима 36% (Слика 10), док у погледу броја погинулих можемо утврдити да регион Србија – Север заузима 33% (Слика 11).

Процентуални однос ново анализираних параметара можемо видети на следећим сликама:

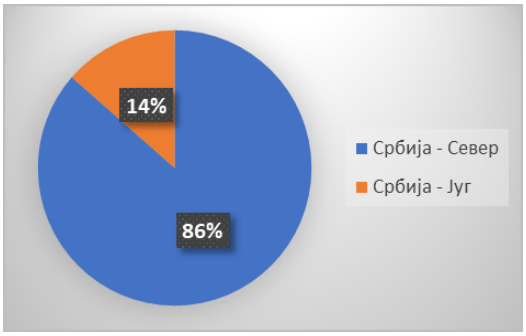
- Процентуални однос између посматраних региона у погледу средње густине тока (Слика 12),
- Процентуални однос између посматраних региона у погледу броја саобраћајних незгода по километру путне мреже (Слика 13),
- Процентуални однос између посматраних региона у погледу броја погинулих лица у односу на ЈПВ (Слика 14),
- Процентуални однос између посматраних региона у погледу броја саобраћајних незгода у односу на ЈПВ (Слика 15),



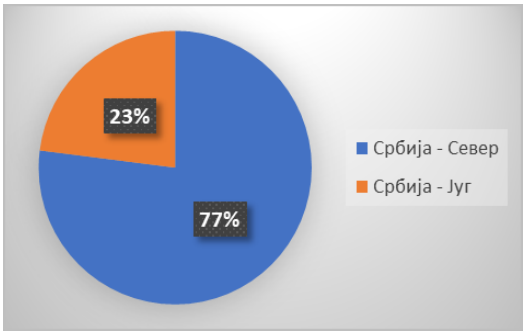
Слика 10. *Међусобни однос саобраћајних незгода између посматраних региона*



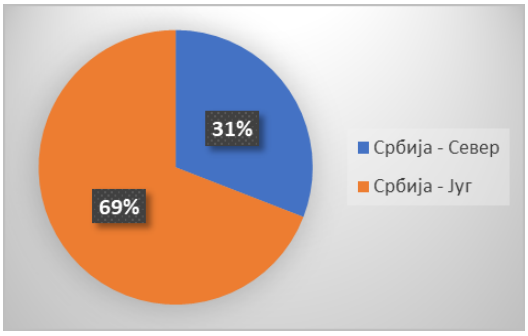
Слика 11. *Међусобни однос броја погинулих између посматраних региона*



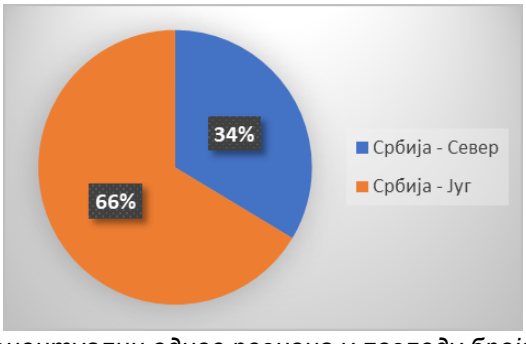
Слика 12. *Процентуални однос између региона у погледу средње густине тока*



Слика 13. *Процентуални однос између региона у погледу бр СН/km пута*



Слика 14. *Процентуални однос региона у погледу броја погинулих/ЈПВ*



Слика 15. *Процентуални однос региона у погледу броја СН/ЈПВ*

4. ДИСКУСИЈА

Први корак у свеобухватној анализи је одређивање референтног односа. Анализирањем Општих параметара можемо видети да је однос региона Србија – Север и Србија – Југ у погледу броја ЈЛС, површине и броја становника приближно исти и да износи 30:70%. Овај однос је из тих разлога узет као референтни однос. Сва даља разматрања вршена су упоређујући процентуалне односе региона Србија - Север у односу на референтни однос.

Анализирањем Општих параметара можемо видети да у региону Србија – Север, у односу на референтну вредност, има већи број становника (+3%), већи број регистрованих возила (+6%), већи број становника по квадратном километру (+27%), а мањи проценат изграђених путева (-15%). Већу промену односа од референте вредности, такорећи за исти параметар, можемо видети код анализе броја возила уколико се број возила сведе на ЈПВ. Тад тај однос износи +23% што је свакако веће у односу на однос који посматра само број регистрованих моторних возила (+6%)[4]. Ови односи уколико их разматрамо са аспекта саобраћаја указују нам на неповољнији положај региона Србија – Север у односу на регион Србија – Југ.

У погледу урбанистичке документације посматраћемо параметар израђене урбанистичке документације која у свом стручном тиму није имала ангажованог бар једног саобраћајног инжењера. Могли смо видети да тај однос износи -16% у односу на референти однос. Из овог податка можемо видети да се регион Србија – Север налази у повољнијем положају јер има већи проценат документације која је израђена ангажовањем саобраћајних инжењера на њеној изради. Свакако треба поменути да уколико посматрамо урбанистичку документацију на нивоу Републике Србије однос између ЈЛС које имају урбанистичку документацију која је израђена са ангажовањем и без ангажовања саобраћајних инжењера је веома неповољан и износи 41:47 % (са/без).

Посматрањем података који нам у одређеној мери указују на ниво безбедности саобраћаја можемо видети да минимална одступања од референтног односа настају уколико посматрамо број саобраћајних незгода (+6%), број погинулих (+3%), број погинулих по ЈПВ(1%), број СН по ЈПВ (+4%). Већа одступања настају уколико посматрамо средњу густину тока (+56%) и број СН по километру пута (+47%). Ови подаци нам такође потврђују резултате добијене анализирањем општих података и то да регион Србија – Север има неповољније услове за безбедно одвијање саобраћаја, док се процентуални однос броја СН и броја погинулих мало разликује у односу на референту вредност.

Довођењем у везу Општих параметара са параметрима Безбедности саобраћаја можемо видети да веће процентуалне вредности броја становника, броја регистрованих возила, броја становника по квадратном километру а мањи проценат изграђених путева доводи до веће густине саобраћајног тока. С друге стране уколико посматрамо процентуалне односе у погледу броја СН и броја погинулих можемо видети да те вредности прате референтну вредност тј. да нема већих одступања (+3% и +6%).

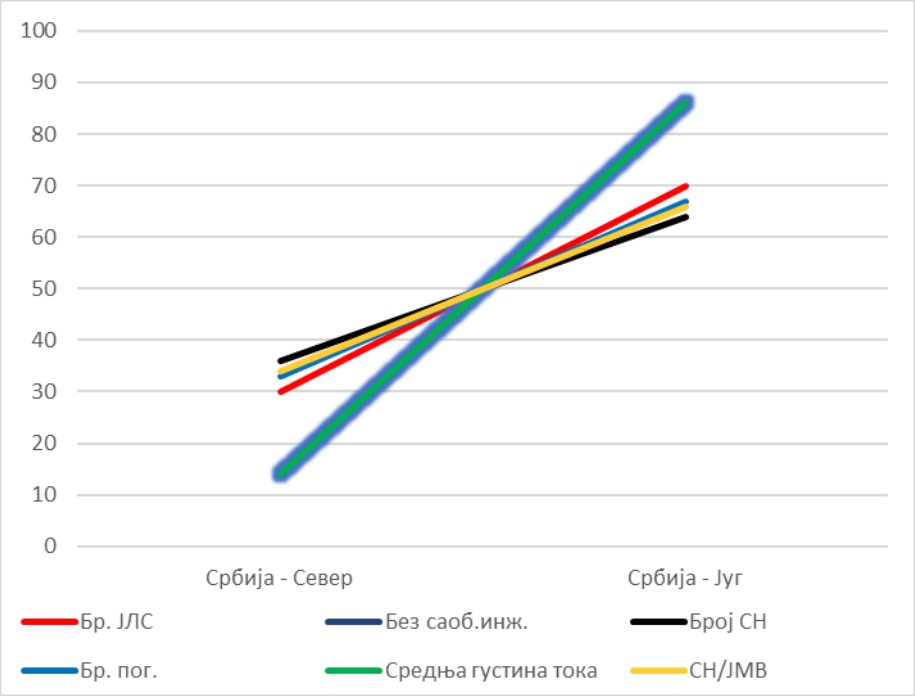
Уколико све Опште параметара грубо сведемо и посматрано кроз густину саобраћајног тока заједно са осталим параметрима Безбедности саобраћаја тада можемо видети да све посматране вредности осим средње густине саобраћајног тока и урбанистичке документације (Без саоб.инж) налазе близу референтног односа (Слика 16). Црвена линија – Број ЈЛС поред своје вредности представља и референти однос.

Занимљива појава је идеално поклапање вредности Средње густине тока и Без саоб. инж. (вредност урбанистичке документације која је израђена без ангажовања дипломираних саобраћајних инжењера – урбаниста). Поред тога, ови параметри једини у великој мери одступају од референтне вредности и то за 16%.

Сви добијени резултати нам указују на неповољније услове за одвијање саобраћаја у региону Србија – Север. Неповољнији услови за одвијање саобраћаја би свакако требали да доводе до већег броја погинулих и већег броја саобраћајних незгода у овом региону, што у принципу није случај. Регион Србија – Север у погледу процентуалног односа броја погинулих и броја саобраћајних незгода не одступа у великој мери од референтне вредности.

Сагледавањем свих анализираних вредности величине на које желимо да утичемо тј. да их смањимо су свакако вредности броја погинулих и број саобраћајних незгода. Да би утицали на жељене вредности ми морамо првенствено утицати на вредности које можемо мењати. Посматрањем анализираних области можемо видети да утицај на безбедност саобраћаја може вршити једино преко Општих параметара и параметара Урбанистичке документације. На вредности Општих параметара се тешко утиче и промене ових параметара су углавном споре. Због природе ових параметара њих можемо посматрати као константне величине. С друге стране параметри Урбанистичке документације се брже и лашке мењају и на њих можемо у великој мери утицати.

[4] Свођењем броја регистрованих возила на ЈПВ се добија тачнији податак за густину саобраћајног тока, али мишљења смо да се увек требају анализирати обе вредности тј. број регистрованих моторних возила и број регистрованих моторних возила сведен на ЈПВ.



Слика 16. *Приказ анализираних резултата међусобног односа региона*

Уколико након свега поново посматрамо резултате урбанистичке документације тада можемо видети да се јасно види да на овом пољу имамо велику могућност и потребу за уређењем. У оквиру анализирања ових података не морамо посматрати засебно регионе, јер у сваком региону постоји одређени проценат ЈЛС које имају урбанистичку документацију израђену без ангажовања дипломираних саобраћајних инжењера – урбаниста, већ можемо посматрати резултате урбанистичке документација на нивоу Републике Србије (Слика 7). На основу ових података видимо да постоји 47% ЈЛС који имају израђену документацију без ангажовања саобраћајних инжењера и 12% ЈЛС за које не постоје информације. На основу ових података можемо грубо рећи да уколико би унапредили урбанистичку документацију у 50% ЈЛС могли би да очекујемо побољшање безбедности саобраћаја тј. смањење броја СН и броја погинулих за око 50%. Овај проценат смањења броја погинулих и броја саобраћајних незгода свакако треба узети са резервом.

4. ЗАКЉУЧАК

Везу између урбанистичке документације и безбедности саобраћаја не треба посебно доказивати зато што урбанистичка документација непосредно утиче на безбедност саобраћаја а самим тим и на спречавање саобраћајних незгода. Циљ овог рада је свакако указивање и истицање ове везе, али и указивање вредности различитих параметара и њихов међусобни однос који се јављају у систему „Урбанистичка документација – Безбедност саобраћаја“.

Као што можемо видети, на основу свих анализираних података, међусобна зависност између региона Србија – Север и Србија – Југ процентуално износи 30:70. У идеалним условима сви посматрани параметри би пратили овај референтни однос што ипак није случај. Сви приказани подаци и односи нам указују на безбедније одвијање саобраћаја у региону Србија – Север под претпоставком да су све остале мере које се спроводе у циљу повећања безбедности саобраћаја исте[5].

Зашто параметри одступају од референтног односа и зашто је у региону Србија – Север безбеднији саобраћај?!

Укључивањем у разматрање података о урбанистичкој документацији видимо да велика одступања се јављају на том пољу. Као и што је приказано, регион Србија – Север има већи проценат израђене урбанистичке документације од стране стручног тима који је имао ангажованог бар једног саобраћајног инжењера. Овакво стање у погледу урбанистичке документације засигурно у великој мери чини регион Србија – Север повољнијим и безбеднијим за одвијање саобраћаја.

[5] Овде се првенствено мисли да су акције и рад МУП-а и Агенције за безбедност саобраћаја исти на нивоу Републике Србије.

Сви приказани подаци и поједини закључци нас усмеравају да требамо да се определимо да поред свих устаљених активности на повећању безбедности саобраћаја почнемо да и у оквиру урбанистичке документације тражимо решења и унапређења безбедности саобраћаја. На том пољу сигурно имамо велике могућности за постизање тог циља. Као што је у раду грубо претпостављено та вредност може бити 50% у погледу смањења броја саобраћајних незгода и броја погинулих, што свакако није мали проценат. Лично мишљење аутора је да тај проценат може да буде и већи уколико се спроведу стручне и адекватне мере на унапређењу.

Израда интерних студија сигурно не може у великој мери да омогући остваривање жељених унапређења у безбедности саобраћаја, али кроз заједничку сарадњу са Министарством грађевинарства, саобраћаја и инфраструктуре, Агенцијом за безбедност саобраћаја, Саобраћајним факултетима и другим заинтересованим институцијама сигурно може довести до постизања већих резултата на том пољу.

Литература

[1] Павловић, А. (2019), Унапређење планске и пројектне документације кроз допуну Закона о планирању и изградњи, VIII међународна конференција: Безбједност саобраћаја у локалној заједници, Зборник радова, 12, 101-108.

[2] Павловић, А. (2020), Повећање безбедности саобраћаја у локалној заједници унапређењем планске и пројектне документације кроз допуну Закона о планирању и изградњи, 15. Међународна конференција: Безбедност саобраћаја у локалној заједници, Зборник радова, 25, 235-244.

[3] Павловић, А., Павловић, Д. (2021), Урбанистичко планирање и безбедност саобраћаја, Саобраћај и комуникација, 115-120.

[4] Закон о безбедности саобраћаја на путевима (2009), Службени гласник Републике Србије бр. 41/09, 53/10, 101/11, 55/14, 32/13 – Одлука УС РС, 96/15 – други закон, 9/16 – Одлука УС РС, 24/18, 41/18, 41/18, 41/18 – други закон, 87/18, 23/19, 128/20 – други закон и 76/23.

[5] Закон о планирању и изградњи (2009), Службени гласник Републике Србије бр. 72/09, 81/09, 64/10 – Одлука УС РС, 24/11, 121/12, 42/13 – Одлука УС РС, 50/13 – Одлука УС РС, 98/13 – Одлука УС РС, 132/14, 145/14, 83/18, 31/19, 37/19 – други закон, 2/20, 52/21 и 62/23.

[6] Закон о путевима (2018), Службени гласник Републике Србије бр. 41/18, 95/18 – други закон.

[7] Правилник о саобраћајној сигнализацији (2017), Службени гласник Републике Србије бр. 85/17, 14/21.

[8] Правилник о процени утицаја пута на безбедност саобраћаја (2019), Службени гласник Републике Србије бр. 63/19.

[9] Правилник о садржини, начину и поступку израде и начина вршења контроле техничке документације према класи и намени објекта (2019), Службени гласник Републике Србије бр. 73/19.

PREGLED REZULTATA PRAKTIČNE PRIMENE ODREĐIVANJA POVRŠINSKIH KARAKTERISTIKA KOLOVOZA U OKVIRU PROVERE BEZBEDNOSTI SAOBRAĆAJA MREŽE AUTOPUTEVA U RS

Đureković Aleksandar[1], prof. dr Lipovac Krsto[2], doc. dr Smailović Emir[2]
[1] Javno Preduzeće Putevi Srbije, adjurekovic@gmail.com
[2] Saobraćajni fakultet, Univerziteta u Beogradu

Rezime: *Karakteristike puta, kao jednog od osnovnih faktora sistema bezbednosti saobraćaja, u prethodnim decenijama posebno dolaze do izražaja i ukazuju na činjenicu da im se mora pristupiti sa posebnom pažnjom. Iako put, kao jedini uticajni faktor utiče na nastanak svega 3% saobraćajnih nezgoda, u sadejstvu sa ostalim faktorima (čovek, vozilo) ovaj procenat je znatno viši. U radu su prikazani rezultati određivanja površinskih karakteristika kolovoza na pojedinim deonicama mreže autoputeva u Republici Srbiji. Odabrane su deonice koje su u eksploataciji 3-5 godina, sa različitim nivoima saobraćajnog opterećenja i klimatskim uslovima u eksploataciji. Deonice koje su ispitane su izvedene sa asfaltnim zastorom, dodatno, određene su površinske karakteristike na dve lokacije sa betonskim zastorom. Merenja su vršena primenom standardizovanih metoda (preko EN standarda), čime se omogućuje uporedivost i konzistentnost u merenju: određivanje makroteksture (MTD); određivanje otpornosti protiv proklizavanja (PTV); deformacije površine kolovoza; geometrijske karakteristike nagiba. Kako je u dosadašnjoj praksi utvrđena veza između makroteksture i karakteristika trenja na elemente doprinosa puta na bezbednost saobraćaja, dato je osnovno upoređenje odnosa koeficijenta trenja u odnosu na makroteksturu.*

Ključne reči: *bezbednost saobraćaja, put, karakteristike kolovoza, makrotekstura, otpornost proklizavanja, deformacija kolovoza.*

OVERVIEW OF THE RESULTS OF THE APPLICATION OF THE DETERMINATION OF THE SURFACE CHARACTERISTICS OF PAVEMENTS OF THE HIGHWAY NETWORK WITHIN THE ROAD SAFETY INSPECTION IN RS

Đureković Aleksandar[1], prof. dr Lipovac Krsto[2], doc. dr Smailović Emir[2]
[1] Public Enterprise Roads of Serbia
[2] Faculty for Transport and Trasnport Engineering, University of Belgrade

Abstract: *The road surface characteristics, as one of the essential factors of the traffic safety system, have come to the fore in previous decades and point to the fact that they must be approached with special attention. Although the road, as the only influencing factor, affects the occurrence of only 3% of traffic accidents, in cooperation with other factors (man, vehicle) this percentage is significantly higher. The paper presents the results of determining the surface characteristics of pavements on certain sections of the highway network in the Republic of Serbia. Sections that have been in operation for 3-5 years, with different levels of traffic load and climatic conditions in operation, have been selected. The sections that were inspected were constructed with an asphalt overlay, additionally, the surface characteristics were determined at two locations with a concrete overlay. Measurements were made using standardized methods (through EN standards), which enables comparability and consistency in measurement: determination of macrotexture (MTD); determination of skid resistance (PTV); pavement surface deformations; geometric characteristics of slopes. As the link between the macrotexture and the friction characteristics of the elements of the road's contribution to traffic safety has been established in the current practice, a basic comparison of the ratio of the friction coefficient in relation to the macrotexture is presented*.

Keywords: *traffic safety, road, pavement characteristics, macrotexture, slip resistance, pavement deformation*.

1. UVOD

Nivo bezbednosti koji se odnosi na interakciju vozilo – kolovoz u najvećoj meri zavisi od nivoa preostale sposobnosti trenja i dubine teksture same površine kolovoza. Otpornost kolovoza na klizanje zavisi od brojnih faktora, posebno od ukupnog kumulativnog saobraćajnog opterećenja, same teksture površine kolovoza kao i karakteristika polirnosti agregata. Posmatrajući ove osnovne faktore, može da se napravi jednostavan sled okolnosti koje mogu da dovedu do smanjivanja karakteristika, a koje su od značaja sa aspekta kolovoza kao dela problema bezbednosti saobraćaja: usled dejstva kumulativnog saobraćajnog opterećenja dolazi do

[1] adjurekovic@gmail.com

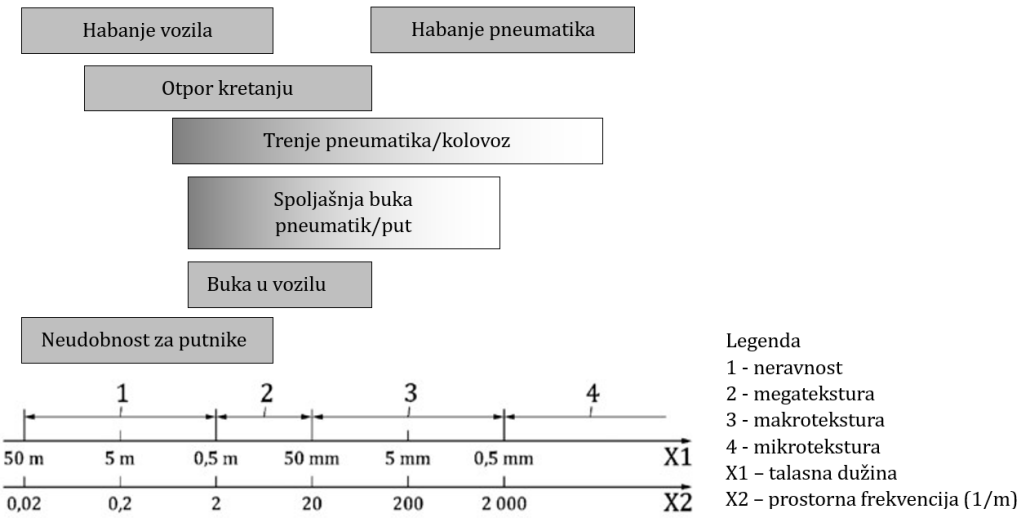
agresivnog dejstva na površinu kolovoza, usled toga dolazi do skidanja filma veziva sa površine agregata, čime agregat postaje izložen. Nastavkom eksploatacije, usled izloženosti i samih karakteristika agregata, dolazi do poliranja i trošenja samog agregata – čime se u određenoj meri smanjuje otpornost protiv proklizavanja.

Opšte je prihvaćeno da su dve osnovne komponente otpornosti na klizanje adhezija i histerezis [10]. Sila histerezis koja se razvija unutar pneumatika najviše reaguje na nepravilnosti makro-nivoa na površini (određene projektovanjem mešavine / tehnologijom izvođenja); Sila adhezije se primarno aktivira na kontaktu pneumatik – kolovoz, i i najviše reaguje na nepravilnosti mikro-nivoa čestice agregata na površini kolovoza.

Uopšteno je prepoznato da je otpor klizanja funkcija kako mikroteksture, tako i makroteksture: makrotekstura – predstavlja odstupanje površine kolovoza od prave ravne površine sa promenama talasne dužine od 0,5 mm – 50 mm: do onih koje više ne utiču na interakciju pneumatik - kolovoz; mikrotekstura – predstavlja odstupanje površine kolovoza od prave ravne površine sa promenama talasne dužine manje od 0,5 mm. Da bi se lakše predstavilo tumačenje iz prethodnog, može da se izvede zaključak da je primarna funkcija makroteksture da obezbedi adekvatnu drenažu vode sa površine kolovoza; primarna funkcija mikroteksture je da u okviru preostale strukture površine može da ostvari interakciju sa preostalim tankim vodenim slojem.

Makrotekstura se uglavnom karakteriše preko parametara MTD (Mean Texture Depth) ili MPD (Mean Profile Depth), u zavisnosti od tipa opreme i metodologije ispitivanja. Sa druge strane, mikrotekstura se može, kao jedan od standardnih načina, odrediti upotrebom BPT (British pendulum tester) u cilju određivanja parametra PTV (Pendulum Test Value).

Objedinjen prikaz kvalitativnih i kvantitativnih efekata tekstura i neravnosti na ponašanje kolovoza, uzimajući u obzir talasne dužine, kao i poželjne karakteristike predloženi su od strane PIARC-a i dodatno razrađeni u okviru SRPS EN 13473-1 [3-6], slika 1.



Slika 1. Uticaj karakteristika površine kolovoza [3-6]

Cilj ovog istraživanja je da se na mreži autoputeva u Republici Srbiji, koji su u relativno ranoj fazi eksploatacije, sa različitim nivoima saobraćajnog opterećenja, u relativno različitim klimatskim uslovima i od različitih materijala, sa stanovišta bezbednosti saobraćaja i primarne interakcije vozilo – kolovozna površina predstavi pregled rezultata, sa ciljem praćenja razvijanja i održanja karakteristika kolovoznih površina koje su od najvišeg značaja za bezbednost saobraćaja.

2. ISPITIVANJE I METODE

2.1. Podaci o lokacijama

Za potrebe određivanja površinskih karakteristika odabrane su deonice mreže autoputeva u okviru Republike Srbije, sa razlogom da su jasno definisana kretanja vozila i da Upravljač puteva raspolaže jasnim podacima o karakteristikama saobraćajnih tokova. Dodatno, klimatski uslovi su preuzeti od Republičkog hidrometeorološkog zavoda – u smislu jasnijeg definisanja klimatskih uslova na deonicama od interesa [1].

Podaci o saobraćajnom opterećenju su preuzeti od Upravljača državnih puteva - JP Putevi Srbije [2]. Deonice od interesa su prikazane u okviru tabele, zajedno sa podacima o saobraćajnim opterećenjem za poslednju dostupnu godinu – 2022., tabela 1.

Tabela 1. *Podaci o PGDS-u za posmatranu godinu od interesa [2]*

Godina	PA	BUS	LT	ST	TT	AV	Ukupno
1051/1052 Broj puta A1 – Deonica petlja Ostružnica – Petlja Orlovača (leva traka - eksploatacija od 2021; desna traka od 2022)							
2022	14748	79	454	534	411	3966	20192
1111/1112 Broj puta A1 – Deonica Grdelica - Predejane (eksploatacija od 2019)							
2022	8213	324	287	367	201	1198	10589
1113/1114 Broj puta A1 – Deonica Predejane - Vladičin Han (eksploatacija od 2019)							
2022	8240	324	285	365	201	1192	10607
2011/2012 Broj puta A2 – Deonica petlja Takovo - petlja Preljina (od 2016, rehabilitacija od 2021)							
2022	10331	301	347	452	255	1016	12702
4009/4010 Broj puta A4 – petlja Bela Palanka – Petlja Pirot zapad (eksploatacija od 2019)							
2022	4333	112	111	142	69	1319	6086
4011/4012 Broj puta A4 – petlja Pirot zapad – petlja Pirot istok (eksploatacija od 2019)							
2022	3045	52	55	70	32	985	4240

Kolovozne konstrukcije koje su izvedene na predmetnim deonicama su fleksibilne kolovozne – sa asfaltnim zastorom, delom habajući sloj SMA, a delom habajući sloj AB11 ili AB16. U trenutku određivanja na predmetnim deonicama postojali su i delovi kolovoznih konstrukcija sa betonskim zastorom – cementno-betonske konstrukcije – na dve deonice, koje su takođe analizirane. Deonice su u upotrebi u određenom vremenskom periodu, što može da ukaže na ponašanje prilikom eksploatacije. Za dodatne analize potrebno je vršiti kontinualno merenje u dužim vremenskim periodima, što se i daje kao preporuka.

Merenja su vršena u vremenskim periodima od aprila do juna 2023. godine. Prema zahtevima standarda određivane su i temperature površine kolovoza i vazduha; u određenim periodima nije bilo moguće određivati karakteristike makroteksture usled vlažnosti / prisutnosti vode na kolovozu. Kako je ponašanje kolovoznih konstrukcija kroz vreme zavisno i od temperature, korišćeni su dostupni podaci Republičkog hidrometeorološkog zavoda, u periodu od interesa. U narednom delu prikazani su podaci o srednjim godišnjim temperaturama za poslednju dostupnu godinu, tabela 2.

Tabela 2. *Podaci o srednjim godišnjim temperaturama od interesa – [1]*

Deonica	Nadmorska visina	Godina	Srednja temperatura
Broj puta A1 – Deonica petlja Ostružnica – Petlja Orlovača	132	2022	14.6
Broj puta A1 – Deonica Predejane - Vladičin Han	311	2020	11.7
Broj puta A2 – Deonica petlja Takovo - petlja Preljina	/	/	/
Broj puta A4 – petlja Bela Palanka – Petlja Pirot zapad Broj puta A4 – petlja Pirot zapad – petlja Pirot istok	373	2021	13.8

2.2. Metode određivanja površinskih karakteristika

Za potrebe određivanja površinskih karakteristika kolovoznih površina korišćene su standardizovane metode ispitivanja (SRPS EN), s tim što su korišćene tzv. Statične metode – metode kojima se određuju karakteristike na pojedinim mestima, a ne kontinualno (npr. SRPS EN 13473-1[6]).

Određivanje makroteksture je izvršeno upotrebom standardizovane metode - sand patch method - SRPS EN 13036-1 [7] – korišćenjem staklenih perli prema zahtevu standarda, sa tim da su za pojedinačne lokacije izvršena dva određivanja – tako da rezultat predstavlja srednju vrednost dva određivanja za lokaciju. Zapremina posude za pesak je definisana za datu opremu kao V=31604 mm^3. Vrednost je izražena prema standardu kao mm.

Određivanje otpornosti proklizavanja je izvršeno upotrebom standardizovane metode – British pendulum tester SRPS EN 13036-4 [8] – za svaku lokaciju je merena temperatura klizača i temperatura površine kolovoza infracrvenim termometrom. Jedna lokacija je određena za tri merenja, centralno i pomerajem za po 100mm

levo i desno, čime je definisana srednja vrednost u opsegu površine kolovoza od 400mm; vrednost PTV je korigovana za temperaturu kolovoza. Vrednost je izražena kao PTV vrednost za ceo broj.

Određivanje kolotraga je izvršeno standardizovanom metodom – SRPS EN 13036-7 [9] – upotrebom letve i klina i određivanjem najveće deformacije u poprečnom smislu. U svim slučajevima najopterećenija traka je ujedeno bila i vozna traka za koju su određene površinske karakteristike kolovozne površine. Vrednost je izražena prema standardu na celi milimetar.

2.3. Korišćene korelacije i kriterijumi

U odnosu na vrednost određene makroteksture MTD (ETD (Estimated texture depth)), upotrebom sledećih korelacija izračunate su vrednosti za MPD (Mean Profile Depth), u cilju poređenja sa vrednostima koje su definisane u okviru dokumentacije, a koje određuju strateške vrednosti za praćenje performansi na nivou mreže [4]. upotrebom sledećih korelacija koje su procenjene upotrebom znatnim podacima za više tipova kolovoznih zastora i podataka na osnovu kojih su određene [5]:

$$ETD = 0.2 + 0.8 \cdot MPD \quad [1]$$

Korelacija je korišćena za potrebe ocene stanja u skladu sa zahtevima definisanim u okviru strateškog dokumenta [4].

Kao i relacije koja je predložena na osnovu dodatnih empirijskih podataka i korelacija [13]:

$$ETD = 0.96 \cdot MPD + 0.139 \quad [2]$$

Potrebno je napomenuti u kontekstu navedenih relacija, da su određeni autori [13] na osnovu iscrpnih istraživanja i dostupnosti podataka uspostavili i druge korelacije. Poslednje izdanje evropskog standarda EN 13473-1 (izdanje 2019) [6], uspostavlja takođe linearnu korelaciju, ali bez odsečka na ordinati:

$$ETD = 1.1 \cdot MPD \quad [3]$$

Za potrebe vrednovanja otpornosti proklizavanja u odnosu na vrednosti koeficijenta trenja prepoznata je relacija koja je zasnovana na empirijskim odnosima, koji ukazuju da su vrednosti PTV (BPN) izvedeni izjednačavanjem utrošene energije kretanja klatna u odnosu na rad utrošen na trenje između klizača i opitne površine, prikazanim u okviru [10] i koji ukazuju da relacija između koeficijenta trenja μ i vrednosti PTV (BPN) nisu izrazito linearne:

$$BPN = 330 \cdot \mu/(3 + \mu) \quad [4]$$

Od dostupnih kriterijuma za vrednovanje nivoa karakteristika korišćene su preporuke na osnovu aktivnosti [4], u okviru kojih su prepoznate i date osnovne klasifikacije za grupe, a samim tim i opsezi za klasifikaciju – u ovom slučaju za saobraćajnice sa najvišim rangom: autoputeve i motoputeve. U okviru dokumenta predlog je dat na osnovu parametra MPD (Mean Profile Depth), koji se određuje upotrebom sistema sa laserskim profilometrima i koji pružaju kontinualne podatke o profilu. Na osnovu prethodno utvrđenih korelacija, podaci dobijeni statičkom metodom i parametrom MTD (Mean Texture Depth) su preračunati za dve potencijalne korelacione preporuke, tabela 3.

Tabela 3. *Indikatori performansi – preporuke za parametar MPD [4]*

Makrotekstura (MPD (mm))	Veoma dobro		→		Veoma loše
Klasifikacija za grupe	0 – 1	1 – 2	2 – 3	3 – 4	4 - 5
Opsezi za klasifikaciju – preporuka za autoputeve	1.25 – 1.06	1.06 – 0.87	0.87 – 0.68	0.68 – 0.49	0.49 – 0.30

Kao pregled i potencijalni kriterijum za vrednovanje parametara otpornosti na proklizavanje, a u okviru istog dokumenta [4], dat je predlog za dva potencijalna parametra koeficijenta trenja SFC (brzine od 60 km/h) i LFC (brzine do 50 km/h), tabela 4. U suštini, ponašanje na kontaktu pneumatik – kolovoz sa aspekta koeficijenta trenja u mnogome zavisi od same brzine pri kojoj se određuju parametri nekom od poznatih metoda, relacija koja je u ovom slučaju upotrebljena sa korelaciju između parametra PTV i koeficijenta trenja treba da se koristi

veoma oprezno, ali je ipak prikazana, jer prateći podatke i analizu [12] postoji određena zadovoljavajuća korelacija za brzine do 40 km/h.

Tabela 4. *Indikatori performansi – preporuke za parametar otpornost proklizavanju [4]*

Otpornost na klizanje (-)	Veoma dobro		→		Veoma loše
Klasifikacija za grupe	0 – 1	1 – 2	2 – 3	3 – 4	4 - 5
Opsezi za klasifikaciju – preporuka za SFC (60 km/h)	0.64 – 0.58	0.58 – 0.52	0.52 – 0.47	0.47 – 0.41	0.41 – 0.35
Opsezi za klasifikaciju – preporuka za LFC (50 km/h)	0.67 – 0.60	0.60 – 0.53	0.53 – 0.46	0.46 – 0.38	0.38 – 0.31

3. REZULTATI I DISKUSIJA

U ovom delu predstavljeni su podaci na osnovu određivanja parametara PTV i MTD, prikazani zajedno sa podacima deskriptivne statistike – radi referenciranja značaja podataka. Treba imati u vidu da vrednosti ne predstavljaju pojedinačne, već vrednosti za pojedine segmente, ali radi jednostavnosti su prikazane kao jedinstvene – u okviru svake vrednosti se nalazi još n-vrednosti koje su odabrane za datu deonicu, a na osnovu procenjene karakteristične površine uzorka.

Na svakoj lokaciji na kojoj je vršeno određivanje izvršeno je pravljenje foto-zapisa upravno na površinu – za potrebe kasnije spektralne analize (nije analizirano u ovom radu) upoređenjem sa realnim podacima, slike 2 - 6.

Slika 2. karakteristična tekstura kolovozne površine – asfaltni zastor

Slika 3. karakteristična tekstura kolovozne površine – asfaltni zastor

Slika 4. karakteristična tekstura kolovozne površine – betonski zastor

Slika 5. Određivanje površinskih karakteristika – nakon određivanja za asfaltni zastor

Slika 6. Određivanje površinskih karakteristika – šema određivanja za betonski zastor

3.1.Podaci o vrednostima makrotekstura MTD

U zavisnosti od perioda puštanja u saobraćaj, klimatskih uslova na datoj relaciji, učešća teških teretnih vozila, kao i od samih materijala i discipline izvođenja radova, dobijeni su podaci. U najvećem broju slučajeva, prateći preporuke [4] (Tabela 3), deonice pokazuju zadovoljavajuće vrednosti, u dva slučaja su dobijene vrednosti koje mogu da ukažu na potencijalni problem tokom eksploatacije – ove vrednosti bi trebalo pratiti kao i progresiju vrednosti kroz vreme. U okviru tabele 5 su dati sumarni podaci određivanja.

Gledajući podatke statistike u najvećem delu deonica postoji određena značajna varijabilnost, preko koeficijenta varijacije CV, u mnogome zavisi od odabira samih deonica, dodatnu informaciju i mišljenje o varijabilnosti je dato u okviru poglavlja 3.3.

Na deonicama i potezima na kojima su određivane karakteristike nisu određene značajne deformacije kolovoznih konstrukcija – pojava kolotraga. Sve vrednosti koje su uočene su reda veličine do 4mm, što nije iznenađujuće imajući u vidu klimatske uslove i nivo saobraćajnog opterećenja.

Tabela 5. *Podaci o vrednostima makrotekstura*

Deonica	Strana	Srednje MTD_{avg} (mm)	Stand. dev. (mm)	Min (mm)	Maks (mm)	CV (%)	MPD - PIARC (ASTM) (mm)	MPD - korelacija (mm)
1051/1052	Desna	**0.653**	0.100	0.532	0.761	15.249	**0.566**	**0.535**
	Leva	**0.767**	0.147	0.631	0.969	19.101	**0.709**	**0.655**
1111/1112	Desna	**0.880**	0.114	0.729	1.006	12.932	**0.850**	**0.772**
	Leva	**0.851**	0.214	0.542	1.129	25.175	**0.814**	**0.742**
1113/1114	Desna	**0.796**	0.035	0..744	0.822	4.403	**0.745**	**0.684**
	Leva	**1.071**	0.092	0.902	1.208	8.865	**1.088**	**0.970**
2011/2012	Desna	**0.554**	0.052	0.487	0.607	9.359	**0.442**	**0.432**
	Leva	**0.499**	0.019	0.466	0.518	3.715	**0.373**	**0.375**
4009/4010	Desna	**1.157**	0.125	1.006	1.392	10.837	**1.196**	**1.060**
	Leva	**1.073**	0.035	1.032	1.129	10.837	**1.091**	**0.973**
4011/4012	Desna	**1.226**	0.227	0.912	1.392	18.475	**1.283**	**1.133**
	Leva	**/**	/	/	/	/	**/**	**/**

Podaci o vrednostima makrotekstura za betonski zastor su dati u tabeli 6, sa napomenom da je ovo veoma ograničen set podataka. Vrednosti koje su dobijene ukazuju na veoma nizak nivo makrotekstura, što potencijalno može da ima značajan uticaj na bezbednost saobraćaja. Generalno, ovakav set podataka ne bi trebalo eliminaciono posmatrati prema izboru cementno-betonskih kolovoznih konstrukcija – na ovom setu

deonica je uočeno da nije u dovoljnoj meri izvršeno profilisanje površina betonskih kolovoza, u cilju postizanja zadovoljavajućih karakteristika – površine su bile značajno glatke.

Tabela 6. *Podaci o vrednostima makrotekstura – betonski zastor*

Deonica	Strana	Srednje MTD_{avg} (mm)	St dev (mm)	Min (mm)	Maks (mm)	CV (%)	MPD - PIARC (ASTM) (mm)	MPD - korelacija (mm)
2011/2012	/	**0.520**	0.153	0.290	0.657	29.370	**0.400**	**0.397**
4007/4008	/	**0.323**	0.026	0.286	0.353	8.095	**0.154**	**0.192**

3.2. Podaci o vrednostima otpornosti proklizavanju PTV

Podaci dobijeni ispitivanjima su dati u tabeli 7, zajedno sa korelacionim vrednostima koeficijenta trenja μ. Vrednost parametra PTV, koji bi u određenoj meri trebao da se kreće u opsegu 50-70 jedinica, je u ovim slučajevima relativno zadovoljavajući. Najveći broj vrednosti konvergira prema opsegu od 55-65 jedinica, što bi trebalo da bude u skladu sa vrstom agregata koji je upotrebljen – eruptivnog porekla – za habajuće slojeve. Kada se radi o statistici vrednosti PTV, ukazuje na bolje odnose koeficijenata korelacije – što bi trebalo da pruži bolje poverenje u rezultate kada se vrši ocena srednje vrednosti. U isto vreme, ovakve statističke veličine mogu da ukažu i na relativno manju osetljivost metode na varijacije prema podeljenim deonicama.

Tabela 7. *Podaci o vrednostima PTV*

Deonica	Strana	Srednje PTV_{avg}	Srednje μ	ST dev	Min	Maks	CV (%)
1051/1052	Desna	**59**	**0.65**	1.74	57	62	2.93
	Leva	**58**	**0.64**	2.38	55	60	16
1111/1112	Desna	**60**	**0.67**	3.08	57	63	5.14
	Leva	**60**	**0.67**	5.07	56	67	8.49
1113/1114	Desna	**61**	**0.68**	5.55	56	68	9.17
	Leva	**60**	**0.67**	4.54	56	68	7.60
2011/2012	Desna	**60**	**0.67**	1.46	59	62	2.43
	Leva	**53**	**0.57**	0.67	53	54	1.25
4009/4010	Desna	**64**	**0.74**	2.2	62	66	3.47
	Leva	**66**	**0.75**	4.81	62	72	7.26
4011/4012	Desna	**68**	**0.78**	7.2	62	76	10.7
	Leva	/	/	/	/	/	/

Vrednosti za PTV za kolovoze sa betonskim zastorima su dati unutar tabele 8 i ukazuju na najniže vrednosti izmerene na predmetnim deonicama, ali opet unutar očekivanog opsega. Za razliku od vrednosti makrotekstura – ovi izabrani betonski zastori zadovoljavaju na graničnom nivou po pitanju očekivanih vrednosti, kada je u pitanju bezbednost saobraćaja.

Tabela 8. *Podaci o vrednostima PTV – betonski zastor*

Deonica	Strana	Srednje PTV_{avg}	Srednje μ	ST dev	Min	Maks	CV (%)
2011/2012	/	**52**	**0.56**	3.87	49	57	7.41
4007/4008	/	**54**	**0.59**	3.81	50	57	7.00

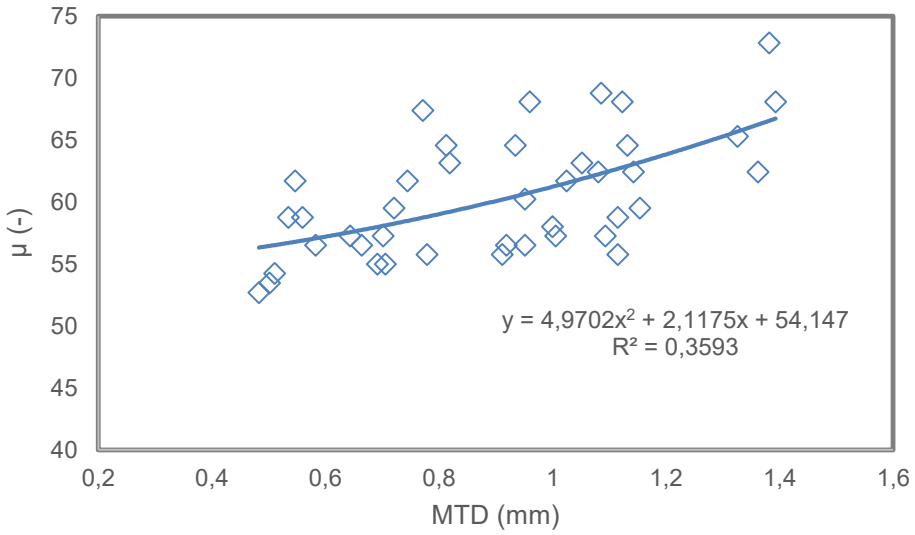
3.3. Makrotekstura u odnosu na korelacioni koeficijent trenja μ za sve deonice koje su snimljene

Na sledećem dijagramu, slika 7, prikazani su sumarni srednji podaci po deonicama kako su prikupljani, u cilju pregleda varijabilnosti i testiranja verodostojnosti rezultata. Generalno, postoji direktni trend između ova dva seta podataka, ali je korelacija podataka data kao manje značajna, i konstatuje se da postoji značajno rasipanje podataka oko linije trenda. Uopšteno je usvojena regresiona jednačina koja predstavlja polinom

drugog stepena. Potrebno je naglasiti da još jedan faktor može da utiče na odnos MTD-μ, a to predstavlja odabir dužina (površina) deonica, ovaj odnos je zapravo sumiran na više površina i na taj način je upoređen [13].

Treba imati u vidu da mikrotekstura predstavlja glavni doprinos trenju površine. Znajući to, sagledavanje ovako velike varijabilnosti može da se dodeli znatnim razlikama u mikroteksturi za pojedine deonice. Iako je pretpostavka da se za određene deonice koriste isti materijali i kombinacija materijala, kao i da se disciplina u svakom segmetnu sprovodi isto, što ipak najčešće nije slučaj.

Kako brzina ima uticaj na parametar - otpornost protiv proklizavanja, pogotovo je pronađena dobra korelacija na većim brzinama [13], treba imati u vidu da se određivanje PTV sprovodi pri pretpostavljenim relativno malim brzinama, makrotekstura ima uticaj na brzinu promene trenja pri promenljivim brzinama.



Slika 7. Odnos μ prema MTD za srednje vrednosti parametara prema deonicama

U nastavku je dat primer kako grupisanje rezultata može predstaviti različite nivoe korelacije, za npr. praćenje performansi na nivou mreže. U okviru tabele 9, prikazane su korelacije u zavisnosti i od prikupljenih podataka i od broja deonica koje se posmatraju u okviru jedne analize. Parametar R^2 varira u značajnoj meri i generalno zavisnost nije jasno uočena od broja lokacija i broja deonica koje su posmatrane.

Tabela 9. *Podaci o vrednostima MTD u odnosu na μ - na izabranim potezima*

Deonica državnog puta	Broj deonica koje se posmatraju	Polinom drugog stepena	R^2
A2	5	$y = 117.1x^2 – 266.95x + 212.5$	0.2824
A4	4	$y = 455.31x^2 – 572.69x + 235.15$	0.5513
A4	2	$y = -50.553x^2 – 84.212x + 26.6$	0.1542
A4	4	$y = -81.121x^2 – 117.81x + 19.786$	0.8624
A1	2	$y = 3.4673x^2 + 4.7044x + 53.631$	0.6127
A1	3	$y = -14.121x^2 – 26.892x + 45.095$	0.1036

4. ZAKLJUČAK

Na osnovu podataka koji su prikupljeni u ovom ograničenom postupku prikupljanja parametara ponašanja kolovoznih konstrukcija u pogledu površinskih karakteristika:

- Generalno, za potrebe adekvatne ocene ponašanja kolovoznih površina potrebno je prikupljati podatke i mikrotekstura i makrotekstura (prednost treba dati dinamičkim načinima prikupljanja, a statičke koristiti za proveru podataka).

- Uopšteno, za prikupljanje podataka na nivou mreže bolje se pokazalo svođenje srednjih vrednosti na dužim potezima.
- Upoređenjem više korelacija konstatuje se da postoji određeno odstupanje, jedni su prepoznati kroz standardizovane postupke dok su ostali u fazi eksperimentalnog prikupljanja.
- Vrlo je važno utvrditi podatke pri nultoj fazi (prilikom prijema objekta) i pratiti ponašanje kroz vreme, a pogotovu sa stanovišta promene klime i sve većeg rasta saobraćajnog opterećenja.
- Vrednosti makroteksture i otpornosti proklizavanju ukazuju da za asfaltne zastore i za mešavine proizvedene po klasičnom postupku trenutna praksa daje adekvatne rezultate.
- Vrednosti makroteksture i otpornosti proklizavanju, na ograničenom uzorku, za cementno-betonske zastore ukazuju da postoje određene neusaglašenosti između faze izvođenja i faze pripreme površine za saobraćaj vozila (primena tehnologija npr. Diamond grinding znatno povećevaju iznose izvođenja).
- Iako postoje preporučene vrednosti za makroteksturu i otpornost proklizavanju, potrebno je usaglasiti i doneti kriterijume u skladu sa dostupnim znanjem, tehnologijom izvođenja, dostupnim materijalima, klimatskim promenama i realnim saobraćajnim opterećenjem.

Generalno, na ograničenom uzorku su analizirane površinske karakteristike od interesa i sa aspekta bezbednosti saobraćaja i sa aspekta upravljanja putnom mrežom, u ovom slučaju autoputskom, Republike Srbije. Dostupnost tehnologija za određivanje površinskih karakteristika je u današnjem vremenu velika, postoji dovoljan broj radova koji analiziraju moguće korelacije različitih parametara. Praćenje ponašanja površinskih karakteristika kolovoznih površina je od strateškog interesa za upravljanje bezbednošću saobraćaja i upravljanjem putnom mrežom.

Zahvale

Autori rada se zahvaljuju Laboratoriji za Kolovozne konstrukcije, Instituta za Saobraćajnice i Geotehniku, Građevinskog fakulteta Univerziteta u Beogradu, zbog mogućnosti da se laboratorijska oprema koristi u svrhu naučnog istraživanja određivanja površinskih karakteristika kolovoznih površina, čiji su rezultati prikazani u radu.

Literatura

[1] Republika Srbija, Republički hidrometeorološki zavod, 2023, https://hidmet.gov.rs/latin/meteorologija/klimatologija_godisnjaci.php
[2] Javno Preduzeće Putevi Srbije, 2023, https://www.putevi-srbije.rs/index.php/sr/brojanje-saobra%C4%87aja
[3] International PIARC Experiment to Compare and Harmonize Texture and Skid Resistance Measurements, PIARC , 1995. , p. 346, (on-line) available at: https://urn.kb.se/resolve?urn=urn%3Anbn%3Ase%3Avti%3Adiva-18200
[4] COST Action 354 Performance Indicators for Road Pavements, Final Report, July 2008, (on-line) available at: http://cost354.zag.si/fileadmin/cost354/1fr/COST354_FinalReport_05062008.pdf
[5] ASTM E 1845-15. 2016. Standard practice for calculating pavement macrotexture mean profile depth. Book of ASTM standards, https://www.astm.org/e1845-15.html
[6] SRPS EN ISO 13473-1:2019 - Karakterizacija teksture kolovoza korišćenjem površinskih profila – Deo 1: Određivanje srednje dubine makroteksture profila: https://iss.rs/sr_Cyrl/project/show/iss:proj:62715
[7] SRPS EN 13036-1:2012 - Površinske karakteristike puteva i aerodromskih saobraćajnih površina – Metode ispitivanja – Deo 1: Merenje dubine makroteksture površine kolovoza pomoću metode zapreminske ispune, https://iss.rs/sr_Cyrl/project/show/iss:proj:37937
[8] SRPS EN 13036-4:2012 - Površinske karakteristike puteva i aerodromskih saobraćajnih površina – Metode ispitivanja – Deo 4: Metoda za merenje otpornosti površine na proklizavanje/klizanje - Ispitivanje klatnom, https://iss.rs/sr_Cyrl/project/show/iss:proj:37940
[9] SRPS EN 13036-7:2012 - Površinske karakteristike puteva i aerodromskih saobraćajnih površina – Metode ispitivanja –Deo 7: Merenje nepravilnosti površine slojeva kolovozne konstrukcije: ispitivanje ravnjačom
[10] Theoretical and practical engineering significance of British pendulum test L. Chu, Weiwei Guo & T. F. Fwa, 2020, https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/10298436.2020.1726351
[11] Hall, J.W. et al., 2009, NCHRP web document 108: guide for pavement friction. Washington DC: Transportation Research Board of the National Academies
[12] Dr Janez Žmavc, Kriterij za kvantitativno vrednovanje karakterističnih svojstava savremenih voznih površina, 1981, Institut za puteve – Beograd

[13] Nima Kargah-Ostadi, Andrew Howard, Monitoring Pavement Surface Macrotexture and Friction, 2015, Transportation Research Record, Journal of the Transportation Research Board, No.2525, Trasnportation Research Board, Washington nDC, pp 111-117, doi: 10.3141/2525-12
[14] Nicholas Frisco, Halil Sezen, Comparison of surface macrotexture measurement methods, 2013 volume 19, Journal of civil engineering and management, doi:10.3846/13923730.2013.802732
[15] Roe, P.G., A.R. Parry, and H.E. Viner. High and Low speed skidding resistance: The influence of texture Depth. Report 367. UK transport research laboratory, London 1998

АНАЛИЗЕ КАПАЦИТЕТА У ПОСТУПЦИМА ПЛАНИРАЊА АУТОПУТЕВА

Милица Тубић, маст. инж. саобр.
milica.tubic@hps.rs

Данијела Ротула, дипл. инж. саобр.
danijela.rotula@hps.rs

Марија Стојановић, дипл. инж. саобр.
marija.stojanovic@hps.rs

Ана Русић, дипл. инж. саобр.
ana.rusic@hps.rs

Милош Мицковић, маст. инж. саобр.
milos.mickovic@hps.rs

Резиме: У Приручницима за капацитет путева (HCM) до 2022.г., дефинисана су 3 нивоа анализе капацитета: оперативна, пројектна и планерска. Нивои детаљности сваке од анализа су у функцији сврхе и ширине приступа. Планерском анализом се утврђује капацитет у раним фазама планирања, када је доступан мали број података и информација. Процедура планирања је заснована на прогнози ПГДС-а и макро симулацији саобраћаја. Планерске анализе су усмерене на питања као што су идентификација проблема, концепт пројекта пута и поређење алтернатива. Планерске анализе се јављају у фази процеса када је познато мало детаља о потражњи са циљем одређивања потребног броја трака аутопута и попречног профила како би се одржао захтевани Ниво Услиге. Методологија дата у HCM-у подразумева коришћење препоручених вредности инпута, односно генерализованих табела дневних капацитета. С обзиром да су препоручене вредности капацитета засноване на типичним профилима аутопутева и карактеристикама саобраћаја у САД, у раду је урађена детаљна анализа капацитета за локалне услове – 3 стандардна геометријска профила аутопутева за различите вредности меродавног протока, слободне брзине, фактора вршног сата, утицаја комерцијалних возила и типа терена, како би се упоредили са вредностима капацитета из HCM_{2022}. Упоредна анализа указује на разлике у вредностима капацитета, па се резултати ових анализа препоручују за примену у Републици Србији.

Кључне речи: *Капацитет, Планерска анализа, ПГДС, Highway Capacity Manual*

CAPACITY ANALYSES IN HIGHWAY PLANNING PROCEDURES

Milica Tubić, M.Sc. T.E.
milica.tubic@hps.rs

Danijela Rotula, B.Sc. T.E.
danijela.rotula@hps.rs

Marija Stojanović, B.Sc. T.E.
marija.stojanovic@hps.rs

Ana Rusić, B.Sc. T.E.
ana.rusic@hps.rs

Miloš Micković, M.Sc. T.E.
milos.mickovic@hps.rs

Abstract: In all Highway Capacity Manual (HCM) editions, incuding 2022, three levels of capacity analyses were defined: operational, design and planning and preliminary engineering analysis. The levels of detail of each analysis serve the purpose and breadth of approach. Planning analysis determines capacity in the early stages of planning when only a small amount of data and information is available. The planning procedure is based on traffic demand forecasts and macro traffic simulations. Planning analysis focus on issues such as problem identification, road design concepts and alternative comparisons. Planning analysis occur in the process phase when little detail is known about demand to determine the required number of highway lanes and cross-section profiles to maintain the required Level of Service (LOS). The methodology provided in the HCM involves using recommended input values, i.e., generalized tables of daily capacities. Since the recommended capacity values are based on typical freeway profiles and traffic characteristics in the USA, a detailed capacity analysis was conducted for local conditions in this study – three standard geometric highway profiles for different relevant flow values, free flow speeds, peak-hour factors and percent of heavy vehicles to compare with HCM_{2022} capacity values. Comparative analysis indicates differences in capacity values, thus the results of these analyses are recommended for application in the Republic of Serbia.

Key Words: *Capacity, Planning and preliminary engineering analysis, AADT, Highway Capacity Manual*

1. УВОД

Амерички Приручник за капацитет путева (енг. Highway Capacity Manual - HCM) је један од основних докумената саобраћајне струке од свог првог издања из 1950. године. Кроз сва издања приручника дефинисане су методологије за прорачун капацитета на путевима и анализу Нивоа Услуге. Капацитет представља максималну величину протока возила која се може остварити на посматраном функционалном делу мреже у јединици времена при преовлађујућим техничко-експлоатационим, саобраћајним, регулативним и амбијенталним условима.

Са друге стране, Ниво Услуге се дефинише као квалитативна мера услова у саобраћајном току, која се исказује одговарајућим критеријумима обзиром на функционални део мреже.

Сва релевантна издања Приручника за капацитет путева дефинишу три нивоа анализе капацитета: оперативну, пројектну и планерску и прелиминарну инжењерску анализу. Фокус рада је планерска анализа којом се утврђује капацитет у најранијим фазама планирања, када је доступан мали број података и информација. Методологија препоручена у HCM-у подразумева коришћење подразумеваних вредности инпута, односно генерализованих табела обима услуге. С обзиром да су препоручене вредности засноване на типичним профилима путева и карактеристикама саобраћајног тока у САД, кључни допринос рада јесте детаљна анализа капацитета на планерском нивоу за локалне услове у Републици Србији.

2. НИВОИ АНАЛИЗЕ КАПАЦИТЕТА У САОБРАЋАЈНОМ ИНЖЕЊЕРСТВУ

Сва релевантна издања Приручника за капацитет аутопутева дефинишу 3 нивоа анализе капацитета. Нивои детаљности су у функцији од сврхе анализе и количине доступних информација, а то су:

- Оперативна анализа;
- Пројектна анализа;
- Планерска и прелиминарна инжењерска анализа.

Сви нивои анализа заснивају на истим принципима и основним методама. Потребни улазни подаци обично су исти на сваком нивоу анализе, али се разликује степен у коме се подразумеване вредности користе уместо измерених или прогнозираних вредности. Оперативне и планерске анализе често процењују Ниво Услуге који ће бити резултат датог скупа улазних података, док пројектне анализе процењују карактеристике инфраструктурног објекта које ће бити потребне да би се постигао жељени Ниво Услуге.

У оперативној анализи достигнути или прогнозирани саобраћајни ток и карактеристике тока упоређују се са познатим (постојећим) или пројектованим карактеристикама пута, да би се утврдио Ниво Услуге који постоји или који се очекује. За конкретно утврђивање Нивоа Услуге неопходни су најдетаљнији подаци о саобраћајним токовима које укључују величину тока, фактор вршног часа, расподелу тока по смеровима и структуру тока.

На овом нивоу анализе све геометријске карактеристике пута морају бити познате: број и ширина трака, ширина банкина, удаљеност бочних сметњи, прегледност, рачунска брзина, као и полупречници хоризонталних и вертикалних кривина. На местима где постоји контрола саобраћаја, односно на семафорисаним раскрсницама, у потпуности морају бити дефинисани услови контроле укључујући тип контроле, дужину циклуса, фазе, трајање зеленог времена и други фактори.

У оперативној анализи, аналитичар директно примењује методологију и испоручује све потребне улазне параметре из измерених или прогнозираних вредности. Због непосредног, краткорочног фокуса оперативних анализа, могуће је обезбедити детаљне инпуте за моделе - многи од улазних података могу бити засновани на теренским истраживањима саобраћаја, физичким карактеристика и контролним параметрима. Генерално, није препоручљиво користити подразумеване вредности на овом нивоу анализе. Због потребе за детаљним прикупљањем података, оперативне анализе обезбеђују највиши ниво тачности, с напоменом да резултати анализа могу бити веома прецизни, али свака варијабилност повезана са инпутима модела може утицати на резултате модела.

Оперативна анализа служи да се из различитих мера утврди, упореди и донесе рационална одлука користећи резултате ове анализе и друге релевантне информације. Већина процедура омогућава не

само утврђивање Нивоа Услуге, већ и граничне вредности параметара. Алтернативна употреба резултата оперативних анализа је да се одреде реалне резерве у капацитету на посматраном функционалном делу мреже. Овакве анализе су веома употребљиве и за одређивање осетљивости резерве у прихватању прогнозираног саобраћајног тока за одређени Ниво Услуге.

Пројектна анализа је кључна за одређивање броја трака које се захтевају на одређеном правцу или коридору, ради остваривања жељеног Нивоа Услуге. Поред броја трака, анализа се може користити за утврђивање утицаја и других пројектних елемената на капацитет и Ниво Услуге, као што су прегледност, полупречници кривина и друго. Детаљни подаци очекиваног саобраћајног тока и услова саобраћаја су неопходни, као и стандардне геометријске мере које се користе у пројектовању: ширина трака, бочне сметње, рачунска брзина и радијуси хоризонталих и вертикалих кривина.

Планерска и прелиминарна инжењерска анализа представља широку оцену Нивоа Услуге, а на овом нивоу анализа капацитета и Нивоа Услуге у планирању даје одговоре на следећа питања:

- Колики је максималан број возила који се може опслужити у одређеном временском периоду?
- Који се Ниво Услуге очекује у будућности на мрежи са и без инвестиција?
- Које су карактеристике пута или сигнализације неопходне за различита саобраћајна оптерећења на најоптерећенијим саобраћајницама у региону?

Планерском анализом се често утврђује Ниво Услуге у најранијим фазама планирања, када је доступан мали број података. Процедура планирања најчешће је заснована на прогнози ПГДС-а (Просечан годишњи дневни саобраћај) и макро симулацији саобраћаја. Често употреба симулационих модела са невалидним улазним подацима може довести до грешака. Због тога се при генералним планерским анализама мора спровести провера када буде доступан већи број информација. Процес планерске анализе кроз касније фазе може да достигне ниво пројектне анализе.

3. ПЛАНЕРСКА И ПРЕЛИМИНАРНА ИНЖЕЊЕРСКА АНАЛИЗА У ОКВИРУ HCM2022 [1]

У планерским и прелиминарним инжењерским анализама, аналитичар примењује HCM методологију користећи подразумеване вредности за скоро све улазне податке модела – на пример, коришћењем генерализованих табела обима услуга. Резултати су генерално мање прецизни, али употреба подразумеваних вредности смањује количину података које је неопходно прикупити и време потребно за реализацију истраживања и анализе. Анализа на овом нивоу је обично фокусирана на услове у будућности, где је пожељно у кратком року поредити серије алтернатива или када конкретне вредности потребне за процедуре нису познате (не могу сви инпути бити познати) или предвидљиве. У студији планирања великих размера, где је предмет анализе велики број путева, овај ниво анализе може бити најбоља опција, с обзиром на временска и буџетска ограничења. Овакве анализе такође су погодне и за процену предложене системске политике, као што је контрола коришћења трака за тешка возила, ramp metering на аутопуту и друге примене интелигентних транспортних система, као и коришћење техника управљања потражњом (нпр. цене).

Конкретан циљ анализе на овом нивоу је најчешће одређивање потребног броја трака (типа пута) како би се одржао прихватљив Ниво Услуге као и истицање потенцијалних „уских грла“ (на пример, локације где потражња може премашити капацитет или где се може погоршати жељени Ниво Услуге).

Као што је наглашено, потражња се у оквиру планерске и прелиминарне инжењерске анализе изражава кроз вредности ПГДС-а, а понуда кроз дневне капацитете. Планиране величине будућег ПГДС-а трансформишу се у Q_m, на основу обрасца:

$$Qm = PGDS \times K \times D \qquad (1)$$

Где је:

Q_m – меродавни проток;

К – пропорција од ПГДС-а за меродавни вршни сат;

D - проценат тока у оптерећенијем смеру у меродавном сату.

С обзиром да проток 200-ог сата данас има примену у многим развијеним земљама, односно најчешће је у употреби, што је случај и у Србији, јасно су дефинисана препоручена процентуална учешћа вредности меродавног часовног протока у укупној вредности ПГДС-а (К) у односу на тип пута и његову функцију. Препоручена вредност К за критеријум 200-ог часа, у урбаним подручјима, креће се у распону од 8% до 10% (тј 0.08 до 0.10), док се за ванградске путеве вредност К креће у распону од 9% до 13% (тј од 0.09 до 0.13).

Карактеристике било ког датог пута ће се вероватно разликовати од претпостављених улазних вредности које се користе за израду табеле обима услуге. Према томе, резултате из табеле обима услуга треба третирати као апроксимације.

Вредности у овим табелама у овиру HCM-а дефинисане су засебно за сваки тип пута – двотрачне путеве, вишетрачне путеве и аутопутеве. У фокусу овог рада биће калибрација ових табела за локалне услове, пре свега за аутопутеве. У табели 1 приказане су вредности генерализованих вредности дневних капацитета за аутопутеве из HCM_{2022} које се најчешће користе у фази израде Генералног пројекта.

Претпостављене улазне вредности су:

- Проценат комерцијалних возила од 5% (за путеве у урбаним срединама) и од 12% (за путеве у руралним подручијима);
- Слободна брзина саобраћајног тока од 70mph;
- Вредност фактора вршног сата 0.94.

Табела 1. Генерализоване вредности дневних капацитета (обима услуге) за аутопутеве у урбаним срединама – равничарски терен (HCM_{2022})

К	D	Профил 2+2				Профил 3+3				Профил 4+4			
		„B“	„C“	„D“	„E“	„B“	„C“	„D“	„E“	„B“	„C“	„D“	„E“
0.08	0.50	56400	77400	94400	**107400**	84600	116200	141700	**161100**	112800	154900	188900	**214900**
	0.55	51300	70400	85900	**97700**	76900	105600	128800	**146500**	102500	140800	171700	**195300**
	0.60	47000	64500	78700	**89500**	70500	96800	118100	**134300**	94000	129100	157400	**179000**
	0.65	43400	59600	72700	**82600**	65100	89400	109000	**124000**	86800	119100	145300	**165300**
0.09	0.50	50100	68800	84000	**95500**	75200	103300	125900	**143200**	100300	137700	167900	**191000**
	0.55	45600	62600	76300	**86800**	68400	93900	114500	**130200**	91200	125200	152600	**173600**
	0.60	41800	57400	70000	**79600**	62700	86000	104900	**119400**	83600	114700	139900	**159200**
	0.65	38600	52900	64600	**73500**	57800	79400	96900	**110200**	77100	105900	129200	**146900**
0.10	0.50	45100	62000	75600	**85900**	67700	92900	113300	**128900**	90200	123900	151100	**171900**
	0.55	41000	56300	68700	**78100**	61500	84500	103000	**117200**	82000	112600	137400	**156300**
	0.60	37600	51600	63000	**71600**	56400	77400	94400	**107400**	75200	103300	125900	**143200**
	0.65	34700	47700	58100	**66100**	52100	71500	87200	**99200**	69400	95300	116200	**132200**
0.11	0.50	41000	56300	68700	**78100**	61500	84500	103000	**117200**	82000	112600	137400	**156300**
	0.55	37300	51200	62400	**71000**	55900	76800	93700	**106500**	74600	102400	124900	**142100**
	0.60	34200	46900	57200	**65100**	51300	70400	85900	**97700**	68400	93900	114500	**130200**
	0.65	31600	43300	52800	**60100**	47300	65000	79300	**90100**	63100	86600	105700	**120200**
0.12	0.50	37600	51600	63000	**71600**	56400	77400	94400	**107400**	75200	103300	125900	**143200**
	0.55	34200	46900	57200	**65100**	51300	70400	85900	**97700**	68400	93900	114500	**130200**
	0.60	31300	43000	52500	**59700**	47000	64500	78700	**89500**	62700	86000	104900	**119400**
	0.65	28900	39700	48400	**55100**	43400	59600	72700	**82600**	57800	79400	96900	**110200**

Табела 2. Генерализоване вредности дневних капацитета (обима услуге) за аутопутеве у урбаним срединама – брдовит терен (НСМ$_{2022}$)

K	D	Профил 2+2				Профил 3+3				Профил 4+4			
		„B“	„C“	„D“	„E“	„B“	„C“	„D“	„E“	„B“	„C“	„D“	„E“
0.08	0.50	53800	73900	90200	**102500**	80800	110900	135200	**153800**	107700	147800	180300	**205100**
	0.55	48900	67200	82000	**93200**	73400	100800	122900	**139800**	97900	134400	163900	**186400**
	0.60	44900	61600	75100	**85500**	67300	92400	112700	**128200**	89700	123200	150300	**170900**
	0.65	41400	56900	69300	**78900**	62100	85300	104000	**118300**	82800	113700	138700	**157800**
0.09	0.50	47900	65700	80100	**91200**	71800	98600	120200	**136700**	95700	131400	160300	**182300**
	0.55	43500	59700	72900	**82900**	65300	89600	109300	**124300**	87000	119500	145700	**165700**
	0.60	39900	54800	66800	**76000**	59800	82100	100200	**113900**	79800	109500	133600	**151900**
	0.65	36800	50500	61600	**70100**	55200	75800	92500	**105200**	73600	101100	123300	**140200**
0.10	0.50	43100	59100	72100	**82000**	64600	88700	108200	**123100**	86100	118300	144200	**164100**
	0.55	39200	53800	65600	**74600**	58700	80600	98400	**111900**	78300	107500	131100	**149200**
	0.60	35900	49300	60100	**68400**	53800	73900	90200	**102500**	71800	98600	120200	**136700**
	0.65	33100	45500	55500	**63100**	49700	68200	83200	**94700**	66300	91000	111000	**126200**
0.11	0.50	39200	53800	65600	**74600**	58700	80600	98400	**111900**	78300	107500	131100	**149200**
	0.55	35600	48900	59600	**67800**	53400	73300	89400	**101700**	71200	97700	119200	**135600**
	0.60	32600	44800	54600	**62100**	48900	67200	82000	**93200**	65300	89600	109300	**124300**
	0.65	30100	41400	50400	**57400**	45200	62000	75700	**86100**	60200	82700	100900	**114700**
0.12	0.50	35900	49300	60100	**68400**	53800	73900	90200	**102500**	71800	98600	120200	**136700**
	0.55	32600	44800	54600	**62100**	48900	67200	82000	**93200**	65300	89600	109300	**124300**
	0.60	29900	41100	50100	**57000**	44900	61600	75100	**85500**	59800	82100	100200	**113900**
	0.65	27600	37900	46200	**52600**	41400	56900	69300	**78900**	55200	75800	92500	**105200**

Табела 3. Генерализоване вредности дневних капацитета (обима услуге) за аутопутеве у руралним срединама – равничарски терен (НСМ$_{2022}$)

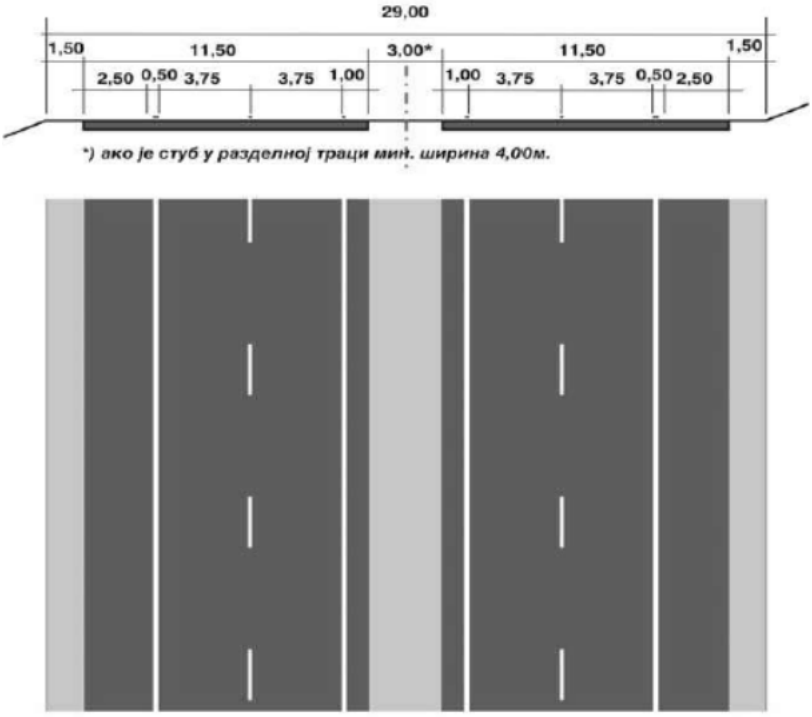
K	D	Профил 2+2				Профил 3+3				Профил 4+4			
		„B“	„C“	„D“	„E“	„B“	„C“	„D“	„E“	„B“	„C“	„D“	„E“
0.08	0.50	52900	72600	88500	**100700**	79300	108900	132800	**151100**	105800	145200	177100	**201400**
	0.55	48100	66000	80500	**91600**	72100	99000	120700	**137300**	96100	132000	161000	**183100**
	0.60	44100	60500	73800	**83900**	66100	90700	110700	**125900**	88100	121000	147600	**167900**
	0.65	40700	55800	68100	**77500**	61000	83800	102200	**116200**	81300	111700	136200	**154900**
0.09	0.50	47000	64500	78700	**89500**	70500	96800	118100	**134300**	94000	129100	157400	**179000**
	0.55	42700	58700	71600	**81400**	64100	88000	107300	**122100**	85500	117300	143100	**162800**
	0.60	39200	53800	65600	**74600**	58800	80700	98400	**111900**	78300	107600	131200	**149200**
	0.65	36200	49600	60500	**68900**	54200	74500	90800	**103300**	72300	99300	121100	**137700**
0.10	0.50	42300	58100	70800	**80600**	63500	87100	106300	**120900**	84600	116200	141700	**161100**
	0.55	38500	52800	64400	**73200**	57700	79200	96600	**109900**	76900	105600	128800	**146500**
	0.60	35300	48400	59000	**67100**	52900	72600	88500	**100700**	70500	96800	118100	**134300**
	0.65	32500	44700	54500	**62000**	48800	67000	81700	**93000**	65100	89400	109000	**124000**
0.11	0.50	38500	52800	64400	**73200**	57700	79200	96600	**109900**	76900	105600	128800	**146500**
	0.55	35000	48000	58500	**66600**	52400	72000	87800	**99900**	69900	96000	117100	**133200**
	0.60	32000	44000	53700	**61000**	48100	66000	80500	**91600**	64100	88000	107300	**122100**
	0.65	29600	40600	49500	**56300**	44400	60900	74300	**84500**	59200	81200	99100	**112700**
0.12	0.50	35300	48400	59000	**67100**	52900	72600	88500	**100700**	70500	96800	118100	**134300**
	0.55	32000	44000	53700	**61000**	48100	66000	80500	**91600**	64100	88000	107300	**122100**
	0.60	29400	40300	49200	**56000**	44100	60500	73800	**83900**	58800	80700	98400	**111900**
	0.65	27100	37200	45400	**51600**	40700	55800	68100	**77500**	54200	74500	90800	**103300**

Табела 4. Генерализоване вредности дневних капацитета (обима услуге) за аутопутеве у руралним срединама – брдовит терен (HCM_{2022})

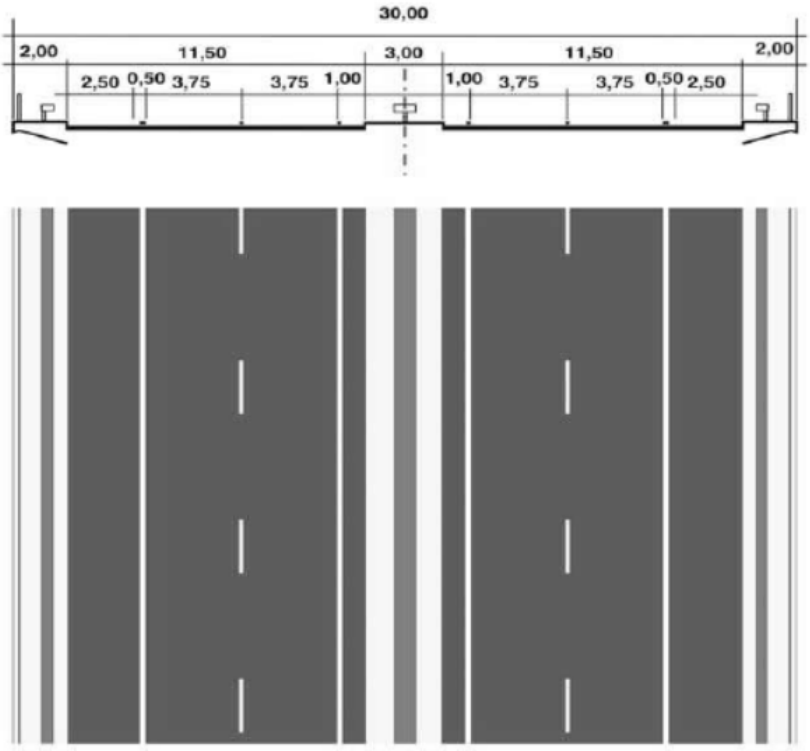
K	D	Профил 2+2				Профил 3+3				Профил 4+4			
		„B“	„C“	„D“	„E“	„B“	„C“	„D“	„E“	„B“	„C“	„D“	„E“
0.08	0.50	47800	65600	80000	**91000**	71600	98400	120000	**136500**	95500	131100	160000	**181900**
	0.55	43400	59600	72700	**82700**	65100	89400	109100	**124000**	86800	119200	145400	**165400**
	0.60	39800	54600	66600	**75800**	59700	82000	100000	**113700**	79600	109300	133300	**151600**
	0.65	36700	50400	61500	**70000**	55100	75700	92300	**105000**	73500	100900	123000	**140000**
0.09	0.50	42500	58300	71100	**80900**	63700	87400	106600	**121300**	84900	116600	142200	**161700**
	0.55	38600	53000	64600	**73500**	57900	79500	96900	**110300**	77200	106000	129300	**147000**
	0.60	35400	48600	52900	**67400**	53100	72900	88900	**101100**	70800	97100	118500	**134800**
	0.65	32700	44800	54700	**62200**	49000	67300	82000	**93300**	65300	89700	109400	**124400**
0.10	0.50	38200	52500	64000	**72800**	57300	78700	96000	**109200**	76400	104900	128000	**145500**
	0.55	34700	47700	58200	**66200**	52100	71500	87200	**99200**	69500	95400	116300	**132300**
	0.60	31800	43700	53300	**60600**	47800	65600	80000	**91000**	63700	87400	106600	**121300**
	0.65	29400	40400	49200	**56000**	44100	60500	73800	**84000**	58800	80700	98400	**112000**
0.11	0.50	34700	47700	58200	**66200**	52100	71500	87200	**99200**	69500	95400	116300	**132300**
	0.55	31600	43400	52900	**60100**	47400	65000	79300	**90200**	63200	86700	105800	**120300**
	0.60	28900	39700	48500	**55100**	43400	59600	72700	**82700**	57900	79500	96900	**110300**
	0.65	26700	36700	44700	**50900**	40100	55000	67100	**76300**	53400	73400	89500	**101800**
0.12	0.50	31800	43700	53300	**60600**	47800	65600	80000	**91000**	63700	87400	106600	**121300**
	0.55	28900	39700	48500	**55100**	43400	59600	72700	**82700**	57900	79500	96900	**110300**
	0.60	26500	36400	44400	**50500**	39800	54600	67100	**75800**	53100	72900	88900	**101100**
	0.65	24500	33600	41000	**46700**	36700	50400	80000	**70000**	49000	67300	82000	**93300**

4. АНАЛИЗА ДНЕВНИХ КАПАЦИТЕТА ЗА АУТОПУТЕВЕ У ЛОКАЛНИМ УСЛОВИМА

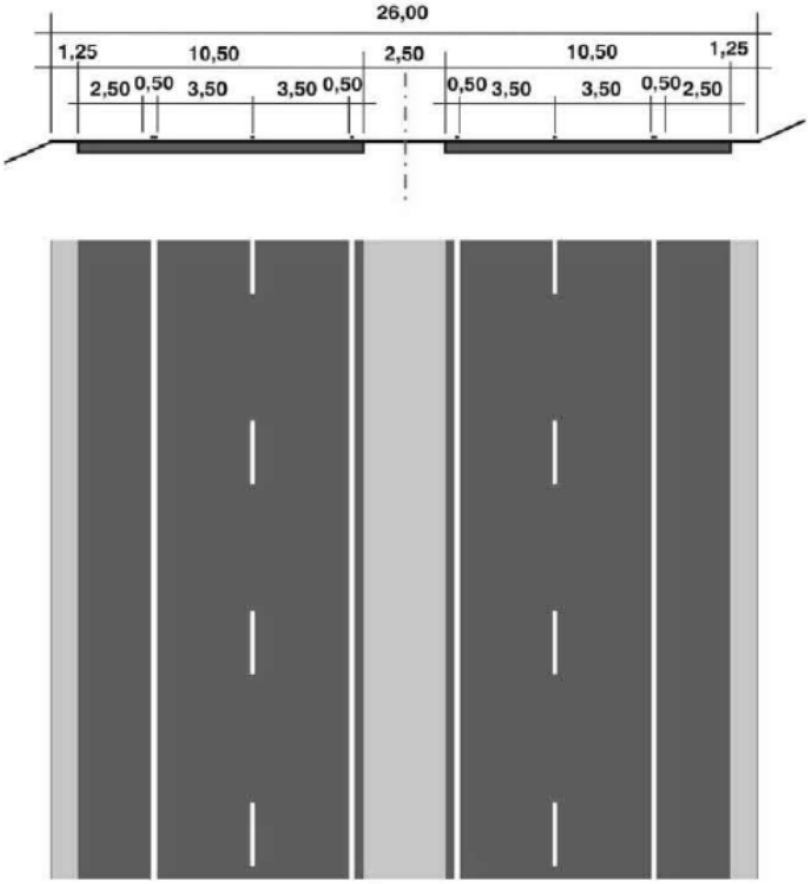
За анализу вредности дневних капацитета аутопутева у Републици Србији коришћена су три стандардна аутопутска попречна профила, дефинисана постојећим Правилником о пројектовању путева, најчешће заступљена на локалној путној мрежи (Слика 1; Слика 2; Слика 3).



Слика 1. Стандардни геометријски попречни профил аутопута 1



Слика 2. Стандардни геометријски попречни профил аутопута 2 (на објектима)



Слика 3. Стандардни геометријски попречни профил аутопута 3

Вредности слободних брзина коришћене за прорачун капацитета базирају се на ограниченим/пројектним брзинама од 130km/h, 100km/h и 80km/h које се примењују на локалној путној мрежи.

По узору на амерички приручник, дневни капацитети су прорачунати за различите вредности K и D. Вредности за K, с обзиром на карактеристике временске неравномерности тока, се у Србији крећу у распону од 0.08 до 0.12, док за D износе 0.50, 0.55, 0.60 и 0.65.

Поред наведених распона вредности улазних параметара, у жељи да се обухвати што већи број реалних случајева, анализа је урађена и за различите улазне вредности учешћа комерцијалних возила (10%, 15% и 20%), као и фактора вршног сата (0.88, 0.90 и 0.92).

У наредним табелама приказани су неки од резултатата анализа дневних капацитета за локалне услове.

Табела 5. Добијене вредности дневних капацитета за аутопутске профиле A1, A2 и A3 (Fkv=10%, FVS=0.90)

		A1		A2		A3	
K	D	Vo=80km/h	Vo=100km/h; Vo=130km/h	Vo=80km/h	Vo=100km/h; Vo=130km/h	Vo=80km/h	Vo=100km/h; Vo=130km/h
		C (voz/dan/os)	C (voz/dan/os)	C (voz/dan/os)	C (voz/dan/os)	C (voz/dan/os)	C (voz/dan/os)
0.08	50/50	94620	94586	96551	96516	94137	94103
	55/45	86018	85987	87774	87742	85580	85548
	60/40	78850	78822	80459	80430	78448	78419
	65/35	72785	72758	74270	74243	72413	72387
0.09	50/50	84107	84076	85823	85792	83678	83647
	55/45	76461	76433	78021	77993	76071	76043
	60/40	70089	70064	71519	71494	69731	69706
	65/35	64698	64674	66018	65994	64368	64344
0.10	50/50	75696	75669	77241	77213	75310	75283
	55/45	68815	68790	70219	70194	68464	68439
	60/40	63080	63057	64368	64344	62758	62736
	65/35	58228	58207	59416	59395	57931	57910
0.11	50/50	68815	68790	70219	70194	68464	68439
	55/45	62559	62536	63836	63812	62240	62217
	60/40	57346	57325	58516	58495	57053	57032
	65/35	52934	52915	54015	53995	52664	52645
0.12	50/50	63080	63057	64368	64344	62758	62736
	55/45	57346	57325	58516	58495	57053	57032
	60/40	52567	52548	53640	53620	52299	52280
	65/35	48523	48506	49513	49496	48276	48258

Табела 6. Добијене вредности дневних капацитета за аутопутске профиле А1, А2 и А3 (Fkv=15%, FVS=0.90)

		A1		A2		A3	
K	D	Vo=80km/h	Vo=100km/h; Vo=130km/h	Vo=80km/h	Vo=100km/h; Vo=130km/h	Vo=80km/h	Vo=100km/h; Vo=130km/h
		C (voz/dan/os)	C (voz/dan/os)	C (voz/dan/os)	C (voz/dan/os)	C (voz/dan/os)	C (voz/dan/os)
0.08	50/50	93407	93373	95313	95279	92931	92897
	55/45	84916	84885	86649	86617	84482	84452
	60/40	77839	77811	79428	79399	77442	77414
	65/35	71852	71826	73318	73291	71485	71459
0.09	50/50	83029	82998	84723	84692	82605	82575
	55/45	75481	75453	77021	76993	75095	75068
	60/40	69190	69165	70603	70577	68837	68812
	65/35	63868	63845	65172	65148	63542	63519
0.10	50/50	74726	74699	76251	76223	74344	74317
	55/45	67932	67908	69319	69294	67586	67561
	60/40	62271	62249	63542	63519	61954	61931
	65/35	57481	57460	58654	58633	57188	57167
0.11	50/50	67932	67908	69319	69294	67586	67561
	55/45	61757	61734	63017	62994	61442	61419
	60/40	56610	56590	57766	57745	56322	56301
	65/35	52256	52237	53322	53303	51989	51970
0.12	50/50	62271	62249	63542	63519	61954	61931
	55/45	56610	56590	57766	57745	56322	56301
	60/40	51893	51874	52952	52933	51628	51609
	65/35	47901	47884	48879	48861	47657	47639

Табела 7. Добијене вредности дневних капацитета за аутопутске профиле А1, А2 и А3 (Fkv=20%, FVS=0.92)

		A1		A2		A3	
K	D	Vo=80km/h	Vo=100km/h; Vo=130km/h	Vo=80km/h	Vo=100km/h; Vo=130km/h	Vo=80km/h	Vo=100km/h; Vo=130km/h
		C (voz/dan/os)	C (voz/dan/os)	C (voz/dan/os)	C (voz/dan/os)	C (voz/dan/os)	C (voz/dan/os)
0.08	50/50	94243	94209	96166	96131	93762	93728
	55/45	85675	85644	87424	87392	85238	85207
	60/40	78536	78507	80138	80109	78135	78107
	65/35	72494	72468	73974	73947	72125	72098
0.09	50/50	83771	83741	85481	85450	83344	83314
	55/45	76156	76128	77710	77682	75767	75740
	60/40	69810	69784	71234	71208	69453	69428
	65/35	64440	64416	65755	65731	64111	64088
0.10	50/50	75394	75367	76933	76905	75010	74982
	55/45	68540	68515	69939	69914	68191	68166
	60/40	62829	62806	64111	64088	62508	62485
	65/35	57996	57975	59179	59158	57700	57679
0.11	50/50	68540	68515	69939	69914	68191	68166
	55/45	62309	62287	63581	63558	61991	61969
	60/40	57117	57096	58283	58261	56825	56805
	65/35	52723	52704	53799	53780	52454	52435
0.12	50/50	62829	62806	64111	64088	62508	62485
	55/45	57117	57096	58283	58261	56825	56805
	60/40	52357	52338	53426	53406	52090	52071
	65/35	48330	48312	49316	49298	48083	48066

5. ДИСКУСИЈА РЕЗУЛТАТА И ЗАКЉУЧЦИ

Детаљна анализа спроведена за локалне услове обухватила је значајно више улазних путних и саобраћајних карактеристика, као и више њихових комбинација. Дневни капацитети су прорачунати за различите вредности меродавног протока, слободне брзине, фактора вршног сата и утицаја комерцијалних возила, како би се упоредили са генерализованим табелама обима услуге, односно вредностима које се односе на Ниво Услуге "Е" (који одговара капацитету) из HCM$_{2022}$. Анализа је спроведена за три стандардна профила аутопута.

Приликом разматрања резултата, неопходно је узети у обзир другачије путне и саобраћајне услове у САД у односу на локалне, па су свакако очекиване вредности дневних капацитета за путеве у Републици Србији ниже.

У наредној табели приказана је упоредна анализа прорачунатих вредности, са вредностима из HCM$_{2022}$, које су добијене на основу сличних улазних параметара.

Као што је очекивано, вредности добијене за локалне услове су ниже, али анализа указује на релативну сагласност у добијеним резултатима (до 5%) за карактеристике сличне као у HCM-у, што потврђује валидност примењене методологије. Такође, добијени резултати указују на то да је примењени поступак валидно квантификовао значај више улазних параметара, како саобраћајног тока, тако и техничко-експлоатационих карактеристика на излазне вредности. Тиме је аналитичарима дата могућност да кроз примену валидних улазнх података, калибрисанх на локалне услове, у симулационим моделима дођу до вишег нивоа поузданости резултата на планерском нивоу анализа.

Табела 8. Упоредна анализа добијених резултата са вредностима из HCM_{2022}, за сличне путне и саобраћајне улазне параметре

		HCM_{2022}	Новокласични поступак
K	D	C (voz/dan/os)	C (voz/dan/os)
0.08	50/50	100700	96688
	55/45	91600	87898
	60/40	83900	80573
	65/35	77500	74375
0.09	50/50	89500	85945
	55/45	81400	78132
	60/40	74600	71621
	65/35	68900	66111
0.10	50/50	80600	77350
	55/45	73200	70318
	60/40	67100	64459
	65/35	62000	59500
0.11	50/50	73200	70318
	55/45	66600	63926
	60/40	61000	58599
	65/35	56300	54091
0.12	50/50	67100	64459
	55/45	61000	58599
	60/40	56000	53715
	65/35	51600	49583

Сумарно, допринос овог рада јесте детаљна анализа улазних параметара са препорученим вредностима дневних капацитета, које су погодне за примену у савременим планерским процедурама и софтверским алатима попут програмских пакета PTV VISUM, Aimsun, CORSIM, итд. Коришћење вредности дневних капацитета које одговарају локалној путној мрежи, приликом спровођења симулација у оквиру наведених програмских пакета, доприноси прецизнијој расподели саобраћаја на путној мрежи. Вредности дневних капацитета значајне су и за димензионисање и избор адекватног попречног профила.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Highway Capacity Manual 7th Edition , National Academy of Sciences, Transportation Research Board, , Washington, D.C., 2022.

[2] Кузовић, Љ., „Капацитет и ниво услуге друмских саобраћајница“, Саобраћајни факултет, Београд, 2000.

[3] Анђус, В., Малетин, М., Техничка упутства за пројектовање ванградских путева, део 1. ТРАСА (ПП – Т/08), Грађевински факултет, Београд, 2008.

[4] Приручник за пројектовање путева у Републици Србији, ЈП „Путеви Србије“ Београд 2012.

[5] Highway Capacity Manual 2000., Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C., 2000.

[6] Малетин, М., Тубић, В., Basic characteristics of traffic on primary rural roads in Serbia, International Journal for Traffic and Transport Engineering 3 (4), 2013.

[7] Петковић, М., Тубић, В., Степановић, Н., Prediction of design hourly volume on rural roads Transportation research record 2675 (3), 112-121, 2021.

НОВИНЕ У МЕТОДОЛОГИЈИ ЗА ПРОРАЧУН НИВОА УСЛУГЕ ВАНГРАДСКОГ ДВОТРАЧНОГ ПУТА

Владан Тубић
Универзитет у Београду - Саобраћајни факултет, vladan@sf.bg.ac.rs

Немања Степановић
Универзитет у Београду - Саобраћајни факултет, n.stepanovic@sf.bg.ac.rs

Маријо Видас
Универзитет у Београду - Саобраћајни факултет, m.vidas@sf.bg.ac.rs

Резиме: *Највећи проблеми за прецизно утврђивање услова у непрекинутом саобраћајном току јављају се код ванградских двотрачних путева, што је последица маневра претицања односно утицаја протока из супротних смерова. Иако је до данашњих дана развијено неколико модела за утврђивање нивоа услуге овог типа пута, најпознатији су модели публиковани у најкоришћенијем светском приручнику за анализу капацитета и нивоа услуге – Highway Capacity Manual (HCM). Иако је пажња овом типу пута посвећена још од првог издања овог приручника 1950. године, комплексност проблема на двотрачним путевима условила је перманентни развој методологије за дефинисање нивоа услуге. У последњем, 7. издању HCM приручника дошло је до значајних промена у методологији, што је довело до великих разлика у односу на претходна издања овог приручника. У овом раду извршена је детаљна анализа свих промена уз поређење са специфичностима методологија из претходних издања приручника. Посебан осврт је дат новом приступу поделе деонице на одсеке, чиме се омогућава анализа карактеристика које се до сада нису егзактно разматрале, али и увођења новог параметра за дефинисање нивоа услуге. Оваквом анализом омогућава се уочавање предности и мана нове методологије у теоријским и практичним проблемима, односно дефинишу препоруке за максимизирање позитивних ефеката употребе исте.*

Кључне речи: *саобраћајни ток, ниво услуге, ванградски двотрачни пут, HCM*

INNOVATIONS OF THE METHODOLOGY FOR TWO-LANE HIGHWAYS LEVEL OF SERVICE DETERMINATION

Vladan Tubić
University of Belgrade - Faculty of Transport and Traffic engineering, vladan@sf.bg.ac.rs

Nemanja Stepanović
University of Belgrade - Faculty of Transport and Traffic engineering, n.stepanovic@sf.bg.ac.rs

Marijo Vidas
University of Belgrade - Faculty of Transport and Traffic engineering, m.vidas@sf.bg.ac.rs

Abstract: *The biggest challenges for the precise determination of conditions in an uninterrupted traffic flow occur in rural two-lane highways, which is a consequence of overtaking maneuvers, i.e. the influence of the opposing traffic stream. As several models have been developed to determine the level of service of this type of road, the most famous models are published in the world's most used manual for capacity and level of service analysis - Highway Capacity Manual (HCM). As attention has been devoted to this road type since the first edition of this manual in 1950, the problem complexity of level of service determination conditioned the permanent development of the methodology. In the last, 7th edition of the HCM manual, there were significant changes in the methodology, which made a big difference compared to the previous editions of this manual. In this paper, a detailed analysis of all changes and improvements was performed, with comparisons with the specifics of the methodology from previous editions of the manual. A special attention is given to the new approach of dividing the highway into sections and sub-sections, which enables the analysis of characteristics that have not been considered until now, as well as the introduction of new parameters for defining the level of service. This kind of analysis makes it possible to see the advantages and disadvantages of the new methodology in theoretical and practical form of view, that is, to define recommendations for maximizing the positive effects of its use.*

Key words: *traffic flow, level of service, two-lane highway, HCM*

1. УВОД

Највећи проблеми за прецизно утврђивање услова у непрекинутом саобраћајном току јављају се код ванградских двотрачних путева због специфичних услова у току који владају на овом типу путева. Основну специфичност узрокује маневар претицања, који се код двотрачних путева обавља у траци

намењеној за кретање возила у супротном смеру, а однос захтева и могућности за претицањем директно зависе од претицајне прегледности, величине и односа протока по смеровима (Stepanović, 2023). До данашњих дана развијено је неколико модела за утврђивање нивоа услуге овог типа пута, од којих су најпознатији модели публиковани у најкоришћенијем светском приручнику за анализу капацитета и нивоа услуге – HCM (*Highway Capacity Manual*). Иако је пажња овом типу пута посвећена још од првог издања Приручника 1950. године, комплексност проблема на двотрачним путевима условила је перманентни развој методологије за дефинисање нивоа услуге. Наиме, након фокуса на утврђивање идеалног и реалног капацитета у првом издању Приручника (HCM, 1950), од другог издања (HCM, 1965) уводи се концепт прорачуна нивоа услуге, са брзином и односом захтеваног протока и капацитета као критеријумима за дефинисање нивоа услуе. У трећем издању Приручника (HCM, 1985) се поред наведених критеријума уводи и критеријум процента временских застоја, који постаје примарни критеријум за дефинисање нивоа услуге. У четвртом издању Приручника (HCM, 2000) долази до значајних промена у методологији за прорачун нивоа услуге, које се у огледају у подели двотрачних путева према функцији и положају у мрежи на две класе, утврђивања слободне брзине као незаобилазног корака за даљу анализу и корекције у концепту прорачуна реалног капацитета. Благу измену нове методологије доноси пето издање Приручника (HCM, 2010) кроз увођење треће класе двотрачних путева и новог критеријума за прорачун нивоа услуге ове класе пута, дефинисан као проценат слободне брзине, док код шестог издања (HCM, 2016) значајнијих измена није било.

Излазак седмог издања HCM-овог приручника (HCM, 2022), доноси велике промене у концепту методологије за прорачун нивоа услуге двотрачних путева. По први пут се у методологији за прорачун нивоа услуге двотрачних путева директно испитује утицај радијуса хоризонталних кривина, што је препознато као значајна утицајна карактеристика у методологијама примењеним још од првог издања немачког приручника за пројектовање путева HBS (нем. *Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen*) из 2001. године, а присутно је и у актуелној верзији из 2015. године (HBS, 2015). Новина је и детаљна класификација тешких возила у току, која сада подразумева класификацију на лака, средња и тешка према FHWA (*Federal Highway Administration*) класификацији. Поред наведеног, спроводи се подела деонице на одсеке хомогених карактеристика у складу са могућношћу за извођењем маневра претицања на одсеке са дозвољеним, забрањенм претицањм и одсеке са додатном траком (2+1 саобраћајна трака у попречном профилу пута). Такође, уводи се нови јединствени критеријум за прорачун нивоа услуге двотрачних путева - густина пратилаца (енг. *Follower density*), који представља број возила у стању праћења водећег возила због немогућности претицања истог, по километру по траци. Све претходно наведено, уз промену концепта прорачуна слободне и просечне брзине тока и промену у приступу прорачуна основних параметара, јасно указује на број и значај промена које је донело последње издање HCM-овог приручника (HCM, 2022). Овако значајне структурне промене методологије изискују темељан приступ у анализи и разумевању истих, пре свега због упоредивости излазних резултата и континуитета са методологијама из претходних издања HCM-овог или неког од других светских приручника, што је основни циљ овог рада.

2. ОСНОВНИ КОНЦЕПТ МЕТОДОЛОГИЈЕ

Двотрачни путеви представљају основу саобраћајне инфраструктуре сваке земље, а пројектовани су у најразличитијим теренима за опслуживање бројних функција (HCM, 2022). Иако се на њима могу опслуживати бициклистички, па и пешачки токови, фокус овог рада је у сагледавању свих разлика и специфичности у методологији за прорачун нивоа услуге тока моторних возила.

Одмах на почетку се може уочити да је подела деонице на одсеке заменила процедуру одређивања класе двотрачног пута према методологији присутној од 4. издања Приручника. Подела на одсеке подразумева издвајање одсека хомогених карактеристика по смеровима, а као што је већ наведено, подела се односи на дефинисање одсека са дозвољеним, забрањенм претицањм и одсеке са додатном (претицајном) траком. Уколико се саобраћајне и геометријске карактеристике пута не разликују пуно између одсека, исти се могу комбиновати у јединствени одсек са истим претицајним карактеристикама, нпр. одсек са забрањеним претицањем. Оно што свакако представља велику новину и изненађење у поређењу са претходним издањима, али и методологијама за остале типове путева у оквиру последњег издања Приручника, јесте прорачун свих параметара у возилима, односно одсуство конверзије реалног у условно хомоген ток свођењем на јединице путничких аутомобила. Због ове одлуке се анализа структуре тока усложњава, посебно на одсецима са критичним вредностима уздужног нагиба, али се целокупан поступак прорачуна нивоа улуге поједностављује.

Због наведеног значаја уздужног нагиба, третман ове геометријске карактеристике пута се детаљније анализира у односу на сва претходна издања сврставањем конкретног нагиба (процента и дужине) у једну од 5 категорија које су дефинисане на основу слободне брзине тешког теретног возила. По сличном принципу извршена је и класификација утицаја радијуса хоризонталних кривина.

У последњој верзији приручника издвојена су три битна индикатора за оцењивање услова у саобраћајном току - просечна брзина, проценат „пратилаца“ - возила у колони услед немогућности за претицањем и густина „пратилаца“. Уколико је однос захтеваног протока и капацитета мањи од 1, на основу последњег наведеног индикатора се директно рачуна ниво услуге свих двотрачних путева. Граничне вредности овог параметра зависе од ограничене брзине на двотрачним путевима, као последица различите перцепције возача на путевима другачијих карактеристика (**Табела 1.**)

Табела 1. *Критеријуми за утврђивање нивоа услуге двотрачних путева*

Ниво услуге	**Густина пратилаца** (пратиоци/км/траци)	
	Двотрачни путеви са већим брзинама $V_{OG} \geq 80$ км/час	**Двотрачни путеви са мањим брзинама** $V_{OG} < 80$ км/час
A	≤ 1,24	≤ 1,55
B	> 1,24 – 2,49	> 1,55 – 3,11
C	> 2,49 – 4,97	> 3,11 – 6,22
D	> 4,97 – 7,46	> 6,22 – 9,32
E	> 7,46	> 9,32
F	захтевани проток већи од капацитета	

Прорачун капацитета двотрачних путева је гурнут у други план од 4. издања Приручника (HCM, 2000) јер су истраживања показала да се капацитет на двотрачним путевима, за разлику од осталих типова путева, може тешко достићи осим можда на краћим одсецима и у краћим временским периодима. Претходно наведено је последица утврђених чињеница да се услови у току доста погоршавају при доста ниским вредностима протока. Као и у претходним издањима и у седмом издању Приручника (HCM, 2022) наведено је да базни капацитет једне траке двотрачног пута износи **1700** воз/час/траци. За добијање ове вредности подразумевано је ниско присуство тешких возила у саобраћајном току (до 5%). Посебно интересантну новину представљају препоручене вредности капацитета одсека са додатном траком у попречном профилу (2+1). Иако је наведено да су истраживања ове карактеристике изузетно ограничена, у последњем издању Приручника (HCM, 2022) приказане су вредности капацитета у зависности од дефинисане класе уздужног нагиба и заступљености тешких возила у саобраћајном току (**Табела 2.**). Како се може видети из **Табеле 2**, вредности капацитета ових одсека варирају између 1100 и 1500 воз/час/траци, што је мање од вредности стандардног двотрачног одсека ванградског пута. Као разлог је наведено уско грло приликом затварања додатне траке узроковано престројавањем тешких возила из десне у леву траку, за шта је неопходан велики прихватљиви интервал слеђења возила у току с обзиром на лоше возно-динамичке карактеристике тешких возила.

Табела 2. *Критеријуми за утврђивање нивоа услуге двотрачних путева*

Проценат тешких возила (%)	**Максимални проток (**воз/час**) по класи уздужног нагиба**				
	1	**2**	**3**	**4**	**5**
< 5	1.500	1.500	1.500	1.500	1.500
≥ 5 < 10	1.500	1.500	1.500	1.500	1.400
≥ 10 < 15	1.400	1.400	1.400	1.300	1.300
≥ 15 < 20	1.300	1.300	1.300	1.300	1.200
≥ 20 < 25	1.300	1.300	1.300	1.200	1.100
≥ 25	1.100	1.100	1.100	1.100	1.100

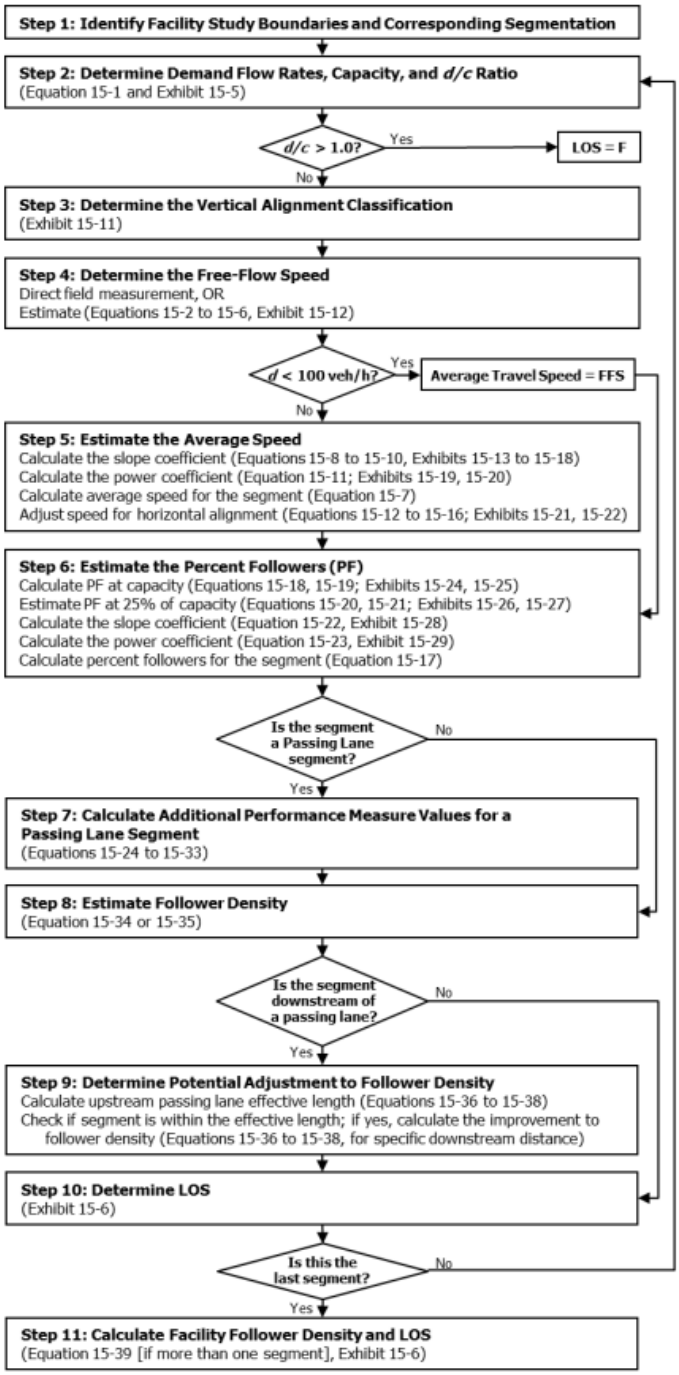
У наставку су приказани основни кораци прорачуна параметара нивоа услуге у методологије непрекинутог тока моторних возила на ванградским двотрачним путевима, који представљају новину у последњем седмом издању Приручника (HCM, 2022).

3. НОВИНЕ У ПРОРАЧУНУ НИВОА УСЛУГЕ ТОКА МОТОРНИХ ВОЗИЛА

Методологија прорачуна нивоа услуге подразумева анализу и одређивање следећих параметара:

- слободне брзине тока,
- просечне (експлоатационе) брзине тока,
- процента пратилаца и
- густине пратилаца.

Подразумеван је прорачун нивоа услуге по смеровима основног одсека двотрачног пута, а могућа је анализа по одсецима или целог путног потеза од неколио деоница. Ову методологију је могуће применити уколико не постоје раскрснице регулисане светлосном сигнализацијом на међусобном растојању краћем од 3,2км, и када нема знака за обавезно заустављање на главном правцу посматраног пута. Алгоритам за прорачун нивоа услуге двотрачног пута приказан је на **Слици 1**.



Слика 1. *Алгоритам за утврђивања нивоа услуге ванградског двотрачног пута (HCM, 2022)*

Подела посматраног пута на одсеке хомогених карактеристика по смеровима представља ***први корак*** у прорачуну нивоа услуге, што је новина у седмом издању Приручника, а као што је већ наведено, подела се односи на дефинисање одсека са дозвољеним, забрањенм претицањм и одсеке са додатном (претицајном) траком. Након тога се у ***другом кораку***, по први пут у досадашњим HCM-овим издањима, прорачунава захтевани проток на деоници у возилима на час, односно не конвертујући реалан у условно хомоген ток, већ само узимајући у обзир фактор вршног часа. Овако утврђен проток се упоређује са капацитетом деонице, чије је дефинисање објашењно у претходном поглављу, а уколико је овај однос већи од један, идентификује се ниво услуге F. Уколико је захтевани проток већи од капацитета, прелази се на ***трећи корак*** који подразумева класификацију уздужног нагиба у 5 категорија у зависности од дужине и процента нагиба (Табела 3.).

Табела 3. *Класификација уздужних нагиба*

Дужина одсека (km)	Уздужни нагиб (%)									
	≤1	>1≤2	>2≤3	>3≤4	>4≤5	>5≤6	>6≤7	>7≤8	>8≤9	>9
≤ 0,16	1(1)	1(1)	1(1)	1(1)	1(1)	1(1)	1(1)	2(1)	2(2)	2(2)
>0,16 ≤0,32	1(1)	1(1)	1(1)	1(1)	2(1)	2(2)	2(2)	3(2)	3(3)	3(3)
>0,32 ≤0,48	1(1)	1(1)	1(1)	2(1)	2(2)	3(2)	3(3)	4(3)	4(4)	5(5)
>0,48 ≤0,64	1(1)	1(1)	2(1)	2(2)	3(2)	3(3)	4(4)	5(4)	5(5)	5(5)
>0,64 ≤0,80	1(1)	1(1)	2(1)	2(2)	3(3)	4(3)	5(4)	5(5)	5(5)	5(5)
>0,80 ≤0,97	1(1)	1(1)	2(1)	3(2)	3(3)	4(4)	5(5)	5(5)	5(5)	5(5)
>0,97 ≤1,13	1(1)	1(1)	2(1)	3(2)	4(3)	4(4)	5(5)	5(5)	5(5)	5(5)
>1,13 ≤1,29	1(1)	1(1)	2(1)	3(3)	4(4)	5(4)	5(5)	5(5)	5(5)	5(5)
>1,29 ≤1,44	1(1)	1(1)	2(1)	3(3)	4(4)	5(5)	5(5)	5(5)	5(5)	5(5)
>1,44 ≤1,61	1(1)	1(1)	2(2)	3(3)	4(4)	5(5)	5(5)	5(5)	5(5)	5(5)
>1,61 ≤1,77	1(1)	1(1)	2(2)	3(3)	4(4)	5(5)	5(5)	5(5)	5(5)	5(5)
>1.77	1(1)	1(1)	2(2)	4(4)	4(4)	5(5)	5(5)	5(5)	5(5)	5(5)

Оваква класификација уздужних нагиба уведена је у најновију верзију Приручника (HCM, 2022) по узору на већ споменути немачки приручник за пројектовање путева - HBS (HBS, 2015), у коме се класификација врши на идентичан начин у 4 категорије.

Након наведених, прелази се на ***четврти корак*** који подразумева утврђивање слободне брзине тока, који је у неколико претходних издања приручника (у четвртом, петом и шестом издању) заправо био почетни корак након прикупљања основних података. Другим речима, због драстичних промена у методологији седмог издања приручника, пре свега у погледу поделе деонице на одсеке хомогених карактеристика и класификације уздужног нагиба, које су неопходне за прорачун захтеваних параметара, овај поступак почиње од четвртог корака. Осим промене у редоследу корака, поступак за утврђивање слободне брзине тока је потпуно нов. Као и раније, остале су препоруке за утврђивање слободне брзине на терену, али је аналитички поступак прорачуна иновиран.

$$V_{sl} = V_{sl0} - a(\%TV) - F_{\check{S}T/BS} - F_{GP}$$

$$a = max\left[0{,}0333, a_0 + a_1 * V_{sl0} + a_2 * L + \max(0, a_3 + a_4 * V_{sl0} + a_5 * L) * \frac{q_{ss}}{1000}\right]$$

где су:
V_{sl} – слободна брзина основног одсека двотрачног пута;
V_{sl0} – базна слободна брзина;
$\%TV$ – проценат учешћа тешких возила у саобраћајном току;
$a_0 - a_5$ – коефицијенти чије се вредности очитавају из Табеле 4 у складу са класом уздужног нагиба;
L – дужина деонице (одсека);
$F_{\check{S}T/BS}$ – фактор заједничког утицаја ширине саобраћајне траке и бочних сметњи;
F_{GP} – фактор утицаја густине приступа;
q_{ss} – проток у супротном смеру (воз/час); 1.500 на одсеку са забрањеним претицањем, 0 на одсеку са додатном траком.

Прва осетна модификација извршена је за дефинисање базне слободне брзине, која је представљала велики проблем у претходним издањима Приручника јер њено утврђивање није било прецизно дефинисано, чиме је било омогућено значајно одступање у одређивању тачне вредности. У

последњем издању приручника је базна слободна брзина јасно дефинисана (Једначина 2), а тиме је по први пут прихваћен резон о утицају ограничења брзине на брзину слободног тока, који је до сада био предмет опречних ставова (Степановић, 2023).

$$V_{sl0} = 1{,}14 * V_{og}$$

где је:
V_{og} – ограничена брзина на деоници пута

Иновација је урађена и код прорачуна фактора комбинованог утицаја ширине траке и бочних сметњи и код фактора утицаја густине приступа, који се више не утврђују табеларно, већ преко следећих једначина:

$$F_{\check{S}T/BS} = 0{,}6 * (12 - \check{S}T) + 0{,}7 * (6 - \check{S}B)$$

где су:
$\check{S}T$ – ширина саобраћајне траке, између минималних 9 и 12 стопа (2,75 и 3,66 метара),
$\check{S}B$ – ширина банкине, између 0 и 6 стопа (0 и 1,8 метара).

$$F_{GP} = \min(\frac{GP}{4}, 10)$$

где је:
GP – густина приступа (број приступа по миљи/километру).

Табела 4. *Вредности коефицијената a за прорачун слободне брзине*

Класа уздужног нагиба	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5
1	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
2	-0,45036	0,00814	0,01543	0,01358	0,00000	0,00000
3	-0,29591	0,00743	0,00000	0,01246	0,00000	0,00000
4	-0,40902	0,00975	0,00767	-0,18363	0,00423	0,00000
5	-0,38360	0,01074	0,01945	-0,69848	0,01069	0,12700

Пети корак обухвата прорачун просечне односно експлоатационе брзине тока у неколико поткорака, који је такође у потпуности иновиран у складу са променама у концепту методологије. У седмом издању се наводи да је експлоатациона брзина једнака слободној ако је проток у посматраном смеру мањи од 100 возила/час, што је дефинисано као гранична вредност протока слободног тока, а рачуна се по следећој једначини ако је проток већи:

$$V_{pr} = V_{sl} - m\left(\frac{q_{ps}}{1000} - 0{,}1\right)^p$$

где су:
V_{pr} – просечна брзина посматраног смера;
V_{sl} – слободна брзина;
q_{ps} – проток у посматраном смру (воз/час);
m – коефицијент нагиба криве;
p – експонент степене функције.

Коефицијенти m и p рачунају се у оквиру поткорака 5a и 5b.

$$m = max[b_5, b_0 + b_1 * V_{sl} + b_2 * \sqrt{\frac{q_{ss}}{1.000}} + max(0, b_3) * \sqrt{L} + max(0, b_4) * \sqrt{\%TV}]$$

где су:
$b_0 - b_5$ – коефицијенти зависности брзине од протока, који се читавају и прорачунавају из одговарајућих табела сличних Табели 4. (доступних у поглављу 15 седмог издања HCM-овог приручника), док су све остале променљиве претходно дефинисане.

$$p = max[f_8, f_0 + f_1 * V_{sl} + f_2 * L + f_3 * \frac{q_{ss}}{1.000} + f_4 * \sqrt{\frac{q_{ss}}{1.000}} + f_5 * \%TV + f_6 * \sqrt{\%TV} + f_7 * (L * \%TV)]$$

где су:
$f_0 - f_8$ – коефицијенти модела степене функције, који се читавају у складу са класом уздужног нагиба из одговарајућих табела сличних Табели 4. (доступних у поглављу 15 седмог издања HCM-овог приручника), док су све остале променљиве претходно дефинисане.

У поткораку $5c$ прорачунава се просечна брзина одсека двотрачног пута, док се у поткораку $5d$ прорачунава брзина у функцији радијуса хоризонталне кривине. Наиме, просечном брзином прорачунатом у поткораку $5c$ претпоставља се да хоризонтална закривљеност нема утицаја на брзину, односно да је реч о одсеку без критичних вредности радијуса хоризонталних кривина. Због тога се у поткораку $5d$ идентификују и класификују елементи хоризонталне закривљеност трасе пута, односно тангенте (правци) и радијуси на одсеку пута на основу вредности приказаних у Табели 5, у зависности од радијуса хоризонталне кривине (стопе/метри) и попречног нагиба (%).

Табела 5. *Класификација елемената хоризонталне закривљености трасе пута*

Радијус (м)	Попречни нагиб (%)										
	<1	≥1<2	≥2<3	≥3<4	≥4<5	≥5<6	≥6<7	≥7<8	≥8<9	≥9<10	≥10
< 91	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
91 – 137	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
137 – 183	4	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
183 – 228	3	3	3	3	3	3	2	2	2	2	2
228 – 274	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
274 – 320	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1
320 – 365	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1
365 – 411	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1
411 – 457	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	–
457 – 503	1	1	1	1	1	1	1	1	–	–	–
503 – 548	1	1	1	1	1	1	–	–	–	–	–
548 – 594	1	1	1	1	1	–	–	–	–	–	–
594 – 640	1	1	1	1	–	–	–	–	–	–	–
640 – 685	1	1	1	–	–	–	–	–	–	–	–
686 – 731	1	1	–	–	–	–	–	–	–	–	–
731 – 776	1	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
>777	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–

– *нема утицаја на брзину и може се третирати као правац*

Након спроведене класификације следи прорачун слободне и просечне брзина тока у функцији радијуса хоризонталних кривина сваког пододсека према следећим једначинама:

$$V_{pr\ Rmin} = \min(V_{pr}, V_{sl\ Rmin} - m * \sqrt{\frac{q_{ps}}{1000} - 0{,}1})$$

где су:
$V_{pr\ Rmin}$ – просечна брзина пододсека са хоризонталном кривином;
$V_{sl\ Rmin}$ – слободна брзина пододсека са хоризонталном кривином.

$$V_{sl\ Rmin} = V_{sl0\ Rmin} - 0{,}0255 * \%TV$$

$$V_{sl0\ Rmin} = \min(V_{sl0\ T}, 44{,}32 + 0{,}3728 * V_{sl0\ P} - 6{,}868 * klasa\ hor.zakrivljenosti\ i)$$

$$m = max\ (0{,}277, -25{,}8993 - 0{,}7756 * V_{sl\ Rmin} + 10{,}6294 * \sqrt{V_{sl\ Rmin}} + 2{,}4766 * klasa\ hor.zakrivljenosti\ i - 9{,}8238 * \sqrt{klasa\ hor.zakrivljenosti\ i})$$

где су:
$V_{sl0\ Rmin}$ – базна слободна брзина пододсека са хоризонталном кривином;
$V_{sl0\ P}$ – базна слободна брзина правца претходног пододсека;

$klasa\ hor.zakrivljenosti\ i$ – класа хоризонталне закривљености пододсека *i* (Табела 5.);
m – коефицијент нагиба криве.

За све пододсеке у правцу (тангенте) просечна брзина се рачуна према једначини ц за V_{pr}.

Након прорачуна претходно наведених параметара прелази се на корак 5d где се прорачунава пондерисана вредност просечне (експлоатационе брзине) на одсеку пута у према критичнијој вредности врзине (правац или радијус) сваког пододсека.

$$V_{pr\,P} = \frac{\sum(V_{pr\ pododseka\ i} * L_{\ pododseka\ i})}{L}$$

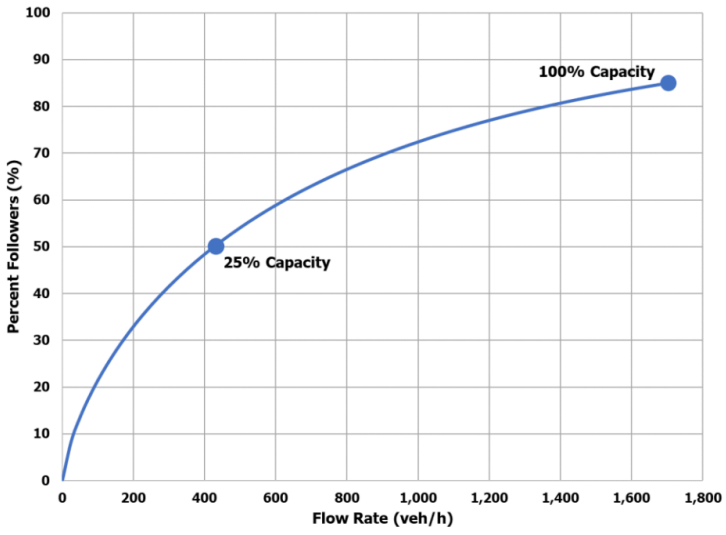
где су:
$V_{pr\,P}$ – просечна брзина у посматраном смеру, узевши у обзир утицај хоризонтале закривљености;
$V_{pr\ pododseka\ i}$ – просечна брзина у посматраном смеру пододсека *i* (правац или тангента);
$L_{\ pododseka\ i}$ – дужина пододсека *i* (правац или тангента);
L – дужина одсека.

Шести корак обухвата прорачун процента пратилаца - већ споменутог новог параметра, према следећој једначини:

$$PP = 100 * \left[1 - \mathrm{e}^{(m*(\frac{q_{ps}}{1000})^{\mathrm{p}})}\right]$$

где су:
PP – проценат пратилаца у посматраном смеру;
q_{ps} – проток у посматраном смеру (воз/час);
m – коефицијент нагиба криве;
p – експонент степене функције.

m и p рачунају се према једначинама приказаним у оквиру шестог корака у поглављу 15 седмог издања HCM-овог приручника, тако да експоненцијална крива пролази кроз две специфичне тачке приказане кроз пример на **Слици 2**. Реч је о тачкама које се такође израчунавају на основу једначина у поглављу 15, тако да прва представља проценат пратилаца при 25% капацитета одсека ($PP_{25\%C}$), док друга представља проценат пратилаца при 100% капацитета одсека ($PP_{100\%C}$).



Слика 2. *Пример прорачуна процента пратилаца и две специфичне тачке и експоненцијалне криве између њих (HCM, 2022)*

Проценат пратилаца при капацитету и 25% капацитета се прорачунава у функцији дефинисане класе уздужног нагиба, дужине анализираног одсека, слободне брзине, процента учешћа тешких возила у току и захтеваног протока у супротном смеру. Прорачуни се врше на основу једначина приказаним у оквиру шестог корака у поглављу 15, које се разликују у складу са поделом деонице на хомогене

одсеке са дозвољеним, забрањенм претицањм и одсеке са додатном (претицајном) траком. На основу дефинисане експоненцијалне криве, односно приказане једначине, прорачунава се проценат пратилаца на одсеку у зависности од конкретног протока, при чему се не разматра утицај хоризонталне закривљености на овај параметар јер је утицај ове карактеристике занемарив у односу на утицај на брзину.

Седми корак карактеристичан је искључиво за одсеке са додатном траком (2+1), где се врши прорачун претходно наведених и појединих специфичних параметара посебно за обе траке у смеру са две саобраћајне траке. Прорачун започиње одређивањем захтеваног протока у претицајној и траци намењеној за кретање спорих возила, наставља са дефинисањем процента тешких возила у току по тракама као и просечних брзина, а завршава прорачуном процента пратилаца по тракама, применом истих или благо модификованих једначина приказаних у претходним корацима.

$$q_{PT} = q_{PS} * (0{,}92183 - 0.05022 * ln(q_{PS}) - 0{,}00030 * TV)$$

$$q_{ST} = q_{PS} * [1 - (0{,}92183 - 0.05022 * ln(q_{PS}) - 0{,}00030 * TV)]$$

где су:
q_{PT} – захтевани проток у претицајној траци;
q_{ST} – захтевани проток у траци за спора возила;
q_{ps} – проток у посматраном смеру (воз/час);
TV – број тешких возила на деоници са додатном траком (воз).

Након специфичног прорачуна за одсеке са додатном (претицајном) траком, анализа нивоа услуге наставља се заједно за све типове двотрачног пута прорачуном новог критеријума у ***кораку осам*** – „густина пратилаца“. За деонице без додатне траке се „густина пратилаца“ рачуна по једначини:

$$GP = \frac{PP}{100} * \frac{q_{ps}}{V_{pr}}$$

где је:
GP – густина пратилаца;

За деонице са додатном траком, прорачун овог критеријума врши се на следећи начин:

$$GP_{2+1} = \frac{\left(\frac{PP_{PT}}{100} * \frac{q_{PT}}{V_{pr\,PT}}\right) + (\frac{PP_{ST}}{100} * \frac{q_{ST}}{V_{pr\,ST}})}{2}$$

где су:
GP_{2+1} – густина пратилаца одсека са додатном траком;
PP_{PT} – проценат пратилаца у претицајној траци;
PP_{ST} – проценат пратилаца у траци за спора возила;
$V_{pr\,PT}$ – просечна брзина у претицајној траци;
$V_{pr\,ST}$ – просечна брзина у траци за спора возила.

Девети корак се примењује искључиво ако се посматрана деоница налази непосредно иза деонице са додатном (претицајном) траком, и то у зони ефективне утицајне дужине те деонице. Уколико је у питању такав случај, врши се корекција густине пратилаца применом једначина приказаним у оквиру деветог корака у поглављу 15 HCM-овог приручника (2022). У супротном, овај корак се прескаче и прелази се на ***десети корак*** у коме се одређује ниво услуге на основу граничних вредности споментуог новог критеријума приказаним у Табели 1.

У случају да постоји више суседних одсека за које се примењује обједињена анализа нивоа услуге, потребно је проћи кроз све кораке за сваки одсек, а на крају извршити прорачун пондерисане густине пратилаца.

4. ЗАКЉУЧАК

Анализом приказане методологије за прорачун капацитета и нивоа услуге основног одсека ванградских двотрачних путева може се уочити да је цео поступак потпуно измењен тако да се промене могу сматрати револуционарним. Осим основног концепта употребе слободне и просечне брзине, сви кораци од првог до последњег су нови, па се измене направљене у седмом издању Приручника (HCM, 2022) могу сматрати највећим од промовисања идеје анализе нивоа услуге у другом издању Приручника (HCM, 1965).

Једном од значајнијих иновације се свакако може сматрати потврда утицаја регулативно-режимске мере ограничења брзине на слободну брзину тока. Наиме, посматрајући аналитичке моделе за прорачун слободне брзине који се пре свега употребљавају у условима када није могуће измерити брзину на терену, нпр. у фазама креирања и пројектовања адекватних попречних профила, најчешће је примењиван HCM-ов модел базиран на грубом одређивању базне слободне брзине (додавањем 16 km/h на вредност ограничења брзине) на свим класама двотрачних путева (HCM, 2016). Непрецизност оваквог приступа наводи и сам HCM (2016), али детаљнија истраживања нису вршена. Поред различитих утицаја геометријских карактеристика пута на брзину слободног тока, бројни аутори су анализирали утицај ограничења брзине на слободну брзину, као нпр. у истраживањима Fazio et al. (2014) или Mahmud et al. (2021). Уочено је да бројне студије користе правило простог додавања фиксне вредности брзине на ограничену брзину, која није егзактно утврђена и не узима у обзир остале факторе путева различитих функција у мрежи (Fazio et al., 2014). Приметна су и опречна мишљења и дискусије да ли је оправдано укључити ограничење брзине у модел или не, као нпр. код Himes et al. (2013) или Wang et al. (2006). Међутим, у последњем издању HCM-овог (2022) приручника потврђен је утицај ограничења на слободну брзину кроз егзактну препоруку за одређивање базне слободне брзине, чиме се смањују могућности за слободно тумачење овог битног параметра, али и ограничава боља калибрација модела на локалне услове. Ово је у складу и са недавним истраживањима у локалним условима (Stepanović, 2023), који су потврдили утицај ограничења брзине на слободну брзину тока.

Једном од највећих новина у односу на сва претходна издања Приручника може се сматрати прецизно квантификовање утицаја хоризонталне закривљености трасе која може значајно утицати на ниво услуге посматране деонице. Присуство критичне вредности ове геометријске карактеристике може значајно редуковати брзину тока, а последично и ниво услуге деонице. Посебно је интересантна чињеница да је сама класификација одсека у функцији радијуса изведена по узору на немачки приручник за пројектовање путева (HBS, 2015), што уз сличну методологију класификације удужних нагиба примењену по први пут у HCM-у, даје на значају наведеном приручнику, али и домаћем тзв. „Новокласичном“ поступку за прорачун капацитета и нивоа (Kuzović, 1994, 2000). Наравно, у седмом издању Приручника (HCM, 2022) се утицај хоризонталних кривина и уздужног нагиба на услове у току могу много детаљније испитати.

Комплетна промена методологије заокружена је увођењем нових параметара и критеријума за одређивање нивоа услуге, попут процента и густине пратилаца, који приближније могу кванитификовати реалне утиске возача о условима у саобраћајном току у односу на посматрање искључиво добро познатих критеријума попут брзине и густине. Приметне су и новине по питању по питању прорачуна капацитета, које се посебно односе на деонице са додатном (претицајном) траком, где се супротно од логичког размишљања показало да деоница са додатном траком може имати и мањи капацитет од класичног двотрачног пута због уског грла на месту укидања додатне траке. Међутим, овако бројне и револуционарне измене методологије и комплексност самог поступка прорачуна постављају питање примењивости нове методологије у пракси. Наиме, посебно изазован део метологије, поре сложености самих релација за прорачун, представља поделу деонице на одсеке хомогених карактеристике, односно третирање сваке промене, нпр. радијуса хоризонталне кривине, у моделу за прорачун брзине. Претходно наведено изазива бојазан да ће инжењери који у пракрси спроводе анализе и за више десетина деоница морати да утроше значајно време за примену нове методологије, што оставља простор да се упркос већој прецизности анализа ипак одлуче за примену неког старијег издања или самосталну модификацију нове методологије. То може изазвати супротан ефекат од првобитног циља HCM-овог приручника који се односи на унификацију резултата анализа капацитета и нивоа услуге на ширем плану, а да ли ће бити тако или не, показаће време.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Fazio, J., Wiesner, B. N., & Deardoff, M. D. (2014). Estimation of free-flow speed. KSCE Journal of Civil Engineering, 18(2), 646–650. https://doi.org/10.1007/S12205-014-0481-7

[2] Himes, S. C., Donnell, E. T., & Porter, R. J. (2013). Posted speed limit: To include or not to include in operating speed models. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 52, 23–33. https://doi.org/10.1016/J.TRA.2013.04.003

[3] HBS (2015). Handbuch für Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen (HBS). [1] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e. V. (FGSV).

[4] HCM (1950). Highway capacity manual (1st ed.). Highway Research Board. Committee on Highway Capacity, Bureau of Public Roads, U. S. Department of Commerce. Washington DC.

[5] HCM (1965). Highway capacity manual (2nd ed.). Highway Research Board, National Research Council. Washington DC.

[6] HCM (1985). Highway capacity manual (3rd ed.). Highway Research Board, National Research Council. Washington DC.

[7] HCM (2000). Highway capacity manual (4th ed.). Transportation Research Board, National Research Council. Washington DC.

[8] HCM (2010). Highway capacity manual (5th ed.). Transportation Research Board, National Research Council. Washington DC.

[9] HCM (2016). Highway capacity manual (6th ed.). Transportation Research Board, National Research Council. Washington DC.

[10] HCM (2022). Highway capacity manual (7th ed.). Transportation Research Board, National Research Council. Washington DC.

[11] Kuzović, L. (1994). Vrednovanje u upravljanju razvojem i eksploatacijom putne mreže. Univerzitet u Beogradu – Saobraćajni fakultet.

[12] Kuzović, L. (2000). Kapacitet i nivo usluge drumskih saobraćajnica. Univerzitet u Beogradu – Saobraćajni fakultet.

[13] Mahmud, M. S., Gupta, N., Safaei, B., Jashami, H., Gates, T. J., Savolainen, P. T., & Kassens-Noor, E. (2021). Evaluating the impacts of speed limit increases on rural two-lane highways using quantile regression. Transportation Research Record, 2675(11), 740–753. https://doi.org/10.1177/03611981211019732

[14] Stepanović. N., (2023). Model za analizu brzine slobodnog toka u funkciji klase dvotračnog puta. Doktorska disertacija. Univerzitet u Beogradu – Saobraćajni fakultet. Beograd

[15] Wang, J., Dixon, K. K., Li, H., & Hunter, M. (2006). Operating-speed model for low-speed urban tangent streets based on in-vehicle Global Positioning System data. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 1961(1), 24–33. https://doi.org/10.1177/0361198106196100104

УТВРЂИВАЊЕ ГРАНИЧНЕ ВРЕДНОСТИ ИНТЕРВАЛА СЛЕЂЕЊА СЛОБОДНОГ ТОКА НА ДВОТРАЧНИМ ПУТЕВИМА I РЕДА У СРБИЈИ

Немања Степановић
Универзитет у Београду - Саобраћајни факултет, n.stepanovic@sf.bg.ac.rs

Маријо Видас
Универзитет у Београду - Саобраћајни факултет, m.vidas@sf.bg.ac.rs

Владан Тубић
Универзитет у Београду - Саобраћајни факултет, vladan@sf.bg.ac.rs

Резиме: *Одређивање брзине слободног тока представља почетни корак код прорачуна капацитета и нивоа услуге вангрaдских путева у бројним познатим моделима и приручницима. Како би се одредила слободна брзина неопходно је познавање теоријске границе слободног тока, односно границе где почиње утицај интеракције између возила и прелазак слободне у брзину стабилног тока. Упркос бројним досадашњим истраживањима, параметар саобраћајног тока за одређивање ове границе, као ни егзактне вредности исте, нису утврђени. Због тога је у овом раду спроведено истраживање на 30 деоница вангрaдских двотрачних путева I реда у Србији, опремљених аутоматским бројачима саобраћаја, са циљем утврђивања граничне вредности слободног тока и омогућавања прецизног прорачуна брзине слободног тока. С обзиром на високу осетљивост граничних вредности протока слободног тока на временску неравномерност наиласка возила, као најпогоднији параметар за дефинисање ове границе одабран је временски интервал слеђења возила. Испитивањем реалних брзина и интервала слеђења 134.261 возила и статистичком обрадом података у софтверу SPSS, утврђена је гранична вредност интервала слеђења од 6,3 s.*

Кључне речи: *слободан ток, интервал слеђења, вангрaдски двотрачни пут*

THE FREE FLOW TIME HEADWAY THRESHOLD VALUE DETERMINATION ON TWO-LANE HIGHWAYS IN SERBIA

Nemanja Stepanović
University of Belgrade - Faculty of Transport and Traffic engineering, n.stepanovic@sf.bg.ac.rs

Marijo Vidas
University of Belgrade - Faculty of Transport and Traffic engineering, m.vidas@sf.bg.ac.rs

Vladan Tubić
University of Belgrade - Faculty of Transport and Traffic engineering, vladan@sf.bg.ac.rs

Abstract: *The free flow speed determination is the initial step in the capacity and level of service calculation of rural two-lane highways in a number of well-known models and manuals. In order to determine the free flow speed, it is necessary to know the theoretical treshold value of the free and normal (stable) flow, i.e. the point at which the increase in vehicle interaction transforms free flow speed into stable flow speed. Despite numerous previous researches, the traffic flow parameter for determining this treshold, as well as its exact values, have not been precisely determined. Therefore, in this paper, research was conducted on 30 sections of the I class two-lane highways in Serbia, equipped with automatic traffic counters, with the aim of the free flow treshold value determining and enabling precise calculation of free flow speed. Considering the free flow treshold value high sensitivity to the traffic volume temporal variations, the parameter of vehicle time headway was selected as the most suitable parameter for examining this threshold on two-lane highways. By examining the real speeds and time headways of 134,261 vehicles and statistical data processing in the SPSS software, the time headway treshold value of 6,3 s was determined.*

Key words: *Free flow, time headway. two-lane highway*

1. УВОД

Брзина слободног тока има велики значај приликом теоријских и практичних анализа у саобраћајном инжењерству, било да је реч о базној или реалној слободној брзини. Не постоји јединствена дефиниција слободне брзине, али се она у теоријском смислу може дефинисати као средња просторна брзина возила на деоници пута када густина и проток теже нули (HCM, 2016). Другим речима, слободна брзина представља средњу вредност брзине возила у слободном току, која је условљена пре свега геометријским карактеристикама пута, али и карактеристикама возила, возача и

окружења, без међусобне интеракције између возила. Веома осетљиво питање које утиче на одређивање границе слободног тока је пораст интеракције између возила и прелазак слободне у брзину стабилног тока. Наиме, ради прецизног утврђивања слободне брзине неопходно је егзактно дефинисање граничне вредности између слободног и нормалног (стабилног) саобраћајног тока. У првим истраживањима (Greenshields et al., 1935) параметар протока возила детектован је као одговарајући за тако нешто, док су каснија истраживања (HCM, 1950) увидела могућност примене временског интервала слеђења возила. С обзиром на високу осетљивост граничних вредности протока слободног тока на временску неравномерност наиласка возила, као најпогоднији параметар за дефинисање ове границе издвојио се временски интервал слеђења возила. Међутим, као отворено питање у досадашњим истраживањима остала је чињеница да није дефинисана јединствена гранична вредност интервала слеђења, већ постоји велики распон у препорученим вредностима овог параметра. Непрецизне граничне вредности интервала слеђења знатно отежавају прорачун слободних брзина, што представља проблем приликом анализе услова у саобраћајном току. Наиме, слободна брзина је незаобилазни део свих постојећих модела за анализу експлоатационих (реалних) брзина, односно представља полазну основу за прорачун капацитета и нивоа услуге путева. Највећи проблем за одређивање границе слободног тока и егзистирања слободне брзине јавља се на ванградским двотрачним путевима, као резултат специфичних услова у току који владају на овом типу пута. Посебно се наведени проблем повећава са маневром претицања, који се код двотрачних путева обавља у траци намењеној за кретање возила у супротном смеру. Однос захтева и могућности за претицањем директно зависи од величине и односа протока по смеровима, што усложњава претходно наведено утврђивање граничног интервала слеђења возила у слободном току и слободне брзине. С обзиром на наведене проблеме, главни циљ овог рада огледа се у дефинисању граничне вредности интервала слеђења слободног тока на путевима I класе у Србији. Приказани резултати проистекли су из опсежних истраживања брзине слободног тока у локалним условима и део су докторске дисертације аутора овог рада (Stepanović, 2023).

2. ПРЕГЛЕД ДОСАДАШЊИХ ИСТРАЖИВАЊА

Као што је већ наведено, слободан саобраћајни ток представља ток у коме је брзина кретања возила условљена пре свега геометеријским карактеристикама пута, али и карактеристикама возила, возача и окружења. Другим речима, на кретање возила у слободном току не утиче међусобна интеракција између возила (Tubić et al., 2022). Дефинисање граничне вредности слободног тока, односно вредности која јасно дефинише када интеракција између возила утиче на кретање а када не, било је предмет бројних досадашњих истраживања (Stepanović, 2023). У првим истраживањима Greenshields et al. (1935) проток је издвојен као параметар за дефинисање ове границе, па је тако за двотрачне путеве она износила 400 до 600 возила/час. Каснија истраживања закључују да је интервал слеђења још погоднији параметар за одређивање ове границе због релативно једноставног мерења и могућности за утврђивање зависности са слободном брзином, па се у првом издању америчког Приручника за капацитет путева (HCM, 1950) спомиње 9. секунда као гранична вредност. Ова вредност се у великој мери подудара са истраживањима Greenshields et al. (1935) када се искаже кроз вредност протока. Наиме, када се узме у обзир средња вредност при временски равномерном наиласку возила, проистиче да гранична вредност слободног тока износи 400 возила/час. Из анализе генералних резултата граничних вредности слободног тока у условима временски равномерног тока произилази да услови слободног тока владају до 450 возила/час (Kuzović, 1987). Међутим, истраживања која су узела у обзир изразиту неравномерност саобраћајног тока у времену показала су да ова гранична вредност може бити и значајно нижа, чак до 100 возила/час/траци (Lobanov et al., 1970; Siljanov, 1977). Може се приметити и да амерички Приручник за прорачун капацитета (HCM, 2016) наводи границу протока од 200 путничких аутомобила/час/оба смера као горњу границу за мерење вредности слободне брзине на терену, која се у великој мери поклапа са претходно наведеним резултатима. Управо се због бољег квантификовања неравномерности и погодности при мерењима на терену у данашњим истраживањима најчешће ова граница одређује на основу интервала слеђења, нпр. код Lobo et al. (2011), а понегде се употребљавају и проток и интервал слеђења, нпр. код америчког Приручника за капацитет путева (HCM, 2016). Међутим, у досадашњим истраживањима може се уочити да није дефинисана јединствена гранична вредност интервала слеђења, већ је присутан велики распон у препорученим вредностима овог параметра. Непрецизне граничне вредности интервала слеђења знатно отежавају прорачун слободних брзина, посебно на двотрачним путевима, због наведених специфичности које се јављају на овом типу пута.

Homburger et al. (1996) препоручили су вредности од 4 s као минимални интервал слеђења за возила у слободном току, али су нагласили да је пожељно узети веће вредности (преко 7 s) уколико

саобраћајни услови то дозволе. Вредност од 4 s користили су и Mahmud et al. (2021), али методологија за добијање ове вредности није објашњена.

Најчешће коришћена гранична вредност за услове у слободном току је 5 s, нпр. Fitzpatrick et al. (2000), Hashim (2011), Medina & Tarko (2005), Sekhar et al. (2016). Hashim (2011) је на пресецима 20 деоница ванградских двотрачних путева у Египту, са приближно хомогеним геометријским и саобраћајним карактеристикама, испитивао однос интервала слеђења и слободне брзине тока. На основу података добијених са аутоматских бројача саобраћаја, поредећи 85-ти перцентил брзина возила у току са интервалима слеђења, закључио је да при вредностима интервала слеђења већим од 5 s нема значајног одступања у брзинама, односно да је то граница слободног тока (Hashim, 2011). Поред овог истраживања, минимална вредност интервала слеђења од 5 s коришћена је и у другим студијама, попут Fitzpatrick et al. (2000), Medina & Tarko (2005), Sekhar et al. (2016), али у појединим радовима није објашњен нити наведен поступак утврђивања граничне вредности интервала слеђења.

Lobo et al. (2011) предложили су петостепени модел за утврђивање минималне граничне вредности интервала растојања између возила при којем брзина првог возила нема утицаја на брзину другог возила. Снимање уређајима који су базирани на Доплеровом ефекту изведено је на 4 пресека (два правца и две хоризонталне кривине) деонице ванградског двотрачног пута у Португалији, током добрих временских услова, у трајању од 12 узастопних часова у условима слободног тока. Добијени резултати базирани на укупно 32.933 снимљена возила показују да при вредностима интервала међурастојања између возила већим од 6 s нема утицаја на брзину кретања пратећег возила. Иста вредност интервала међурастојања од 6 s коришћена је и у Lamm et al. (1990), али без детаљнијег објашњења. Вредност интервала слеђења од 6 s добила је и Vogel (2002) применом развијене методологије базиране на снимању саобраћајних карактеристика више од 100.000 возила на четворокракој раскрсници у Шведској.

Како би осигурали да су приликом мерења брзина на различитим типовима саобраћајница присутни услови слободног тока, Fazio et al. (2014) користили су просечне вредности интервала слеђења веће од 7 s, позвавши се на резултате истраживања које су спровели Currin (2001), Homburger et al. (1996) и Robertson et al. (1994). Silvano et al. (2020) су приликом истраживања утицаја ограничења брзине и геометријских карактеристика градских саобраћајница на брзину слободног тока дошли до закључка да критична вредност интервала слеђења при коме ће се возила са вероватноћом од 50% наћи ван услова слободног тока износи око 7 s. Утврдили су и да вероватноћа драстично опада (<10%) приликом интервала слеђења већег од 10 s, што је гранична вредност коју је нпр. добио и Luttinen (1996) за двотрачне ванградске и градске саобраћајнице.

Поред наведених, у литератури се појављују и вредности интервала међурастојања веће од 8 s (Lin et al., 1996), при којима долази до стабилизације брзина, односно престанка утицаја осталих возила.

Како се може приметити до сада су бројни истраживачи користили одређену вредност интервала слеђења возила као граничну вредност слободног тока, али без конкретних објашњења, као нпр. Lamm et al. (1990) или Mahmud et al. (2021), док су поједини вршили врло егзактна и прецизна мерења овог параметра, као нпр. Lobo et al. (2011) или Vogel (2002), али уз велику разлику у вредности овог параметра. Наиме, може се уочити да се распон у истраживањима најчешће креће од 3 s до 10 s. Због великог распона граничне вредности интервала слеђења возила слободног тока у досадашњим истраживањима идентификована је потреба за прецизним утврђивањем вредности истог у локалним условима (Stepanović et al., 2023).

3. МЕТОДОЛОГИЈА ИСТРАЖИВАЊА

На основу класификације дефинисане у америчком Приручнику за капацитет путева (HCM, 2016) и функционалне класификације путева у Србији (Tubić & Maletin, 2008), издвојено је укупно 30 деоница путева I класе које су опремљене аутоматским бројачима саобраћаја (АБС). Реч је о аутоматским бројачима (QLTC 10C) који раде на принципу индуктивних петљи, а који поред података о протоку, структури саобраћајног тока, временским неравномерностима итд., региструју и брзину проласка сваког појединачног возила, као и временске интервале слеђења (**Слика 1.**). Сви наведени подаци са аутоматских бројача саобраћаја на испитиваним деоницама добијени су увидом у базу података о бројању саобраћаја Јавног предузећа „Путеви Србије”.

00377	02.02.19	06:32:17	0	0	C1	75	1503
00460	02.02.19	06:32:44	3	1	A1	84	483
00461	02.02.19	06:32:48	3	1	A1	86	450
00462	02.02.19	06:32:59	3	1	A1	78	459
00378	02.02.19	06:33:03	0	0	B2	56	727
00379	02.02.19	06:33:04	0	0	B2	56	877
00380	02.02.19	06:33:06	0	0	B2	54	871
00463	02.02.19	06:33:20	3	1	A1	92	547
00464	02.02.19	06:33:32	3	1	A1	90	491
00465	02.02.19	06:33:34	3	1	B1	86	717
00466	02.02.19	06:33:39	3	1	A2	86	659
00467	02.02.19	06:34:06	3	1	A1	75	435
00468	02.02.19	06:34:09	3	1	A2	77	677
00469	02.02.19	06:34:15	3	1	A1	82	505
00470	02.02.19	06:34:18	3	1	A1	113	537
00471	02.02.19	06:34:45	3	1	A1	84	529
00381	02.02.19	06:35:01	0	0	A1	55	486
00472	02.02.19	06:35:36	3	1	A1	77	438
00473	02.02.19	06:35:59	3	1	B5	78	1806

Слика 1. *Пример података са АБС-а који показују: редни број возила по смеру, датум, време наиласка возила, смер кретања, категорију возила, брзину [km/h] и дужину возила [cm], извор: Stepanović et al., 2023*

Анализе спроведене у истраживању које је приказано у овом раду односе се на утицајне зоне аутоматских бројача саобраћаја. Под овом зоном подразумева се одсек пута од по 0,75 km испред и иза АБС. Параметри саобраћајног тока очитани са АБС на овај начин репрезентативни су за предметни одсек, с обзиром на то да су у овој зони одступања у вредностима параметара минимална. За анализу је одабран меродаван дан у меродавном месецу – четвртак, 18. април 2019. године. Ова година је одабрана како би се избегли утицаји пандемије COVID-19, односно мера које су повремено биле на снази, попут ограничења кретања, на варијације у саобраћајном току. С обзиром на то да је предмет истраживања гранична вредност слободног и стабилног тока, дан и период истраживања су одабрани тако да услови буду што приближнији идеалним – дан је био сунчан на свим изабраним деоницама, без икаквих падавина (сув асфалт), а подаци су прикупљени током дневне светлости, од 06:00 h до 20:00 h. Укупан валидан узорак на свих 30 деоница опремљених АБС-ом износио је 134.261 возила (Stepanović et al., 2023).

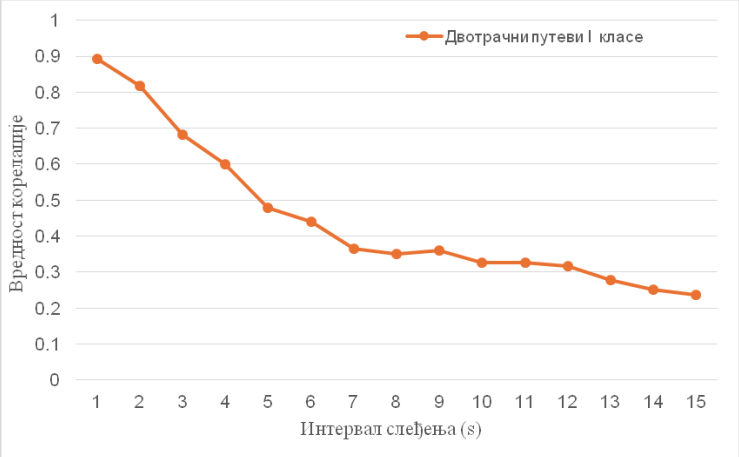
Временски интервал слеђења представља време које протекне између проласка исте тачке два узастопна возила преко попречног пресека деонице (Tubić et al., 2022). У случају прорачуна интервала слеђења на основу детектора, најчешће се посматра време између проласка две исте осовине возила n и n-1, што је био случај и приликом овог истраживања. Познато је да возило n има великог утицаја на брзину возила које га следи (n-1) при малим вредностима интервала слеђења, док је код великих вредности интервала слеђења тај утицај минималан, јер тада на кретање возила утичу пре свега карактеристике пута, возила и возача. Због тога брзине између возила n и n-1 неће бити у корелацији у условима слободног тока, односно очекивано је да ће се корелација смањивати са растом интервала слеђења док не достигне стабилне вредности око нуле (Vogel, 2002). Када се то има у виду, неопходно је идентификовати граничну вредност до које су брзине возила зависне од интервала слеђења, а након које је та зависност јако слаба. Вредности корелације до 0,4 прихваћене су као слаба корелација (Soldić-Aleksić & Chroneos Krasavac, 2009). Након тога, могуће је поделити групе возила у односу на добијену граничну вредност и наћи регресиону криву која описује вредност корелације узастопних возила за групу са јаком и слабом корелацијом. На тај начин могуће је добити додатни критеријум за одређивање прецизне граничне вредности, а који се односи на вредност интервала слеђења очитаном на месту спајања две криве. Добијена вредност треба да буде блиска вредности коришћеној за поделу на две групе а ако није, поступак се спроводи поново (Vogel, 2002).

С обзиром на то да аутоматски бројачи саобраћаја који се налазе на дефинисаним одсецима утицајне зоне АБС мере интервале слеђења и заокружују их на вредности од 1 s, креирано је укупно 15 група у складу са вредностима интервала слеђења између возила. Тако су брзине свих возила чије вредности интервала слеђења износе 1 s класификоване у групу 1, брзине возила са интервалима слеђења од 2 s у групу 2, и тако до последње групе, која је обухватила брзине свих возила са растојањима слеђења ≥15 s. Интервали слеђења мањи од 1 s (мањи од 0,5 s) нису анализирани, с обзиром на то да је најчешће реч о возилима која нагло започињу или завршавају маневар претицања. За све анализиране деонице са АБС испитиване су корелације између расподељених брзина сваког возила (n) и возила које следи (n-1) у оквиру сваке од 15 наведених група. За чување и

обраду података коришћен је SQL Server Express, у којем је направљена релациона база података. Статистичка обрада података вршена је у софтверу IBM SPSS Statistics v. 21 (Stepanović et al., 2023).

4. АНАЛИЗА РЕЗУЛТАТА

Испитивањем корелације (r) између брзине возила n и следећег возила (n-1) за сваку од 15 дефинисаних група интервала слеђења (t_h) добијени су следећи резултати (**Табела 1.** и **Слика 2.**).

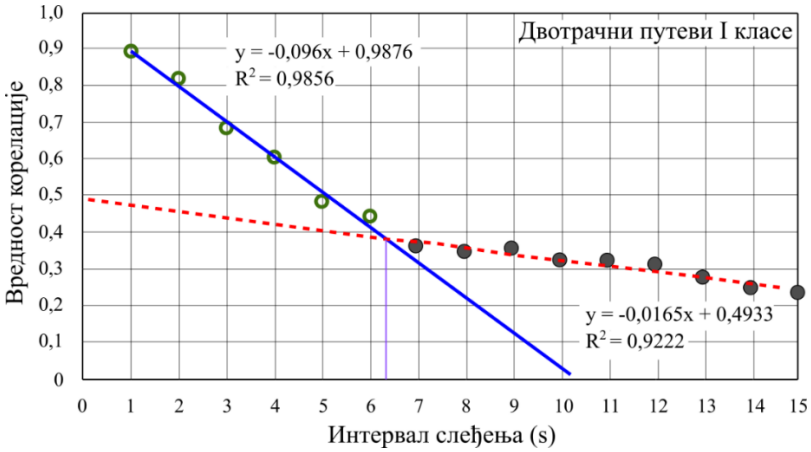


Слика 2. *Вредности корелације за сваку дефинисану групу временског интервала слеђења, извор: Stepanović et al., 2023*

Табела 1. *Коефицијенти корелације брзина узастопних возила по дефинисаним групама временских интервала слеђења, извор: Stepanović et al., 2023*

t_h (s)	Двотрачни путеви I класе		
	корелација	значајност	валидан узорак
1	0,892	<0,001	17048
2	0,817	<0,001	17397
3	0,682	<0,001	9433
4	0,600	<0,001	6223
5	0,479	<0,001	4730
6	0,439	<0,001	3899
7	0,365	<0,001	3380
8	0,350	<0,001	3113
9	0,360	<0,001	2827
10	0,326	<0,001	2605
11	0,325	<0,001	2465
12	0,316	<0,001	2276
13	0,278	<0,001	2183
14	0,250	<0,001	1995
15	0,236	<0,001	50566

Увидом у добијене резултате примећује се статистички значајна корелација брзине узастопних возила свих дефинисаних група интервала слеђења. Као што је и очекивано, приметно је генерално смањење коефицијента корелације, односно смањење зависности између брзина возила n и n-1 са повећањем интервала слеђења, као и успорење пада (заравњавање криве) након одређене вредности интервала слеђења. Уколико се за слабу корелацију посматрају вредности до 0,4 (Soldić-Aleksić & Chroneos Krasavac, 2009) из **Табеле 1**. и са **Слике 2**, може се закључити да стабилни услови слободног тока за двотрачне путеве I класе почињу од 7. s (Stepanović et al., 2023). Како би се провериле добијене вредности, односно потврдиле тачне граничне вредности интервала слеђења, дефинисане су регресионе криве за вредности корелације испод (група са слабом корелацијом) и изнад (група са средње јаком и јаком корелацијом) уочене граничне вредности од 7 s. Може се уочити да пресечна тачка две регресионе криве пада близу претпостављене вредности, односно износи 6,3 s за двотрачне путеве испитиване класе (**Слика 3.**), на основу чега се може закључити да је то гранична вредности слободног тока.



Слика 3. *Регресионе криве вредности корелације за дефинисане групе возила са интервалима слеђења испод и изнад граничне вредности*, *извор: Stepanović et al., 2023*

Посматрајући добијену граничну вредност интервала слеђења од 6,3 s на двотрачним путевима I класе може се закључити да је ова вредност у складу са досадашњим истраживањима на овом типу пута. Добијена вредност је нешто виша од вредности које је добио Hashim (2011) – 5 s, али веома слична вредностима које су добили Lobo et al. (2011) и Vogel (2002) – 6 s, као и вредностима при прихватљивим условима које препоручују Homburger et al. (1996) – 7 s. Посматрањем везе добијених граничних вредности интервала слеђења возила у слободном току двотрачних путева са протоком возила могу се уочити интересантни резултати. Добијена вредност од 6,3 s одговарају вредностима протока од 571 воз/час, у случају посматрања средњих вредности временски равномерног наиласка возила. Ови резултати су у складу са једним од првих истраживања границе осетљивности брзине на раст протока на двотрачним путева (Greenshields et al., 1935), у којима су утврђене граничне вредности од 400 до 600 возила/час. Такође, у поређењу са граничном вредношћу протока од 450 возила/час (Kuzović, 1987), уочава се да су добијене веће вредности, што се може делимично образложити управо утицајем раста саобраћајног оптерећења на перцепцију возача о условима слободног тока. Наиме, услед пораста просечног годишњег дневног саобраћаја (ПГДС), утицај интеракције са возилом испред почиње при нижим вредностима интервала слеђења, односно већим вредностима протока. С обзиром на велики раст ПГДС-а у односу на вредности у наведеним истраживањима, али побољшање возно-динамичких карактеристика возила, разумљив је и раст граничне вредности протока слободног тока. У поређењу са препорукама америчког Приручника за прорачун капацитета (HCM, 2016), који наводи границу протока од 200 путнички аутомобила/часу/оба смера за мерење слободних брзина на терену, уочава се да су добијене вредности више. Међутим, ова разлика последица је наведених претпоставки о временски равномерном наиласку возила, која је могућа само у теоријски идеалним условима, па резултати нису директно упоредиви. Ипак, добијени резултати недвосмислено показују да би повећање ове вредности требало размотрити, с обзиром на то да се она наводи у америчком Приручнику за прорачун капацитета још од његовог четвртог издања (HCM, 2000), без јасно наведеног истраживања на основу којег је конкретна вредност добијена. Претходно наведено додатно оправдава коришћење интервала слеђења као подобнијег параметра за дефинисање граничних вредности слободног тока (Stepanović, 2023).

5. ЗАКЉУЧАК

У раду су приказани резултати истраживања граничне вредности интервала слеђења између слободног и стабилног тока на двотрачним путевима у Србији. Због великог теоријског и практичног значаја који слободна брзина има приликом анализа у саобраћајном инжењерству циљ овог истраживања односио се на утврђивање прецизне вредности ове границе слободног тока у локалним условима. Утврђивање ове границе је посебно важно с обзиром на чињеницу да ова вредност у досадашњим истраживањима није усаглашена, већ варира између 3 и 10 секунди (нпр. Vogel, 2002), што оставља простор за велику грешку приликом прорачуна слободне брзине тока. Имајући то у виду, спроведено је опсежно истраживање на 30 деоница двотрачних путева прве класа опремљених модерним аутоматским бројачима саобраћаја (АБС), са којих су добијени подаци о брзинама и интервалима слеђења за укупан узорак од 134.261 возила. Добијени резултати су показали да је гранична вредност интервала слеђења слободног тока износи 6,3 секудне, што је у складу са најчешћим резултатима досадашњих истраживања. Добијене вредности граничних интервала слеђења одговарају вредностима протока од 571 возила/час на двотрачним путевима I у случају

посматрања средњих вредности временски равномерног наиласка возила. Поређењем добијене вредности протока са појединим истраживањима може се закључити да су добијене граничне вредности протока слободног тока нешто више од резултата појединих истраживања (Greenshields et al., 1935; HCM, 1950; Kuzović, 1987). На генерални раст граничних вредности протока возила слободног тока, односно пада вредности интервала слеђења возила, поред промене перцепције возача о условима слободног тока због раста саобраћајног оптерећења, утиче и значајно унапређење возно-динамичких карактеристика возила, пројектних стандарда геометријских елемената пута, квалитета коловоза итд. (Stepanović, 2023).

Ови резултати могу представљати квалитетну основу за прорачун слободних брзина на ванградској мрежи двотрачних путева у Србији, а тиме и прецизније резултате бројних анализа у саобраћајном инжењерству. У будућим истраживањима потребно би било утврдити и граничне вредности интервала слеђења на осталим класама ванградских двотрачних путева као и на градским саобраћајницама, где овај параметар такође има битну улогу. Наиме, другачији услови окружења пута и присуство локалних саобраћајних токова захтевају детаљнију поделу група интервала слеђења возила ради одређивања граничне вредности слободног тока.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Currin, T. R. (2001). *Spot speed study in introduction to traffic engineering: A manual for data collection and analysis*. Wadsworth Group.

[2] Fazio, J., Wiesner, B. N., & Deardoff, M. D. (2014). Estimation of free-flow speed. *KSCE Journal of Civil Engineering*, *18*(2), 646–650. https://doi.org/10.1007/S12205-014-0481-7

[3] Fitzpatrick, K., Elefteriadou, L., Harwood, D. W., Collins, J. M., McFadden, J., Anderson, I. B., Krammes, R. A., Irizarry, N., Parma, K. D., Bauer, K. M., & Passetti, K. (2000). *Speed prediction for two-lane rural highways* (FHWA-RD-99). U. S. Department of transportation – Federal Highway Administration.

[4] Greenshields, B. D., Bibbins, J. R., Channing, W. S., & Miller, H. H. (1935). *A study of traffic capacity*.

[5] Hashim, I. H. (2011). Analysis of speed characteristics for rural two-lane roads: A field study from Minoufiya Governorate, Egypt. *Ain Shams Engineering Journal*, *2*(1), 43–52. https://doi.org/10.1016/J.ASEJ.2011.05.005

[6] HCM (1950). *Highway capacity manual* (1st ed.). Highway Research Board. Committee on Highway Capacity, Bureau of Public Roads, U. S. Department of Commerce. Washington DC.

[7] HCM (2016). *Highway capacity manual* (6th ed.). Transportation Research Board, National Research Council. Washington DC.

[8] Homburger, W., Hall, J., Loutzenheiser, R., & Reilly, W. (1996). *Fundamentals of traffic engineering*.

[9] Kuzović, L. (1987). Teorija saobraćajnog toka. IRO Građevinska knjiga.

[10] Lamm, R., Choueiri, E. M., & Mailaender, T. (1990). Comparison of operating speeds on dry and wet pavements of two-lane rural highways. *Transportation Research Record*, *1280*(8), 199–207.

[11] Lin, F. B., Su, C. W., & Huang, H. H. (1996). Uniform criteria for level-of-service analysis of freeways. *Journal of Transportation Engineering*, *122*(2), 123–129. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-947X(1996)122:2(123)

[12] Lobanov, E. M., Siljanov, V. V, Sitnikov, J. M., & Sapegin, L. N. (1970). Propusnaja sposobnost automobilnih dorog. *Transport*, *Moskva*. [Лобанов, Е. М., Сильянов В. В., Ситников. Ю. М., Сапегин, Е. М. (1970). *Пропускная способность автомобильных дорог,* Транспорт, Москва]

[13] Lobo, A., Jacques, M. A. P., Rodrigues, C. M., & Couto, A. (2011). Free-gap evaluation for two-lane rural highways. *Transportation Research Record*, *2223*, 9–17. https://doi.org/10.3141/2223-02

[14] Luttinen, R. T. (1996). *Statistical analysis of vehicle time headways*. Aalto University.

[15] Mahmud, M. S., Gupta, N., Safaei, B., Jashami, H., Gates, T. J., Savolainen, P. T., & Kassens-Noor, E. (2021). Evaluating the impacts of speed limit increases on rural two-lane highways using quantile regression. Transportation Research Record, 2675(11), 740–753. https://doi.org/10.1177/03611981211019732

[16] Medina, A. M. F., & Tarko, A. P. (2005). Speed factors on two-lane rural highways in free-flow conditions. *Transportation Research Record*, *1912*, 39–46. https://doi.org/10.1177/0361198105191200105

[17] HCM Robertson, H. D., Hummer, J. E., Nelson, D. C., & Institute of Transportation Engineers (1994). *Manual of transportation engineering studies*. Englewood Cliffs, N. J. Prentice Hall.

[18] Sekhar, C. R., Nataraju, J., Velmurugan, S., Kumar, P., & Sitaramanjaneyulu, K. (2016). Free flow speed analysis of two lane inter urban highways. *Transportation Research Procedia*, *17*, 664–673. https://doi.org/10.1016/J.TRPRO.2016.11.121

[19] Siljanov, V. V. (1977). *Teorija transportnih potokov v projektovaniji dorog i organizaciji dvizenija*. Transport, Moskva. [Сильянов В. В. (1977). *Теория транспортных потоков в проектировании дорог и организации движения*. Транспорт, Москва]

[20] Silvano, A. P., Koutsopoulos, H. N., & Farah, H. (2020). Free flow speed estimation: A probabilistic, latent approach. Impact of speed limit changes and road characteristics. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, *138*, 283–298. https://doi.org/10.1016/J.TRA.2020.05.024

[21] Soldić-Aleksić, J., & Chroneos Krasavac, B. (2009). *Kvantitativne tehnike u istraživanju tržišta*. CID Ekonomskog fakulteta u Beogradu.

[22] Stepanović. N., (2023). Model za analizu brzine slobodnog toka u funkciji klase dvotračnog puta. Doktorska disertacije. Univerzitet u Beogradu – Saobraćajni fakultet. Beograd

[23] Stepanović, N., Tubić, V., & Zdravković, S. (2023). Determining free-flow speed on different classes of rural two-lane highways. Promet – Traffic & Transportation, 35(3), 315–330. https://doi.org/https://doi.org/10.7307/ptt.v35i3.195

[24] Tubić, V., & Maletin, M. (2008). *Kriterijumi za kategorizaciju putne mreže Srbije*. Institut Saobraćajnog fakulteta, Beograd.

[25] Tubić, V., Vidas, M., & Stepanović, N. (2022). Osnove teorije saobraćajnog toka. Univerzitet u Beogradu – Saobraćajni fakultet.

[26] Vogel, K. (2002). What characterizes a “free vehicle” in an urban area? *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, *5*(1), 15–29. https://doi.org/10.1016/S1369-8478(02)00003-7

.

ANALIZA PODATAKA O SAOBRAĆAJNIM NEZGODAMA U REPUBLICI SRBIJI I MOGUĆI DORINOSI UNAPREĐENJU SISTEMA BEZBEDNOSTI I OČUVANJU ŽIVOTNE SREDINE

Marija Mladenović, *mladenovicmarija.ing@gmail.com*

Saobraćajni fakultet, Univerzitet u Beogradu, 11000 Beograd

Rezime: *Ovaj istraživački rad ispituje bezbednosne aspekte saobraćaja, s fokusom na saobracajne incidente. Formiranje baze podataka o saobraćajnim nezgodama predstavlja osnov za dobijanje relevantnih i pouzdanih informacija, omogućavajući detaljnu analizu događaja. Napredak u oblasti bezbednosti saobraćaja, evidentiran kroz analizu podataka, predstavlja osnov za identifikaciju konkretnih mera prevencije u bezbednosti saobraćaja, kao i promocije održivih vidova saobraćaja. Kroz konkretan primer saobraćajnih nezgoda na putno- pružnim prelazima, iz baze podataka, istražuju se strategije koje se tiču bezbednosti saobraćaja, kao i mogućnosti kreiranja planova koji se tiču prevencije nezgoda i smanjenja rizika na putno- pružnim prelazima. Kroz primenu statističke analize i drugih metoda za dokazivanje, pružen je dublji uvid u uzroke i posledice ovih nezgoda.*

Proučavajući dešavanja u drumskom i železničkom saobraćaju, posebna pažnja biće posvećena uticaju saobraćaja na zemljište i biodivezitet. Cilj istraživanja je identifikacija mera koje doprinose bezbednijem saobraćaju i promovišu održivost saobraćajne delatnosti u Srbiji. integracija rezultata istraživanja u politike i praksu bezbednosti saobraćaja ima potencijal za značajan doprinos unapređenju sistema bezbednosti i očuvanja životne sredine.

Ključne reči: *bezbednost saobraćaja, saobraćajne nezgode, održivost*

ANALYSIS OF ROAD TRAFFIC ACCIDENT DATA IN THE REPUBLIC OF SERBIA AND POTENTIAL CONTRIBUTIONS TO IMPROVING SAFETY SYSTEMS AND ENVIRONMENTAL PRESERVATION

Marija Mladenović, *mladenovicmarija.ing@gmail.com*

Faculty of Transport and Traffic Engineering, *University of Belgrade, 11000 Belgrade*

Abstract: *This research paper explores safety aspects of transportation, with a focus on traffic incidents Establishing a database of traffic accidents serves as a basis for obtaining relevant and reliable information, enabling detailed event analysis. Progress in traffic safety, as evidenced by data analysis, forms the basis for identifying specific preventive measures in traffic safety and promoting sustainable modes of transportation. Through a concrete example of traffic accidents at railway crossings, data-driven strategies concerning traffic safety are explored, as well as the possibilities of creating plans for accident prevention and risk reduction at railway crossings. Through the application of statistical analysis and other evidential methods, a deeper insight into the causes and consequences of these accidents is provided.*

Studying events in road and railway traffic, special attention will be paid to the impact of traffic on land and biodiversity. The research aims to identify measures that contribute to safer traffic and promote the sustainability of transportation activities in Serbia. Integrating research results into traffic safety policies and practices has the potential to significantly contribute to improving safety systems and environmental preservation.

Keywords*: traffic safety, traffic accidents, sustainability*

1. UVOD

Saobraćaj predstavlja vitalni deo svakodnevnog života i ekonomske aktivnosti, ali istovremeno nosi sa sobom značajne izazove u pogledu bezbednosti u saobraćaju i očuvanja životne sredine. U Republici Srbiji, kao i u mnogim drugim zemljama, bezbednost u drumskom i železničkom saobraćaju predstavlja prioritetnu tačku za unapređenje. Saobraćajne nezgode na putno- pružnim prelazima su posebno kritične tačke koje zahtevaju adekvatno rešavanje radi smanjenja broja nesreća i poboljšanja bezbednosti.

Predmet istraživanja obuhvata analizu podataka o saobraćajnim nezgodama u Republici Srbiji, sa posebnim naglaskom na nezgode koje se dešavaju na putno-pružnim prelazima. Problematika koja se istražuje jeste nedostatak efikasnih strategija i sistema za prevenciju saobraćajnih nezgoda na putno- pružnim prelazima u Srbiji. Ovaj nedostatak može rezultirati povećanim rizikom po bezbednost učesnika u saobraćaju i ekološkim negativnim efektima.

Cilj istraživanja je analizirati podatke o saobraćajnim nezgodama i saobraćajnim nezgodama na putno-pružnim prelazima radi identifikacije uzroka i faktora koji doprinose istima. Osim toga, istraživanje ima za cilj promovisanje održivog saobraćaja, sa naglaskom na unapređenju železničkog saobraćaja kao ključnog segmenta u tom procesu. Kroz identifikaciju izazova i mogućnosti u oblasti bezbednosti saobraćaja i očuvanja životne sredine, istraživanje teži da predloži strategije i mere koje bi podržale dugoročno održivo planiranje i upravljanje saobraćajem u Republici Srbiji.

Metode koje su korišćene u istraživanju obuhvataju analizu podataka o saobraćajnim nezgodama, pregled relevantne literature iz oblasti bezbednosti i održivosti u saobraćaju, studije iz oblasti bezbednosti saobraćaja, kao i primenu alata mašinskog učenja uz korišćenje programskog jezika Python. Konkretno, korišćenjem alata mašinskog učenja i programa Python, analizirane su baze podataka nesreća na putno- pružnim prelazima radi proračuna broja nesreća po mesecima.

Rad je, pored uvodnih i zaključnih razmatranja, strukturiran u dva dela. Prvi deo rada obuhvata analizu saobraćajnih nezgoda u drumskom i železničkom saobraćaju, kao i analizu saobraćajnih nezgoda na putno-pružnim prelazima u Republici Srbiji, sa osvrtom na njihovu frekvenciju, uzroke i posledice. Drugi deo rada posvećen je analizi doprinosa unapređenju sistema bezbednosti saobraćaja i uticaju saobraćaja na životnu sredinu. Ukazuje se na strategijski značaj razvoja železničkog saobraćaja za Srbiju, kao održivog vida saobraćaja. Nakon toga, u radu su izneti rezultati istraživanja i njihov doprinos analizi sistema bezbednosti saobraćaja i očuvanju životne sredine. Na kraju, u zaključku su sumirani ključni nalazi istraživanja, uz preporuke za dalja istraživanja i akcije u oblasti saobraćajne bezbednosti i održivosti.

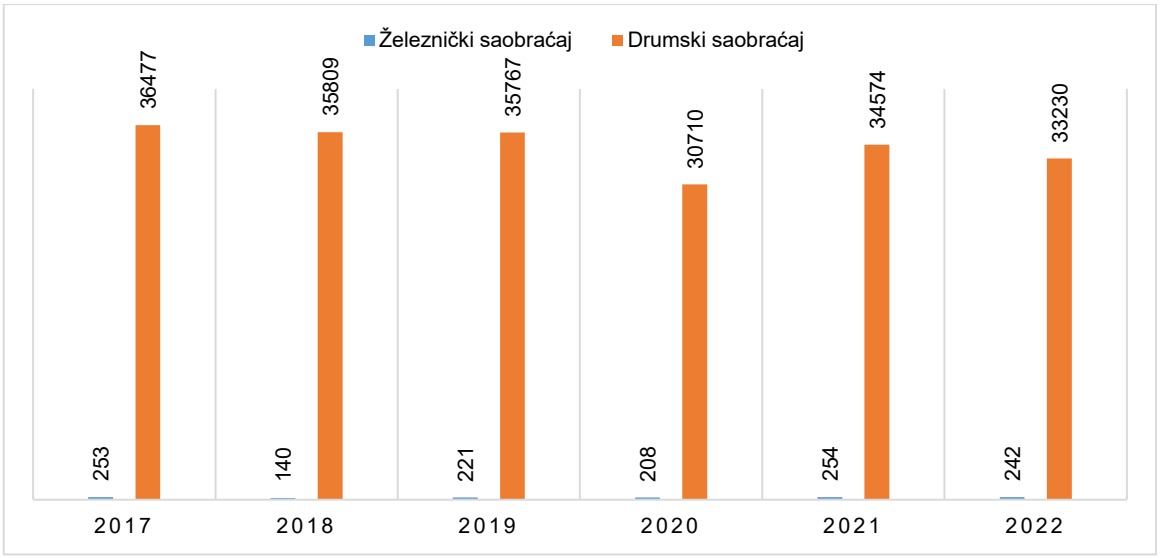
2. BEZBEDNOST DRUMSKOG I ŽELEZNIČKOG SAOBRAĆAJA

Bezbednost u drumskom i železničkom saobraćaju predstavlja ključni faktor za održivost i efikasnost transportnog sistema svake zemlje. Od lokalnih puteva do auto- puteva, pravilna primena saobraćajnih propisa i održavanje infrastrukture od vitalnog su značaja za sprečavanje nesreća. Sa druge strane, železnički saobraćaj zahteva pažljivo planiranje i održavanje putno- pružnih prelaza kako bi se osigurala bezbednost putnika i tereta. Oba vida saobraćaja zahtevaju kontinuirano unapređenje sistema bezbednosti, koordinaciju između drumskog i železničkog saobraćaja, kao i podizanje svesti o rizicima, kako bi se stvorilo sigurno okruženje za sve učesnike u saobraćaju.

2.1. Analiza saobraćajne nezgode na putno-prižnim prelazima u Srbiji

Nesreća znači retki, slučajni, višefaktorski događaj u kojem jedan ili više učesnika u saobraćaju ne uspevaju da se prilagode okolini, što rezultira sudarom. Saobraćajne nesreće se dešavaju kombinacijom faktora koji dovode do žrtava, povreda i oštećenja imovine. Četiri faktora - ljudski, vozilo, put i okruženje - uvek imaju ključnu ulogu u nastanku saobraćajnih nesreća (Thapa et al, 2023, pp.197).

Oblast istraživanja su saobraćajane nesreće u Srbiji u drumskom i železničkom saobraćaju stavljajući akcenat na nesreće na putno- pružnim prelazima. U Srbiji, kao i u mnogim drugim zemljama, saobraćajne nesreće na drumskim i železničkim putevima predstavljaju ozbiljan izazov za bezbednost i održivost transportnog sistema. Svake godine, hiljade ljudi biva pogođeno nesrećama na putevima, dovodeći do gubitka ljudskih života, povreda i materijalnih šteta. Ove nesreće pored toga što imaju direktni uticaj na pojedince i njihove porodice, već takođe opterećuju zdravstvene i društvene resurse, kao i ekonomiju zemlje. Na žalost, iako se preduzimaju različite mere kako bi se poboljšala bezbednost u saobraćaju, nesreće i dalje ostaju prisutne. Drumski saobraćaj u Srbiji često je podložan riziku zbog različitih faktora kao što su preopterećenost puteva, nepridržavanje saobraćajnih propisa, loše održavanje vozila i infrastrukture, kao i nedostatak svesti o bezbednosti u saobraćaju. Sa druge strane, iako je železnički saobraćaj ekološki prihvatljiviji, nesreće na železničkim prugama takođe predstavljaju izazov, posebno na putno-pružnim prelazima. Bez obzira na razlike između drumskog i železničkog saobraćaja, obe vrste prevoza zahtevaju pažljivo planiranje, nadzor i sprovođenje mera bezbednosti kako bi se smanjio rizik od nesreća i očuvala integritet transportnog sistema. Na grafikonu 1 prikazan je broj nesreća u drumskom i železničkom saobraćaju u periodu 2017-2022. godine bio je:



Grafikon 1. *Komparativna analiza nesreća u železničkom i drumskom saobraćaju u periodu 2017-2022. godine*

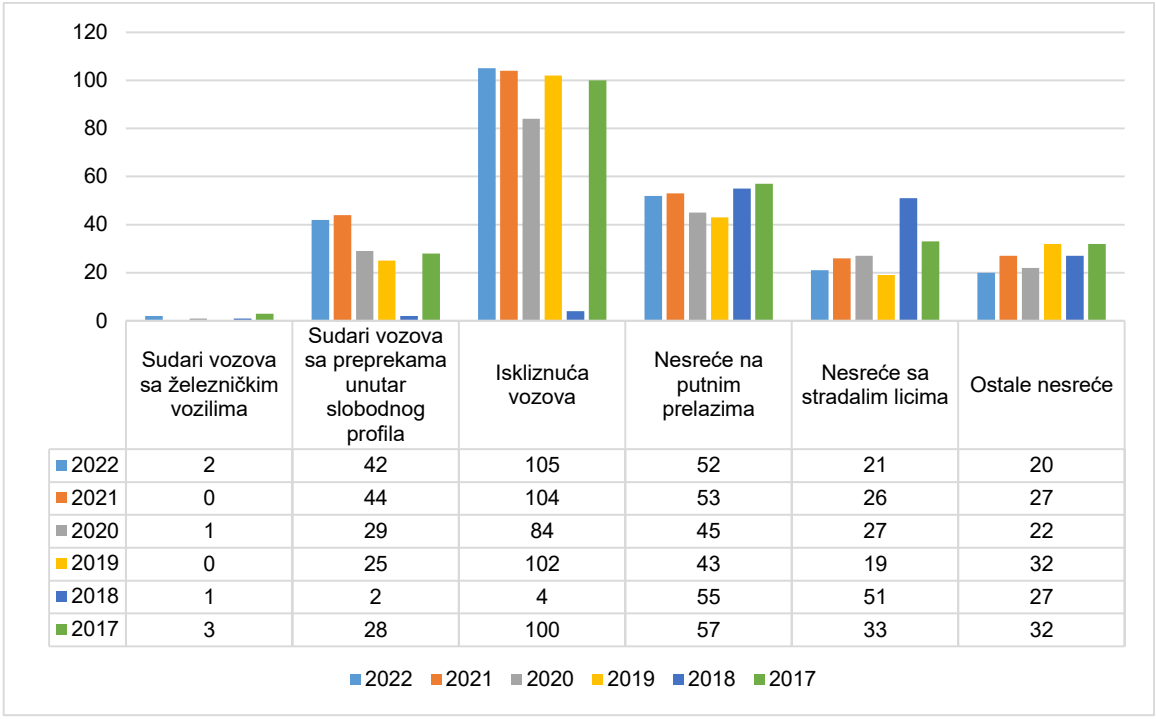
(Izvor: Izveštaj Direkcije za železnice; Agencija za bezbednost saobraćaja)

Broj nesreća u drumskom saobraćaju je značajno veći u odnosu na nesreće u železničkom saobraćaju. Ovi statistički podaci su očekivani obzirom na znatno veći broj učesnika u drumskom saobraćaju koji obuhvata širok spektar vozila i učesnika, što prirodno povećava verovatnoću nesreća u odnosu na situacije u železničkom saobraćaju. U 2020. godini, u godini pandemije virusa COVID 19, kada su vladale stroge mere

kretanja ljudi broj saobraćajnih nesreća je bio manji. U narednoj 2021. godini broj nesreća se značajno povećao.

Ukupan broj nesreća u drumskom saobraćaju u 2017. godini bio je 36.477, dok je u istoj godini broj nesreća u železničkom saobraćaju bio 253. Posmatrajući nesreće u železničkom saobraćaju, u 2018. godini u odnosu na 2017. godinu primećen je značajan pad broja nesreća, dok je trend rasta započeo od 2018. godine nadalje, sa 221 u 2019. godini, 208 u 2020. godini, 254 u 2021. godini i 242 u 2022. godini. Postoji trend rasta broja nesreća u železničkom i drumskom saobraćaju, a to ukazuje na potrebu dodatnih mera za unapređenje bezbednosti u železničkom i drumskom saobraćaju, kako bi se smanjio broj nesreća i poboljšala bezbednost putnika i tereta.

Grafikon 2 je prikaz vrste nesreća u železničkom saobraćaju.

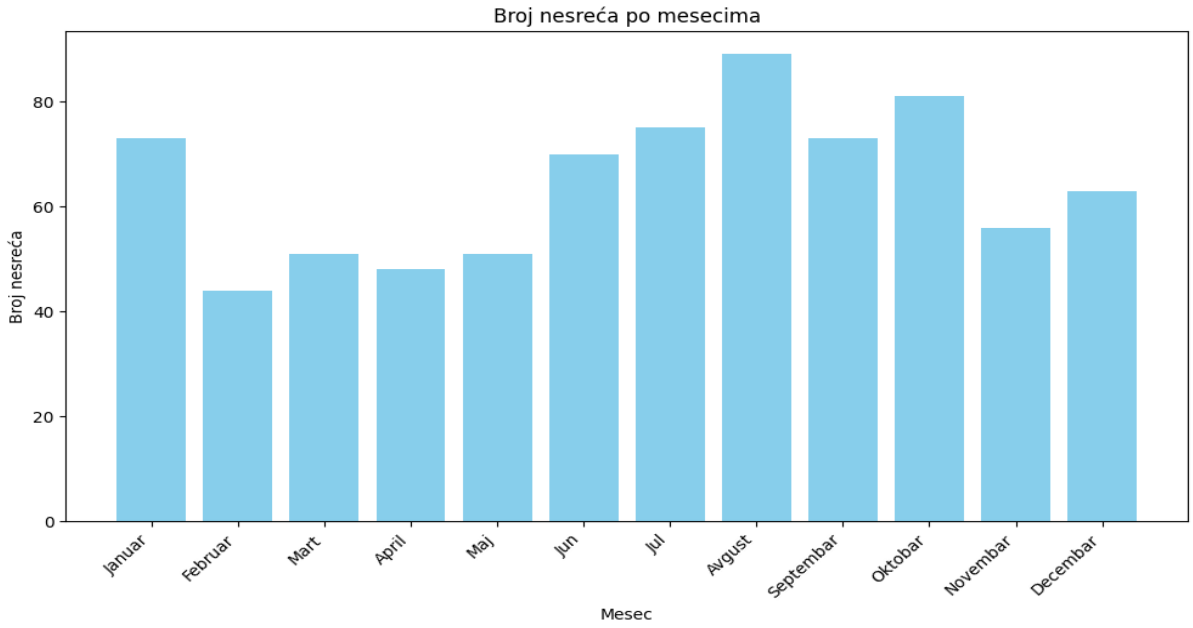


	Sudari vozova sa železničkim vozilima	Sudari vozova sa preprekama unutar slobodnog profila	Iskliznuća vozova	Nesreće na putnim prelazima	Nesreće sa stradalim licima	Ostale nesreće
2022	2	42	105	52	21	20
2021	0	44	104	53	26	27
2020	1	29	84	45	27	22
2019	0	25	102	43	19	32
2018	1	2	4	55	51	27
2017	3	28	100	57	33	32

Grafikon 2. *Vrste nesreća u železničkom saobraćaju u periodu 2017-2022. godine*

(Izvor: Izveštaj Direkcije za železnice)

Najveći broj nesreća evidentiran je kod vrste nesreće iskliznuća vozova i nesreće na putno- pružnim prelazima. Nesreća na putno- pružnim prelazima najviše je bilo u 2018. godini, ali nakon tog perioda dolazi do smanjenja ove vrste naresreće u železničkom saobraćaju. Podignut je stepen tehničkih i zakonskih mera bezbednosti, kao i svest o bezbednosti saobraćaja na putno- pružnim prelazima, kao i postojanje saradnje između dva vida saobraća- drumskog i železničkog. Međutim, uočava se rast vrste nesreće sudari vozova sa preprekama unutar slobodnog profila, kojih je u 2018. godini bilo svega 2, dok je njihov broj povećan na 44 sudara tokom 2021. godine i za dva manje u 2022. godini (42). Posebna pažnja u ovom istraživanju posvećena je nezgodama na putno- pružnim prelazima. Shodno istraživanju i bazi podataka za period 2008-2022. godine ukupan broj nesreća po mesecima prikazan je na grafikonu 3 .



Grafikon 3. *Broj nesreća po mesecima u periodu 2008-2022. godine*

(Izvor: Sopstveni rad autora u programu Python na osnovu baze podataka Železnice Srbije)

U toku letnjih meseci i januara, saobraćaj na putno-pružnim prelazima dostiže svoj vrhunac, što često rezultira povećanim brojem nesreća. Ovi meseci su poznati po visokim frekvencijama saobraćaja, kada su putevi i pruge često opterećeni vozilima. Kombinacija većeg broja vozila na putu i povećane aktivnosti na prugama čini ove periode posebno rizičnim za bezbednost na putno-pružnim prelazima.

Infrastruktura železnice Srbije a.d., koja obuhvata ukupnu železničku mrežu dužine 3.348 km, sadrži 2.121 putno- pružni prelaz. Važno je istaći da se veliki broj ovih prelaza nalazi na malom međusobnom rastojanju, pri čemu se 77% pružnih prelaza nalazi na udaljenosti manjoj od 2 km. Ovaj faktor, zajedno sa nedovoljnom preglednošću i slabo uočljivim obeležjima na prelazima, predstavlja jedan od problema koji doprinose nastanku rizičnih situacija u saobraćaju. Rezultati istraživanja sprovedenih tokom 2017. i 2018. godine pokazala su da je najčešći uzrok rizičnih situacija i saobraćajnih nesreća na putno- pružnim prelazima nebezbedno ponašanje učesnika u drumskom saobraćaju, često izazvano nepoznavanjem rada sistema zaštite na prelazima. **Nepostojanje programa** unapređenja bezbednosti saobraćaja na putno- pružnim prelazima, koji bi detaljnije razradio buduće mere i aktivnosti, izdvaja se kao problem u efikasnom upravljanju bezbednošću saobraćaja na putno-pružnim prelazima (Stategija 20223-2030, str. 18). Na niovu države postoje dva podzakonska akta, pravilnici o ukrštanju pruge i puta, kao i pravilnik o saobraćajnoj signalizaciji. U **pravilniku** su navedeni propisi koji garantuju prisustvo bezbednosti na putno-pružnim prelazima kroz šest različitih nivoa obezbeđenja (Jovanović, 2018, str. 23):

1. Saobraćajnim znacima na putu i zonom potrebne preglednosti;
2. Svetlosnim saobraćajnim znacima i saobraćajnim znacima na putu;
3. Automatskim polubranicima sa svetlosnim saobraćajnim znacima i saobraćajnim znacima na putu;
4. Branici i saobraćajni znaci na putu;
5. Neposrednim regulisanjem saobraćaja na putnom prelazu i posebnim merama; i
6. Zaštitnim ogradama i saobraćajnim znacima ili mimoilaznicama i saobraćajnim znacima na putnim prelazima za pešake i bicikliste.

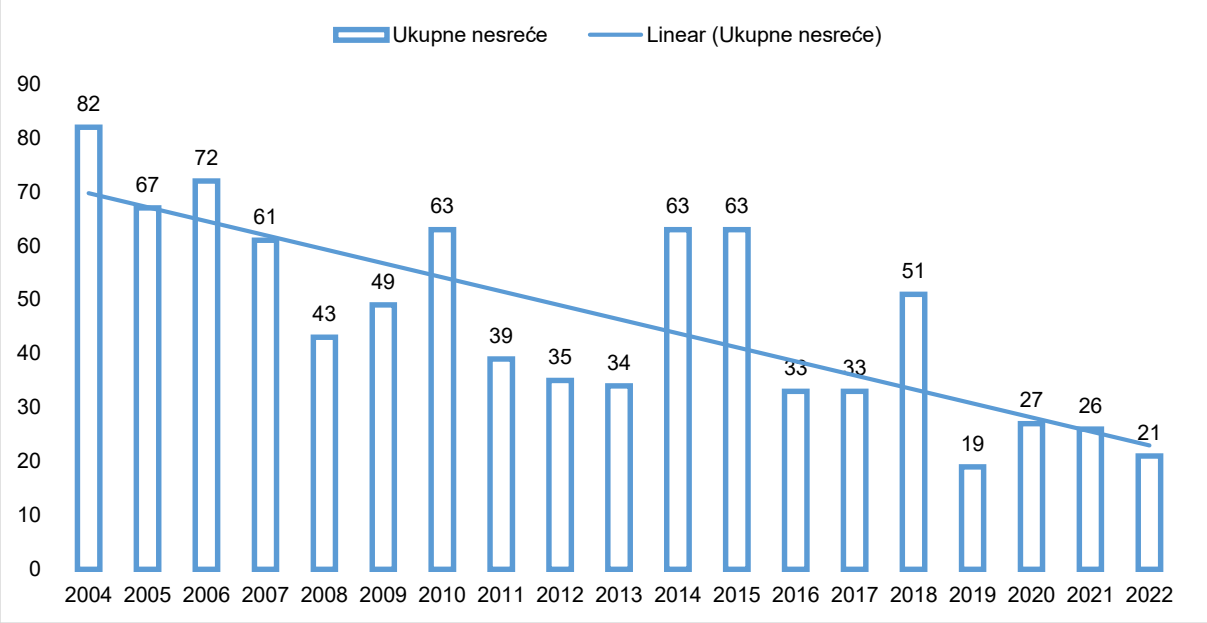
Iako postoji Pravilnik o bezbednosti na putno-pružnom prelazu, nedostaju jasno definisani planovi upravljanja bezbednošću na ovim lokacijama koji bi pružili određene smernice u upravljanju optimalnom bezbednošću na putno-pružnim prelazima. Međutim, u Stretegiji bezbednosti saobraćaja 2023-2030. godine na značaju se daje unapređenju bezbednosti saobraćaja na putno-pružnim prelazima, kao i smanjenju rizika mogućih nezgoda na tim lokacijama. Predlog je izrada **Plana (strategije)** unapređenja bezbednosti saobraćaja na putno-pružnim prelazima koji prati izrada metodologije za procenu rizika bezbednosti saobraćaja na putno- pružnim prelazima, što bi imalo direktan pozitivan uticaj na bezbednost učesnika drumskog i železničkog saobraćaju (na primer putno- pružni prelaz koji ima veći stepen rizika imaće i veće bezbednosne mere). Plan bi obuhvatio prethodne sveobuhvatne analize stanja bezbednosti saobraćaja na putno- pružnim prelazima, kao i predloge

i sprovođenje različitih mere i aktivnosti za unapređenje bezbednosti na putno- pružnim prelazima. Ove mere uključuju tehničke intervencije, kao i aktivnosti usmerene na edukaciju, prevenciju i promociju bezbednosti, kao i eventualne izmene zakona. Posebna pažnja biće posvećena istraživanju ponašanja učesnika u saobraćaju u vezi sa različitim načinima obezbeđenja putno- pružnih prelaza, kako bi se identifikovale i preduzele mere za smanjenje nebezbednog ponašanja (Stategija 2023-2030, str. 35).

Cilj je samo jedan, veća bezbednost kroz smanjenje broja nezgoda na putno- pružnim prelazima. Stoga, u nastavku istraživanja, fokus će biti na ukazivanju potrebe za razvojem i implementacijom strategije bezbednosti saobraćaja koja uključuje i poseban plan upravljanja bezbednošću na putno-pružnim prelazima. Ovaj plan bi trebao da identifikuje specifične mere i akcije za unapređenje bezbednosti na ovim lokacijama, uzimajući u obzir različite faktore rizika i specifičnosti svakog putno-pružnog prelaza kroz kreiranje matrice rizika. Putem kreiranja matrice rizika, svaki putno- pružni prelaz imao bi svoju kategorizaciju rizika. Onaj sa visokim stepenom rizika, uživao bi posebne bezbednosne mere.

Rizik podrazumeva mogućnost nastanka neželjenog događaja zajedno sa razmatranjem veličine gubitka koji će rezultirati takvim događajem. To uključuje događaje koji utiču na bezbednost (smrtni slučajevi, povrede putnika ili zaposlenih, ozbiljne materijalne štete) ili stabilnost transporta (kašnjenje). Putno- pružni prelazi (eng. *Railway crossings*) su mesta gde se pruga ukršta sa putem i imaju visok rizik od sudara zbog potencijalnog konflikta između drumskog saobraćaja i vozova (Sekasi, Solini, 2021).

Bezbednost na putno- pružnim prelazima jedna je od glavnih briga u našem svakodnevnom životu (Dezhkam, Eslami, 2017). Godišnje, mnogi ljudi stradaju usled saobraćajnih nesreća. Prema podacima Direkcije za železnice u periodu 2008-2022. broj poginulih na putno- pružnim prelazima bio je sledeći:



Grafikon 4. Broj nesreća sa smrtnim ishodom na putno- pružnim prelazima u periodu 2004-2022.

(Izvor: Izveštaj Direkcije za železnice)

Grafik 4 predstavlja trend pada broja poginulih na putno- pružnim prelazima u periodu 2004-2022. godine. Međutim, pažnju je potrebno posvetiti većem stepenu bezbednosti,kako bi broj nesreća bio minimalan, pa samim tim i broj poginulih. Iako smrtni slučajevi na putno- pružnim prelazima imaju nizak udeo u ukupnom broju poginulih na putevima, oni čine značajan procenat u svim železničkim incidentima. Ovi podaci naglašavaju da su putno-pružni prelazi lokacije sa specifičnim rizikom, kako za učesnike u drumskom, tako i u železničkom saobraćaju (ABS, 2023).

Bezbednost je glavna javna briga u našem svakodnevnom životu (Dezhkam, Eslami, 2017). Stoga, prioritetni zadatak jeste kreiranje strategija koje se tiču povećanja bezbednosti na putno- pružnim prelazima, kao i koordiniran rad drumskog i železničkog saobraćaja u cilju postizanja veće i bolje saradnje, a sve u cilju smanjenja rizika i bezbednijeg saobraćaja na mestima ukrštanja pruge i druma.

Po uzoru na svetsku praksu predlog je kreiranje matrice rizika. Primer dobre prakse je Južni Vels koji je kreirao Vodič sa kriterijumima procene rizika na putno- pružnim prelazima (skraćeno PP prelazi). Procena rizika

predstavlja celokupni proces identifikacije rizika, analize rizika i procene rizika. Pri proceni rizika važne su četiri grupe kriterijuma (Railway Crossing Safety, 2011, pp. 7):

1. Vrste rizika koji mogu biti prisutni na PP-u.
2. Vrste rizika koji mogu da se dese na PP-u.
3. Verovatnoća da se ovi rizici dogode.
4. Posledice rizika (nesreće), ukoliko se dese.

Ova četiri kriterijuma se objedinjuju u matricu nivoa rizika. Ova matrica se koristi za određivanje nivoa rizika prisutnog na PP-u, uzimajući u obzir postojeće mere upravljanja bezbednošću. Na osnovu nivoa rizika, planeri su u mogućnosti da utvrde da li su potrebne dodatne akcije za upravljanje bezbednošću na PP-u. Tačnije, na osnovu pet ključnih koraka planeri donose odluke o neophodim bezbednosnim merama na određenim putno-pružnim prelazima (Railway Crossing Safety, 2011, pp. 7):

Korak 1: Utvrđivanje okvira (pravilnika) prelaza preko pruge.

Korak 2: Identifikacija opasnosti, opasnih događaja i rizika bezbednosti na putno- pružnom prelazu.

Korak 3: Analiza postojećih rizika na putno- pružnom prelazu.

Korak 4: Procena mera upravljanja bezbednošću na pruzi.

Korak 5: Kreiranje plana upravljanja bezbednošću na putno- pružnom prelazu.

Rizici koji se javljaju na PP- ima mogu se klasifikovati u grupe prema ponašanju učesnika u saobraćaju dok prelaze preko PP-a. Ove grupe se nazivaju „*kategorije rizika*“. Sledeće kategorije rizika su usvojene za PP-ove:

- Učesnik u saobraćaju ne zaustavi vozilo dok se voz približava.
- Učesnik u saobraćaju ne oslobađa put dok se voz približava.
- Učesnik u saobraćaju ne ostaje unutar trake kretanja, kolovoza ili staze.
- Kvar saobraćajnih signala ili aktivnih kontrola.
- Učesnik u saobraćaju ne posmatra druge učesnike u saobraćaju tokom prelaska preko PP-a.

Ove kategorije rizika su suviše široke da bi se primenile u proceni rizika za određeni PP, jer se kontrole i ostale karakteristike PP-ova razlikuju. Stoga, kako bi omogućili planerima da identifikuju i procene rizike na određenim PP-ovima, razvijeni su „*vrste rizika*“ dizajna i operacija. Ove vrste rizika su specifičnije od kategorija rizika jer uzimaju u obzir kako se vozači ponašaju, tako i kontrole, dizajn i operativne elemente na PP-u. Identifikovane vrste rizika na putno- pružnim prelazima prikazane su u tabeli 1.

Tabela 1. *Verovatnoća nesreće*

Verovatnoća	Opis	Učestalost saobraćajnih nesreća na PP
Ekstremna	Očekuje se da se događaj desi u većini slučajeva	Jedan događaj se dešava najmanje jednom mesečno
Visoka	Očekuje se da će se događaj verovatno desiti u većini slučajeva	Jedan događaj se dešava između jednom mesečno i jednom u tri meseca
Srednja	Događaj možda može da se desi u nekom trenutku	Jedan događaj se dešava između jednom u četiri meseca i jednom godišnje
Niska	Događaj može da se desi u nekom trenutku	Jedan događaj se dešava između jednom godišnje i jednom u tri godine
Zanemarljiva	Događaj se može desiti u izuzetnim okolnostima	Jedan događaj se dešava ređe od jednom u tri godine

Izvor: (Railway Crossing Safety, 2011, pp. 8)

Važno je imati u vidu da su posledice nesreća fatalne i da su one uglavnom praćene smrtnim ishodom. Prisutne su posledice finansijske prirode, ali su i posledice po okolinu značajne.

Slika 1. *Pozitivan primer obezbeđenosti putno-pružnog prelaza (država Južni Vels)*

Izvor: (Railway Crossing Safety, 2011, pp. 8)

Slika 1 prikazuje bezbedan putno- pružni prelaz, po uzoru na svetsku praksu. Upravljanje bezbednosću na putno- pružnim prelazima kroz kreiranje matrice rizika na istima treba da bude uzor pri kreiranju strategije upravljanja rizikom i bezbednošću na putno- pružnim prelazima u Republici Srbiji.

2.2. Podizanje svesti o bezbednosti saobraćaja

U današnjem saobraćajnom okruženju, podizanje svesti o bezbednosti saobraćaja predstavlja ključni aspekt u ostvarivanju ciljeva održivog i sigurnog transportnog sistema. Kako saobraćaj postaje sve složeniji, sa sve većim brojem učesnika i različitih interakcija, važnost promovisanja bezbednog ponašanja u saobraćaju postaje neizbežna. Podizanje svesti nije samo o informisanju pojedinaca o rizicima i pravilima u saobraćaju, već i o promovisanju kulture odgovornosti i solidarnosti među svim učesnicima. Kroz edukaciju, kampanje, i inicijative, podizanje svesti o bezbednosti saobraćaja ima za cilj da inspiriše pozitivne promene u ponašanju, doprinoseći tako smanjenju broja saobraćajnih nezgoda i poboljšanju kvaliteta života u zajednici.

Podizanje svesti o bezbednosti saobraćaja na putno- pružnim prelazima u Republici Srbiji postiže se obeležavanje Međunarodnog dana bezbednosti na putno- pružnim prelazima (ILCAD6), koji je prvi put obeležen 25. juna 2009. godine u 28 država, dok je 2023. godine događaj održan 15. juna pod sloganom "Pruge su za vozove!" u oko 50 država.

Svest o bezbednosti u železničkom saobraćaju podiže se u vidu kreiranja Saveta za bezbednost na putno-pružnim prelazima za različite kategorije učesnika u saobraćaju.

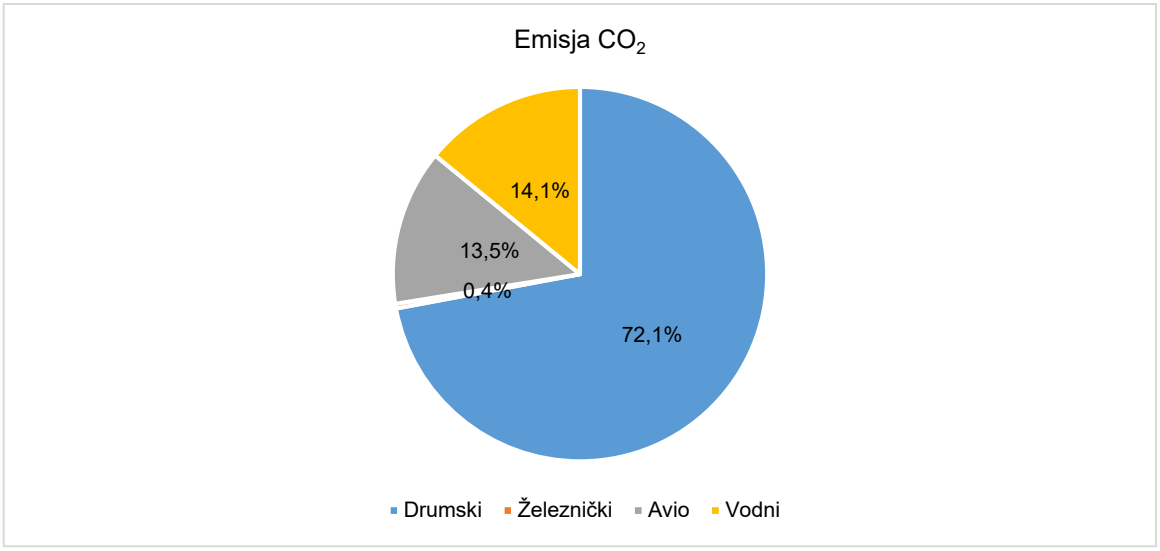
Tokom 2022. godine, Transportna zajednica (eng. *Transport community*) pokrenula je kampanju pod nazivom "Tanka je linija", koja je bila usmerena na učesnike u saobraćaju na teritoriji Zapadnog Balkana. Glavni razlog pokretanja ove kampanje bio je podatak da su saobraćajne nesreće sa učešćem železničkog vozila nisu česte kao drugi tipovi saobraćajnih nesreća, ali da su njihove posledice, po pravilu, teže (ABS, 2023).

Infrastruktura železnice Srbije tokom 2018. godine sprovela je kampanju pod sloganom "Pravilno je bezbedno". Ova kampanja je realizovana u 56 osnovnih škola, što je obuhvatilo 28 gradova i opština širom Srbije. Jedna od ključnih aktivnosti ove kampanje bila je integracija u aplikaciju *Pružni prelazi*, koja omogućava pristup informacijama o putno- pružnim prelazima, kao i opciju za aktivaciju alarma (upozorenja) prilikom ulaska u zonu putno-pružnog prelaza. Takođe, Agencija je sprovela kampanju pod sloganom "Voz na umu - bezbednost na drumu" od 2018. godine. Deo ove kampanje bila je i brošura koja je pružila pregled elemenata saobraćajne signalizacije i opreme koja se koristi za unapređenje bezbednosti saobraćaja na putno- pružnim prelazima.

Saobraćaj se smatra ključnim aspektom privredne aktivnosti i ima važnu ulogu u svakodnevnom funkcionisanju društva. Neadekvatno dizajnirane strategije i programi saobraćajne delatnosti mogu rezultirati takvim saobraćajnim mrežama i uslugama koje štete životnoj sredini ili zanemaruju osnovne potrebe korisnika u pogledu bezbednosti. Saobraćaj ima uticaj na životnu sredinu i ljudsko zdravlje, koji zavise od same vrste saobraćaja, njegove energetske efikasnosti, vrste goriva koje se koristi. Zagađenje vazduha se pojavljuje kao ozbiljan problem, uglavnom u urbanim područjima gde je koncentrisan drumski saobraćaj i gužve. Međutim, saobraćaj doprinosi i regionalnim i globalnim problemima zagađenja poput kiselosti i klimatskih promena. Saobraćajna infrastruktura dovodi do fragmentacije prirodnih staništa, a vozila uključuju probleme upravljanja otpadom. Ostali negativni ekološki efekti uključuju buku, potrošnju energije, uticaj na zemljište i druge prirodne resurse, kao i saobraćajne nesreće (Dionelis, Giaoutzi, 2005).

Životna sedina i mere bezbednosti imaju centralno mesto u Zajedničkoj saobraćajnoj politici EU (eng. *Common Transport Policy*). Konkretno, zahtevi za zaštitu životne sredine integrisani su u definiciju i sprovođenje politike. Ovo podrazumeva prioritetnu promociju one vrste saobraćaja koja ima najmanji negativan uticaj na životnu sredinu, a to je upravo železnički saobraćaj. Države članice moraju uzeti u obzir zaštitu životne sredine prilikom sprovođenja projekata od zajedničkog interesa. Usvajanjem Direktive 2004/49/EC, države članice su obavezne da primene mere za sertifikaciju bezbednosti (Dionelis, Giaoutzi, 2005).

Savremeni saobraćajni sistem mora biti održiv s ekonomske i socijalne tačke gledišta, kao i s ekološkog aspekta. Strategija države bi trebalo da se zasniva na potpunoj analizi troškova i koristi koja obuhvata kako saobraćajne, tako i ekološke ciljeve. Strateške akcije za promociju ekološki i bezbedno osetljivog ponašanja uvek bi trebalo da budu prioritet. Iako njihovi efekti možda dolaze sporo do izražaja i mogu biti politički i administrativno teški za sprovođenje, oni su ključna i prožimajuća osnova za održivi razvoj transporta. Sobraćajna politika Srbije, po uzoru na Zajedničku saobraćajnu politiku EU, ima za cilj ekonomski rast bez značajnih ekoloških uticaja. Postavljanje ravnoteže između načina transporta je u središtu strategije održivog razvoja EU. Cilj je minimalno zagađenje životne sredine i minimalne emisije CO_2 (Dionelis, Giaoutzi, 2005). Prema dostupnim podacima iz 2019. godine emisije CO_2 po vrstama saobraćaja bile su sledeće:



Grafikon 5. *Emisije CO_2 po vrstama saobraćaja*

(Izvor: European Environment Agency)

Železnički saobraćaj najmanji je emiter CO_2 i pruža značajne ekološke prednosti u odnosu na drumski saobraćaj (Dionelis, Giaoutzi, 2005). Današnji trend u saobraćajnoj industriji sve više teži ka smanjenju zavisnosti saobraćajnih sredstava od nafte, promovišući upotrebu alternativnih goriva i postavljajući unapređenje energetske efikasnosti kao ključni imperativ. U skladu s tim, ulaganja u razvoj infrastrukture železničkog saobraćaja postaju ključni faktor u ostvarivanju održivog transportnog sistema. Uz to, napori već uloženi u očuvanje kvaliteta vazduha nužni su kako bi se zadovoljile potrebe životne sredine i brige građana, uz istovremeno očuvanje konkurentnosti saobraćajnog sistema i ekonomije. Iako je železnički saobraćaj poznat po svojoj ekološkoj prihvatljivosti, izgradnja i održavanje železničke infrastrukture zahtevaju značajna

ulaganja u poređenju sa drumskim saobraćajem. Međutim, cilj je ulaganje u razvoj železničke infrastrukture i njeno povezivanje sa drugim državama, što bi rezultiralo smanjenjem potrošnje resursa, očuvanjem životne sredine i dugoročnom održivošću saobraćajnog sistema.

Odluke koje se tiču infrastrukture saobraćaja neizostavno su povezane sa planiranjem upotrebe zemljišta, lokalnim ekonomskim razvojem i pristupom osnovnim uslugama. Integrisanje ekoloških i bezbednosnih aspekata u ranim fazama odlučivanja, uz odgovarajuće procene uticaja na životnu sredinu i primenu osnovnih bezbednosnih mera, postaje ključno za dugoročnu održivost transportnog sistema (Dionelis, Giaoutzi, 2005). U svetlu navedenog, ulaganje u železničku infrastrukturu postaje prioritet, ne samo zbog ekoloških benefita već i zbog doprinosa ekonomskom rastu, smanjenju zagađenja, i unapređenju bezbednosti i dostupnosti transporta. Dakle, železnički saobraćaj se nameće kao ključna tačka u strategiji održivog razvoja transporta države, čija implementacija zahteva sveobuhvatne pristupe i usmerenost ka balansiranju ekonomskih, socijalnih i ekoloških ciljeva.

3. STRATEŠKI ZNAĆAJ RAZVOJA ŽELEZNIČKOG SAOBRAĆAJA ZA SRBIJU

Železniči saobraćaj ima važnu ulogu u podsticanju ekonomskog rasta i oblikovanju savremenih društava. Kako se svet suočava sa urgentnom potrebom da ublaži klimatske promene i pređe na održive načine saobraćaja, uloga železnice je dobila posebnu pažnju. Železnički saobraćaj je poznat kao jedno od najekološki prihvatljivijih sredstava masovnog prevoza, pružajući manje emisije CO_2, energetsku efikasnost i smanjenu gužvu u poređenju sa drugim vidovima saobraćaja. Međutim, i dalje postoje mnogi izazovi koje treba prevazići kako bi se obezbedila kontinuirana održivost u kontekstu ekoloških uticaja, posebno u vezi sa zaštitom životne sredine (Behrends, 2012). Održivi saobraćaj odnosi se na način transporta koji uključuje prakse i tehnologije usmerene na minimiziranje negativnih ekoloških, društvenih i ekonomskih uticaja, istovremeno maksimizirajući efikasnost i dugoročnu održivost. U slučaju železničkog saobraćaja, to obuhvata različite aspekte železničkih operacija, infrastrukture i politika koje teže postizanju ravnoteže između zadovoljstva saobraćajnih potreba i osiguravanja ekološke odgovornosti. Među ključnim elementima održivosti su (Milewicz et al, 2023):

1. ekološki uticaj,
2. energetska efikasnost,
3. bezbednost i
4. društvena mobilnost.

U prvom slučaju, razvoj ima za cilj minimiziranje ekološkog uticaja vozova i železničke infrastrukture. To uključuje smanjenje emisija gasova sa efektom staklene bašte, zagađenja vazduha i buke putem mera kao što su elektrifikacija, korišćenje obnovljivih izvora energije, unapređena energetska efikasnost i efikasne prakse upravljanja otpadom. U budućnosti, prioritet će biti energijski efikasne operacije, fokusirane na optimizaciju dizajna vozova, pogonskih sistema i infrastrukture kako bi se minimizirala potrošnja energije. To uključuje napredak u sistemima regenerativnog kočenja, efikasno planiranje voznih redova i integraciju pametne mreže kako bi se maksimizirao povrat energije i minimizirao energetski otpad. U kontekstu bezbednosti, održivost se odnosi na bezbednost i sigurnost putnika, zaposlenih i infrastrukture. To podrazumeva primenu bezbednosnih mera, modernih sistema signalizacije, efikasnih praksi održavanja i protokola bezbednosti kako bi se minimizirali nesreće, prekidi i rizici. Uzimajući u obzir društvenu mobilnost, glavna uloga je osigurati inkluzivan i pravedan pristup transportu, što podrazumeva pristupačnost, pouzdanost i dostupnost železničkog prevoza različitim grupama populacije. To uključuje razmatranja za osobe sa invaliditetom, starije osobe i druge marginalizovane grupe. Takođe uključuje integrisanje železnice sa drugim vidovima transporta (Milewicz et al, 2023).

Železnički saobraćaj ima **strateški značaj** za Srbiju i potrebu da se sve prednosti ovog vida saobraćaja maksimalno iskoriste. Železnički saobraćaj predstavlja stub održivog i bezbednog saobraćaja, nudeći niz benefita kako za pojedince tako i za društvo u celini.

Železnički saobraćaj ima značajnu ulogu u održivom razvoju, s obzirom na svoj relativno nizak ekološki uticaj u poređenju sa drugim vidovima saobraćaja, poput drumskog saobraćaja. Manje emisije gasova sa efektom staklene bašte i manja potrošnja energije čine železnički saobraćaj ekološki prihvatljivijim izborom. Investiranje u infrastrukturu železničkog saobraćaja i podsticanje korišćenja železnice za putovanja i transport robe doprinosi smanjenju zagađenja vazduha i smanjenju saobraćajne gužve na putevima, pa samim tim i do smanjenja nesreća. Ovaj vid saobraćaja pruža visok nivo bezbednosti u poređenju sa drumskim saobraćajem. Kroz modernizaciju i unapređenje tehnologije, kao i stroge bezbednosne mere kroz uvažavanje postojećih i kreiranja novih strategija čine železnički saobraćaj pouzdanijim i manje podložnim saobraćajnim nesrećama.

Ovo je posebno važno imajući u vidu da je bezbednost u saobraćaju jedan od ključnih faktora održivosti, jer smanjenje broja nesreća dovodi do manjeg ljudskog i materijalnog gubitka. Takođe, ulaganje u železnički saobraćaj podstiče ekonomski razvoj i konkurentnost države. Efikasniji transport robe putem železnice može doprineti povećanju izvoza i stvaranju radnih mesta u sektorima vezanim za transport i logistiku. Pored toga, kvalitetna železnička infrastruktura privlači investitore i olakšava pristup tržištima, što doprinosi ekonomskom rastu. U skladu sa navedenim, država Srbija treba da usmeri svoje napore ka unapređenju železničkog saobraćaja i stvaranju stimulativnog okruženja za njegovo korišćenje. To podrazumeva ulaganje u modernizaciju i proširenje železničke infrastrukture, kao i podsticanje investicija u železnički sektor. Takođe, važno je podizanje svesti građana o prednostima korišćenja železnice i promocija održivih vidova transporta. Kroz ove mere, Srbija može ostvariti sve veće koristi od železničkog saobraćaja, unapređujući održivost, bezbednost i ekonomski prosperitet zemlje.

3. ZAKLJUČAK

Zaključak ove analize, a koji se tiče strategija prevencije i održivost u sektoru saobraćaja, jeste isticanje važnosti sagledavanja podataka o saobraćajnim nezgodama kao ključnog koraka u formulisanju efikasnih strategija za unapređenje sistema bezbednosti i očuvanja životne sredine u saobraćaju. Proučavanje ovih podataka omogućilo je da se identifikuje ključni problem i izvori rizika, što je od suštinskog značaja za planiranje adekvatnih preventivnih mera.

Analiza podataka o saobraćajnim nezgodama u Republici Srbiji, a posebno saobraćajanim nezgodama na putno- pružnim prelazima, otkriva složenost izazova s kojima se suočavamo u oblasti saobraćajne bezbednosti i održivosti. Analizom je utvrđeno da su nesreće na putno-pružnim prelazima najčešće zabeležene tokom letnjih meseci, posebno u avgustu, kao i tokom januara. Imajući u vidu ovu sezonu visoke frekvencije, predlaže se pojačana implementacija preventivnih mera tokom tih perioda kako bi se smanjio broj nezgoda. Ovo uključuje dodatno osvetljenje, pojačanu signalizaciju, redovno održavanje i edukaciju vozača o pravilnom ponašanju na putno- pružnim prelazima. Takođe, predlaže se kontinuirano praćenje i analiza podataka radi identifikacije uzroka nesreća i efikasnijeg planiranja preventivnih mera u budućnosti. Ovi koraci su ključni za unapređenje bezbednosti na putno- pružnim prelazima i smanjenje rizika od saobraćajnih nezgoda.

Pored evidentnog fokusa na smanjenje broja nezgoda i žrtava, postaje sve važnije razmatrati i uticaj saobraćaja na životnu sredinu. U tom kontekstu, železnički saobraćaj se nameće kao ključni faktor za postizanje održivijeg transportnog sistema. Njegovi minimalni negativni uticaji na životnu sredinu u poređenju s drugim vidovima saobraćaja, poput smanjenih emisija CO_2, čine ga atraktivnim izborom za buduće strategije transporta.

Dalji razvoj železničkog saobraćaja u Srbiji treba da bude prioritet u razvoju saobraćajne delatnosti zemlje. Ovo uključuje investicije u modernizaciju i proširenje železničke infrastrukture, kao i poboljšanje usluga i sigurnosti putnika i transporta robe. Povezivanje najvećih gradova u zemlji s regionalnim centrima i evropskim gradovima postaje ne samo cilj, već i ključna strategija za održivi razvoj saobraćaja u Srbiji. Navedeno bi doprinelo ne samo ekonomskom rastu, već i smanjenju zagađenja i gužvi na putevima, kao i poboljšanju kvaliteta života građana. Ono što je nužno jeste promocija ovog vida saobraćaja kroz kontinuirano unapređenje usluge železničkog saobraćaja kako bi se privuklo više korisnika i smanjila upotreba drumskog saobraćaja.

Uzimajući u obzir navedeno, preporuke za dalja istraživanja i akcije uključuju fokusiranje na identifikaciju ključnih tačaka za unapređenje sistema bezbednosti, promociju održivog saobraćaja, i implementaciju strategija za smanjenje rizika od saobraćajnih nezgoda na putno- pružnim prelazima i drugim kritičnim tačkama. Osim toga, važno je kontinuirano praćenje i evaluacija efikasnosti sprovedenih mera kako bi se osiguralo postizanje željenih rezultata u oblasti saobraćajne bezbednosti i održivosti.

Analiza statističkih podataka je identifikovala važan doprinos u unapređenju bezbednosti saobraćaja, posebno na putno-pružnim prelazima, gde se nesreće često događaju. Preporznato je da je važna koordinacija drumskog i železničkog saobraćaja sa ciljem pokretanja akcije u kreiranju plana bezbednosti na putno-pružnim prelazima. Iako postoji Pravinik o ponašanju učesnika saobraća na putno pružnim prelazima, cilj regulatornih tela treba da bude usmeren na podizanje stepena bezbednosti na istima kroz kreiranje zasebne

strategije. Strategija bi se se ticala ponašanja i edukacije učesnika u saobraćaju, bolje i uređenije infrastrukture i signalizacije na putno- pružnim prelazima, a po uzoru na svetsku praksu jedan od predloga jeste kreiranje matrice rizika u cilju smanjenja rizika i povećenja bezbednosti na putno – pružnim prelazima u zemlji. Ovde je važno istaći da su potrebna dalja istraživanja i implementacije mera koje će smanjiti rizik od nesreća na putno- pružnim prelazima kako bi se osigurala bezbednost svih učesnika u saobraćaju.

Pored analize nesreća na putno- pružnim prelazima analizirani su doprinosi unapređenja sistema bezbednosti saobraćaja i promocija održivog saobraćaja kao što je to železnički saobraćaj. Ustanovljeno je da je železnički saobraćaj takav vid saobraćaja koji ima najmanje negativne efekte po životnu sredinu i da je kao takav bezbedan u odnosu na drumski saobraćaj koji ima najviše emisije CO_2. Održivost saobraćaja je od vitalnog značaja za dugoročni ekonomski razvoj i zaštitu životne sredine. Stoga, dalji razvoj infrastrukture železnice Srbije treba da bude prioritet, a povezivanje većih gradova u zemlji sa gradovima regiona i Evrope budući cilj.

Literatura

[1] Behrends, S. (2012) „The Significance of the Urban Context for the Sustainability Performance of Intermodal Road-Rail Transport“ Procedia Soc. Behav. Sci. Vol 54, 375–386.

[2] Dezhkam, B., Eslami, M. (2017) „A review of methods for highway-railway crossings safetymanagement process”, *International Electronic Journal of Mathematics Education*, Vol. 12 No. 3, pp. 561-568.

[3] Dionelis, C., Giaoutzi, M. (2005) „Environmental and safety aspects in rail transport“, 8th *Nectar Conference*, Las Palmas G.C. June 2-4, 2005.

[4] Milewicz, J., Mokrzan, D., Szymański, G. (2023) „Environmental Impact Evaluation as a Key Element in Ensuring Sustainable Development of Rail Transport“, *Sustainability 2023*, Institute of Transport, Poznan University of Technology, 15(18):13754.

[5] Sekasi, J., Solini, H. (2021) „Safety and risk analysis at railway crossings of north-south Addis Ababa light rail“, *Smart and Resilient Transport*, Emerald Publishing Limited.

[6] Thapa, S. et al. (2023) „A Review Paper on Road Traffic Accidents (RTA) Trends in Kathmandu Valley“, *International Conference on Engineering & Technology - KEC Conference,* Vol V, 197-201.

[7] Pravilnik o načinu prelaska putno- pružnog prelaza, lokaciji gde se može izvršiti prelazak, i merama za osiguranje bezbednosti saobraćaja, „Službeni glasnik RS“, br. 89/2016.

[8] Pravilnik o saobraćajnoj signalizaciji, „Službeni glasnik RS“, br. 85/2017.

[9] Jovanović i sar. (2018) *Istraživanje bezbednosti saobraćaja u zonama putno- pružnih prelaza*, Agencija za bezbednost saobraćaja, Beograd, https://www.abs.gov.rs/sr/analize-i-istrazivanja/realizovani-projekti/istrazivanje-stanja-bezbednosti-saobracaja-u-zonama-pruznih-prelaza, 10.03.2024.

[10] Agencija za bezbednost saobraćaja, jun 2023, „Analiza bezbednosti saobraćaja na putno- pružnim prelazima“, https://www.abs.gov.rs/admin/upload/documents/20230612121022-analiza-bezbednosti-saobracaja-na-putno-pruznim-prelazima.pdf, 13.03.2024.

[12] Agencija za bezbednost saobraćaja, „Statistički izveštaj o stanju bezbednosti saobraćaja u Republici Srbiji za 2022. godinu“, https://www.abs.gov.rs/admin/upload/documents/20231010092110-statisticki-izvestaj-o-stanju-bezbednosti-saobracaja-u-republici-srbiji-za-2022.-godinu.pdf, 10.03.2024.

[13] Agencija za bezbednost saobraćaja, https://www.abs.gov.rs/sr/analize-i-istrazivanja/statistika-i-analize/statisticki-izvestaji, 10.03.2024.

[14] Strategiju bezbednosti saobraćaja Republike Srbije za period od 2023 do 2030. godine sa akcionim planom za 2023. do 2025. godine., https://www.abs.gov.rs/admin/upload/documents/20231002113306-strategija-bezbednosti-saobracaja-2023-2030.pdf, 14.03.2024.

[15] Izveštaj Direkcije za železnice o stanju bezbednosti u železničkom saobraćaju za 2022., 2021, 2020..2017. godinu, Beograd, https://www.raildir.gov.rs/izvestaji.php, 10.03.2024.

[16] Railway Crossing Safety Series 2011, „Asses: Applying risk tolerance and risk assessment criteria to railway crossings“, *Transport Road & Traffic Autority*, NSW Government, https://www.transport.nsw.gov.au/system/files/media/documents/2023/Assess%20applying%20the%20risk%20tolerance.pdf, 10.03.2024.

[17] European Environment Agency, „CO_2 emissions from cars: facts and figures (infographics)“, https://www.europarl.europa.eu/topics/en/article/20190313STO31218/co2-emissions-from-cars-facts-and-figures-infographics, 10.03.2024.

POTRAŽNJA ZA PARKING MESTIMA ZA TEŠKA TERETNA VOZILA DUŽ AUTO-PUTEVA U SLOVENIJI

Marko Čelan, Franci Šoba
marko.celan@dri.si

Apstrakt *: Na teritoriji Republike Slovenije drumski teretni saobraćaj nastavlja intenzivno da raste. Kako saobraćaj raste, tako raste i potražnja za parking mestima za teška teretna vozila duž auto-puteva. Ovaj rad predstavlja metodologiju i obračun broja parking mesta potrebnih duž auto-puteva, uzimajući u obzir zakon o radnom vremenu i obaveznim periodima odmora za profesionalne vozače i tokove teretnog saobraćaja. Putanje teretnih vozila na mreži auto-puteva zasnovane su na 4-faznom makroskopskom modelu saobraćaja i vrednovane su u skladu sa najnovijim podacima o brojanju saobraćaja. Saobraćajni tokovi za tranzit, polazna tačka-odredište i unutrašnji teretni saobraćaj daju se odvojeno. Na osnovu projektovanog rasta teretnog saobraćaja i metodologije koja se koristi za izračunavanje potražnje za parking mestima, nedostatak parking mesta za svaku deonicu mreže auto-puteva u Sloveniji daje se za trenutnu situaciju i prognozirani obim saobraćaja u 2040.*

Ključne reči: *prevoz tereta, saobraćajni model, putanje kretanja vozila, periodi odmora vozača*

DEMAND FOR PARKING SPACES FOR HEAVY GOODS VEHICLES ALONG MOTORWAYS IN SLOVENIA

Abstract *: In the territory of the Republic of Slovenia, road freight transport continues to grow intensively. As traffic grows, so does the demand for parking spaces for heavy goods vehicles along motorways. This paper presents a methodology and calculation of the number of parking spaces needed along motorways, taking into account legislation on working time and compulsory rest periods for professional drivers and freight traffic flows. The trajectories of freight vehicles on the motorway network are based on a 4-stage macroscopic traffic model and are weighted by the latest traffic counter data. Traffic flows for transit, origin-destination, and internal freight traffic are given separately. Based on the projected growth in freight transport and the methodology used to calculate the demand for parking spaces, the shortage of parking spaces for each section of the motorway network in Slovenia is given for the current situation and the forecast traffic volume in 2040.*

Keywords: *freight transport, traffic model, vehicle movement trajectories, driver rest periods*

1 INTRODUCTION

Slovenia has experienced a significant increase in freight traffic since joining the European Union (EU), and further with the accession of Romania and Bulgaria to the EU. Over the years, freight traffic has increased, and so has the volume of freight vehicles parked along motorways. With the entry of Croatia into the Schengen area and the impact of the redirection of traffic flows as a result of the war in Ukraine, an increase in transshipments at the Port of Koper, the new logistics centre in Graz, and the new Balkan transport corridors, it is expected that in the future there will be a further growth in freight traffic on Slovenian motorways and thus an increase in the demand for parking spaces for heavy goods vehicles (HGVs) [1] . The paper discusses the key elements that influence the demand for parking spaces for HGVs, such as:

- legislation setting limits on working time and compulsory rest stops for professional drivers [2, 3, 4, 5],
- traffic congestion [6] and spatial distribution of HGV traffic flows [7],
- the journey times and trajectories of all HGVs or groups of vehicles using a part of or all of the motorway and expressway (hereafter MW) network in the Republic of Slovenia (hereafter RS),
- the number of existing parking spaces for HGVs along the MW [8, 9],
- the need for HGV parking spaces in 2040.

Based on the defined methodology, the calculation of parking demand for HGVs is given and the difference between parking supply and demand is shown. The calculation of the parking demand for HGVs is verified by observing the occupancy of parking spaces at MW rest areas.

2 METHODOLOGY FOR CALCULATING THE DEMAND FOR PARKING SPACES FOR HEAVY GOODS VEHICLES

For the purpose of calculating the number of parking spaces needed for HGVs, the following data are defined for each vehicle or group of vehicles on the road network in the baseline:

- the road network by network arm and border crossing point,

- existing supply of parking spaces for HGVs along the MW and expressways,
- where the journey started or how long the vehicle or driver has been on the road,
- where the journey ends,
- the intended trajectories of the HGV routes,
- at which point the HGV or driver will have to stop and how long the stop must last.

It is assumed that the parking spaces are mostly needed for heavy goods vehicles originating and/or with a source from outside Slovenia. Therefore, for each border crossing point considered, we obtained the traffic load of the road section and the spatial distribution of traffic (trajectories of a group of vehicles from origin to destination in the territory of the Republic of Slovenia), based on data from the 4-phase traffic model [7] and traffic counter data [6].

The trajectories of groups of HGVs are based on a four-phase traffic model, and the number of HGVs for each trajectory is based on the traffic model loads weighted by traffic counter data. For each group of vehicles, this defines where in the territory of the RS they start and end their journey, and whether the traffic is transit, destination-origin, or origin-destination traffic.

For transit and origin-destination traffic, it is assumed that, on entering the RS, each group of vehicles following the same trajectory to the source of the journey in the RS or leaving the RS at a different border crossing point, takes a different length of journey to enter the country. Subject to legislation, vehicles (drivers) must take a rest period based on theduration of their preceding driving (e.g. 1 hour, 2 hours, no rest period at all). Based on the location of the entry into the country, the intended source of the journey, the predefined network sections, the estimated time, how long the vehicle has been on the road, and the regulatory requirements for rest periods [4], the network section on which the vehicle will stop, and the type of rest period (45 minutes or 10 hours) is determined/calculated for each vehicle or group of vehicles.

2.1 Road network

In defining the road network, we take as a starting point the methodology for determining the number of parking spaces needed. In addition to the MW network, which covers 616 km in the RS. The considered network also includes national roads from/to border crossing points with higher volumes of freight traffic to the connection to the MW. The network is divided into several arms, with origins and destinations defined at MW hubs and major MW connections or hubs on other national roads carrying a higher volume of freight traffic.

Border crossing points are also defined as a transport section or point, as the origin or destination of a journey. A total of 121 road sections or border crossings have been defined, for which traffic flows are considered. When dividing the network, MW hubs, MW connections with higher loads, and other national roads with higher freight traffic volumes are taken into account.

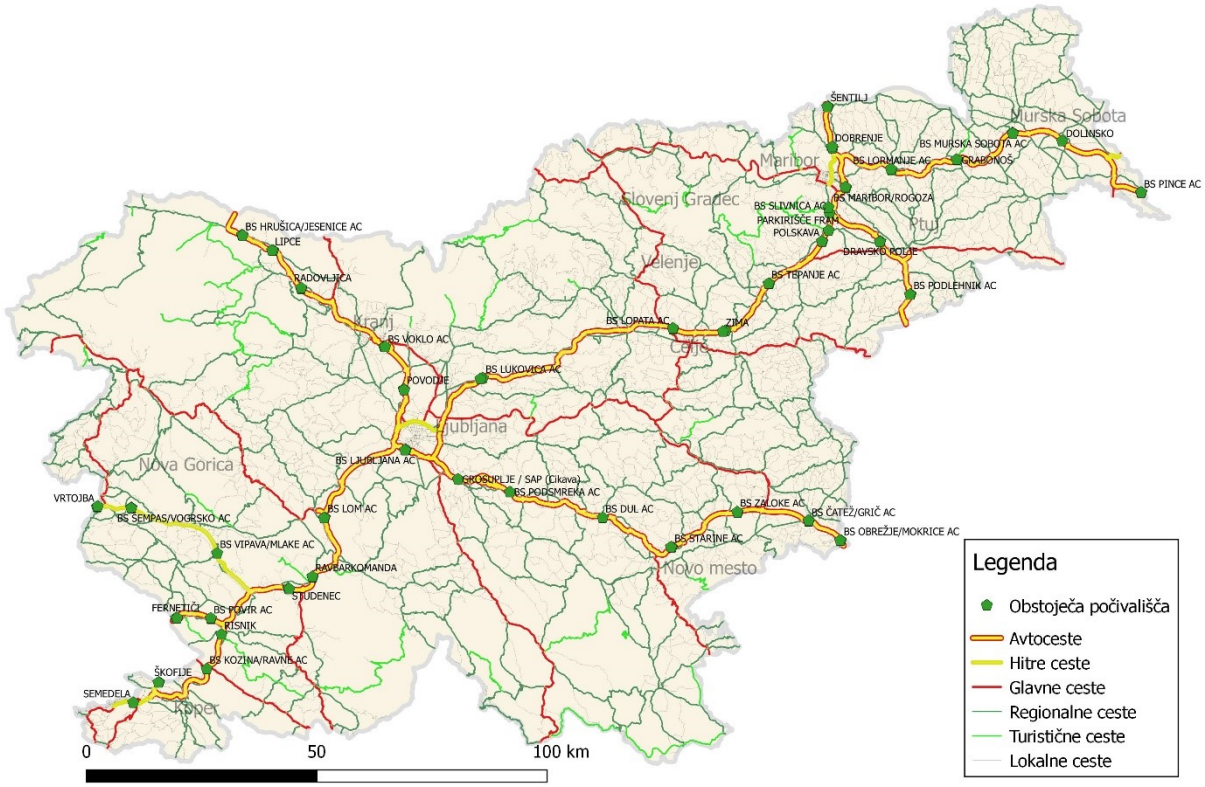


Figure 1: *Road network in the RS and existing rest areas along the MW*
Source: A study on ensuring additional parking areas along Slovenian motorways and expressways, DRI, 2020

2.2 Analysis of the existing supply of parking spaces for heavy goods vehicles

For the purpose of determining the number of parking spaces needed for HGVs, rest areas were considered in 4 ways:

- rest areas in the territory of the RS, excluding border rest areas.
- rest areas in the RS, taking into account all border rest areas in the RS that are currently used for the parking of HGVs in transit,
- rest areas in the territory of the RS, including all border rest areas in the RS, and
- all rest areas in the RS and border rest areas outside the RS.

Table 1. *Number of rest areas with parking for heavy goods vehicles*

Motorway/Expressway arm	Number of parking spaces in the RS today (excluding border parking spaces)	Number of parking spaces today in the RS (including border parking spaces)	Number of parking spaces in RS and border area in immediate vicinity of RS
Dolenjska	134	134/334	474
Dolga Vas	0	15	15
Gorenjska region	59	111	161
LJ ring	60	60	60
Podravje	149	149/194	334
Pomurje	336	368	418
Primorska	84	84	84
Sežana (A3)	14	14	264
Štajerska	368	390	485
Vipavska	33	33/183	598
Total	1,237	1,358/1,753	2,893

Source: Revision of the study for the provision of additional parking spaces along Slovenian motorways and expressways, DRI, 2024

In total, we have identified 60 rest areas in the area of motorways and expressways in Slovenia where HGV parking is possible, of which 49 rest areas in Slovenia excluding border rest areas, 11 border rest areas in the RS, and 8 border rest areas in the RS that today have the function of HGV parking, and 12 rest areas in the border zone outside Slovenia. Furthermore, we have considered 10 more rest areas [8], the building of which

is planned in the next period in order to forecast the demand for parking spaces in 2040 in the MW and expressway area in Slovenia. The total number of parking spaces for HGVs along the MW in the RS today is therefore 1,358, of which 121 in border areas. Moreover, additional HGV parking spaces have been identified in the border areas, amounting to almost 400 HGV parking spaces, which do not, however, function today as rest areas for HGVs in transit.

3 ANALYSIS OF TRAFFIC FLOWS

The traffic flow analysis is based on traffic count data from the 2022 and 2023 traffic counters and the 2018 macroscopic traffic model for the RS. The spatial distribution of traffic flows from macroscopic model is weighted by traffic counter data.

Total traffic volumes (all vehicles) increased by between 10% and 41% over the five-year 2018–2023 period, while the HGV category above 7.5 tonnes increased by between 4% and 35% [6]. The analysis of traffic volumes shows that there is some redistribution of heavy goods traffic volumes in 2023 compared to 2018. The biggest change is in Primorska, where heavy goods traffic through the Vipava Valley has increased (+35%), while it has decreased on the motorway past Sežana (-17%). Freight traffic also increased on the Primorska A1 motorway as a result of the capacity constraints on the Divača–Koper railway line, so the motorway took over the growth in freight traffic from the Port of Koper.

In 2018, 20.8 million kilometres travelled (mill. km travelled) were covered, of which 2.654 mill. km travelled were covered by heavy goods vehicles (HGVs), representing a 12.7% proportion of all vehicles. In 2022, the volume of transport work carried out increases to 21.956 million km travelled, or 2.960 million km travelled for HGVs. The increase over four years is 6% for all vehicles and 12% for HGVs.

The traffic forecast for 2040 is generated using the uniform growth factor model, using average annual growth rates for each vehicle category, using the same methodology as in the baseline study. Two traffic forecasts are made, with lower and higher traffic growth, using the same average annual growth rates. The basis for the forecast assessment is data from the traffic model, trends in historical traffic volumes, and an assessment of economic growth forecasts in Slovenia and neighbouring countries.

Table 2. *Average annual growth rates until 2040*

prognosis	Motorcycles	Passenger cars	Buses	Light duty vehicles < 3.5 t	HGV domestic	HGV destination-origin	HGV transit
lower	1.50	1.50	1.50	2.00	1.50	2.00	2.50
higher	2.00	2.00	2.00	3.00	2.50	3.00	3.50

Taking into account the lower traffic growth, HGV traffic will increase by around 49% between 2023 and 2040, and by around 74% for the higher forecast.

3.1 Analysis of transit and origin-destination traffic

The starting point for determining transit, origin-destination, and destination-origin freight traffic flows is the spatial distribution of traffic flows from the 2018 traffic model, weighted by traffic flows data from traffic counters. For each of the 26 border crossings considered, a cross-section of the road section in the direction of Slovenia was made, both for entry into Slovenia and for exit from Slovenia. This cross-section covered the traffic volumes and spatial distribution of heavy goods vehicle traffic. Based on this information, for each predefined arm, the number of HGVs is determined, where the vehicles originate (border crossing, arm of the network), and the destination of the journey. If the vehicle comes from a neighbouring country, the origin of the journey is defined as the border crossing point at the point of entry into Slovenia, and if the vehicle has a destination outside Slovenia, the destination is defined as the border crossing point at which the vehicle left Slovenia.

The analysis separates HGV traffic flows into three or four categories, namely:
- transit traffic (both the origin and destination of the journey are at border crossing points);
- origin-destination traffic (the origin of the journey is at a border crossing and the destination is at one of the predefined arms of the network);
- destination-origin traffic (origin of the journey is at one of the predefined arms of the network and destination of the journey is at a border crossing);
- domestic traffic (both the origin and destination of the journey are on one of the predefined arms of the network).

Based on the traffic counters and the spatial distribution of traffic according to the traffic model, the tendencies of transit and destination-origin HGV traffic were calculated. Transit and origin-destination traffic is derived from the spatial distribution and traffic volumes at the border crossing points of entry into Slovenia, while destination-origin traffic is the same as the origin-destination traffic, but in the reverse direction. Below, the forecasts combine destination-origin and origin-destination traffic into one category, namely destination-origin traffic, which means traffic in both directions.

Table 3. *Trends in HGV weekday transit traffic in 2023*

Origin/destination	Dragonja border crossing	Fernetiči border crossing	Gruškovje border crossing	Hodoš border crossing	Holmec border crossing	Jelšane border crossing	Karavanke	Kozina border crossing	Obrežje border crossing	Pince border crossing	Starod border crossing	Šentilj border crossing	Vrtojba border crossing	Total
Dragonja border crossing							1			75				76
Fernetiči border crossing				6		38				832		5		880
Gruškovje border crossing												568		568
Hodoš border crossing		3											3	5
Karavanke border crossing		126							236					362
Kozina border crossing	2										9			11
MP Metlika							3		5					9
Obrežje border crossing	3	62					335						389	789
Pince border crossing	53	877										224	538	1,693
Središče_Ormož border crossing		1			34	16						3		54
Starod border crossing		32						74					32	138
Šentilj border crossing	1	27	607							188			188	1,012
Škofije border crossing	50													50
Vrtojba border crossing				7					331	647		291		1,276
Završ border crossing												2	1	3
Total	109	1,128	607	13	34	54	339	74	573	1,742	9	1,093	1,151	6,927

The matrix of transit freight traffic trends shows that on an average day there are almost 7,000 HGV journeys in transit through Slovenia. Most freight traffic comes from Hungary towards Italy.

In total, 455 different routes (origin-destination journeys) and 2,937 different combinations of routes and arms (origin, traffic section, destination) were identified for transit, destination-origin, and origin-destination traffic. Transit traffic is detected on 42 different routes, while destination-origin and origin-destination traffic are detected on 413 different routes.

3.2 Demand for heavy goods vehicle parking for transit traffic

The amount of HGV parking demand depends on the following elements:
- HGV traffic flows (journey origin, trajectory on the Slovenian network, journey destination, time distribution of journeys);
- Statutory rest periods for drivers;
- Net travel time of HGVs on the Slovenian road network;
- Net travel time of HGVs on a foreign road network to the border with Slovenia;
- Net travel time of HGVs travelled by a vehicle since the start of the journey or since the last long stop (longer active rest for drivers).

The calculation of the number of parking spaces for HGVs is performed separately according to the type of traffic, i.e. transit, destination-origin, origin-destination, and domestic traffic. The basis for calculating the number of parking spaces is the traffic flows of HGVs in transit and HGVs that start their journey abroad, unload and load their cargo in Slovenia, and make the return journey from Slovenia, in the direction of their origin.

Common starting points
- The following average HGV speeds are considered on the road network according to the road categorisation:
  - 70–80 km/h on MW,
  - 65–75 km/h on expressways,
  - 40–50 km/h on other roads.

Higher average speeds are assumed during normal traffic conditions (no congestion, dry road surface), while lower speeds are assumed during peak periods and bad weather (e.g. wet road surface). Based on the average speeds of vehicles in different road categories and the trajectories of vehicles, the net travel times of vehicles on the Slovenian road network are determined. Based on the legislation setting maximum driving times and mandatory rest periods for professional drivers [2, 3, 4, 7], the following simplifications have been applied in the calculation of the parking space demand:

- The vehicle must make a 45-minute stop when the total travel time (abroad and in Slovenia) is 4.5 hours (270 minutes);
- The vehicle must make a 10-hour stop when the total travel time (abroad and in Slovenia) is 9 h (540 min).

Based on the assumed average speed of HGVs according to the road categorisation and the spatial distribution of journeys, the net travel times of HGVs on the Slovenian road network in transit traffic are from 4 to 5 hours for about 50% of the vehicles. If a higher average speed is taken into account, net travel times are lower, with more than 50% of vehicles travelling from 3 to 4 hours on Slovenian roads.

Table 4. *Time distribution of net journey times of heavy goods vehicles – transit traffic*

Net travel time on the Slovenian network in hours	Number of journeys taking into account the lower average speed (v_n)	Number of journeys taking into account the higher average speed (v_v)
up to 1 hour (average 30 min)	1,184	1,185
up to 2 hours (average 90 min)	519	652
up to 3 hours (average 150 min)	717	1,238
up to 4 hours (average 210 min)	1,144	3,705
up to 5 hours (average 270 min)	3,351	145
up to 6 hours (average 330 min)	15	0
Total	6,927	6,927

Source: Revision of the study for the provision of additional parking spaces along Slovenian motorways and expressways, DRI upravljanje investicij, 2024

The amount of parking space demand for short rest periods (45 min) and longer active rest periods (10 hours) for transit traffic is calculated as follows: $P_{k\text{-}t} = f(P_{ij}, t_0, t_{max})$

$P_{k\text{-}t}$	Demand for HGV parking spaces on the k-arm for transit traffic
P_{ij}	Number of journeys on the route from location i (border crossing point of entry of the vehicle into Slovenia) to location j (border crossing point of exit of the vehicle from Slovenia)
t_0	Net journey time travelled by a vehicle from the journey origin or the last long stop abroad to the border with Slovenia
t_{max}	Maximum net travel time that vehicles/drivers can travel before resting: 270 min after a short stop (45 min) and 540 min before a longer active rest (10 h)

The calculation of the parking space demand takes into account traffic flow data from the traffic model for the whole of Slovenia, weighted by traffic counter data for 2023. Taking into account the above calculation methodology, the demand for rest or parking areas for HGVs in transit on the Slovenian road network ranges from 1,975 to 2,147 longer active rest stops and from 2,203 to 2,569 short stops.

3.3 Demand for HGV parking spaces for destination-origin traffic

On an average working day, around 12,650 destination-origin (CI) or origin-destination (IC) journeys are made on Slovenian roads. Based on the assumed average speed of HGVs according to the road categorisation and the spatial distribution of journeys, the net travel times of HGVs on the Slovenian road network in CI or IC traffic are up to 1 hour for more than 50% of the vehicles. If a higher average speed is considered, net travel times on the Slovenian network are on average lower, but the hourly distribution is quite similar. The table below gives the time distribution of the net HGV travel time for CI and IC traffic according to the assumed average speed by road type.

When calculating parking demand for CI and IC traffic, it is necessary to take into account, especially for foreign vehicles, that they are making a return journey and that they are unloading and loading the vehicle in Slovenia, which takes different lengths of time (taking into account the actual loading/unloading time and waiting time). Not all journeys end/begin directly along long-distance roads, so additional journey time for the 'secondary' road network is added to the calculation.

The amount of parking space demand for short rest periods (45 min) and longer active rest periods (10 hours) for CI and IC traffic is calculated as follows: $P_{k\text{-}ci/ic} = f(P_{ij}, P_{ji}, t_0, t_{nr}, t_{max}, t_{so})$

$P_{k\text{-}ci/ic}$	Parking demand for HGVs on the K-arm for destination-origin or origin-destination traffic
P_{ij}	Number of journeys from location i to location j
P_{ij}	Number of journeys from location j to location i
t_0	Net journey time travelled by the vehicle from the starting point of the journey or last long stop
T_{nr}	Vehicle loading and unloading time
t_{so}	Net vehicle journey time on the 'secondary' road network

Taking into account the above calculation methodology, the demand for rest or parking for HGVs for CI and IC traffic on the Slovenian road network ranges from 944 to 1,096 longer active rest stops and from 1,698 to 1,834 short stops.

3.4 Demand for heavy goods vehicle parking for domestic traffic

The total demand for parking spaces for domestic traffic is calculated on the basis of the proportion of HGV loads in domestic traffic on each arm of the network and the demand for parking spaces for HGVs in transit and CI/IC traffic, assuming that on a typical working day, domestic traffic vehicles make only short stops of 45 minutes.

The amount of short-rest (45 min) parking space demand for domestic traffic is calculated using the following formula: $P_{k\text{-}n} = d_{k\text{-}n}*(P_{k\text{-}ci/ic} + P_{k\text{-}t})$

$P_{k\text{-}n}$	Demand for HGV parking spaces on the K-arm for domestic traffic
$P_{k\text{-}ci/ic}$	Demand for HGV parking spaces on the K-arm for destination-origin or origin-destination traffic
$P_{k\text{-}t}$	Demand for HGV parking spaces on the K-arm for transit traffic
$d_{k\text{-}n}$	Proportion of domestic traffic on the K-arm

Taking into account the above calculation methodology, the demand for rest areas or parking spaces for HGVs for domestic traffic on the Slovenian road network is between 411 and 1,096 short stops.

4 DEMAND FOR PARKING SPACES FOR GOODS VEHICLES

The demand for parking spaces for HGVs along the MW in the RS has been calculated on the basis of the modelled data presented in the previous chapters. The results concerning the lack of parking spaces have been validated on the basis of the observation carried out.

4.1 Parking demand based on modelled data for the existing situation

Based on the demand for parking spaces for transit, destination-origin or origin-destination, and domestic traffic, the number of parking spaces needed on the Slovenian MW network is calculated. This takes into account that, due to the uneven distribution of parking demand over time, the average occupancy rate is 75%. Thus, on an average working day, 1.8 HGVs occupy one parking space for a long stop, and 24 HGVs occupy one parking space for a short stop of 45 minutes. The parking demand data for HGV parking spaces along the MW are compared with the parking space supply. It has been found that the shortage of parking spaces for HGVs along the Slovenian MW is just under 1,000. The largest shortage is on the A1 motorway.

Table 5. *Comparison of the existing parking spaces in the RS on an average working day versus HGV parking demand in 2023*

MW	Arm	Road section	Demand for parking spaces		Supply of parking spaces		Difference	
A1	Štajerska	Šentilj-Dragučova	57	627	36	368	-21	-259
		Dragučova-Slivnica	89		92		3	
		Slivnica-Celje	257		115		-142	
		Celje-Zadobrova	224		125		-99	
	LJ ring	Zadobrova-Malence	76	125	0	60	-76	-65
		Malence-Kozarje	49		60		11	
	Primorska	Kozarje-Postojna	149	484	34	84	-115	-400
		Postojna-Nanos	256		0		-256	
		Nanos-Gabrk	15		0		-15	
		Gabrk-Kozina	41		0		-41	

		Kozina-Srmin	24		50		26	
A2	Gorenjska region	Karavanke-Podtabor	38	90	30	59	-8	-31
		Podtabor-Koseze	53		29		-24	
	LJ ring	Koseze-Kozarje	12	12	0	0	-12	-12
	Dolenjska	Malence-Novo Mesto	107	253	53	134	-54	-107
		Novo Mesto-Drnovo	84		58		-26	
		Drnovo-Obrežje	50		23		-27	
A3	Sežana	Gabrk-Fernetiči	49	49	14	14	-35	-35
A4	Podravje	Slivnica-Ptuj	33	64	56	149	23	85
		Ptuj-Gruškovje	31		93		62	
A5	Pomurje	Dragučova-Murska Sobota	183	332	0	336	-183	4
		Murska Sobota-Dolga Vas	125		336		211	
		Dolga vas-Pince	24		0		-24	
H3	LJ ring	Zadobrova-Koseze	31	31	0	0	-31	-31
H4	Vipavska	Nanos-Vrtojba	129	129	33	33	-96	-96
H5	Coast	Srmin-Škofije	5	12	0	0	-5	-12
		Koper-Srmin	7		0		-7	
H6		Koper-Izola	0		0		0	
H7	Pomurje	Dolga Vas-Dolga Vas border crossing	8	8	0	0	-8	-8
Total			**2,204**		**1,237**		**-967**	

4.2 Analysis of the occupancy of rest areas based on observation

Observations of parking occupancy [8] have shown that rest areas are congested during the week in practically the entire MW network. The biggest shortage of parking spaces is on the Štajerska MW, where there were around 350 parked HGVs more than there are available HGV parking spaces. On the Pomurje and Dolenjska MWs, there were around 150 parked HGVs more at rest areas than there are available parking spaces; on the Primorska MW, there were around 100 parked HGVs more than there are available parking spaces; on the Vipava road, there were around 90 parked HGVs more than there are available parking spaces; and on the A3 Gabrk–Fernetiči MW, there were around 60 parked HGVs more than there are available parking spaces. In total, more than 1,000 parking spaces for HGVs are missing in the entire motorway and expressway network.

Table 6. *Occupancy of HGV rest areas – observation*

			course		
Motorway arm	Day	Date	Italy	Gabrk fork	Total
A3 Sežana	Tuesday (public holiday)	31/10/2023	19	-3	16
	Thursday	02/11/2023	-35	-29	-64
	Tuesday	05/12/2023	-37	-23	**-60**
			Croatian	Ljubljana	Total
Dolenjska MW	Sunday	05/11/2023	55	3	58
	Tuesday	14/11/2023	-87	-70	**-157**
			Austria	Ljubljana	Total
Gorenjska region	Sunday	05/11/2023	-16	6	**-10**
	Tuesday	14/11/2023	-21	-37	-58
			Kozarje fork	Malence fork	Total
Ljubljana ring	Wednesday	25/10/2023	-12		-12
	Thursday	26/10/2023		-17	-17
	Tuesday (public holiday)	31/10/2023	29	24	53
	Tuesday	05/12/2023	-26	-32	**-58**
			Hungarian	Maribor	Total
Pomurje	Wednesday	25/10/2023	-79	-78	**-157**
	Sunday	29/10/2023	257	42	299
	WEDNESDAY	29/11/2023	-64	-42	-106
			Koper	Ljubljana	Total
Primorska	Tuesday (public holiday)	31/10/2023	8	22	30
	Thursday	02/11/2023	-50	-83	-133
	Tuesday	05/12/2023	-41	-61	**-102**
			Austria	Ljubljana	Total
Štajerska	Wednesday	25/10/2023	-167	-189	**-356**
	Sunday	29/10/2023	56	67	123
	WEDNESDAY	29/11/2023	-104	-128	-232
			Italy	Nanos	Total
Vipavska	Tuesday (public holiday)	31/10/2023	17	4	21

	Wednesday	02/11/2023	-41	-26	-67
	Tuesday	05/12/2023	-67	-20	**-87**
Total over the weekend					590
Total during the week (busiest)					**-1070**
Total during the week (days not taken into account around 1 November)					**-1039**

4.3 Parking space demand in 2040

The operator of the MW network in the RS is pushing for the construction of additional rest areas and parking spaces along the Slovenian MW. There is also interest in the creation of rest areas by private operators. In total, 10 locations have been identified to increase the supply of parking spaces for HGVs. If built, this would increase the number of HGV parking spaces along the Slovenian MW and expressways by around 1,080 additional HGV parking spaces. Based on the traffic forecast in 2040 (lower traffic growth) and taking into account the additional HGV parking spaces, there will still be a lack of HGV parking spaces along the MW in the RS of around 500 parking spaces. If the supply were to remain as it is today, the lack would be around 2,000 HGV parking spaces.

Table 7. *Comparison of the increased supply of parking spaces in the RS on an average working day versus HGV parking demand in 2040*

MW	Arm	Road section	Demand for parking spaces		Supply of parking spaces		Difference	
A1	Štajerska	Šentilj-Dragučova	86	943	58	849	-28	-94
		Dragučova-Slivnica	133		261		128	
		Slivnica-Celje	386		265		-121	
		Celje-Zadobrova	337		265		-72	
	LJ ring	Zadobrova-Malence	114	188	0	60	-114	-128
		Malence-Kozarje	74		60		-14	
	Primorska	Kozarje-Postojna	224	728	457	507	233	-221
		Postojna-Nanos	385		0		-385	
		Nanos-Gabrk	22		0		-22	
		Gabrk-Kozina	61		0		-61	
		Kozina-Srmin	35		50		15	
A2	Gorenjska region	Karavanke-Podtabor	57	136	82	261	25	125
		Podtabor-Koseze	79		179		100	
	LJ ring	Koseze-Kozarje	18	18	0	0	-18	-18
	Dolenjska	Malence-Novo Mesto	161	381	53	334	-108	-29
		Novo Mesto-Drnovo	127		58		-69	
		Drnovo-Obrežje	75		223		148	
A3	Sežana	Gabrk-Fernetiči	74	74	64	64	-10	-10
A4	Podravje	Slivnica-Ptuj	49	95	56	194	7	99
		Ptuj-Gruškovje	46		138		92	
A5	Pomurje	Dragučova-Murska Sobota	276	500	0	368	-276	-132
		Murska Sobota-Dolga Vas	188		336		148	
		Dolga vas-Pince	36		32		-4	
H3	LJ ring	Zadobrova-Koseze	47	47	0	0	-47	-47
H4	Vipavska	Nanos-Vrtojba	194	194	183	183	-11	-11
H5	Coast	Srmin-Škofije	8	19	0	0	-8	-19
		Koper-Srmin	11		0		-11	
H6		Koper-Izola	0		0		0	
H7	Pomurje	Dolga Vas-Dolga Vas border crossing	12	12	15	15	3	3
Total			**3,316**		**2,835**		**-481**	

5 CONCLUSION

The modelled data revealed the following: Based on traffic volumes, the demand for HGV parking spaces in the territory of the RS is around 2,200 parking spaces (excluding border rest areas and parking spaces), while 1,237 HGV parking spaces are available (excluding border rest areas and parking spaces), or 1,358 parking spaces including border rest areas where HGVs in transit can be parked. The total shortage of parking spaces for heavy goods vehicles along the Slovenian MW today amounts to around 1,000 parking spaces. There is a particular shortage of parking spaces on the MW network connecting the east (from Hungary) and west of Slovenia (towards Italy).

The TEN-T Regulation on the trans-European transport network states that, on the core network for road transport, the construction of rest areas on motorways is required at a rate of approximately every 100 km, in

accordance with the needs of society, the market, and the environment, including for the provision of adequate parking areas for commercial road users, where an adequate level of safety and security is ensured [10]. Given the current state of parking supply along the motorway and expressways, the above conditions of the TEN-T Regulation are not met.

Regulations such as the Act on Working Time and Rest Periods for Mobile Workers and Recording Equipment in Road Transport and Regulation 561/2006 establish the conditions for drivers regarding maximum driving times and rest periods. Overcrowding in rest areas and parking spaces already prevents drivers from complying with the law (parking in car parks for goods vehicles) in a safe way.

Based on traffic forecasts (lower growth), the volume of freight traffic on the MW network in Slovenia will increase by around 50% by 2040. This will increase the demand for parking spaces by an additional 1,100 parking spaces for HGVs. Based on the existing situation, around 2,000 additional parking spaces will need to be provided along the Slovenian MW for the safe parking of HGVs compared to the existing situation.

Acknowledgements

I would like to express my gratitude to DARS (Motorway Company in the Republic of Slovenia) for their invaluable assistance in obtaining data regarding parking spaces at rest areas and for providing information on the occupancy of these areas. Without their contribution and support, conducting this research would have been challenging. I also extend my thanks for their kindness and professionalism in handling our requests.

References

[1] Čelan, M., Franci, Š. 2024: Revision of the study for the provision of additional parking spaces along Slovenian motorways and expressways;
[2] Regulation (EC) No 561/2006 of the european parliament and of the council of 15 March 2006 on the harmonisation of certain social legislation relating to road transport and amending Council Regulations (EEC) No 3821/85 and (EC) No 2135/98 and repealing Council Regulation (EEC) No 3820/85;
[3] European Agreement concerning the work of crews of vehicles engaged in international road transport (AETR);
[4] Act Regulating the Working Time and Compulsory Rest Periods of Mobile Workers, and Recording Equipment in Road Transport (ZDCOPMD);
[5] Act of Rules on Road Transport (ZPCP-2);
[6] Traffic congestion data, DRSI;
[7] Macroscopic 4-phase traffic model for hourly traffic, NCUP, 2018;
[8] Data obtained from DARS;
[9] Data on the number of parking spaces for HGVs at the Fram rest area (https://www.shell.si/poslovne-stranke/crpalke-slovenija/fram-maribor.html, 7. December 2023)
[10] Regulation (EU) No 1315/2013 (TEN-T Regulation);

UTICAJ LOKACIJE BROJAČA SAOBRAĆAJA NA DOBIJENE PODATKE ZA ANALIZU, PLANIRANJE I OPTIMIZACIJU SAOBRAĆAJNOG TOKA NA PRIMERU SEMAFORIZACIJE ČETVOROKRAKE RASKRSNICE U NOVOM PAZARU

Milana Šarenac[1], mast. inž. saobr.
[1] GMP GRAMONT-NS, Tihomira Ostojića 2, Novi Sad, milana.sarenac@gmpns.co.rs

Aleksandar Petrić, dipl. inž. saobr.
GMP GRAMONT-NS, Tihomira Ostojića 2, Novi Sad, aleksandar.petric@gmpns.co.rs

Goran Đokić, dipl. inž. saobr.
GMP GRAMONT-NS, Tihomira Ostojića 2, Novi Sad, goran.djokic@gmpns.co.rs

Rezime: *U radu je istaknut uticaj lokacije brojača saobraćaja na dobijene podatke o saobraćajnom toku, i izbor optimalnog projektnog rešenja na posmatranoj lokaciji. Analiziran je projekat poboljšanja uslova odvijanja saobraćaja na raskrsnici državnog puta IB-22 sa ulicom Branka Ćopića u Novom Pazaru, u kom je predviđena semaforizacija četvorokrake raskrsnice, na osnovu analize podataka sa mobilnih brojača postavljenih na raskrsnici. Poređenje sa podacima o protoku vozila sa fiksnih brojača na deonici Novi Pazar (Brđani) - Ribariće predmetnog državnog puta ukazuje na neophodnost nezavisnog brojanja saobraćaja mobilnim brojačima u određenim slučajevima, kada se podaci sa fiksnih brojača ne mogu iskoristiti. Iz navedenog proističe značaj strateškog postavljanja mobilnih brojača na raskrsnicama, priključcima i ključnim saobraćajnim deonicama za podatke najpribližnije stvarnom stanju na konkretnoj lokaciji. To značajno utiče na dalje analize i odluke koje se donose na osnovu tih podataka, i može imati dugoročne posledice na planiranje i optimizaciju saobraćajnog toka.*

Ključne reči: *brojanje saobraćaja, mobilni brojači, lokacija brojača, semaforizacija raskrsnice, analiza uslova odvijanja saobraćaja.*

THE IMPACT OF TRAFFIC COUNTERS LOCATION ON DATA FOR TRAFFIC FLOW ANALYSIS, PLANNING, AND OPTIMIZATION USING THE EXAMPLE OF SIGNALIZATION OF A FOUR-WAY INTERSECTION IN NOVI PAZAR

Milana Šarenac[1], M.Sc.
[1] GMP GRAMONT-NS, Tihomira Ostojića 2, Novi Sad

Aleksandar Petrić, B.Sc.
GMP GRAMONT-NS, Tihomira Ostojića 2, Novi Sad

Goran Đokić, B.Sc.
GMP GRAMONT-NS, Tihomira Ostojića 2, Novi Sad

Abstract: *The paper highlights the impact of traffic counters location on the traffic flow data, and the selection of the optimal project solution at the observed location. The project to improve traffic conditions at the intersection of the IB-22 state road with Branko Ćopić Street in Novi Pazar was analyzed, in which the signalization of the four-way intersection is planned based on the analysis of data from mobile traffic counters placed at the intersection. Comparison with data on vehicle flow from fixed counters on the section Novi Pazar (Brđani) - Ribariće of the relevant state road indicates the necessity of independent traffic counting with mobile traffic counters in certain cases, when data from fixed counters cannot be utilized. From the above, the significance of strategically placing mobile traffic counters at intersections, junctions, and key traffic sections for data closest to the real situation at the specific location emerges. This significantly influences further analyses and decisions made based on this data, and can have long-term consequences for traffic flow planning and optimization.*

Keywords: *traffic counting, mobile traffic counters, traffic counters location, traffic light instalation at an intersection, traffic flow conditions analysis.*

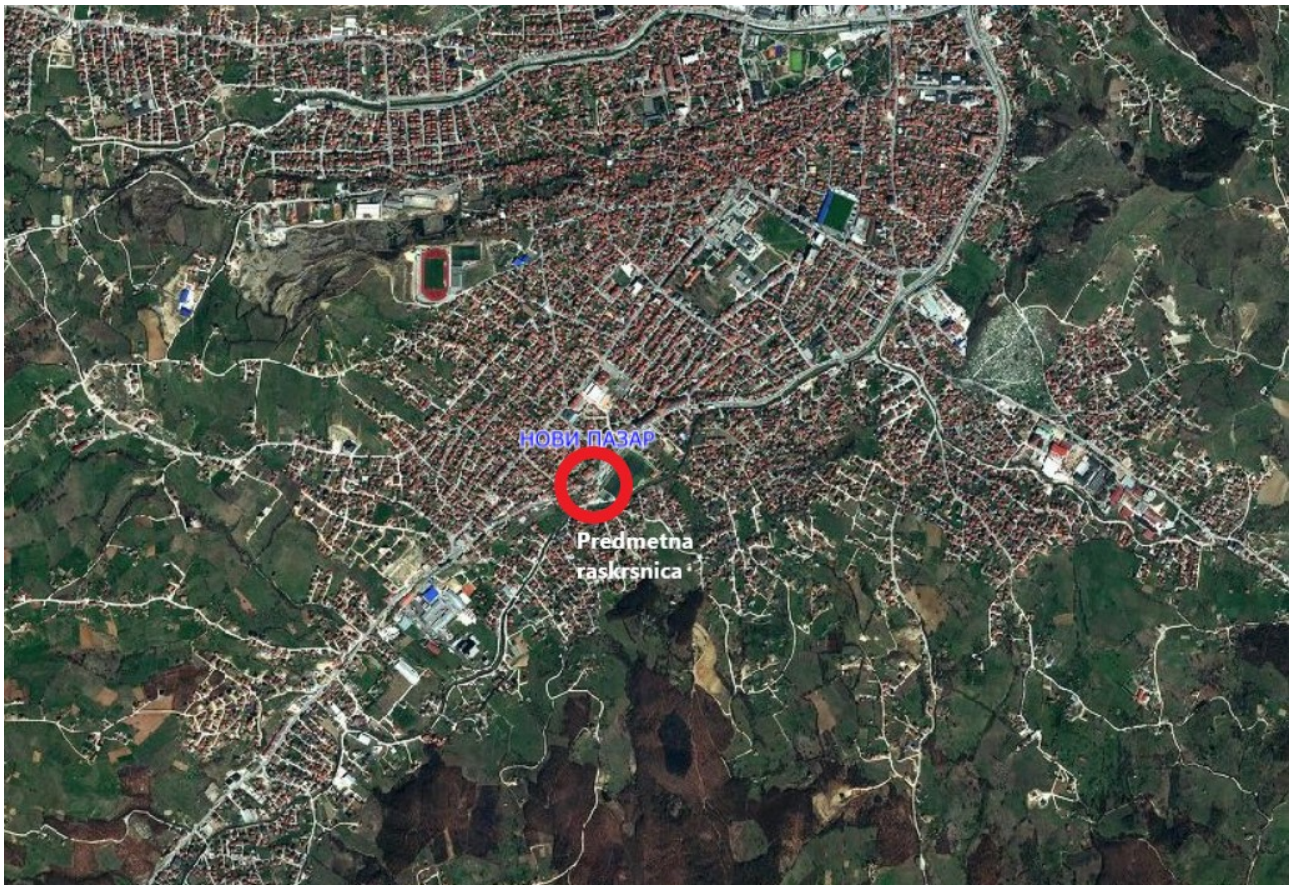
[1] Autor zadužen za korespodenciju: milana.sarenac@gmpns.co.rs

1. UVOD

Prikupljanje pouzdanih podataka o saobraćajnom toku je ključno za planiranje i unapređenje bezbednosti saobraćaja i nivoa usluge. Lokacija brojača saobraćaja igra važnu ulogu u obezbeđenju merodavnih podataka koji odražavaju stvarne uslove na putevima. Kroz analizu semaforizacije četvorokrake raskrsnice državnog puta IB reda broj 22 sa ulicom Branka Ćopića u Novom Pazaru, prikazan je uticaj lokacije brojača saobraćaja na dobijanje preciznih podataka o saobraćajnom toku, kao i za dalju analizu, planiranje i optimizaciju saobraćajnog toka. U radu se ističe ključna uloga brojanja saobraćaja za određene lokacije, posebno na gradskim deonicama gde se zvanične baze podataka često ne mogu primeniti i iskoristiti, ili i ne postoje. Urbana saobraćajna mreža predstavlja vitalni deo infrastrukture svakog grada, sa raskrsnicama kao ključnim tačkama od interesa. Analiza njihovog stanja i funkcionalnosti od izuzetne je važnosti za unapređenje bezbednosti i efikasnosti saobraćaja.

2. POSTOJEĆE STANJE

Analizirana je raskrsnica državnog puta IB reda broj 22 (deonica broj 02234 Novi Pazar (Brđani) - Ribariće) – ulica Kej skopskih žrtava sa ulicom Branka Ćopića u Novom Pazaru na km 258+931,42 (slika 1). Ulica Kej skopskih žrtava je državni put IB-22 i predstavlja glavni pravac, a ulica Branka Ćopića je sabirna ulica i predstavlja sporedni pravac.
Raskrsnica se nalazi u jugozapadnom delu grada Novog Pazara, u naselju, u gradskom građevinskom području. Raskrsnica je četvorokraka nestandardnog tipa, odnosno nepravilne geometrije, jer se glavni i sporedni pravac ne seku pod pravim uglom. Na svim krakovima raskrsnice definisana je po jedna ulazna i jedna izlazna saobraćajna traka i omogućen je pun program veza, odnosno dozvoljena su skretanja u svim smerovima na svakom od prilaza raskrsnici. U postojećem stanju raskrsnica je regulisana horizontalnom i vertikalnom signalizacijom.



Slika 1. *Lokacija predmetne raskrsnice*

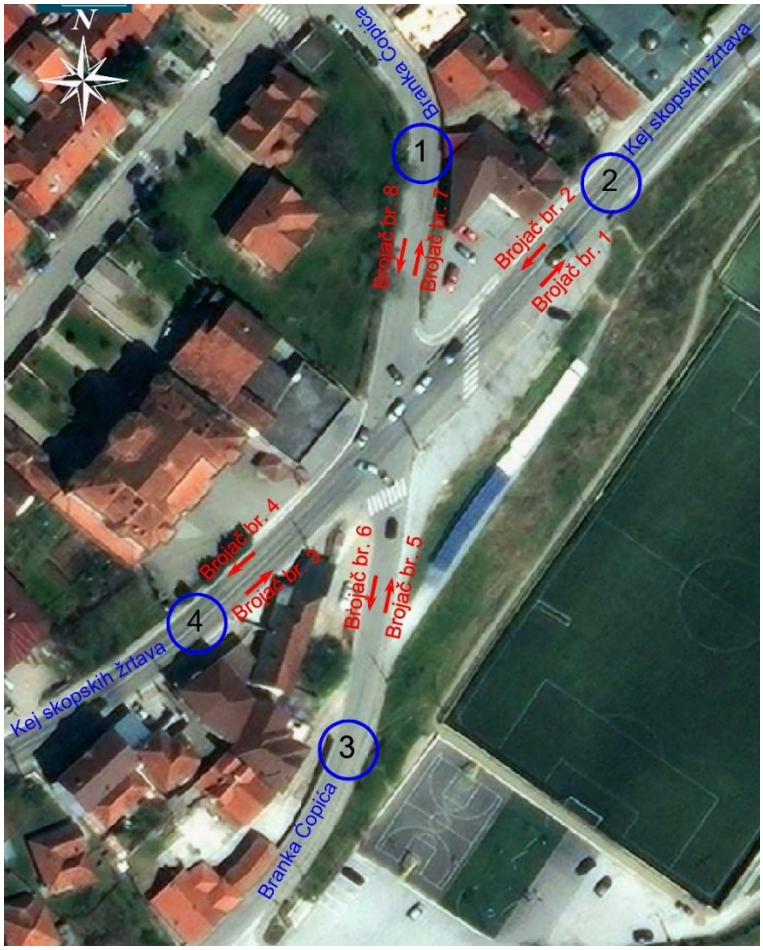
Na osnovu analize sa aspekta bezbednosti saobraćaja utvrđeno je da se u periodu od 2017. do 2021. godine na predmetnoj raskrsnici dogodilo 17 saobraćajnih nezgoda, i to 1 SN[2] sa poginulim licima, 12 SN sa

[2] Saobraćajna nezgoda

povređenim licima i 4 SN sa materijalnom štetom [1]. Zaključna razmatranja iz procene uticaja pokazala su da je optimalno rešenje semaforizacija raskrsnice, kako sa aspekta bezbednosti saobraćaja, tako i sa aspeka efikasnosti sabraćajnih tokova na istoj [1].

3. ANALIZA BROJANJA SAOBRAĆAJA NA RASKRSNICI

Brojanje saobraćaja na uličnoj mreži izvršeno je sa ciljem da se utvrde merodavna saobraćajna opterećenja na raskrsnici i izvrši analiza uslova odvijanja saobraćaja. Brojanje je izvršeno od utorka 11.07.2023. do četvrtka 13.07.2023. godine, u kontinuitetu tokom 24 časa, pomoću mobilnih brojača saobraćaja (slika 2).



Slika 2. *Lokacije postavljenih mobilnih brojača po prilazima predmetne raskrsnice*

Na osnovu utvrđenog činjeničnog stanja ispitana je mogućnost uvođenja svetlosne signalizacije kao predlog mere za poboljšanje uslova odvijanja saobraćaja. Analiza kako postojećeg tako i predloženog stanja izvršena je u softverskom paketu *Trafficware Synchro* za utvrđeni prepodnevni i poslepodnevni vršni sat. Uslovi odvijanja saobraćaja utvrđeni su prema kriterijumu prosečnih vremenskih gubitaka na prilazima, a prema metodologiji HCM 2000.

3.1. Mobilni brojači saobraćaja

Mobilni brojači saobraćaja pomoću kojih je izvršeno brojanje (slika 3) obezbeđuju veliku tačnost pri merenju broja vozila, brzine kretanja, dužine vozila i temperature podloge, pri čemu objedinjuju podatke o protoku vozila, brzini, klasifikaciji, gustini toka, vremenu sleđenja vozila, temperaturi i vlažnosti podloge [2]. Za preuzimanje i obradu snimljenih podataka sa brojača koristi se softver HDM verzija 9.4.3 (*Highway Data Management*) [2].

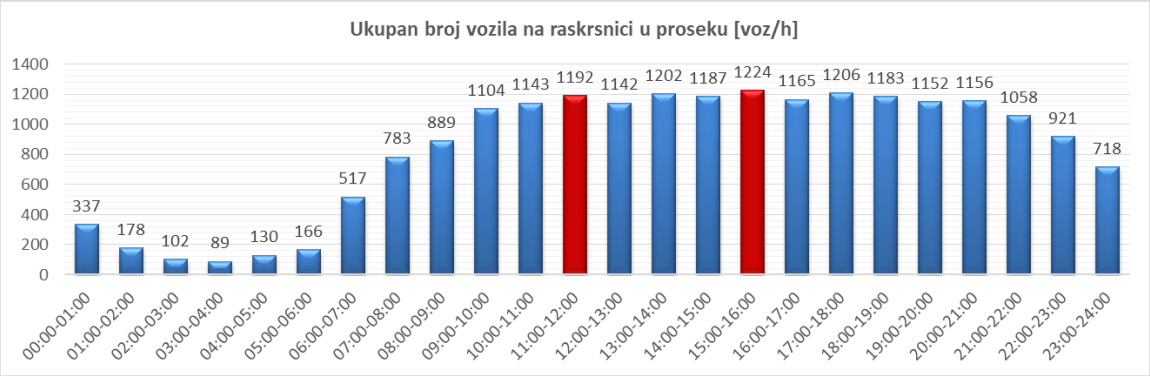
Slika 3. *Mobilni brojač MH Corbin NC300*
Source: (Izvor, [2])

Prednosti mobilnih brojača su brojne, a neke od njih su:

- mogućnost postavljanja na bilo koju podlogu;
- lako i brzo premeštanje i postavljanje neposredno na lokaciju gde je potrebno snimiti saobraćajni tok (raskrsnica, deonica, most, parking, garaža, makadam, itd.);
- otpornost na spoljašnje meteorološke i mehaničke uticaje;
- trajanje baterije omogućava snimanje u kontinuitetu u periodu do tri sedmice i klasifikaciju do čak 300.000 vozila;
- vremenski intervali snimanja se mogu podesiti na više načina u zavisnosti od cilja analize i mogu biti od 1 do 120 minuta;
- kompaktni [2].

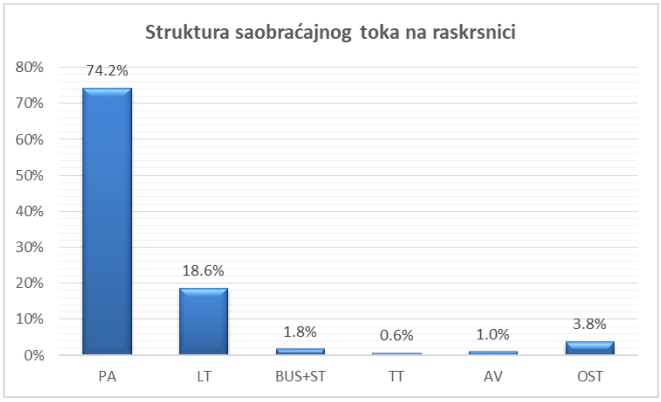
3.2. Rezultati analize brojanja saobraćaja na raskrsnici

Analizom prosečne časovne rapodele toka na mreži za tri dana kontinualnog brojanja, utvrđeno je da se prepodnevni vršni čas javlja u periodu od 11:00 do 12:00 časova, a poslepodnevni vršni čas u periodu od 15:00 do 16:00 časova (slika 4) [3].



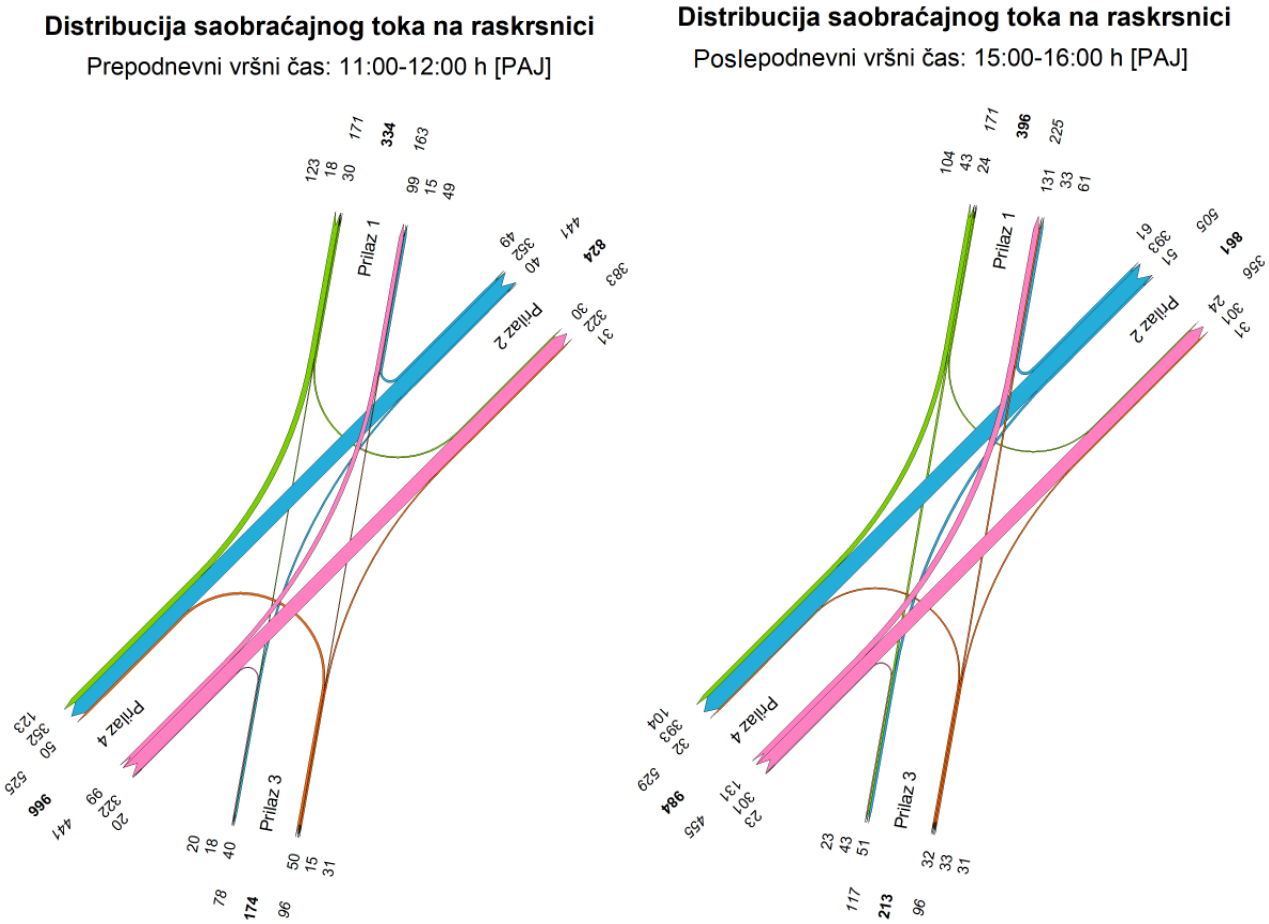
Slika 4. *Časovna raspodela saobraćajnog toka na mreži u proseku*
Source: (Izvor, [3])

Na predmetnoj raskrsnici prepodnevni vršni čas javlja kasnije od uobičajenog, i vršni čas je razvučen, odnosno u određenom periodu javljaju se mala odstupanja protoka vozila u odnosu na protok u vršnom času. Tako je prepodnevni vršni čas razvučen na period od 09:00 do 12:00 časova, a poslepodnevni na period od 12:00 do 21:00 časova, pri čemu dolazi do spajanja prepodnevnog i poslepodnevnog vršnog časa u vršni period od 09:00 do 21:00 časova [3].
U strukturi saobraćajnog toka na predmetnoj raskrsnici (slika 5), najviše su zastupljeni putnički automobili, (74,2%), zatim laka teretna vozila (18,6%), komercijalna vozila (3,5%) - od čega su autobusi i srednja teretna vozila zastupljeni 1,8%, teška teretna vozila 0,6% i autovozovi 1%. Prilikom brojanja, evidentiran je određeni broj nekategorisanih vozila (ostala vozila), u procentu od 3,8% vozila koja brojač nije uspeo da kategoriše.



Slika 5. *Struktura saobraćajnog toka na raskrsnici*
Source: (Izvor, [3])

Analizom distribucije saobraćajnog toka u prepodnevnom vršnom času utvrđeno je da je na prilazu 2 i prilazu 4 najopterećeniji smer za pravo, dok je na prilazu 1 smer za desno najviše opterećen, a na prilazu 3 smer za levo (slika 6). U poslepodnevnom vršnom času utvrđeno je da je na prilazu 2 i prilazu 4 najopterećeniji smer za pravo, dok je na prilazu 1 smer za desno najviše opterećen, a na prilazu 3 smer za levo (slika 6).



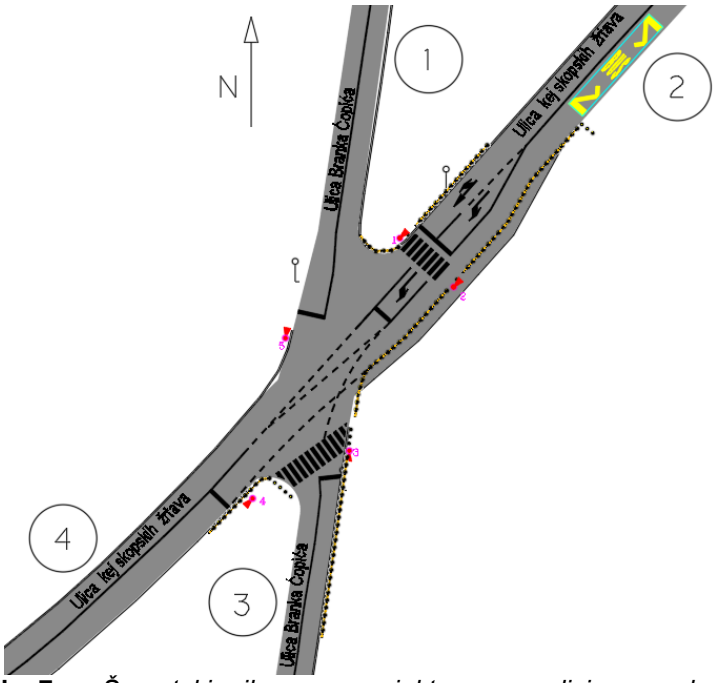
Slika 6. *Dijagrami distribucije saobraćajnog toka na raskrsnici u vršnim časovima*
Source: (Izvor, [3])

Analizom uslova odvijanja saobraćaja na predmetnoj nesignalisanoj raskrsnici utvrđeno je da se u oba posmatrana vršna sata javljaju nepovoljni uslovi odvijanja saobraćaja na sporednim prilazima, odnosno prilazima iz ulice Branka Ćopića i to:

- u prepodnevnom vršnom satu (11:00 – 12:00) na prilazu 1 utvrđen je nivo usluge D sa prosečnim vremenskim gubicima 26,9 s/voz, dok na prilazu 3 prosečni vremenski gubici iznose 65,1 s/voz što odgovara nivou usluge F, odnosno najnepovoljnijem nivou usluge;

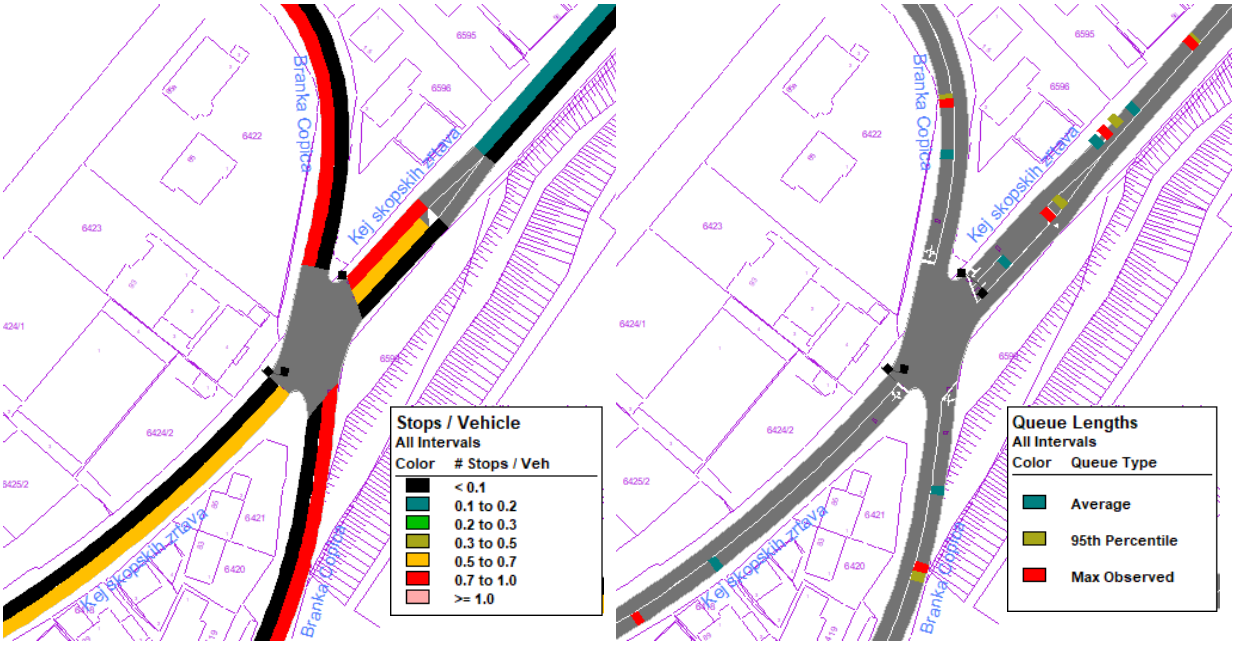
- u poslepodnevnom vršnom satu (15:00 – 16:00) na oba sporedna prilaza evidentirani su nepovoljni uslovi odvijanja saobraćaja, odnosno nivo usluge F, sa prosečnim vremenskim gubicima od 55,6 s/voz na prilazu 1 i 103,1 s/voz na prilazu 3 [3].

Nepovoljni uslovi odvijanja saobraćaja na sporednim prilazima nastaju kao posledica intenzivnog saobraćajnog toka u ulici Kej skopskih žrtava, odnosno nepostojanja adekvatnog kritičnog intervala sleđenja u glavnom toku za uključivanje vozila sa sporednog toka.
Sa aspekta iskorišćenja kapaciteta raskrsnice, posmatrana raskrsnica može se oceniti nivoom usluge C, odnosno trenutni zahtevi za protokom u vršnim časovima odgovaraju veličini od 64,9% odnosno 69,5% kapaciteta nesignalisane raskrsnice [3].
U cilju unapređenja uslova odvijanja saobraćaja na posmatranoj raskrsnici analizirana je mogućnost uvođenja semafora uz reorganizaciju prilaza broj 2 (severoistočni prilaz ulice Kej skopskih žrtava) u smislu obeležavanja posebne saobraćajne trake za leva skretanja (slika 7) [3]. Predloženo rešenje ima za cilj da trenutne vremenske gubitke koji se javljaju na sporednim prilazima ravnomerno i optimalno rasporedi na sve prilaze, odnosno vozila. Pored toga, dodatna prednost semaforizacije je veća mogućnost upravljanja saobraćajnim tokovima na raskrsnici u zavisnosti od promene zahteva za protokom. U skladu sa tim, na predmetnoj raskrsnici izvršena je analiza saobraćajnog toka te je kao najpovoljnije rešenje usvojena varijanta dvofaznog ciklusa sa međufazom za tokove sa prilaza broj 4, odnosno jugozapadnom prilazu ulice Kej skopskih žrtava, formirana zadrškom zelenog vremena na suprotnom prilazu. Analiza je izvršena za prepodnevni i poslepodnevni vršni čas posebno, a u oba slučaja optimalna dužina ciklusa iznosi 60 s [3].



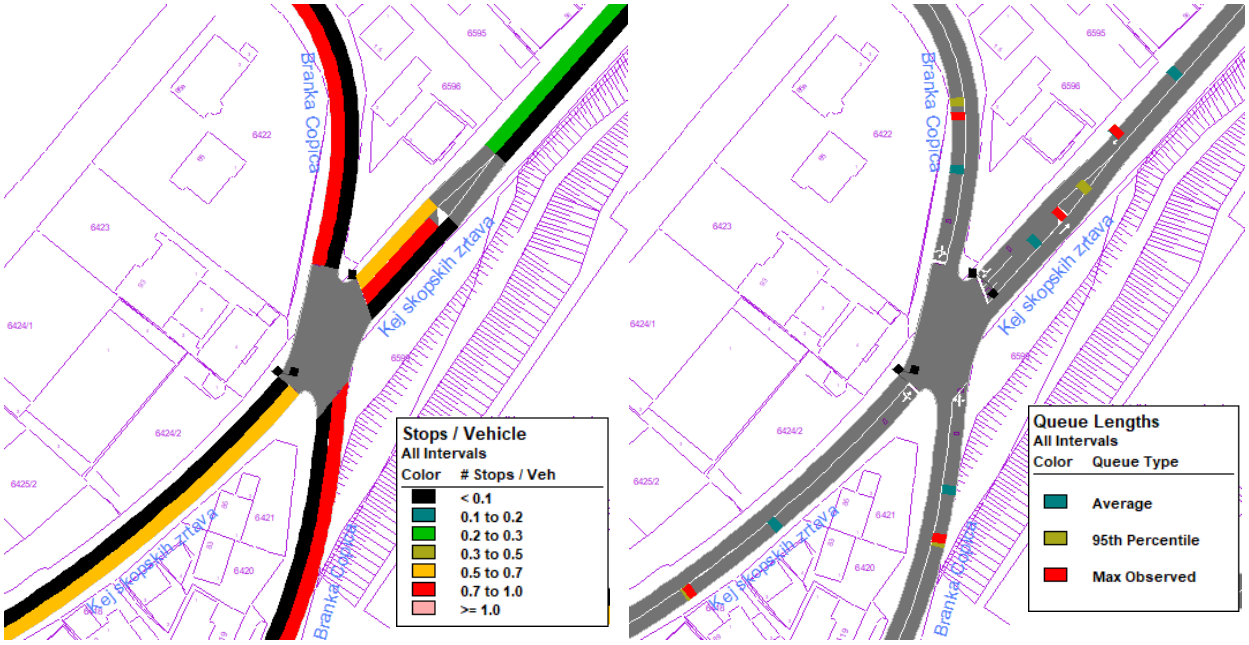
Slika 7. *Šematski prikaz novoprojektovane analizirane raskrsnice*
Source: (Izvor, [3])

Analizom uslova odvijanja saobraćaja u predloženim varijantama semaforizovane raskrsnice utvrđeno je da bi semaforzacijom mogli značajno popraviti nepovoljne uslove odvijanja saobraćaja na sporednim prilazima. Međutim, smanjenje vremenskih gubitaka na sporednim prilazom uslovljeno je povećanjem vremenskih gubitaka na prioritetnom putnom pravcu [3]. Predmetna analiza pokazala je da bi na posmatranoj raskrsnici nakon uvođenja semafora i primenom utvrđenog optimalnog signalnog plana možemo očekivati promenu koja bi kao rezultat dala smanjenje vremenskih gubitaka na sporednim prilazima.
U prepodnevnom vršnom času (11:00 – 12:00) na prilazima 1 i 3 uslovi odvijanja saobraćaja mogu se oceniti nivoom usluge C sa ostvarenim prosečnim vremenskim gubicima od 23,2 s/voz na prilazu 1 i 24,1 s/voz na prilazu 3 [3]. U ovom slučaju izrazito se poboljšavaju uslovi odvijanja saobraćaja na prilazu 3. Na prioritetnom toku, uslovi odvijanja saobraćaja u slučaju semaforizacije spustili bi se na nivo usluge C na prilazu 2 i B na prilazu broj 4 [3]. Nivo usluge na celoj raskrsnici iznosio bi C sa prosečnim vremenskim gubicima po vozilu od 23,0 s/voz [3]. Na sledećoj slici (slika 8) prikazani su grafički rezultati simulacije u vidu statičkih parametara za prepodnevni vršni čas koji podrazumevaju broj zaustavljanja po vozilu u saobraćajnim trakama i dužinu reda čekanja. Simulacija je pokazala da se vozila u prepodnevnom vršnom satu ni u jednoj saobraćajnoj traci neće zaustavljati više od jednom, drugim rečima sva vozila će proći u toku prvog ciklusa po dolasku na raskrsnicu [3].



Slika 8. *Prosečan broj zaustavljanja vozila po trakama – levo i dužina reda čekanja na raskrsnici – desno, za prepodnevni vršni čas*
Source: (Izvor, [3])

U poslepodnevnom vršnom času (15:00 – 16:00) na prilazima 1 i 3 uslovi odvijanja saobraćaja mogli bi se oceniti nivoom usluge C sa ostvarenim prosečnim vremenskim gubicima od 27,2 s/voz na prilazu 1 i 27,3 s/voz na prilazu 3. U ovom slučaju se poboljšavaju uslovi odvijanja saobraćaja na sporednim prilazima, a pogotovo prilazu 3 gde u se vremenski gubici umanjuju za skoro četiri puta. Na prioritetnom toku, uslovi odvijanja saobraćaja u slučaju semaforizacije spustili bi se na nivo usluge C na prilazu 2 i B na prilazu broj 4, kao i u prepodnevnom vršnom satu. Nivo usluge na celoj raskrsnici iznosio bi C sa prosečnim vremenskim gubicima po vozilu od 22,4 s/voz. Na sledećoj slici (slika 9) prikazani su grafički rezultata simulacije u vidu statičkih parametara za poslepodnevni vršni čas koji podrazumevaju broj zaustavljanja po vozilu u saobraćajnim trakama i dužinu reda čekanja. Posmatrajući uslove odvijanja saobraćaja iz ugla ovih parametara oni su jednaki uslovima utvrđenim u prepodnevnim vršnom satu ili povoljniji.



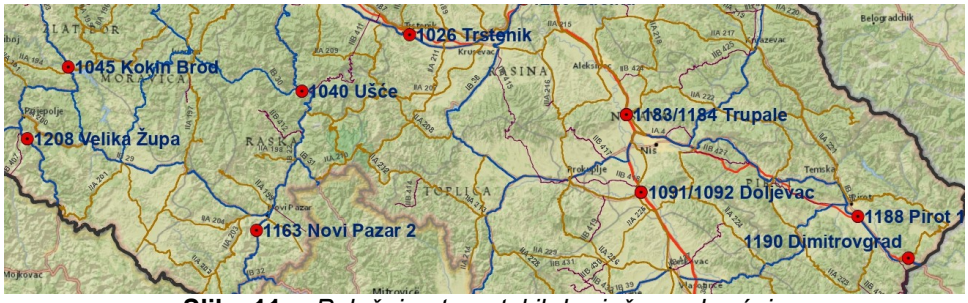
Slika 9. *Prosečan broj zaustavljanja vozila po trakama – levo i dužina reda čekanja na raskrsnici – desno, za poslepodnevni vršni čas*
Source: (Izvor, [3])

4. ANALIZA ZVANIČNIH PODATAKA O BROJANJU SAOBRAĆAJA NA DEONICI PUTA (JP PUTEVI SRBIJE)

Sektor za upravljačko informacione sisteme u saobraćaju (UISS), u okviru Javnog preduzeća Putevi Srbije, obavlja poslove upravljanja i održavanja sistema koji predstavljaju tehničko-tehnološke i funkcionalne celine u oblasti upravljačko informacionih sistema u saobraćaju. Jedan od tih sistema je upravljanje automatskim brojačima saobraćaja (ABS) (slika 10). Podaci sa automatskih brojača saobraćaja prikupljaju se na server korišćenjem mreže mobilne telefonije, na osnovu kojih se formira baza podataka [4]. Svi podaci o prosečnom godišnjem dnevnom saobraćaju (PGDS) na javnim putevima I i II reda u Republici Srbiji su zvanični i mogu se preuzeti na sajtu JP Puteva Srbije, za svaku deonicu na kojoj se vrši brojanje.

Slika 10. *Automatski brojači saobraćaja tip GK 6000 i QLTC 10c*
Source: (Izvor, prezentacija JP Puteva Srbije, Sektor za upravljačko informacione sisteme u saobraćaju)

Predmetna raskrsnica se nalazi na deonici broj 02234 državnog puta IB-22, na kojoj je postavljen automatski brojač oznake ABS 1163 (slika 11). Posmatrani brojač se nalazi van naselja, na određenoj udaljenosti od predmetne raskrsnice.



Slika 11. *Položaj automatskih brojača saobraćaja*
Source: (Izvor, [4])

U sledećoj tabeli su prikazani zvanični podaci o protoku i strukturi saobraćajnog toka za posmatranu deonicu, preuzeti sa sajta JP Puteva Srbije.

Tabela 1. *Podaci o saobraćajnom toku (PGDS) na deonici 02234 državnog puta IB-22 izraženi u vozilima na dan u oba smera*

Oznaka deonice	Saobraćajna deonica	Dužina deonice (km)	PA	BUS	LT	ST	TT	AV	Ukupno	Oznaka brojača
02234	Novi Pazar (Brđani) Ribariće	24.4	6.379	57	91	111	64	163	6.866	ABS 1163

Izvor: sajt Puteva Srbije – brojanje saobraćaja na putnoj mreži Republike Srbije [4]

Može se videti da PGDS na posmatranoj deonici iznosi 6.866 vozila na dan. Svi prikupljeni podaci za deonice puteva su od velikog značaja, ali uz pažljiv izbor prave svrhe za koju se mogu koristiti, što je detaljnije objašnjeno u sledećem poglavlju.

5. VAŽNOST IZBORA LOKACIJE BROJAČA SAOBRAĆAJA

Za poboljšanje uslova odvijanja saobraćaja na predmetnoj raskrsnici zaključeno je da je optimalno rešenje semaforizacija. Za potrebe programiranja optimalnog rada semafora izvršeno je brojanje postavljanjem mobilnih brojača na raskrsnici, koja se nalazi u naselju. Analizom rezultata brojanja utvrđen je PGDS od 14.892 vozila na dan - posmatrano samo na glavnom pravcu, odnosno ulici Kej skopskih žrtava. Na osnovu dalje analize definisan je optimalan program rada semafora za predmetnu raskrsnicu, pri čemu je evidentno poboljšanje nivoa usluge i smanjenje ukupnih vremenskih gubitaka. Analizom zvaničnih podataka o brojanju saobraćaja sa automatskog brojača koji se nalazi na posmatranoj deonici puta, na određenoj udaljenosti od predmetne raskrsnice, van naselja, utvrđen je PGDS od 6.866 vozila na dan. Poređenjem vrednosti PGDS-a utvrđenog brojanjem neposredno na raskrsnici i na deonici puta nedaleko od raskrsnice (Tabela 2), primećuje se znatno manji PGDS evidentiran na deonici puta automatskim brojačima, u odnosu na PGDS utvrđen brojanjem mobilnim brojačima neposredno na raskrsnici.

Tabela 2. *Podaci o saobraćajnom toku na deonici 02234 državnog puta IB-22*

Brojač	PA	BUS+ST	LT	TT	AV	ostalo	Ukupno
automatski	6.379	168	91	64	163	1	6.866
mobilni	11.696	277	2.502	103	171	143	14.892

S obzirom na prethodno izneseno poređenje, ukoliko bi se podaci o protoku sa manjim PGDS-om koristili za programiranje rada semafora, ne bi se mogao postići optimalan režim rada semafora za stvarne saobraćajne uslove na posmatranoj raskrsnici. Takođe, dužina reda čekanja na raskrsnici bi bila znatno veća, pri čemu vremenski gubici na raskrsnici ne bi mogli biti smanjeni do zadovoljavajućeg nivoa. Zbog toga je bilo neophodno izvršiti brojanje na predmetnoj raskrsnici, postavljanjem mobilnih brojača na svim prilazima raskrsnice, kako bi se dobila jasna slika o saobraćajnom opterećenju na analiziranoj raskrsnici.
Prema tome, od suštinske važnosti za verodostojnost i merodavnost prikupljenih podataka za određenu lokaciju je pravilan odabir lokacije na kojoj se vrši brojanje – odnosno mesto evidentiraja podaka o obimu saobraćaja. U tom smislu važno je posmatrati makrolokaciju i mikrolokaciju.
Sa stanovišta makrolokacije neophodno je sagledati okruženje i predvideti potencijalne faktore koji mogu uticati na podatke o saobraćajnom toku u posmatranom području i vršiti brojanje neposredno na predmetnoj lokaciji na kojoj je to potrebno za analizu, planiranje i optimizaciju saobraćajnog toka. Razlog tome je što svaka lokacija ima svoje specifičnosti u gradskom okruženju (škola, pijaca, ugostiteljski objekti i drugi objekti iz oblasti uslužnih delatnosti, prodavnice i slično), jer postoje svakodnevna kretanja stanovništva, a najveći udeo imaju lokalna kretanja, početno – završna kretanja, pa se podaci višestruko razlikuju od vangradskih deonica (što se može primetiti na prethodno opisanom primeru raskrsnice u Novom Pazaru). Često se u ovim slučajevima usled nedostatka vremena, sredstava ili možda nekih drugih razloga koriste pristupačniji podaci, odnosno postojeći podaci sa automatskih brojača – koji bi u ovim slučajevima dali pogrešnu sliku saobraćajnog opterećenja za posmatrane lokacije. Za potrebe izrade studijske dokumenatcije (npr. studija opravdanosti), kada su potrebni podaci o saobraćajnom opterećenju (PGDS) na određenim putnim pravcima / deonicama, podaci sa automatskih brojača su merodavni i moguće ih je koristiti, ali je ta mogućnost ograničena i zavisi od same lokacije, odnosno deonice puta koja je predmet istraživanja. U ovakvim slučajevima, podaci sa automatskih brojača JPPS u kombinaciji sa podacima dobijenim nezavisnim brojanjem (mobilnim brojačima) mogu da daju najbolje rezultate.
Sa stanovišta mikrolokacije u svakom slučaju se predviđa brojanje saobraćaja za svaku pojedinačnu lokaciju, posebno u gradskim uslovima sa urbanim matricama saobraćajnica u kojima su saobraćajne površine kompleksno formirane, nepravilne geometrije raskrsnica. Za navedene situacije se ističu prednosti mobilnih brojača, zbog praktičnosti, kompaktnosti i mogućnosti pozicioniranja na bilo koju površinu, pri čemu se mogu obuhvatiti i nepovoljne situacije sa prilazima raskrsnici, bočni prilazi, i slično. Pored toga, mobilni brojači koji su pomenuti u ovom radu pružaju mogućnost lakog montiranja, bez angažovanja većeg broja izvršioca, pouzdanost prikupljenih podataka i razvrstavanja podataka po kategorijama vozila, čime se eliminiše nedostatak vremena, organizacije, troškova i drugih ograničenja koji karakterišu klasične metode brojanja.

6. ZAKLJUČAK

Kako bi se istakla važnost lokacije brojača saobraćaja za dobijanje podataka o saobraćajnom toku koji su merodavni za određenu lokaciju, u radu je prikazan primer četvorokrake raskrsnice državnog puta IB-22 sa ulicom Branka Ćopića u Novom Pazaru. Na osnovu analize saobraćajnog toka, brojanja i procene uticaja na bezbednost saobraćaja, zaključuje se da je semaforizacija predmetne raskrsnice optimalno rešenje [1].

Upotrebom mobilnih brojača saobraćaja, dobijeni su pouzdani podaci o protoku vozila i strukturi saobraćajnog toka na predmetnoj raskrsnici, čime je omogućena precizna analiza stanja. Važnost pravilnog odabira lokacije brojača saobraćaja ističe se kao ključni faktor za verodostojnost prikupljenih podataka za određene lokacije. Naime, poređenje sa podacima o protoku vozila sa automatskih brojača na deonici predmetnog državnog puta ukazuje na neophodnost nezavisnog brojanja saobraćaja mobilnim brojačima u određenim slučajevima, kada se podaci sa automatskih brojača ne mogu iskoristiti ili ne postoje. Podaci sa automatskih brojača se ne mogu koristiti kao osnova za izradu projekata u naselju, odnosno gradskim područjima, kao što se može videti na prikazanom primeru projekata semaforizacije. U radu se naglašava važnost primene modernih tehnoloških alata poput mobilnih brojača u analizi saobraćajnih sistema, pružajući pouzdane i precizne informacije za donošenje odluka u planiranju saobraćajne infrastrukture i unapređenju bezbednosti saobraćaja u urbanim sredinama.

Literatura

[1] Projekat procene uticaja puta na bezbednost saobraćaja na raskrsnici državnog puta IB-22 i ulice Branka Ćopića u Novm Pazaru, investitor JP Putevi Srbije, konsultant Novius

[2] Petrić, A., Đokić, G., Krnajac, M. (2022). – Praktična primena mobilnih brojača saobraćaja u cilju planiranja saobraćajne mreže. Zbornik radova XIII konferencije sa međunarodnim učešćem o Tehnikama saobraćajnog inženjerstva (TESi), Univerzitet u Beogradu, Saobraćajni fakultet, str. 152-157.

[3] Petrić, A., Krnajac, M. (2023). – Analiza saobraćajnog toka na raskrsnici državnog puta IB-22 (deonica 02234 Novi Pazar (Brđani) – Ribariće) – ulica Kej skopskih žrtava sa ulicom Branka Ćopića u Novom Pazaru na km 258+931,42. Prilog projekta saobraćaja i saobraćajne signalizacije za izgradnju semafora na raskrsnici državnog puta IB-22 (deonica 02234 Novi Pazar (Brđani) – Ribariće) i ulice Branka Ćopića u Novom Pazaru na km 258+931,42, GMP GRAMONT-NS

[4] www.putevi-srbije.rs

ANALIZA I IZBOR MERA ZA UPRAVLJANJE BRZINAMA - PRIMER GRADA SREMSKA MITROVICA

Dr Nemanja Garunović[1], Dr Vuk Bogdanović[2], Obrad Vučenović[3], Marko Marković[4]
[1] Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka Novi Sad, garunovic@uns.ac.rs
[2] Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka Novi Sad, vuk@uns.ac.rs
[3] Grad Sremska Mitrovica, ovucenovic@gmail.com
[4] Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka Novi Sad, markovic.marko989@gmail.com

Rezime: *Upravljanje brzinama (eng. Speed Management) je postupak koji podrazumeva preduzimanje različitih mera u cilju postizanja optimalne brzine svih, odnosno većine vozila u saobraćajnom toku. Optimalna brzina zavisi od ranga i kategorije puta, u principu radi se o dozvoljenoj brzini na posmatranoj deonici puta. Sprovođenje mera u cilju upravljanja brzinom vozila na uličnoj mreži zahteva dodatna ulaganja, pa je potrebno definisati objektivne kriterijume za izbor lokacije na kojima su mere potrebne i prioriteta njihove implementacije. Pored toga, potrebno je definisati postupak izbora mere na izabranim lokacijama, koje bi bile usklađene sa efikasnošću, ali i objektivnim ograničenjima i drugim faktorima. U ovom radu analiziran je postupak izbora tehničkih i regulativnih mera za smanjenje brzine motornog saobraćaja na uličnoj mreži naselja Sremska Mitrovica.*

Ključne reči: *upravljanje brzinama, kriterijumi, motorni saobraćaj, Grad Sremska Mitrovica*

ANALYSIS AND SELECTION OF MEASURES FOR SPEED MANAGEMENT - AN EXAMPLE OF THE CITY OF SREMSKA MITROVICA

Nemanja Garunović, PhD[2], Vuk Bogdanović, PhD[2], Obrad Vučenović[3], Marko Marković[4]
[1] University of Novi Sad, Faculty of Technical Sciences Novi Sad, garunovic@uns.ac.rs
[2] University of Novi Sad, Faculty of Technical Sciences Novi Sad, vuk@uns.ac.rs
3 City of Sremska Mitrovica, ovucenovic@gmail.com
4 University of Novi Sad, Faculty of Technical Sciences Novi Sad, markovic.marko989@gmail.com

Abstract: *The process of speed management involves taking various measures to reach the optimal speed of the majority of vehicles in the traffic flow. The optimal speed depends on the rank and category of the road. In principle, it is the permitted speed on the observed section of the road. The implementation of measures aimed at managing the traffic flow speed requires additional investments, so it is necessary to define objective criteria for choosing the location where the measures are needed and the priority of their implementation. Furthermore, it is necessary to define the procedure for selecting measures in selected locations that is aligned with efficiency, objective limitations, and other factors. This paper examines the method for selecting technical and regulatory measures to decrease the speed of motor traffic on the street network of Sremska Mitrovica city.*

Keywords: Speed Management, Criteria, Motor Traffic, City of Sremska Mitrovica

1. UVOD

Vreme putovanja i vreme transporta robe su veoma značajni parametri na osnovu kojih se utvrđuje efikasnost mreže drumskih saobraćajnica. Naime, umanjenjem ovih parametara smanjuju se troškovi transporta, što je jedan od osnovnih motiva za ulaganje u izgradnju putne i ulične mreže. Smanjenje vremena putovanja može se ostvariti povećanjem eksploatacione brzine, što se postiže većom računskom brzinom prilikom izgradnje saobraćajnica. Međutim, povećanje brzine na mreži saobraćajnica utiče na veći rizik nastanka saobraćajnih nezgoda i posebno posledica saobraćanih nezgoda.

Saobraćajne nezgoda su jedan od osnovnih uzroka smrtnosti u kojima, prema podacima Svetske zdravstvene organizacije (WHO), svake 22-23 sekunde u svetu smrtno strada po jedna osoba. Tokom 2022. godine u svetu je u saobraćajnim nezgodama život izgubila 1.354.840 osoba, a prema sadašnjim trendovima u 2023. godini život će izgubiti preko 1.450.000 osoba [1]. U Republici Srbiji je u 2021. godini poginula 521 osoba, a 19.905 osoba je povređeno [2]. Brzina je jedan od faktora koji se najčešće dovodi u vezu sa saobraćajnim nezgodama, pa tako, prema nekim izvorima, povećanje brzine za samo 1 km/h povećava rizik od nastanka saobraćajne

[1] Osoba za korespodenciju: Nemanja Garunović: garunovic@uns.ac.rs

nezgode za 3% [3]. Prema podacima iz SAD, prebrza vožnja, odnosno brzina je osnovni faktor u oko 30% saobraćajnih nezgoda sa smrtnim posledicama [4]. Male razlike u sudaranim brzinama prave veliku razliku u posledicama saobraćajne nezgode, U naletu automobila na pešake, postoji 90% šansi da će pešak preživeti ako je brzina manja od 30 km/h, 60% pri brzini do 40 km/h i 10% pri brzini koja je veća od 50 km/h. U slučaju bočnog sudara automobila sa drugim vozilom, postoji 90% šansi da će vozač ili putnici u vozilu preživeti pri brzinama do 50 km/h, 60% šansi pri brzinama do 60 km/h i 20% pri brzinama većim od 70 km /h. U direktnom čeonom sudaru dva vozila, postoji 95% šansi da će vozač ili putnici u vozilu preživeti pri brzinama do 60 km/h, 90% šansi pri brzinama do 70 km/h i 20% šansi pri brzini od 90 km/h ili većoj. Naime, svako povećanje brzine utiče na povećanje kinetičke energije i dodatnu silu udara, što zbog ograničenja koje ima ljudsko telo povećava rizik od smrti i teških telesnih povreda [5].Na teritoriji Grada Sremska Mitrovica tokom 2021 godine dogodilo se 317 saobraćajnih nezgoda u kojima je poginulo 10 osoba, a povređeno je 1146 osoba. U kombinaciji sa drugim uticajnim faktorima, posebno sa alkoholom i psihoaktivnim supstancama, brzina se kao faktor javlja u preko 50% saobraćajnih nezgoda [2].

ETSC (*European Transport Safety Council*) je 2014. objavio pregled nacionalnih studija o prekoračenju brzine u Evropi. Pokazalo se da oko 30% vozača u Evropi prekoračuje ograničenja brzine na autoputevima, više od 70% vozi iznad ograničenja na putevima van naseljenih mesta, a 80% vozača prekoračuje brzinu unutar naseljenih mesta i urbanih područja [6]. ETSC je nakon ankete koja je sprovedena tokom 2019. godine [7] utvrdio da se u urbanim sredinama od 35% do 75% Evropljana ne pridržava ograničenja brzine. To je takođe slučaj sa između 9% i 63% vozača van naseljenih mesta i između 23% i 59% vozača na autoputevima. Rezultati istraživanja ESRA (*European Society of Regional Anaesthesia*) iz 2019. godine [8] pokazali su da je 56% evropskih vozača automobila izjavilo da su svesno vozili brže od ograničenje brzine u naseljenim mestima najmanje jednom u mesecu. Kako bi se uskladile potrebe za efikasnim saobraćajnim sistemom koji podrazumeva što kraće vremena putovanja i transporta robe, sa potrebama da se na najmanju moguću meru smanji rizikom od nastanka saobraćajnih nezgoda, ograničenja brzine na putnoj i uličnoj mreži su obavezni deo legislativnih akata praktično svih zemalja sveta. Međutim, karakteristike poprečnog profila i horizontalne trase većina puteva i ulica omogućava kretanje motornim vozilima većom, a često i značajno većom brzinom od dozvoljene. S obzirom da eksploataciona brzina zavisi i od stepena interakcije između vozila u saobraćajnom toku, prekoračenja brzine se najčešće javljaju u vanvršnim periodima. Kako su sve studije koje su rađene širom sveta pokazale da zakonsko ograničenje brzine i regulisanje dozvoljenih brzina na putnoj i uličnoj mreži saobraćajnom signalizacijom nisu mera kojima se može upravljati brzinama, u zadnjim decenijama se u mnogim gradovima se prave strategije upravljanja brzinama koje uvažavaju specifičnosti i ograničenja lokalne sredine. Strategije podrazumevaju širok dijapazon različitih mera koje vozače sprečavaju da voze brzinom većom od optimalne.

1.1. Predmet i cilj istraživanja

Predmet istraživanja je ulična mreža u naselju Sremska Mitrovica. Naselje Sremska Mitrovica nalazi se u centralnom delu područja Grada Sremska Mitrovica. Svojom teritorijom obuhvata 48,4 km^2, što je oko 6,35% površine grada. Dužina ulične mreže u ovom naselju iznosi 109,0 km. Kroz naselje Sremska Mitrovica prolaze deonice tri državna puta. Naselje presecaju državni put IIa reda broj 123 (deonica 12302) i državni put IIa reda broj 120 (deonice 12005 i 12006). Istočni obod naselja Sremska Mitrovica tangira državni put Ib reda broj 20 (deonice 02001 i 02002). Ostale saobraćajnice u ovom naselju imaju kategoriju lokalne ulične mreže.

Osnovni cilj upravljanja brzinama na posmatrano području je definisanje mera čijom implementacijom bi se onemogućila vožnja uličnom mrežom brzinom većom od dozvoljene, odnosno optimalne brzine. Sa druge strane predložene mere treba da budu takve da ne naruše funkcionalnost i kvalitet uslova odvijanja saobraćaja na analiziranom delu ulične mreže, odnosno da ne utiču na povećanje optimalnog vremena putovanja. U skladu sa definisanim ciljem sprovedeno je istraživanje i predlozi mera koji su prilagođeni zahtevima područja koje je predmet analize, odnosno uličnoj mreži naselja Sremska Mitrovica.

1.2. Metodologija istraživanja i analize

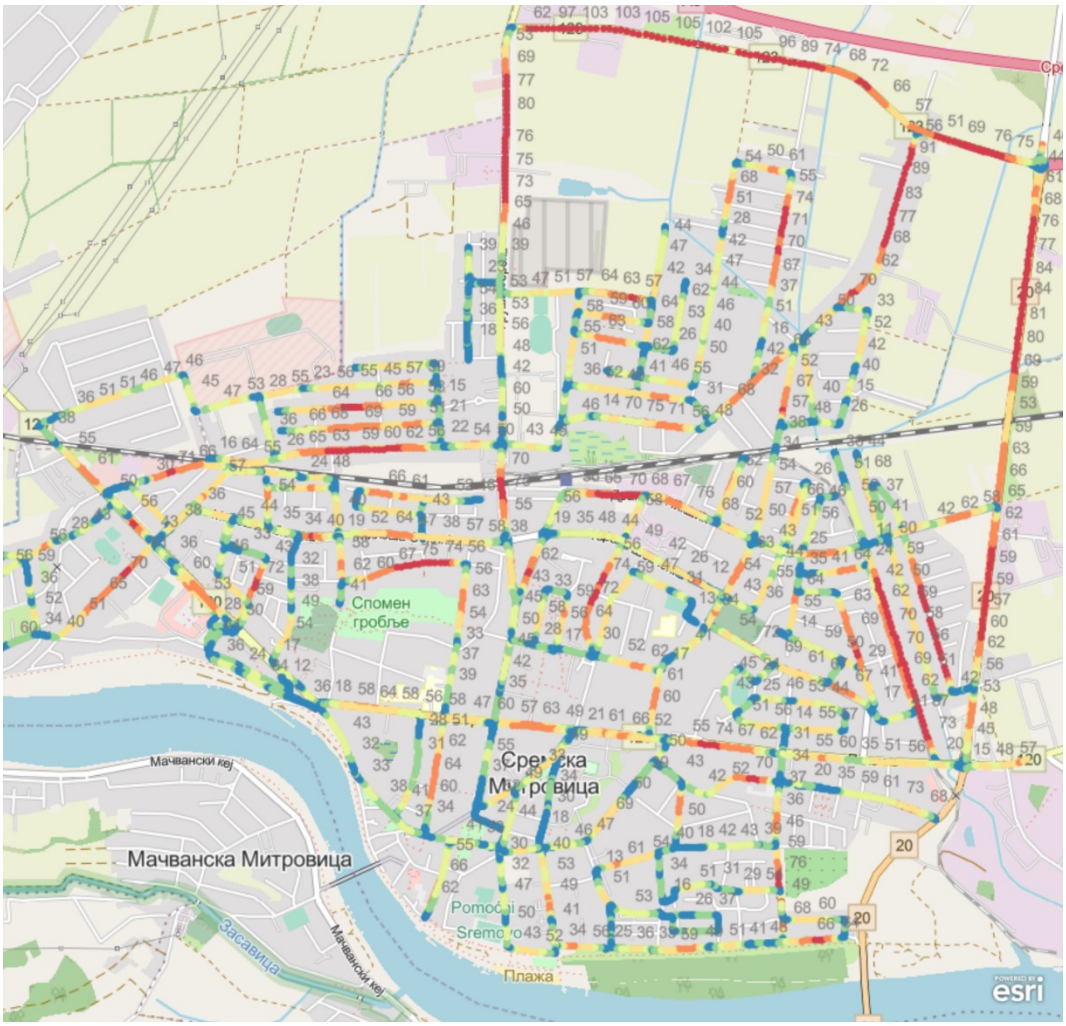
Predmetno istraživanje sprovedeno je u tri faze. U okviru prve faze sprovedena su istraživanja i prikupljeni su podaci neophodni za stvaranje informacione osnove. Istraživanja su obuhvatila merenja brzine u slobodnom toku, praktično na kompletnoj putnoj i uličnoj mreži naselja koja se nalaze u sastavu Grada Sremska Mitrovica. U okviru ove faze analizirani su javno dostupni podaci o karakteristikama saobraćajnih nezgoda na teritoriji grada. Na osnovu rezultata sprovedenih istraživanja i karakteristika ulične mreže izvršena je komparativna analiza na osnovu kojih su izdvojeni delovi ulične mreže i lokacije za koje je potrebno definisati mere za upravljanje brzinama. Druga faza je takođe istraživačka faza koja obuhvata analize strategija i mera koje se

preduzimaju u cilju upravljanja brzinama na uličnoj mreži. U okviru ove faze, definisani su kriterijumi za izbor mera za upravljanje brzinama na izdvojenim delovima ulične mreže i lokacijama. U okviru treće faze definisane su mere i tipska rešenja koja se mogu implemetirati na izabrane delove ulične mreže i lokacije u skladu sa postavljenim opštim ciljevima, kao i ograničenja za implementaciju.

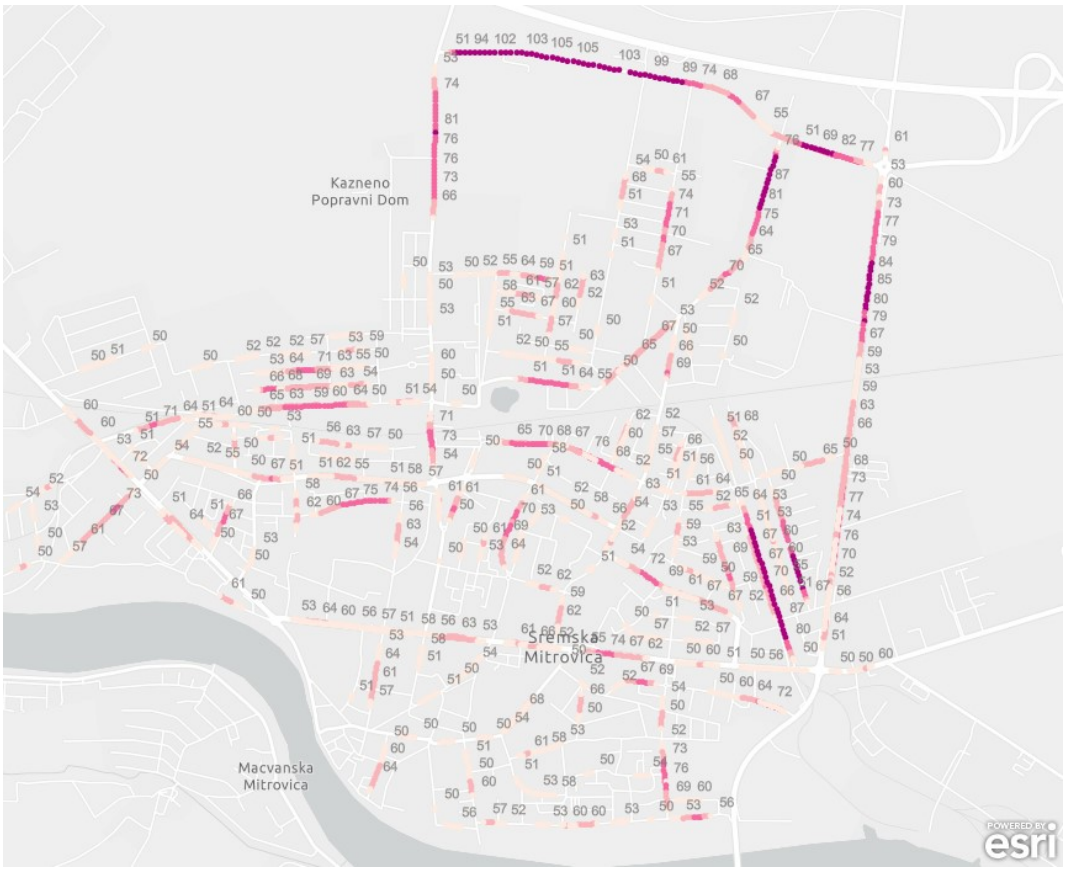
2. REZULTATI ISTRAŽIVANJA

2.1. Rezultati istraživanja brzine u slobodnom toku

Prikupljanje podataka o brzinama izvršeno je po principu pokretnog osmatrača, odnosno neposrednim istraživanjem na terenu. Metoda se sastojala u tome da je vozilom, opremljenim video kamerom koja pored video zapisa ima mogućnost beleženja trenutne brzine i geografske pozicije vozila, izvršen obilazak terena i snimanje brzina na delovima putne i ulične mreže u uslovima slobodnog toka. Snimanje je izvršeno u drugoj polovini januara 2023. godine. Na ovaj način utvrđene su realno ostvarive maksimalne brzine vozila koje mogu biti postignute na mreži. Zabeleženi podaci o brzinama obrađeni su u tabelarnoj formi obrađeni po klasama 0-30 km/h, 30-40 km/h, 40-50 km/h, 50-60 km/h, 60-70 km/h i >70 km/h. Pored toga, izvršena je prostorna distribucija brzina na posmatranoj uličnoj mreži naselja (Slika 1, Slika 2).

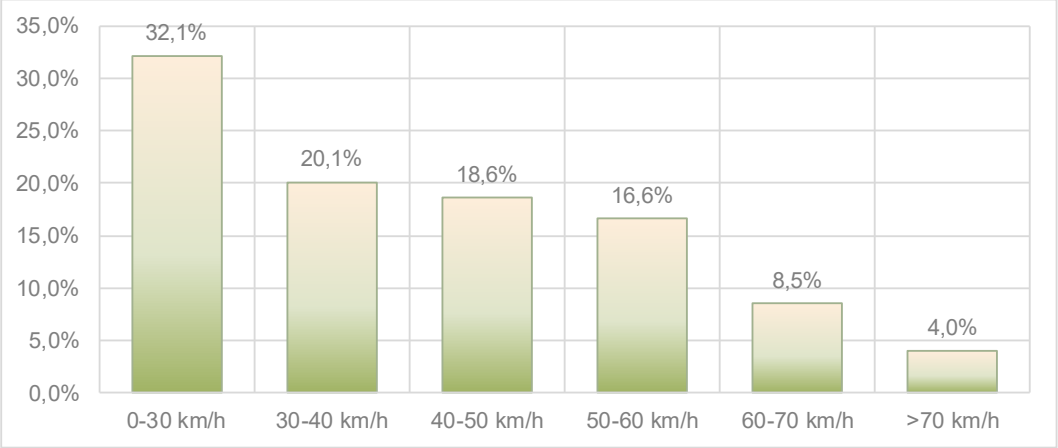


Slika 1. *Prostorna distribucija brzina u naselju Sremska Mitrovica*
Izvor: Grad Sremska Mitrovica 2023, Studija upravljanja brzinama na uličnoj mreži Grada Sremska Mitrovica



Slika 2. *Prostorna distribucija brzina većih od 50 km/h u naselju Sremska Mitrovica*
Izvor: Grad Sremska Mitrovica 2023, Studija upravljanja brzinama na uličnoj mreži Grada Sremska Mitrovica

Analizom brzina snimljenih na uličnoj mreži u naselju Sremska Mitrovica utvrđeno je da na 70,9% dela ulične mreže obuhvaćene istraživanjem putni uslovi omogućuju kretanje vozila brzinom do 50 km/h. Brzina u granicama 50-60 km/h ostvaruje se na 16,6% snimljene ulične mreže. Brzinu od 60 km/h, moguće je ostvariti na 12,6% ulične mreže.

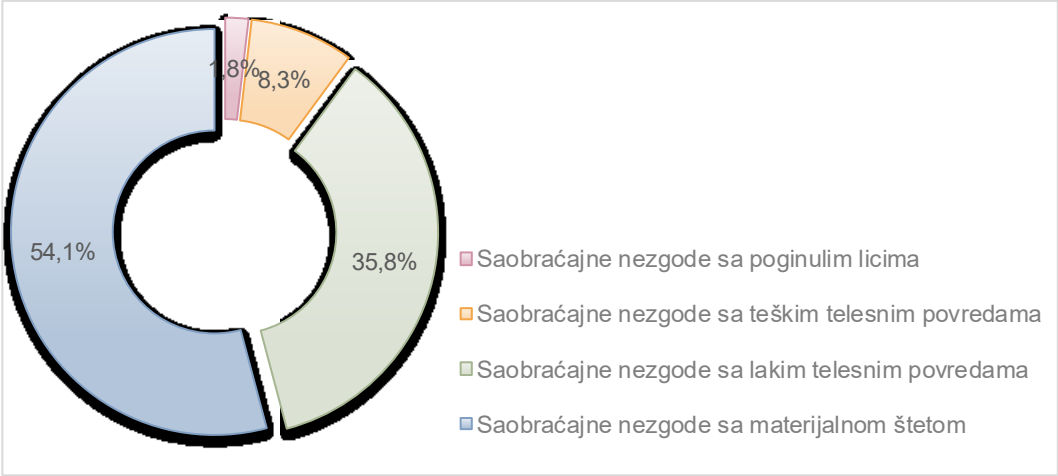


Slika 3. *Raspodela brzina prema klasama u naselju Sremska Mitrovica*
Izvor: Grad Sremska Mitrovica 2023, Studija upravljanja brzinama na uličnoj mreži Grada Sremska Mitrovica

2.2. Analiza stanja bezbednosti saobraćaja

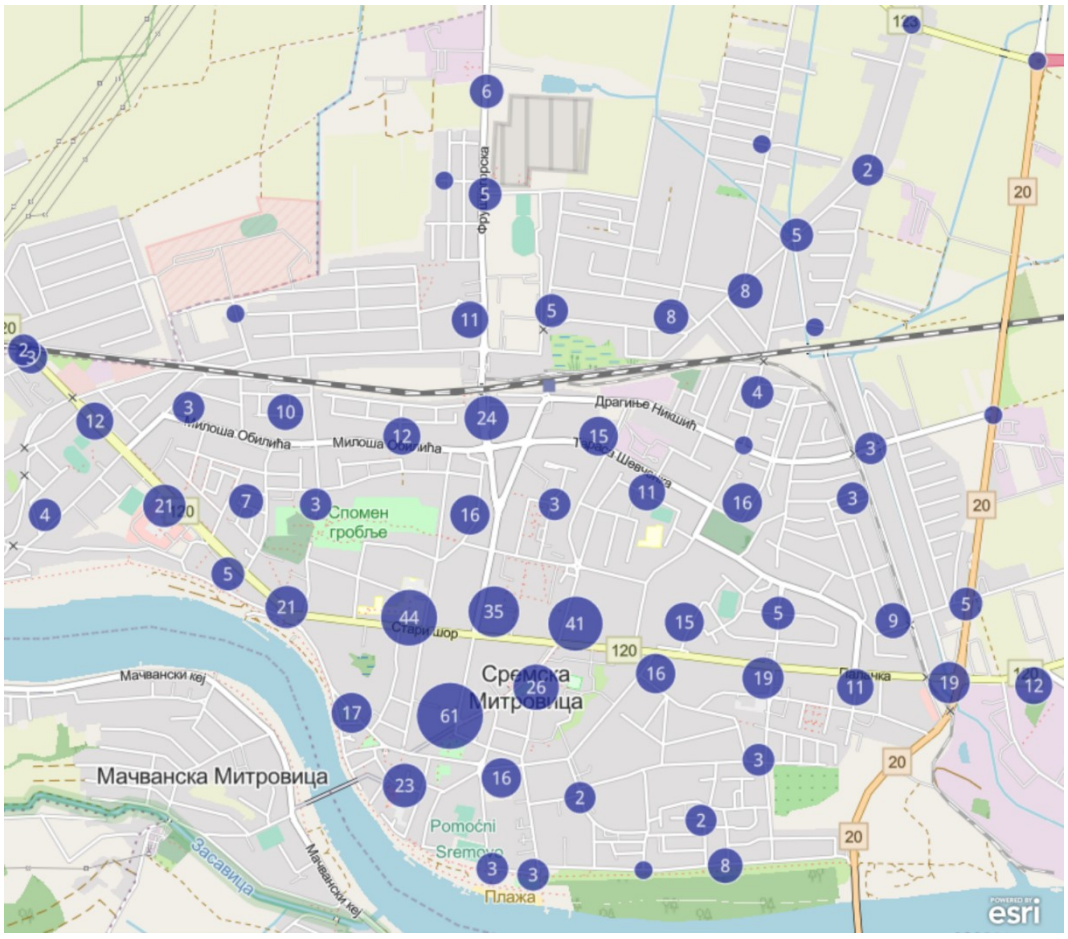
Analizom raspoloživih podataka utvrđeno je da je u periodu 2018. – 2022. godine u naselju Sremska Mitrovica evidentirano ukupno 659 saobraćajnih nezgoda, od čega su 49,2% saobraćajne nezgode sa nastradalim licima. Od ukupnog broja saobraćajnih nezgoda u ovom naselju, 109 saobraćajnih nezgoda, odnosno 16,5% od ukupnog broja, kao faktor nastanka imaju neprilagođenu brzinu ili prekoračenje brzine. Saobraćajne

nezgodne nastale pod uticajem faktora neprimerene brzine (neprilagođenosti i/ili prekoračenja brzine) u 45,9% kao posledicu imaju nastradala lica (Slika 4).



Slika 4. *Raspodela ukupnog broja saobraćajnih nezgoda za faktor prekoračenja i neprilagođene brzine*
Izvor: Grad Sremska Mitrovica 2023, Studija upravljanja brzinama na uličnoj mreži Grada Sremska Mitrovica

Analizom prostorne distribucije saobraćajnih nezgoda u naselju Sremska Mitrovica utvrđeno je da se kao u svim većim gradovima najveći broj saobraćajnih nezgoda događa se u zonama raskrsnica. Takođe centralni deo grada se ističe sa brojem nezgoda što proizilazi iz činjenice da u taj deo grada gravitira i najveći broj korisnika. Saobraćajnica koja se ističe po broju saobraćajnih nezgoda je državni put IIA reda broj 120 koji prolazi kroz naselje Najveći broj saobraćajnih nezgoda na jednoj lokaciji dogodio se u zoni gradskog parka odnosno 61 saobraćajna nezgoda. (Slika 5).



Slika 4. *Raspodela ukupnog broja saobraćajnih nezgoda na uličnoj mreži naselja Sremska Mitrovica*
Izvor: Grad Sremska Mitrovica 2023, Studija upravljanja brzinama na uličnoj mreži Grada Sremska Mitrovica

3. IZBOR MERA ZA SMANJENJE BRZINE MOTORNOG SAOBRAĆAJA

3.1. Kriterijumi za izbor lokacija i tehničkih i regulativnih mera

Sprovođenje mera u cilju upravljanja brzinom vozila na uličnoj mreži zahteva dodatna ulaganja, pa je potrebno definisati objektivne kriterijume za izbor lokacije na kojima su mere potrebne i prioriteta njihove implementacije. Pored toga, potrebno je definisati postupak izbora mere na izabranim lokacijama, koje bi bile usklađene sa efikasnošću, ali i objektivnim ograničenjima i drugim objektivnim faktorima od kojih zavisi mogućnost implementacije.

Izbor lokacija na kojima će biti predložene tehničke mere za smanjenje brzine izvršeno je vrednovanjem svakog pojedinačnog dela ulične mreže prema sledećim kriterijumima:

I. Vrednost prekoračenja brzine u slobodnom toku izabrana je kao osnovni kriterijum za izbor lokacija na kojima se predlaže implementacija neka od tehničkih mera za smanjenje brzine zbog činjenice da brzina pored toga što utiče na rizik za nastanak saobraćajnih nezgoda u najvećoj meri utiče i na težinu posledica. Definisana prekoračenja brzine u slobodnom toku su definisana u odnosu na vrednosti dozvoljene brzine za naselja od 50 km/h
II. Prostorni raspored saobraćajnih nezgoda u kojima je kao jedan od uzroka identifikovana brzina vozila, potrebno je uzeti u obzir kao kriterijum za izbor lokacija na kojima je potrebno preuzeti određene mere. Naime, opšte je poznato da vozači na opasnu saobraćaju situaciju najčešće reaguju kočenjem, kao i da mogućnost izbegavanja nezgode zavisi od vremena kočenja i dužine zaustavnog puta. Dužina zaustavnog puta kočenjem je kvadratna funkcija brzine, pa je upravo brzina ključni faktor koji utiče na mogućnost izbegavanja nezgode.
III. Nepovoljne geometrijske karakteristike uzete su kao kriterijum za izbor lokacija iz razloga što se na takvim delovima ulične mreže po pravilu javljaju otežani uslovi odvijanja saobraćaja, pa se od vozača zahteva posebna pažnja ili specifičan način vožnje, odnosno upravljanja vozilom. Pod nepovoljnim geometrijskim karakteristikama podrazumevaju se nesimetrične raskrsnice, raskrsnice sa prilazima sa uzdužnim nagibom, raskrsnice na kojima je zbog lokacije objekata ili drugih prepreka na sporednim prilazima ograničena preglednost, delovi ulične mreže u oštrim horizontalnim krivinama, delovi ulične mreže u oštrim vertikalnim krivinama, suženja kolovoza itd.
IV. Specifični lokalni uslovi pod koje se podrazumeva nedostatak trotoara na posmatranoj lokaciji, blizina objekata visoke atrakcije i ostale specifičnosti geometrije i okoline.

Prilikom izbora lokacije za postavljanje tehničkih mera za smanjenje brzine, lokaciju je moguće vrednovati određenim brojem bodova prema definisanim kriterijumima. Maksimalni moguć broj bodova je 100, dok je minimalni broj bodova koji lokaciju kvalifikuje za preduzimanje mera 50.

Tabela 1. *Vrednost kriterijuma za vrednovanje lokacija*

Kriterijum		Broj bodova
Kriterijum br. 1: Maksimalno prekoračenje brzine	>30 km/h	40
	20 km/h – 30 km/h	30
	10 km/h – 20 km/h	20
	<10 km/h	10
Kriterijum br. 2: Uzrok saobraćajne nezgode	Брзина	30
	Остало	20
Kriterijum br. 3: Nepovoljne geometrijske karakteristike		20
Kriterijum br. 4: Specifični lokalni uticaji		10

Izvor: Grad Sremska Mitrovica 2023, Studija upravljanja brzinama na uličnoj mreži Grada Sremska Mitrovica

3.1. Izbor mera za upravljanje brzinama

U postupku izbor mera potrebno je pored efikasnosti, sagledati mogućnost njihove primene u konkretnim uslovima, odnosno sa karakteristikama prostorno-planske dokumentacije i mogućnošću dobijanja saglasnosti i dozvola za implementaciju. Analizom iskustava u primeni mera za upravljanje brzinama na putnoj i uličnoj mreži, s obzirom na postojeću legislativu i prostorna ograničenja, mere se mogu podeliti na:

- mere koje zahtevaju promene elemenata situacionog plana putne mreže;
- mere koje zahtevaju promene elemenata nivelacionog plana;
- regulativne mere

Koncept smanjenja brzine motornog saobraćaja promenom elemenata situacionog plana zasnovan je na reorganizaciji postojeće primarne mreže, a zatim i pristupnih ulica kroz građevinske intervencije na raskrsnicama i u poprečnom profilu ulica. Kada su u pitanju raskrsnice, svakako da se izdvaja kao dobro rešenje, rekonstrukcija postojećih raskrsnica sa ukrštanjem saobraćajnih pravaca u raskrsnice sa kružnim tokom saobraćaja-kružne raskrsnice. Intervencije na poprečnom profilu ulica su transformacije poprečnih profila u postupku rekonstrukcije i reorganizacije na celokupnom poprečnom profilu, odnosno u celoj širini regulacionog pojasa postojećih ulica. Cilj ovakvih transformacija je da se pravci na sekundarnoj putnoj mreži pretvore u formu sa horizontalno smaknutim osama.

Primenom različitih tipova kružne raskrsnice sa različitim projektantskim rešenjima mogu se obezbediti željeni rezultati kad je u pitanju smanjenje brzina motornih vozila na lokalnoj putnoj mreži. Shodno navedenom, za umirenje saobraćaja mogu se primeniti različiti tipovi kružnih raskrsnica koje su klasifikovane na sledeći način:

- **Mini kružna raskrsnica** primenjuje se prioritetno na saobraćajnicama u naselju gde je dozvoljena maksimalna brzina od 50 km/h, isključivo kao jednotračna kružna raskrsnica, sa pregaznim centralnim ostrvom. Navedene raskrsnice su veoma dobro rešenje za kontrolisanje brzine kretanja motornih vozila na gustoj urbanoj saobraćajnoj mreži, pri čemu maksimalna željena brzine toka iznosi od 25 km/h. Osnovna dimenziona karakteristika mini kružnih raskrsnica definisana je prečnikom upisane kružnice koji može da bude $14 \leq D \leq 25$ m. Centralno ostrvo je minimalnog prečnika od 8 m, izuzetno 7 m, izdignutog u odnosu na kolovoz kružne raskrsnice za 4-6 cm, ali se centralno ostrvo može izvesti i u vidu kalote, pri čemu je najviši, centralni deo izdignut za maksimalno 10 cm u odnosu na kolovoz kružne raskrsnice.
- **Mala kružna raskrsnica** su raskrsnice sa prečnikom upisane kružnice koji se kreće između $18 \leq D \leq 34$ m. Pored ulične mreže ovaj tip raskrsnica može biti primenjen i na vangradskoj putnoj mreži u slučaju da prostorne mogućnosti zadovoljavaju izgradnju raskrsnice sa prečnikom $D \geq 28$ m. Projektno-tehnički elementi treba da budu sa ograničenjem brzine do 40 km/h, a raskrsnice se mogu projektovati isključivo kod jednotračnih ulivno-izlivnih pristupnih puteva.
- **Velika kružna raskrsnica** karakterišu veći prečnici upisane kružnice u granicama $34 \leq D \leq 70$ m. Ove kružne raskrsnice mogu biti jednotračne i dvotračne, kao i kombinacija istih na ulivno-izlivnim mestima. Kod velikih kružnih raskrsnica obavezno je denivelisanje razdelnih ostrva i centralnog ostrva u odnosu kolovoz kružne raskrsnice. Primena ovih raskrsnica je moguća i u naselju i van naselja. Biciklistički i pešački saobraćaj su u segregatnom projektnom rešenju, odnosno vode se kao nezavisne saobraćajne površine odvojene od kolovoza za kretanje motornih vozila. Projektno-tehnički elementi treba da budu sa ograničenjem brzine od 40 km/h u naselju i 50 km/h izuzetno 60 km/h van naselja.

Intervencije u poprečnom profilu ulica podrazumeva stvaranje diskontinuiteta na pravcima odnosno horizontalno smicanje ose kolovoza predstavlja efikasni načini za smanjenje brzine kretanja vozila koji je moguće primenjivati na lokalnoj uličnoj mreži. Ovakve rekonstrukcije uličnih koridora imaju za cilj prinudno smanjenje brzina kretanja vozila sa ili bez mogućnosti mimoilaženja vozila. Efekat usporenja je moguće postići i primenom drugačijeg završnog kolovoznog zastora na mestima promene pravaca, kao i ozelenjavanje sa visokim zelenilom uz ivicu kolovoza, sve sa ciljem promene percepcije vozača. U zonama diskontinuiteta , posebno na mestima promene pravca kolovoza obavezno je primena javnog osvetljenja. Promena pravca ose kolovoza može vršiti jednostrano, dvostrano paralelno ili dvostrano naizmenično. Navedena remodelacija poprečnih profila ulica naročito je pogodna u ulicama sa jednosmernim tokom saobraćaja.

Promene nivelacionog plana se vrši u okviru postojećeg saobraćajnog profila puta, tako da ona ne zahteva izmenu planske dokumentacije, odnosno izmene poprečnog profila ulične mreže. U mere koje ne zahtevaju promenu situacionog plana, odnosno izmene postojeće planske i projektne dokumentacije spadaju praktično sve vrste vertikalnih usporivača. U tom smislu, a s obzirom na učestalost primene, potrebno je aktivnosti u vezi sprovođenja ovih mera uskladiti sa postojećom regulativom [9].

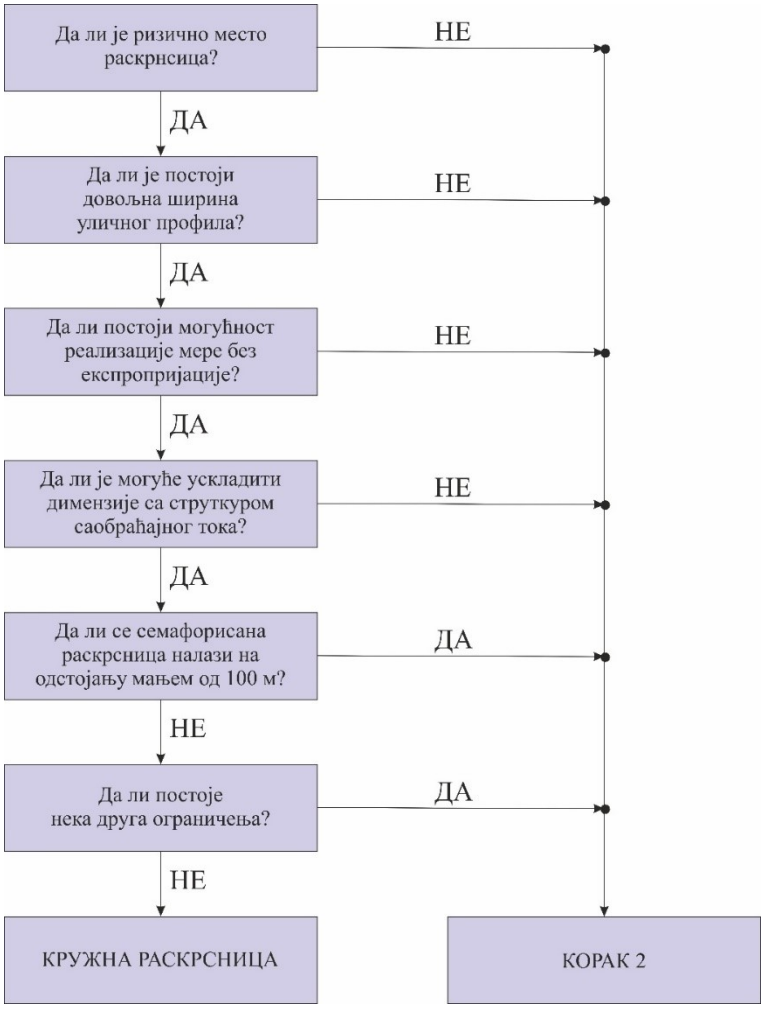
U mere koje ne zahtevaju promene putnih i uličnih elemenata spadaju sve mere koje se odnose na regulisanje režima brzina tehničkim regulisanjem saobraćaja, kao i mere kontrole. Prema tome u ove mere spadaju mere koje se odnose na promene širine saobraćajnih traka upotrebom horizontalnih oznaka, primena sredstva za upozoravanje, kao i uređaja za efikasnu kontrolu brzine, odnosno kamera.

3.1. Izbor mera za upravljanje brzinama

Postupak izbora optimalne mere za upravljanje brzinama na konkretnoj lokaciji najlakše je sprovesti algoritamskim sagledavanjem lokacije, problema i cilja. Na ovaj način moguće je izvršiti izbor optimalne mere

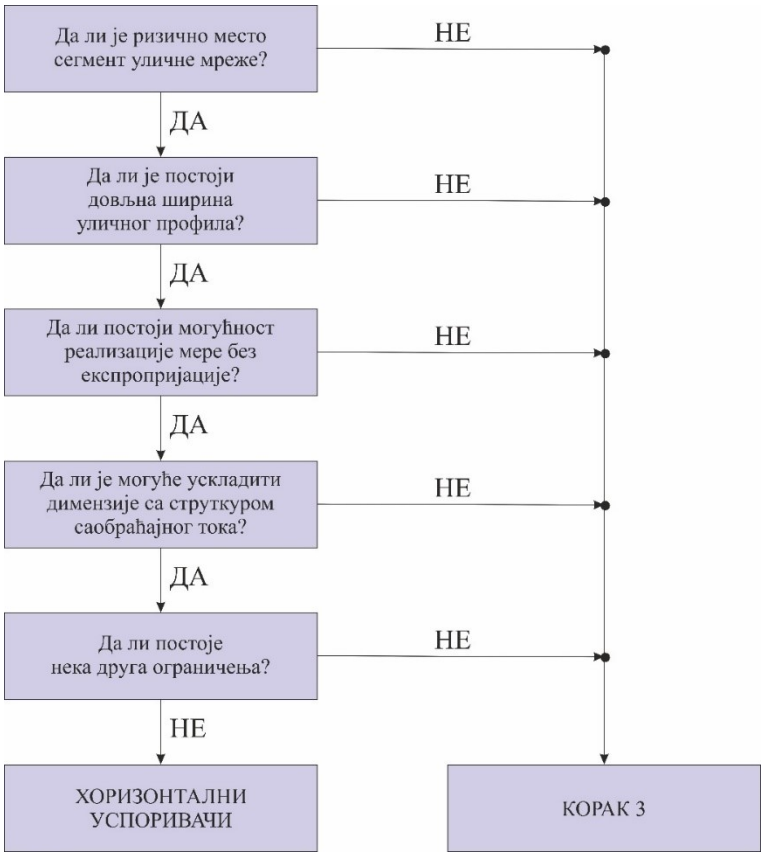
kroz korake u okviru kojih je moguće sagledati osnovne karakteristike lokacije, i uz uvažavanje osnovnih ograničenja za njihovu primenu.

Prvi proceduralni korak odnosi se na proveru mogućnosti implementacije kružne raskrsnice na lokaciji kritične raskrsnice. On se sastoji u proveri prostornih mogućnosti lokacije, odnosno mogućnosti implementacije kružne raskrsnice u okviru postojećeg profila ulica koje čine raskrsnicu, bez eksproprijacije zemljišta.



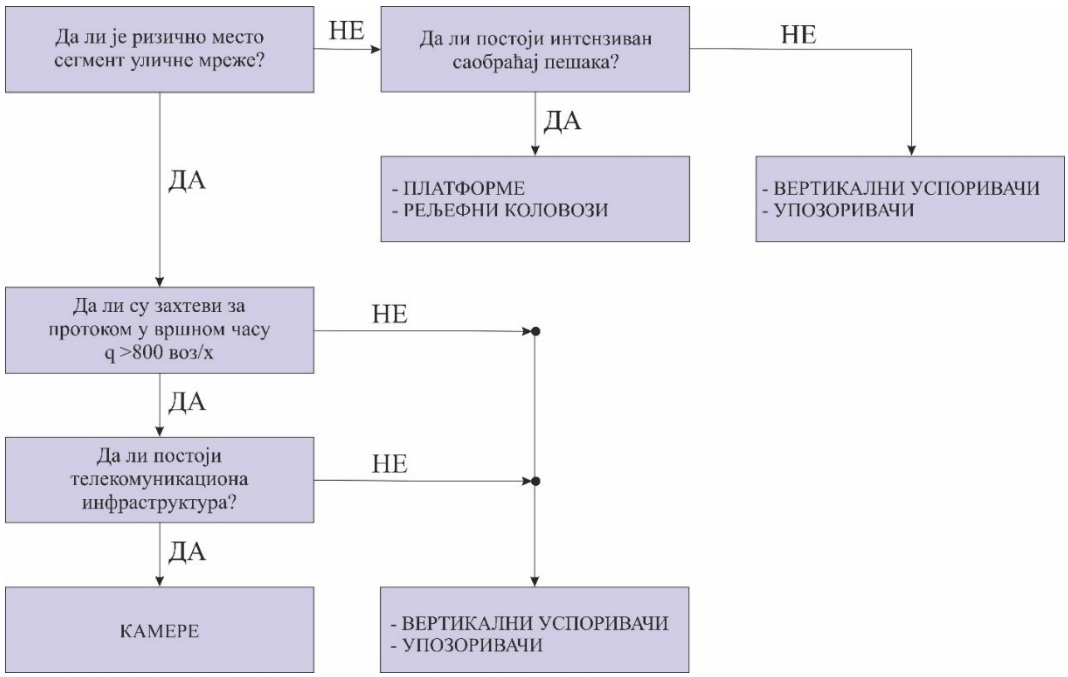
Slika 5. *Algoritam za proveru mogućnosti implementacije mera za upravljanje brzinama – KORAK 1*
Izvor: Grad Sremska Mitrovica 2023, Studija upravljanja brzinama na uličnoj mreži Grada Sremska Mitrovica

Korak 2 odnosi se na proveru mogućnosti implementacije i proveru mogućnosti primene mera promenom putanje kretanja vozila u horizontalnoj ravni, odnosno horizontalnih usporivača (suženja, veštačkih šikana itd.). Mogućnost primene ove mere pre svega se odnosi na proveru uslova i ograničenja na posmatranoj lokaciji, odnosno mogućnosti realizacije suženja ili izmeštanja horizontalne trase kolovoza u okviru postojećeg profila ulica, bez eksproprijacije zemljišta. U skladu sa ograničenjima lokacije i karakteristikama saobraćajnih površina bira se vrsta horizontalnog usporivača. Nakon izbora vrste usporivača, neophodna je provera prohodnosti autobusa, ukoliko se segmentom ulične mreže realizuje javni prevoz ili međugradske autobuske linije, kao i prohodnost za komunalnih vozila za odnošenje smeća, vozila hitnih službi i poljoprivrednih vozila, ukoliko se ulica nalazi u seoskim naseljima. Pored toga, potrebno je proveriti da li postoje druga, lokalna ograničenja, kao na primer, zasadi višegodišnjeg drveća, objekti kao što su javne česme, spomenici itd., koje nije moguće ukloniti ili pomeriti bez obzira što se nalaze na javnim površinama. Izbor ovakvih mera obavezno uključuje i postavljanje dodatnog uličnog osvetljenja na samom mestu primene mere kako bi izmena geometrije bila jasno vidljiva u noćnim i uslovima smanjene vidljivosti.



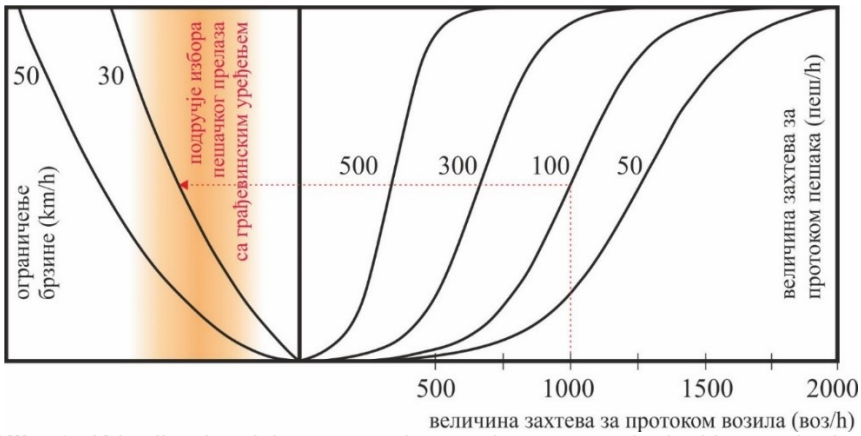
Slika 6. *Algoritam za proveru mogućnosti implementacije mera za upravljanje brzinama – KORAK 2*
Izvor: Grad Sremska Mitrovica 2023, Studija upravljanja brzinama na uličnoj mreži Grada Sremska Mitrovica

Korak 3 odnosi se na proveru mogućnosti implementacije proveru mogućnosti primene svih vrsta vertikalnih usporivača, upozorivača i kamera za kontrolu brzine. Prilikom izbora vrste vertikalnog usporivača potrebnoj je uzeti u obzir strukturu saobraćajnog toka, posebno na delovima ulične mreže gde postoje linije javnog prevoza, na trasama vozila hitnih službi i intenzivan biciklistički saobraćaj.



Slika 7. *Algoritam za proveru mogućnosti implementacije mera za upravljanje brzinama – KORAK 3*
Izvor: Grad Sremska Mitrovica 2023, Studija upravljanja brzinama na uličnoj mreži Grada Sremska Mitrovica

Na izdvojenim pešačkim prelazima i raskrsnicama na kojima je intenzivan pešački saobraćaj najbolje rešenje predstavljaju platforme. Na narednoj slici prikazan je dijagram sa kriterijumom izbora pešačkog prelaza sa građevinskim uređenjem u zavisnosti od zahteva za protokom pešaka, protokom vozila i ograničenja brzine. Dijagram je formiran u skladu sa preporukama za izgradnju pešačke infrastrukture nemačkog istraživačkog društva za saobraćaj [10].



Slika 8. *Kriterijumi za izbora pešačkog prelaza sa građevinskim uređenjem*
Izvor: Forschungsgesellschaft für Strassen- und Verkehrswesen. 2002. Empfehlungen für Fussgängerverkehrsanlangen (EFA). Köln.

4. ZAKLJUČAK

U okviru ovog rada prikazani su rezultati istraživanja brzine slobodnog toka i stanja bezbednosti saobraćaja na teritoriji naselja Sremska Mitrovica. Predmetno istraživanje izvršeno je sa ciljem da se definišu mere i kriterijumi za izbor tehničkih i regulativnih mera Na osnovu izvršenih analiza postojećeg stanja i mera koje se koriste u postupcima upravljanja brzinama na putnoj i uličnoj mreži, kao i uz uvažavanje važeće zakonske regulative, definisani su kriterijumi za izbor lokacija na kojim je potrebna primena mera za usporavanje saobraćaja i kriterijumi za izbor mera za upravljane brzinama.
Na osnovu rezultatu istraživanja definisan je jasan sistem vrednovanja koji pored izbora lokacija omogućava i definisanje prioriteta. Kriterijumi i postupak izbora mera pored efikasnosti, sagledava i mogućnost njihove primene u konkretnim uslovima, odnosno sa karakteristikama prostorno-planske dokumentacije i mogućnošću dobijanja saglasnosti i dozvola za implementaciju. U skladu sa tim definisana su tri osnovna tipa mera, i to: (1) mere koje zahtevaju promene elemenata situacionog plana, (2) mere koje zahtevaju promene elemenata nivelacionog plana i (3) regulativne mere. Postupak izbora mera predložen je kroz algoritamski proces unapred definisanih koraka, na osnovu kog je moguće izabrati optimalnu meru. Redosled koraka usklađen je sa efikasnošću mere i složenošću njene primene.

Zahvale

This research has been supported by the Faculty of Technical Sciences, University of Novi Sad, Department of traffic engineering through project “Contemporary trends and innovations in curriculum development in the field of traffic and transportation”.

Literatura

[1] Svetska zdravstvena organizacija, https://extranet.who.int/roadsafety/death-on-the-roads/#ticker, (22.01.2023.)
[2] Agencija za bezbednost saobraćaja, https://www.abs.gov.rs/%D1%81%D1%80/analize-i-istrazivanja/statistika-i-analize/trendovi, (22.01.2023.)
[3] Finch, D. J., Kompfner, P., Lockwood, C. R. & Maycock, G. 1994. *Speed, speed limits and crashes*. Project Record S211G/RB/Project Report PR 58. Transport Research Laboratory TRL, Crowthorne, Berkshire
[4] NSC Injury Facts, https://injuryfacts.nsc.org/motor-vehicle/motor-vehicle-safety-issues/speeding/, (22.01.2023.)
[5] Transport for NSW - Centre for Road Safety, https://roadsafety.transport.nsw.gov.au/speeding/index.html, (23.01.2023.)

[6] Zvanični vebsajt Evropske unije, https://road-safety.transport.ec.europa.eu/system/files/2021-07/road_safety_thematic_report_speeding.pdf, (23.01.2023.)
[7] Adminaité-Fodor, D., & Jost, G. 2019. *Reducing speeding in Europe*. *ETSC PIN Flash Report 36*. Brussels: European Transport Safety Council
[8] Holocher, S., & Holte, H. 2019, *Speeding. ESRA2 Thematic report Nr. 2. ESRA project (E-Survey of Road users' Attitudes)*. Bergisch Gladbach, Germany, Germany: BASt – Bundesanstalt für Straßenwesen.
[9] Pravilnik o tehničkim sredstvima za usporavanje saobraćaja na putu ("Sl. glasnik RS", br. 9/2014)
[10] Forschungsgesellschaft für Strassen- und Verkehrswesen. 2002. *Empfehlungen für Fussgängerverkehrsanlangen (EFA)*. Köln.

ULOGA INFORMACIONO-KOMUNIKACIONIH TEHNOLOGIJA U ODRŽIVOM RAZVOJU: SMANJENJE UTICAJA KLIMATSKIH PROMENA U PUTNOM SEKTORU

Milica Pavić, master građ.inž.[1]
dr Igor Jokanović, dipl.građ.inž.
[1]Univerzitet u Novom Sadu, Građevinski fakultet Subotica, Kozaračka 2a, 24000, Subotica, milica@gf.uns.ac.rs, jokanovici@gf.uns.ac.rs

Rezime: *Usled uticaja klimatskih promena svet se konstantno menja, istovremeno ostavljajući trag na sve sektore društva. Generalni prioriteti u svetskim okvirima su da svaki sektor postane otporan na ove promene i sposoban za brzi oporavak. Tehnologija igra veliku ulogu u podizanju svesti o klimatskim promenama i obrazovanju ljudi o njihovom uticaju na životnu sredinu. Kombinacija inovacija, političke volje i angažovanosti može dovesti do značajnog napretka u smanjenju emisije gasova sa efektom staklene bašte, čime se poboljšava kapacitet očuvanja planete za buduće generacije. Primenom informaciono-komunikacionih tehnologija (IKT) se utiče na poboljšanje kvaliteta životne sredine koja se ogleda kroz proces ublažavanja zagađenja. Cilj rada je da se napravi pregled primene IKT u putnom sektoru, sa posebnim akcentom na analizi sprovođenja mera usmerenih ka adaptaciji i unapređenju putne infrastrukture i njene eksploatacije. Takođe, biće date relevantne informacije i smernice kako bi se podržale inicijative usmerene ka ojačanju putnog sektora koji može odgovoriti na sve veće izazove u vezi sa klimatskim promenama.*

Ključne reči: *klimatske promene, IKT, putni sektor*

ROLE OF INFORMATION-COMMUNICATION TECHNOLOGIES IN SUSTAINABLE DEVELOPMENT: REDUCING THE IMPACT OF CLIMATE CHANGE IN THE TRANSPORTATION SECTOR

Milica Pavic, Master Civil Eng.
Igor Jokanovic, Civil Eng., Ph.D.
University of Novi Sad, Faculty of Civil Engineering, Subotica
milica@gf.uns.ac.rs, jokanovici@gf.uns.ac.rs

Abstract: *Due to the impact of climate change, the world is constantly changing, simultaneously leaving a mark on all sectors of society. The general priorities on a global scale are for each sector to become resilient to these changes and capable of rapid recovery. Technology plays a significant role in raising awareness about climate change and educating people about its impact on the environment. A combination of innovation, political will, and engagement can lead to significant progress in reducing greenhouse gas emissions, thereby improving the planet's capacity for preservation for future generations. The application of information and communication technologies (ICT) influences the improvement of environmental quality, reflected in the process of pollution mitigation. The aim of this paper is to provide an overview of the application of ICT in the road sector, with a special emphasis on analyzing the implementation of measures aimed at adaptation and improvement of road infrastructure and its operation. Additionally, relevant information and guidelines will be provided to support initiatives aimed at strengthening the road sector to respond to increasing challenges related to climate change.*

Keywords: *climate change, ICT, road sector*

1. UVOD

Borba protiv klimatskih promena se uglavnom vodi odozgo ka dole, tj. od najviših međunarodnih i državnih organa uz podršku globalne naučne zajednice. Odluke se zatim prenose na nacionalne vlasti, koje se prilagođavaju svojim specifičnim potrebama i sprovode na lokalnom nivou. Brzina prenosa globalnih politika za smanjenje klimatskih promena na nacionalni i lokalni nivo najviše zavisi od kapaciteta vlade neke zemlje, te sposobnosti privrede i društva u celini da izvrše neophodne transformacije.

[1] Milica Pavić: milica@gf.uns.ac.rs

Klimatske promene i ekstremni događaji naglašavaju potrebu za prilagođavanjem infrastrukture kako bi se zaštitila i unapredila životna sredina i životi ljudi u pogođenim područjima. Infrastruktura zasnovana na IKT predstavlja važnu ulogu u ovom procesu, pružajući alate i resurse za efikasnu reakciju na klimatske katastrofe i upravljanje njihovim posledicama. Ova mreža obuhvata velike komunikacione mreže (kičma interneta), električnu energiju, pristup inormacijama, itd. [1]. Pouzdan pristup komunikacijama omogućava brzo izveštavanje o klimatskim katastrofama, evakuaciju i sigurnost ljudi. Takođe, IKT može pomoći u praćenju, predviđanju i upravljanju klimatskim promenama putem senzora, satelitskih podataka i analitičkih alata.

Osim toga, IKT ima potencijal da pomaže u razvoju zelenih i održivih rešenja, kao što su solarne i vetroelektrane, pametne mreže za distribuciju elektriciteta, i upravljanje vodnim resursima. Ove tehnologije mogu pomoći u smanjenju emisija, poboljšanju energetskog efikasnosti i osiguravanju pristupa energiji u područjima koje su prethodno bila izolovana.

Digitalizacija oblikuje društvo na globalnom nivou, a upotreba IKT postaje sve zastupljenija u svim sferama života. Ova digitalna transformacija dovodi do uvođenja novih aplikacija i tehnoloških rešenja u sve više sektora, čime se postiže poboljšanje životnog standarda, poslovnih rezultata i funkcionisanja društva, kao i povećanje efikasnosti u procesima donošenja vladinih odluka. Manifestacija digitalizacije se može videti u sve većem spektru digitalnih javnih usluga, kao što su e-uprava, e-zdravstvo, e-obrazovanje, e-finansije, e-otpornost, e-adaptacija. Ove digitalne usluge omogućavaju građanima lakši pristup različitim uslugama putem interneta, čime se ubrzava proces pružanja usluga, smanjuju troškovi i povećava efikasnost. Sveukupno, digitalizacija predstavlja bitnu pokretačku snagu koja oblikuje savremeno društvo i otvara vrata za dalje inovacije i napredak.

Uvođenje IKT u oblast puteva pomaže u planiranju, građenju, održavanju i upravljanju putevima, što doprinosi unapređenju saobraćajnog sistema u celini. Kada je reč o klimatskim promenama i ekstremnim vremenskim događajima, IKT pruža mogućnosti za praćenje vremenskih uslova u realnom vremenu, predviđanje nepogoda i pravovremeno reagovanje na potencijalne opasnosti. Može pomoći i u identifikaciji ranjivih tačaka na putevima koje su podložne štetnim uticajima klimatskih promena, kao i u razvoju rešenja za njihovo ojačavanje i prilagođavanje.

2. KLIMATSKE PROMENE

Klimatske promene predstavljaju egzistencijalnu pretnju i jedan od najvećih izazova našeg vremena. Prirodne katastrofe poput poplava, suša, oluja i požara dešavaju se sve češće i jače usled klimatskih promena. To predstavlja ogroman izazov za ceo svet, posebno za siromašne zemlje koje nemaju dovoljno resursa da se izbore sa posledicama. Pored direktnih posledica po život i zdravlje, klimatske promene utiču na poljoprivredu, snabdevanje vodom i infrastrukturu. Prema tome utiče se i na ekonomiju, stvarajući velike materijalne štete.

Elementi infrastrukture, kao što su putevi, pruge, aerodromi i luke, neophodni su za kretanje ljudi i roba. Svaki element infrastrukture se gradi sa ciljem osiguranja bezbednosti, udobnosti i zaštite celokupne zajednice (naselja, grad, region, država), kako sadašnje, tako i buduće. Saobraćajna infrastruktura je posebno osetljiva na uticaje klimatskih promena. Ekstremni vremenski događaji poput poplava, klizišta, oluja, promene temperature mogu direktno oštetiti puteve, pruge, mostove. Poplave potkopavaju temelje, klizišta blokiraju puteve, a udari vetra izazivaju oštećenja električnih vodova i signalizacije. I najmanja oštećenja mogu uzrokovati velike zastoje i kašnjenja, sa značajnim ekonomskim posledicama. Zatvaranje ključnih putnih pravaca ometa lance snabdevanja, transport robe i kretanje radnika. Oštećenja infrastrukture predstavljaju direktnu opasnost po bezbednost putnika, dolazi do smanjenja brzine reakcije vozača i povećanja saobraćajnih nesreća [2].

Klimatske promene dovode do češćih i dugotrajnijih prirodnih katastrofa, Slika 1. Ove katastrofe mogu trajati od nekoliko sati do više dana i obuhvataju [3]:

- poplave uzrokovane obilnim padavinama ili topljenjem snega;
- intenzivne padavine ili zemljotrese koji mogu destabilizovati kosine, izazvati klizišta ili odrona, oštetiti infrastrukturu i prouzrokovati saobraćajne nesreće;
- eroziju obala reka koja može oštetiti infrastrukturu;
- požare koji mogu zatvoriti puteve i oštetiti saobraćajnu infrastrukturu;
- maglu koja može usporiti saobraćaj i povećati rizik od nesreća;
- ledene i snežne padavine koje dovode do blokada i kašnjenja u saobraćaju, kao i zamrzavanja vodovodnih sistema;

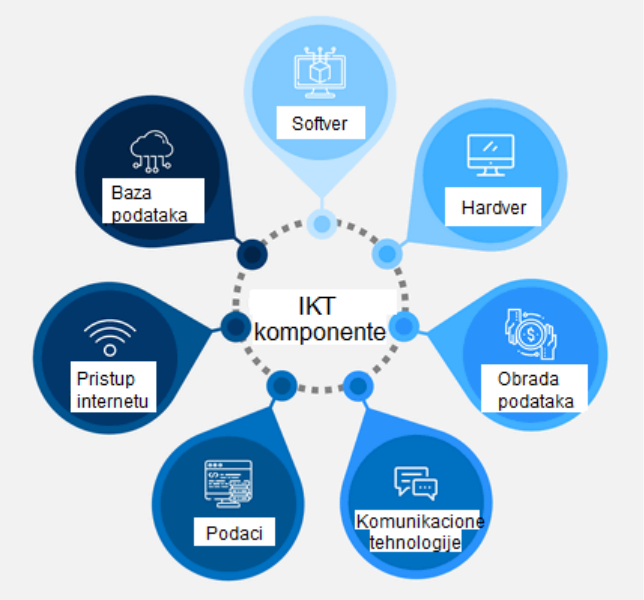
- peščane oluje koje mogu blokirati puteve i prouzrokovati kašnjenja u saobraćaju;
- visoke temperature koje mogu promeniti karakteristike materijala i ubrzati oštećenja na saobraćajnoj infrastrukturi.

Slika 1. *Posledice suše, poplava, požara [4,5,6]*

Zbog učestale pojave ekstremnih vremenskih događaja, javlja se potreba za veća i učestalija ulaganja u održavanje saobraćajne infrastrukture, što opterećuje budžet. Neophodno je prilagoditi projektovanje, izgradnju i održavanje infrastrukture očekivanim klimatskim promenama. Iz tog razloga, potrebni su odlučni koraci na globalnom i nacionalnom nivou kako bi se ublažile posledice i izgradila otpornost, uz posebnu podršku najugroženijim zemljama i zajednicama. Samo zajedničkim naporima može se suočiti sa ovim kompleksnim problemom.

3. VEZA KLIMATSKIH PROMENA I INFORMACIONO-KOMUNIKACIONIH TEHNOLOGIJA

IKT su kombinacija uređaja i usluga koje se koriste za elektronsko primanje, prenošenje i prikazivanje podataka i informacija. To uključuje različite komponente (Slika 2) kao što su: uređaji (hardver), softver, baze podataka, bežične mreže, podaci, komunikacione tehnologije i obrada podataka [7].

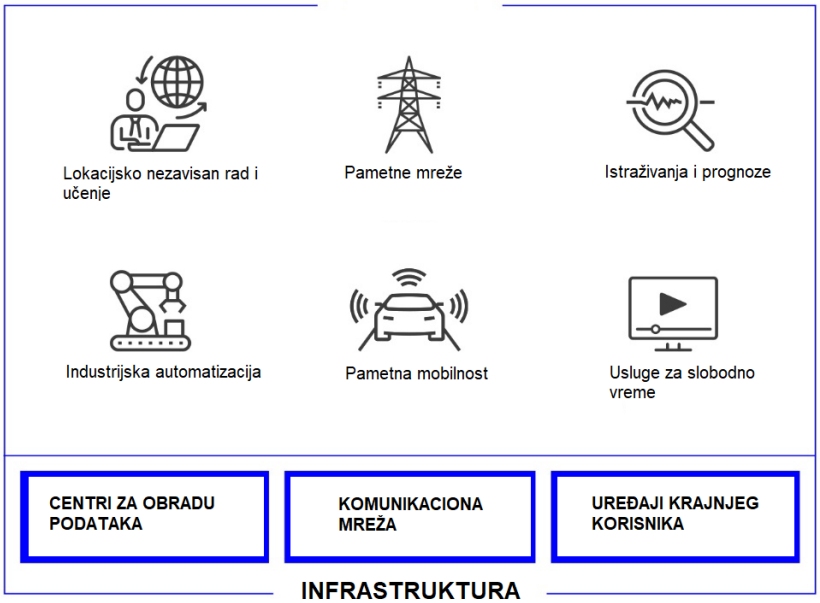


Slika 2. *IKT komponente [7]*

Infrastruktura IKT (Slika 3) je neophodan uslov za primenu usluga inteligentnih transportnih sistema., obezbeđujući relevantne i visokokvalitetne podatke iz sistema koji prate situaciju na putevima. Obuhvata centre podataka, komunikacione mreže i terminalne uređaje, koji se koriste za pružanje usluga različitim sektorima društva [8].

Prednosti IKT-a u istraživanju životne sredine i nauci o klimi su očigledne. IKT se koristi svuda od prikupljanja podataka, skladištenja i obrade, kao i modeliranja do deljenja podataka i komunikacije sa širom javnosti. Donošenje odluka zasnovano na znanju mora biti potkrepljeno najboljim mogućim i pouzdanim informacijama koje se mogu proveriti kroz otvorenost i reviziju od strane kolega. IKT povećava efikasnost prikupljanja istraživačkih podataka u objektima kao što su automatizovane merne stanice koje se mogu koristiti za merenje

i praćenje temperature vazduha i/ili vode ili koncentracije različitih supstanci uključujući zagađivače u vazduhu i/ili vodi. Lakše skladištenje velikih podataka, različite funkcije pretraživanja i poboljšano modeliranje zahvaljujući povećanoj računarskoj snazi takođe su primeri prednosti IKT-a u različitim fazama istraživačkog procesa [8].

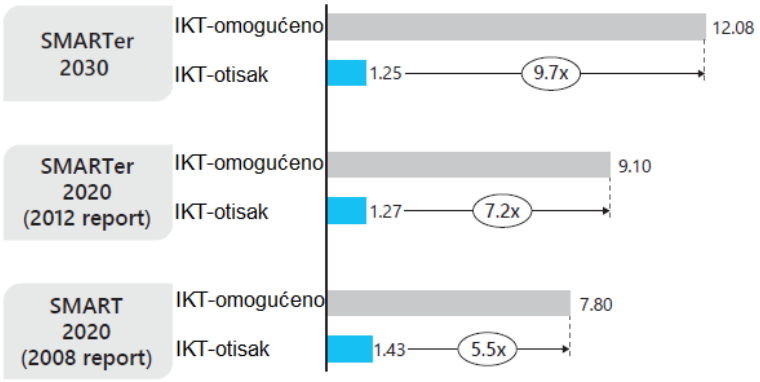


Slika 3. *IKT infrastruktura [8]*

Postoje tri glavna načina kako IKT mogu uticati na klimatske promene [1]:
1) smanjenje emisija u IKT sektoru,
2) omogućavanje energetske efikasnosti u drugim sektorima i
3) podrška adaptaciji na klimatske promene.

IKT sektor značajno doprinosi emisijama gasova staklene bašte kroz potrošnju električne energije za napajanje uređaja i centara podataka. Međutim, uvođenjem servera sa niskom potrošnjom, efikasnih sistema hlađenja, optimizovanih servera i sl., pomenute emisije se mogu smanjiti [1]. IKTsektor postaje sve efikasniji u pogledu emisija u odnosu na druge sektore privrede. Iako se očekuje da će apsolutne emisije IKT sektora nastaviti da rastu, njihov udeo u globalnim emisijama smanjiće se tokom vremena zbog poboljšanja energetske efikasnosti tehnologije. Efikasnost uređaja, infrastruktura i prakse za upravljanje podacima doprinose smanjenju potrošnje energije, prema tome i emitovanju CO_2. U izveštaju SMART2020 iz 2008. godine [9], procenjeno je da će emisije IKT sektora dostići 1,43 Gt CO_{2e} do 2020. godine, što bi predstavljalo 2,7% globalnih emisija. Pet godina kasnije, u izveštaju SMARTer2020 [10], ta prognoza je revidirana na 1,27 Gt CO_{2e}, odnosno 2,3% globalnih emisija. Dalje se predviđa smanjenje, pri čemu se očekuje da će emisije IKT sektora dostići 1,25 Gt CO_{2e} do 2030. godine, što bi predstavljalo 1,97% globalnih emisija [10].

Za praćenje stanja životne sredine i klimatskih parametara, deljenje podataka i rano upozoravanje uključeni su sledeći IKT sistemi [1]:
- Vremenski sateliti: koriste se za praćenje napretka uragana, tajfuna i drugih ekstremnih vremenskih pojava sa visokom rezolucijom;
- Meteorološki radari: omogućavaju praćenje napretka tornada, grmljavina, velikih šumskih požara, pružajući važne informacije o opasnim vremenskim pojavama;

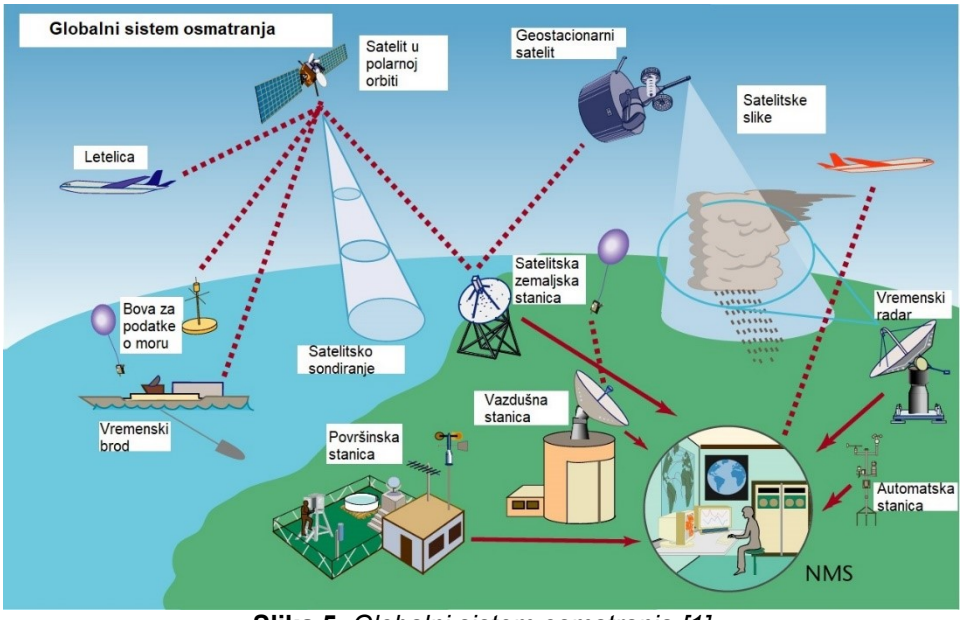


Slika 4. *IKT faktor koristi u 2020. i 2030. godini [10]*

- Radio-meteorološki sistemi: prikupljaju i obrađuju vremenske podatke, pružajući osnovu za tačne vremenske prognoze i rano upozoravanje na opasne vremenske uslove;
- Sateliti sa posmatranje zemlje: sateliti poput NASA-inog Terra i Aqua i Kopernikusa Evropske svemirske agencije pružaju sveobuhvatne globalne podatke o ključnim klimatskim promenama. Oni mere koncentracije gasova staklene bašte, temperaturu površine mora, topljenje leda, promene vegetacije itd. Ovi podaci su važni za razumevanje i kvantifikovanje klimatskih promena, kao i za informisanje politika ublažavanja i adaptacije;
- Sistemi za emitovanje i komunikaciju: koriste se za upozoravanje javnosti na opasne vremenske prilike, kao i za obaveštavanje pilota aviona o olujama i turbulencijama;
- Sistemi za upravljanje katastrofama: omogućavaju rano upozorenje na prirodne i izazvane katastrofe, kao i za koordinaciju i sprovođenje operacija pomoći u katastrofama radi ublažavanja njihovih negativnih efekata.

Navedeni sistemi čine Globalni sistem osmatranja (The Global Observing System - GOS), Slika 5. GOS je pokrenut kao podrška svetskom *Weather Watch*, a predstavlja jedan od možda najuspešnijih primera međunarodne saradnje u poslednjih 60 godina [11]. Pruža posebno podatke posmatranja za različite svrhe, uključujući agrometeorologiju, vazduhoplovnu meteorologiju i klimatologiju. Što se tiče klimatologije, obuhvata podatke o dugoročnim trendovima temperature, padavina, nivoa mora i drugih parametara, što pomaže u proučavanju klime i globalnih promena, kao i u proceni njihovih posledica na životnu sredinu i društvo [1].

Kada je reč o upravljanju rizikom od katastrofa (*Disaster Risk Management*), IKT se smatraju važnom komponentom u svim fazama tog procesa: prevencija rizika, smanjenje rizika, spremnost/odgovor i oporavak. Pružaju alate i resurse koji omogućavaju efikasnije upravljanje rizicima i olakšavaju procese oporavka nakon katastrofa [12].



Slika 5. *Globalni sistem osmatranja [1]*

Gradovi su ključna čvorišta u rešavanju problema klimatskih promena, jer su to mesta gde se najviše emituju gasovi sa efektom staklene baste [13]. Optimizacija sistema javnog prevoza za promenljive uslove i smanjenje negativnog uticaja na životnu sredinu, istovremeno unapređujući iskustvo korisnika, predstavlja ključni aspekt modernizacije urbanih transportnih sistema. Delimična automatizacija upravljanja voznim parkom omogućava efikasnije korišćenje resursa i bolje prilagođavanje potrebama korisnika. Korišćenje podataka o saobraćaju i uslovima u realnom vremenu, generisanih putem različitih sistema podrške, kao što su mrežno povezane kamere i senzori, pruža mogućnost tačnog i pouzdanog informisanja putnika o rutama i vremenskim parametrima putovanja, što zauzvrat čini mobilnost efikasnom i vreme prenosa preciznijim. Takođe, gradovi mogu da primene inteligentne sisteme kontrole saobraćaja, koji se odnose na korišćenje pametnih senzora i mernih uređaja za poboljšanje saobraćajnih tokova, Slika 6. Na taj način se direktno utiče na smanjenje emisija iz saobraćaja skraćivanjem vremena putovanja i smanjenjem praznog hoda vozila i obima putovanja.

Slika 6. *Pametni uređaji za prikupljanje podataka [14]*

Nakon poplava na ekvadorskoj obali, koje su tokom 2008. godine izazvale velike ekonomske gubitke, Nacionalni istraživački centar El Ninjo fenomena i Nacionalni institute za hidrologiju i meteorologiju su razvili mobilni informacioni sistem za klimatska upozorenja. Ovaj sistem omogućava slanje poruka direktno na mobilne telefone, upozoravajući stanovnike na klimatske katastrofe. Na taj način bi se smanjili budući uticaji prirodnih katastrofa [1].

Širom sveta je razvijen sistem upozoravanja na šumske požare, dizajniran da informiše širu javnost i vatrogasne službe o riziku od šumskih požara izazvanih suvim terenom, odnosno pomažu u proceni rizika zasnovanoj ne samo na vremenskim zapažanjima i prognozama meteoroloških instituta, već i na osnovu indeksa procene suše u pogledu zapaljivosti terena [8].

3. JAČANJE PUTNOG SEKTORA

Podrška inicijativama usmerenim ka jačanju putnog sektora koji je otporan na klimatske promene obuhvata različite nivoe akcija. Neki primeri inicijativa su:

- Uvođenje propisa koji ograničavanju emisije vozila;
- Pametni putevi uz ugradnju senzora i povezanih tehnologija u putnu infrastrukturu;
- Pametno održavanje putne mreže podržano korišćenjem dronova i veštačke inteligencije za nadgledanje stanja puteva u realnom vremenu, predviđanje potreba za održavanjem i optimizaciju radova na putu;
- Multimodalna integracija koja osigurava povezivanje drumskog transporta sa ostalim vidovima prevoza kroz digitalne platforme za planiranje putovanja, integrisanu naplatu, deljenje podataka i dr.;
- Uključivanje subvencija za kupovinu električnih vozila, izgradnju infrastrukture za punjenje, poboljšanje uslova za bicikliste i pešake, unapređenje javnog prevoza;
- Izgradnja punjača za električna vozila na javnim mestima, duž auto-puteva i na parking prostorima kako bi se podržao prelazak na vozila sa niskim ili nultim emisijama gasova;
- Podržavanje razvoja i uvođenja tehnologija koje poboljšavaju efikasnost goriva i smanjuju emisije gasova, poput hibridnih i plug-in hibridnih vozila;
- Obrazovanje i podizanje svesti stanovništva o prednostima održivih oblika transporta i načinima kako mogu doprineti smanjenju emisija gasova u putnom sektoru;
- Podsticanje istraživanja i razvoja novih tehnologija.

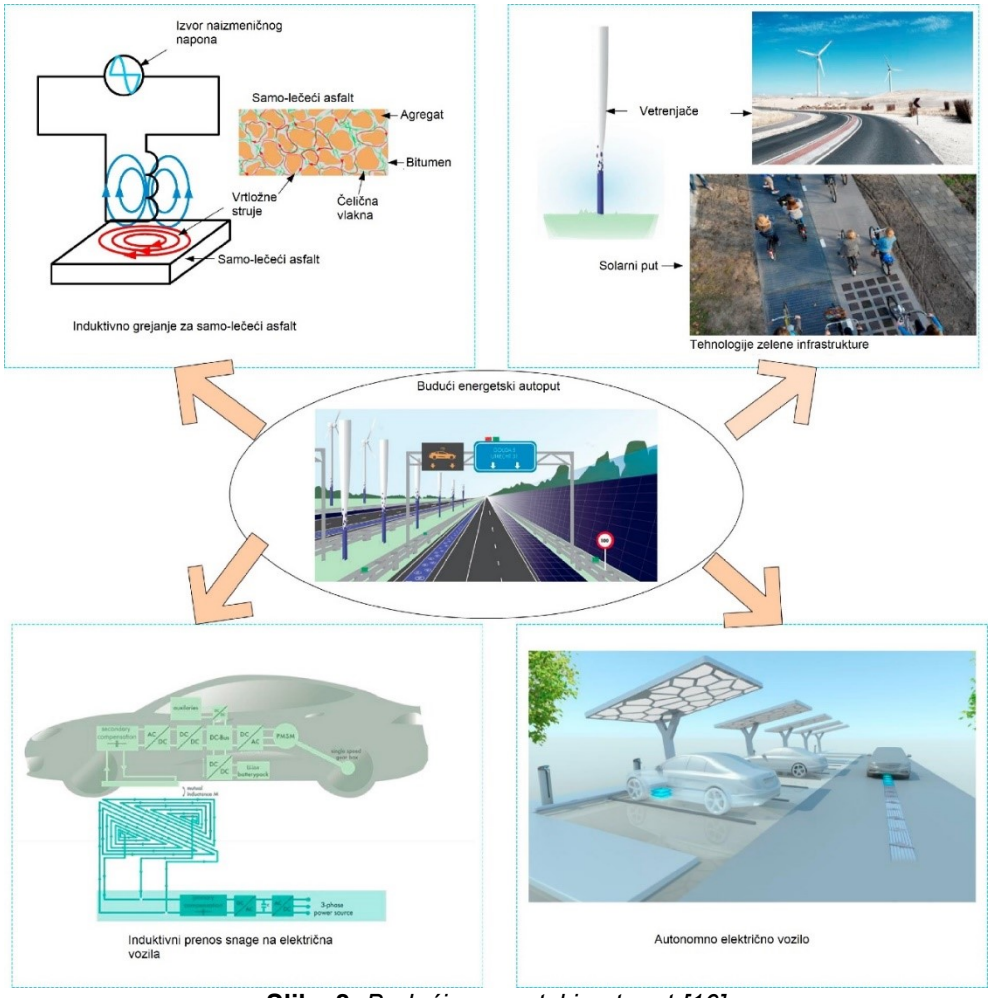
Najčešće se sreću predlozi u domenu saradnja između vladinih institucija, privatnog sektora, nevladinih organizacija i građana kako bi se stvorila održiva i otporna putna mreža koja može odgovoriti na izazove budućih klimatskih promena. U nastavku se prikazuje nekoliko ideja i rešenja koja su blisko povezana sa IKT.

Napredne transportne tehnologije kao što su električna vozila i sistemi javnog prevoza pomažu u smanjenju emisije iz putnog sektora. Međutim, stvarni uticaj na sveopšte smanjenje emisija bi se postigao kroz budući „pametni“ transport koji se odnosi na inteligentna vozila, znakove i puteve, Slika 7. Solarni putevi koji koriste fotonaponske panele integrisane u površinu puta pretvaraju sunčevu svetlost u električnu energiju. Ova

energija se može koristiti za napajanje različitih uređaja i sistema duž puteva, kao što su ulična rasveta, saobraćajna signalizacija ili punjenje električnih vozila [15]. Iako privlačni, ovi sistemi se još uvek nalaze u fazi razrade ili testiranja tako da će vreme i rezultati tek pokazati stvarnu dobrobit i isplativost.

Slika 7. *Budući pametni sistemi u putnom sektoru [15]*

Razvoj novih tehnologija usmeren je i na unapređenje infrastrukture puteva i obuhvata induktivno punjenje, induktivni samo-lečeći asfalt (inductive self-healing asphalt) i korišćenje obnovljivih izvora energije duž autoputa. Ideja je da ove tehnologije budu integrisane kako bi stvorile održivo okruženje duž puteva, Slika 8 [15]. Iako se tradicionalno proučavaju odvojeno, očekuje se da će svaka od njih imati uticaj na tehnologiju električnih vozila na putu [16].

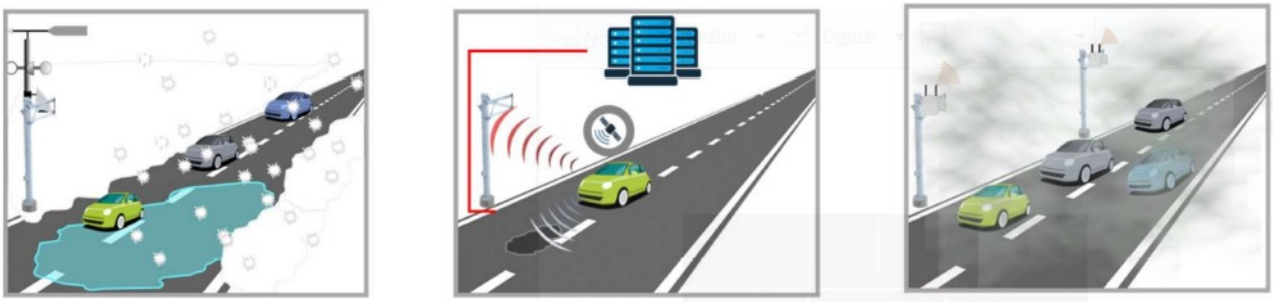


Slika 8. *Budući energetski autoput [16]*

Tradicionalno, IKT omogućavaju prikupljanje, analizu i obradu velikih količina podataka o saobraćaju, vremenskim uslovima, stanju puteva i drugim faktorima. Ovi podaci pružaju osnovu za donošenje informisanih odluka o planiranju, projektovanju, održavanju i upravljanju putevima radi smanjenja njihovog ekološkog uticaja. Napredni softverski alati mogu pomoći inženjerima da optimizuju projektna rešenja puteva radi smanjenja uticaja na okruženje, kao što su smanjenje potrošnje materijala, energetski efikasni putevi i smanjenje emisija gasova. Npr. OpenRoads Designer je softverski alat koji integriše alate za projektovanje puteva, mostova i drugih saobraćajnih objekata. Omogućava izradu detaljnih 3D modela puteva, analizirajući teren, simulaciju saobraćajnih tokova i izradu hidroloških analiza. Na taj način, može pomoći u optimizaciji za smanjenje rizika od poplava i erozije, povećavajući sigurnost i održivost saobraćajne infrastrukture [17] što uglavnom nije slučaj kod široko dostupnih alata za projektovanje gde se analize rade odvojeno.

Da bi se prilagodili budućnosti, uz pomoć IKT se razvijaju pametni materijali, kako u svim oblastima, tako i u putnom sektoru. Pametni materijali su najnoviji tehnološki izum u industriji nauke o materijalima [18]. Kod kolovoznih konstrukcija mogu se primeniti: samo-lečeći asfalt (self-healing asphalt) [19], termo reflektujući premazi, termoakumulacioni materijali, fotokatalitički premazi (photocatalytic coatings), betoni sa dodacima koji apsorbuju ugljen-dioksid [20]. Ovi materijali mogu imati sposobnost samoregeneracije, apsorpcije solarnog zračenja ili upravljanja temperaturom, što može doprineti smanjenju potrošnje energije i emisije gasova tokom eksploatacije kolovoza i objekata na putevima.

Za praćenje stanja kolovoza i vremenskih prilika se već duže vreme koriste senzori postavljeni u putnom pojasu i u kolovoznoj konstrukciji. Senzori su od suštinskog značaja za razvoj i primenu inovativnih metoda upravljanja. U domenu životne sredine, senzori se mogu podeliti u šest tipova: senzori stanja kolovoza koji mere površinsku temperaturu, površinsku vlagu i prisustvo snežnih nakupina, senzori vidljivosti koji detektuju maglu, smog, oblake prašine, jaku kišu i snežne oluje, senzori za termalno mapiranje koji se mogu koristiti za otkrivanje prisustva leda, anemometri za detekciju brzine vetra, senzori kvaliteta vazduha za praćenje nivoa zagađenja, senzori buke za merenje nivoa saobraćajne buke [21]. Rezultati dobijeni u realnom vremenu omogućavaju pravovremeno održavanje puteva (naročito u zimskom periodu) sa efektom smanjenja potrošnje resursa i zagađenja, kao i smanjenim uticajem materijala za posipanje na kvalitet kolovozne konstrukcije, te omogućavaju pravovremene akcije na upravljanju saobraćajnim tokovima tokom loših vremenskih prilika ili povećanog nivoa emisija.



Slika 9. *Senzori i sistemi za praćenje stanja kolovoza i vremenskih prilika [22]*

Nadgledanje stanja puteva u realnom vremenu pomoću dronova i veštačke inteligencije, mora se priznati, samo po sebi ne utiče značajno na smanjenje emisija imajući u vidu da uobičajene tehnologije koriste jedno ili nekoliko vozila na nivou jedne državne putne mreže. Međutim, ovde je ključna mogućnost višestrukog snimanja stanja tokom godine i brzina dobijanja pokazatelja o stanju mreže kako bi se pravovremeno pristupilo intervencijama na putnoj mreži. Na taj način se kritične lokacije mogu ranije obraditi, odnosno popraviti ili poboljšati njihovo stanje kako bi određena deonica, a i čitava putna mreža bila otpornija na uticaje klimatskih promena i ekstremnih događaja.

Na kraju bi pomenuli i primenu veštačke inteligencije u planiranju putovanja koje, u današnjem brzom svetu, može biti zastrašujući zadatak, sa bezbroj opcija koje treba razmotriti i odluka koje treba doneti. Na sreću, napredak u razvoju veštačke inteligencije je definisao put kojim treba da se kreću inteligentne aplikacije za planiranje putovanja koje mogu pojednostaviti proces i ponuditi personalizovane preporuke prilagođene individualnim preferencijama i prioritetima. Aplikacije koje pokreće veštačka inteligencija mogu da pruže uvid u realnom vremenu o dostupnosti i pristupačnosti infrastrukture i sredstava prevoza, mogućnosti rezervacije i menjanja sredstava prevoza, kao i dinamičko planiranje puta. Klasične aplikacije za mapiranje i navigaciju, kao što su Google Maps, Apple Maps, Waze, Bing Maps, se u današnje vreme nadograđuju prilagodljivim generatorima putovanja (npr. PlanTripAI, TripPlannerAI, RoamAround) kada se razmatra opšta primena, dok postoje i specijalizovane aplikacije koje koriste transportne kompanije i/ili njihova udruženja. Osim klasične

primene u olakšavanju planiranja putovanja, ovakve aplikacije doprinose skraćivanju vremena provedenog u prevozu, smanjenju potrošnje goriva i smanjenju emisija, tako da se doprinosi postizanju održivog transporta.

4. ZAKLJUČAK

Napredak informaciono-komunikacionih tehnologija u prethodnim godinama zaista je izuzetno značajan. Tehnološka revolucija koja je u toku donosi ubrzanje, smanjenje troškova i veću dostupnost IKT na globalnom nivou. Ova transformacija je ključna jer omogućava širenje koristi IKT širom sveta, što doprinosi stvaranju čistijeg, zdravijeg i prosperitetnijeg društva. Svet sa naprednim IKT zaista postaje čistiji, zdraviji i prosperitetniji kroz smanjenje emisija, poboljšanje zdravstva, ekonomski prosperitet, veće mogućnosti za pojedince, itd. Ovo je ključna tema koja zahteva dalju podršku i ulaganja kako bi se osiguralo da svi imaju koristi od digitalne revolucije.

Uloga IKT u održivom razvoju, posebno u putnom sektoru, ima važnu ulogu u smanjenju uticaja klimatskih promena, pruža ključne alate i resurse koji omogućavaju inovativne pristupe za smanjenje emisije gasova sa efektom staklene bašte, povećanje efikasnosti resursa i unapređenje upravljanja u putnom sektoru. Iako je prepoznata uloga IKT u borbi sa klimatskim promenama, istraživanja su uglavnom fokusirana na pojedinačna rešenja, dok su studije koje se bave sveobuhvatnom i sistematičnom analizom uloge IKT retke [12]. To ukazuje na potrebu za daljim istraživanjem i razvojem integrativnih pristupa koji će omogućiti bolje razumevanje kompleksnih interakcija između IKT i klimatskih promena, kao i njihovog uticaja na upravljanje rizicima od katastrofa.

Literatura

[1] International Telecommunication Union (ITU), GLOBAL e-SUSTAINABILITY INITIATIVE (GeSI). (2021). Using ICTs to tackle climate change. https://www.itu.int/dms_pub/itu-t/oth/0B/11/T0B1100000A3301PDFE.pdf (01.03.2024)

[2] Jokanović, I., Zeljić, D. 2019. Spremnost preduzeća za održavanje puteva na reakciju prilikom vanrednih događaja. Put i saobraćaj. 2/2019, 7-11. (DOI: 10.31075/PIS.65.02.02)

[3] Jokanović, I. 2021. *Saobraćajnice i životna sredina*. Beograd: PUT plus.

[4] Hill, C. (2016). Drought, soil contraction sausing highway pavements to crumble in Mississippi. Equipment World. https://www.equipmentworld.com/roadbuilding/article/14966260/drought-soil-contraction-causing-highway-pavements-to-crumble-in-mississippi (25.02.2024)

[5] Denchank, M. (2023). Flooding and Climate Change: Everything You Need to Know. NRDS. https://www.nrdc.org/stories/flooding-and-climate-change-everything-you-need-know#facts (25.02.2024)

[6] Bill, L. (2020). Oregon Expexts Reopening and Reairing Roads Damaged by Wildfires Will Take Months. Route Fifty. https://www.route-fifty.com/infrastructure/2020/09/oregon-wildfire-road-damage-recovery/168659/ (25.02.2024)

[7] https://www.techtarget.com/searchcio/definition/ICT-information-and-communications-technology-or-technologies

[8] Ministry of Transport and Communications. 2020. *The ICT sector, climate and the environment*. Publications of the Ministry of Transport and Communications 2020:14

[9] The Climate Gorup. 2020. SMART 2020:Enabling the low carbon economy in the information age. https://www.compromisorse.com/upload/estudios/000/36/smart2020.pdf (09.03.2024)

[10] GLOBAL e-SUSTAINABILITY INITIATIVE (GeSI). 2020. GeSI SMARTer 2020: The Role of ICT in Driving a Sustainable Future. https://www.telenor.com/wp-content/uploads/2014/04/SMARTer-2020-The-Role-of-ICT-in-Driving-a-Sustainable-Future-December-2012._2.pdf (09.03.2024)

[11] World Meterological Organization. Global Observing System (GOS). https://community.wmo.int/en/activity-areas/global-observing-system-gos (06.03.2024)

[12] Petrović, M. (2020). Informaciono-komunikacione tehnologije kao podrška adaptaciji na klimatske promene. XXXVIII Simpozijum o novim tehnologijama u poštanskom i telekomunikacionom saobraćaju – PosTel 2020, Beograd, 1. i 2. decembar 2020. 67-76. (https://doi.org/10.37528/FTTE/9788673954318/POSTEL.2020.008)

[13] Damjanović, D.; Gluščević, A.; Marković, S.; Nikolić, J.; Janjušević, M.; Pozder, N. (2021). *Pametni gadovi Srbije, Inovativnost i rezilijentnost lokalnih zajednica u Srbiji 2021. godine.* PALGO smart, Beograd.

[14] Radivojević, G.; Šormaz, G.; Lazić, B. 2020. Trendovi u razvoju i integraciji ITS sistema. Put i saobraćaj. 3/2020, 33-40. (DOI: 10.31075/PIS.66.03.05)

[15] Toh, C. K.; Sanguesa, J. A.; Cano, J. C.; Martinez, F. J. 2020. Advances in smart roads for future smart cities. Proc. R. Soc. A 476:20190439. (http://dx.doi.org/10.1098/rspa.2019.0439)

[16] Venugopal, P.; Shekhar, A.; Visser, E.; Scheele, N.; Mouli, G. R. C.; Bauer, P.; Silvester, S. 2018.

Roadway to self-healing highways with integrated wireless electric vehicle charging and sustainable energy harvesting technologies, Applied Energy, 212, 1226-1239. (https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.12.108)
[17] OpenRoads Designer, https://www.bentley.com/software/openroads-designer/ (10.03.2024)
[18] Arpitha, S. (2023). Smart Materials: The future of efficient and cutting-edge design, Parametric Architecture, https://parametric-architecture.com/smart-materials-the-future-of-efficient-and-cutting-edge-design/ (10.03.2024)
[19] Self-healing asphalt, https://www.self-healingmaterials.com/self-healing-asphalt/ (10.03.2024)
[20] Concrete that Absorbs Carbon Dioxide. (2021), https://www.gov-online.go.jp/eng/publicity/book/hlj/html/202110/202110_10_en.html (10.03.2024)
[21] PIARC. Roadway sensors. https://rno-its.piarc.org/en/its-basics-its-technologies-data-and-information/roadway-sensors (15.03.2024)
[22] Guerrero-Ibáñez, J.; Zeadally, S.; Contreras-Castillo, J. 2018. Sensor Technologies for Intelligent Transportation Systems. Sensors, 18 (4), 1212. (https://doi.org/10.3390/s18041212)

POSTIZANJE RAVNOTEŽE: NAVIGACIJA RAZVOJEM INFRASTRUKTURE I OČUVANJEM BIODIVERZITETA U SRBIJI - OTKRIVANJE IZAZOVA I REŠENJA

Despotović Miloš, Mišić Iva, Petković Matija
Arup, Kneginje Zorke 77 11000 Belgrade, Srbija, milos.despotovic@arup.com

Apstrakt: Srbija trenutno prolazi kroz brojne projekte razvoja infrastrukture, sa još više planiranih za budućnost. Međutim, ravnoteža između razvoja i očuvanja biodiverziteta često je stavljena u drugi plan ili potpuno zanemarena. S obzirom na to da ovi infrastrukturni projekti igraju ključnu ulogu u podsticanju ekonomskog rasta, njihovo uspešno završavanje je imperativ. Istovremeno, oni predstavljaju značajan rizik od degradacije životne sredine. U ovoj studiji, bavimo se izazovima poput globalne usklađenosti, praznina u podacima, pitanjima kapaciteta i ograničenom svesti. Koristimo integrativne i holističke metodologije, deleći uvide i iskustva, posebno u oblasti veštačke inteligencije. Predložena rešenja obuhvataju različite pristupe, naglašavajući unapređenu komunikaciju, ažurirane podatke i optimizaciju alokacije resursa. Ističući saradnju među zainteresovanim stranama, naglašavamo dvostruku odgovornost postizanja ekonomskog napretka uz očuvanje biodiverziteta. Kroz ilustrativne primere planiranja i dizajna, zalažemo se za budućnost u kojoj razvoj i očuvanje koegzistiraju harmonično, inspirišući zajedničke napore ka održivosti i prosperitetu.

Ključne reči: projekti razvoja infrastrukture, očuvanje biodiverziteta, globalna usklađenost, veštačka inteligencija, održivost

STRIKING A BALANCE: NAVIGATING INFRASTRUCTURE DEVELOPMENT AND BIODIVERSITY CONSERVATION IN SERBIA - UNVEILING CHALLENGES AND SOLUTIONS

Despotović Miloš, Mišić Iva, Petković Matija
Arup, Kneginje Zorke 77 11000 Belgrade, Srbija, milos.despotovic@arup.com

Abstract: Serbia is currently undergoing numerous infrastructure development projects, with even more planned for the future. However, the balance between development and biodiversity conservation is often relegated to a secondary position or neglected altogether. Considering that these infrastructure projects play a crucial role in propelling economic growth, their successful completion is imperative. Simultaneously, they pose a significant risk of environmental degradation. In this study, we address challenges such as global alignment, data gaps, capacity issues, and limited awareness. We employ integrative and holistic methodologies, sharing insights and experiences, particularly in the realm of Artificial Intelligence. Proposed solutions encompass various approaches, emphasizing enhanced communication, updated data, and optimized resource allocation. Highlighting collaboration among stakeholders, we underscore the dual responsibility of achieving economic progress while preserving biodiversity. Through illustrative planning and design examples, we advocate for a future where development and conservation coexist harmoniously, inspiring collective efforts towards sustainability and prosperity.

Keywords: Infrastructure development projects*, Biodiversity conservation, Global alignment, Artificial Intelligence, Sustainability*

1. INTRODUCTION

Serbia is currently undergoing a significant transformation with numerous infrastructure development projects underway and many more planned for the future. However, the rapid pace of development often comes at the cost of biodiversity conservation, a critical issue that is frequently overlooked. While these infrastructure projects are essential for driving economic growth and improving living standards, they also pose a significant risk of environmental degradation [1].

Achieving a balance between development and conservation is a complex challenge that requires careful consideration and planning. Sustainable development, as defined by the United Nations, is "development that meets the needs of the present without compromising the ability of future generations to meet their own needs" [1,2]. This concept has gained traction in recent years as a framework for addressing the challenges of balancing economic growth with environmental protection. Sustainable development recognizes the interdependence of economic, social, and environmental goals and aims to integrate them into decision-making processes. By adopting a sustainable development approach, policymakers and stakeholders can work towards a future where development and conservation are not mutually exclusive, but rather complementary aspects of a prosperous society.

In this study, we aim to explore the challenges and opportunities associated with sustainable infrastructure development in Serbia. We will examine the current state of infrastructure development in the country, highlighting the potential risks to biodiversity and the environment. We will also discuss the concept of sustainable development and its relevance to infrastructure projects, emphasizing the importance of integrating environmental considerations into planning and decision-making processes.

Through our research, we hope to provide insights and recommendations that will help guide policymakers, developers, and other stakeholders towards more sustainable infrastructure development practices. By balancing the needs of development with the need to protect biodiversity, we can create a more resilient and prosperous future for Serbia.

2. BENEFITS OF BIODIVERSITY CONSERVATION

2.1 Ecological Benefits

Ecosystems are the foundation of life on Earth, providing essential services that support human existence. They regulate the climate, purify air and water, cycle nutrients, and provide habitats for countless species [3,4,5,6]. However, human activities, such as urbanization, infrastructure development, and pollution, have placed immense pressure on these ecosystems, leading to habitat destruction, species extinction, and the disruption of critical ecological functions.

In Serbia, a country with remarkable biodiversity, the impact of human activities on ecosystems is particularly pronounced. The destruction of natural habitats, driven by urbanization and infrastructure projects, has put immense pressure on the country's plant and animal species. With over 2,400 plant species and 1,100 animal species classified as endangered, the need for conservation efforts is urgent [7].

Preserving biodiversity is essential for ensuring the continued functioning of ecosystems and the services they provide. Biodiverse ecosystems are more resilient to environmental changes, such as climate change and natural disasters, as they contain a variety of species with different adaptations [2]. This resilience allows ecosystems to recover more quickly from disturbances, maintaining their stability and functionality.

Furthermore, biodiversity conservation helps prevent the dominance of invasive species, which can disrupt ecosystems and threaten native species [4]. By preserving the natural balance of ecosystems, biodiversity conservation ensures the survival of species essential to the food chain and ecosystem functioning.

Overall, the preservation of biodiversity is crucial for maintaining the health and stability of ecosystems. It supports the continued provision of ecosystem services that are vital for human well-being, such as clean air and water, climate regulation, and food security. Through effective conservation efforts, we can protect and restore ecosystems, ensuring a sustainable future for generations to come.

2.2. Social and Economic Benefits

Biodiversity conservation not only preserves ecosystems but also brings about a range of social and economic benefits. These benefits encompass resilience against natural disasters, protection of cultural heritage, creation of green jobs, and reduction of healthcare costs.

One significant advantage of biodiversity conservation is its role in enhancing resilience to natural disasters and reducing associated costs. By maintaining natural habitats such as forests and wetlands, biodiversity conservation helps prevent floods, soil erosion, and coastal erosion. Coastal forests and marine algae, for example, act as natural barriers against erosion and hurricanes, providing cost-effective protection for coastal communities [8,9].

Cultural heritage and traditions are closely intertwined with biodiversity and the environment. Many societies have customs and practices that are deeply rooted in nature, and the preservation of biodiversity helps safeguard these cultural traditions. In Serbia, for instance, rural customs and traditions are directly linked to the environment and biodiversity. The preservation of these traditions not only maintains cultural identity but also contributes to the tourism industry, promoting sustainable cultural and eco-tourism.

Biodiversity conservation also contributes to the creation of green jobs, which are focused on preserving ecosystems and promoting sustainability. These jobs include roles in eco-tourism, organic agriculture,

natural resource management, ecosystem restoration, biodiversity research, and monitoring. According to the International Labour Organization (ILO), investments in nature and biodiversity conservation could create 24 million new jobs globally by 2030, providing economic opportunities while preserving the environment [10,11,12].

Furthermore, biodiversity provides essential health benefits to communities. Access to healthy food, medicinal plants, and green spaces improves mental and physical health, reducing the burden on healthcare systems. Green spaces in urban areas also help reduce air pollution, noise, and temperature, which can lower the risk of respiratory and cardiovascular diseases [5,13,14].

In conclusion, biodiversity conservation not only preserves ecosystems but also delivers a range of social and economic benefits. By enhancing resilience, protecting cultural heritage, creating green jobs, and improving health, biodiversity conservation plays a crucial role in sustainable development and human well-being.

2.3 Animal Rights Protection; Maintaining Balance in Nature; Ethics and Moral Reasons

Conserving biodiversity is not just about protecting ecosystems; it's also about respecting the rights of other species with which we share the planet. Infrastructure development can have detrimental effects on wildlife, disrupting ecosystems and leading to species endangerment or extinction. This dominance over nature has ethical implications, and many believe it is our moral obligation to preserve the environment for future generations. Protecting biodiversity is crucial for maintaining the balance of nature, as each species plays a unique role in the ecosystem. By recognizing and respecting the value of all life forms, we can contribute to a more sustainable and harmonious coexistence with the natural world.

3. ANALYSIS OF BIODIVERSITY CONSERVATION REQUIREMENTS

Analysis of Differences in Biodiversity Conservation Requirements between International Financial Institutions and the Legislation of the Republic of Serbia
In order to preserve natural resources and reduce the negative impact on biodiversity, International Financial Institutions (IFIs) such as the United Nations (UN), the World Bank (WB), the International Finance Corporation (IFC), the European Bank for Reconstruction and Development (EBRD), and others establish standards related to biodiversity conservation and adopt practices that align with these standards. While the legislation of the Republic of Serbia is largely in compliance with the requirements of these institutions, these standards are stricter in some areas and also cover a broader range of topics. For instance, while the legislation of the Republic of Serbia mainly focuses on the protection of flora and fauna, the standards of international financial institutions also clearly define habitat protection, ecosystem management, pollution prevention, and more. Therefore, the analysis of differences between the requirements of international financial institutions and the legislation of the Republic of Serbia regarding biodiversity conservation aims to identify disparities, shortcomings, and opportunities for improving Serbian legislation in terms of biodiversity conservation. By analyzing international standards and practices in relation to Serbian legislation, discrepancies can be pinpointed, and necessary changes can be identified to ensure alignment with international standards [7,10,15,16].

3.1 United Nations Environment Programme (UNEP)

The United Nations Environment Programme (UNEP) plays a crucial role in global biodiversity protection governance. The requirements set for biodiversity conservation primarily relate to promoting sustainable development and protecting natural resources. Their key requirements include promoting the sustainable use of natural resources, protecting endangered species and their habitats, preventing illegal wildlife trade, reducing the negative impact of human activities on the environment, and encouraging collaboration and partnerships to protect biodiversity globally. These requirements are outlined in several relevant documents, such as the Convention on Biological Diversity (CBD), the Global Biodiversity Outlook 2030, and several other documents related to environmental conservation [17,18,19].

3.2. The World Bank and Its Biodiversity Conservation Requirements

The Environmental and Social Framework (ESF) is the latest standard of the World Bank that addresses these E&S issues. This standard was adopted in 2016, replacing the previous safeguard policies. One of the key standards within the ESF is Standard 6, which pertains to biodiversity conservation, titled "Biodiversity

Conservation and Sustainable Management of Living Natural Resources." Standard 6 requires that projects financed by the World Bank establish systems and develop biodiversity management plans based on scientific and empirical data. Projects must address the conservation and sustainable management of living natural resources, including wildlife, plants, and entire ecosystems [20,21]. Key requirements set by this standard include the assessment and management of a project's impact on biodiversity, the establishment of biodiversity conservation objectives, the implementation of appropriate measures to achieve these objectives, and the planning and management of the use of living natural resources. Standard 6 also requires the identification, monitoring, and protection of endangered species and critical habitats. One of the goals should be a "net gain for Critical Habitat," meaning that the project should leave critical habitats in better condition than before the project started. Projects must align with biodiversity and ecosystem conservation goals and avoid negative impacts on natural habitats ("no net loss to Natural Habitat"). In cases where avoiding negative impacts is impossible, projects must adapt to reduce and mitigate those impacts and ensure a net gain for biodiversity. The World Bank also requires the involvement of local communities and stakeholder groups in project planning and implementation, especially in cases where projects affect habitats and resources used by these groups. Additionally, projects must be adapted to avoid and minimize potential negative impacts on cultural heritage and community rights [21,22].

3.3. IFC Biodiversity Conservation Requirements

The International Finance Corporation (IFC) has its own set of standards known as Performance Standards, which represent an international set of rules that the IFC applies to projects financed worldwide. Performance Standard 6 (Biodiversity Conservation and Sustainable Management of Living Natural Resources) is the standard that relates to biodiversity conservation and the sustainable management of living natural resources. IFC standards align with the World Bank's ESF standards when it comes to biodiversity protection requirements. Similar to the ESF, they require the preparation of a Biodiversity Baseline Study, Biodiversity Management Plan, and Biodiversity Action Plan, which we have already described in the previous section [10]. What IFC standards additionally provide are detailed guidelines for Performance Standard 6 (Guidance Note 6: Biodiversity Conservation and Sustainable Management of Living Natural Resources), offering guidance on the practical application of IFC Performance Standard 6. These guidelines comprehensively describe the process of planning and managing biodiversity and natural resources within a project and thoroughly discuss the key documents mentioned earlier. In addition to guidelines for preparing these documents, assessments, project activities, and plans, the document also offers guidance on monitoring and evaluation of project's impact on biodiversity [10].

3.4. EBRD Biodiversity Conservation Requirements

The European Bank for Reconstruction and Development (EBRD) is a financial institution that aims to support the development of countries in transition to market economies, including projects related to environmental protection and biodiversity. They are one of the most active financial institutions in our region. The EBRD Environmental and Social Policy from 2019 sets standards and guidelines that must be adhered to when implementing projects financed by the EBRD. The EBRD policy Includes Performance Requirement 6 (PR6–- Biodiversity Conservation and Sustainable Management of Living Natural Resources), which relates to biodiversity conservation and the sustainable management of natural resources, as well as the integration of these aspects into project planning and implementation. The key requirements outlined in this standard are very similar to the previously mentioned standards of the World Bank and IFC and include the need to assess the projec''s impact on biodiversity and ecosystems as part of the environmental impact assessment and identify measures for their protection and conservation, the requirement to comply with relevant laws, regulations, and international conventions on nature and biodiversity protection during project planning and implementation, the demand for active involvement of stakeholders in decision-making processes related to natural resource management and biodiversity protection, and the need to allocate resources for monitoring and reporting on the projec''s effects on biodiversity and ecosystems, as well as to take corrective measures in case of negative impacts [7]. It is important to note that EBRD Performance Requirement 6 goes further and provides more detailed definitions of certain aspects of biodiversity protection than the World Bank and IFC standards. One key difference is the introduction of the term “Priority biodiversity feature” (PBF), which represents a subset of biodiversity that is irreplaceable or vulnerable but of lower priority than critical habitats (CH). PBF includes endangered habitats, endangered species, significant biodiversity features identified by a wide range of stakeholders or governments, and the ecological structure and functions necessary for the conservation and sustainability of PBFs. In practice, EBRD Performance Requirement 6 does not use the concept of natural habitats but defines them through CHs and PBFs. In September 2022, EBRD issued an updated version of its guidance note on biodiversity protection (Guidance

Note 6: Biodiversity Conservation and Sustainable Management of Living Natural Resources), providing details on the application of EBRD Performance Requirement 6 in practice. The main objectives of this

Other international institutions, such as KfW, the European Investment Bank (EIB), and the International Labour Organization (ILO), also have stringent standards for biodiversity conservation, emphasizing the integration of environmental aspects into all project phases and the assessment of projects' impact on biodiversity and ecosystems [9,16,12].

4. CHALLENGES AND OPPORTUNITIES IN BIODIVERSITY CONSERVATION LEGISLATION: A SERBIAN PERSPECTIVE

Infrastructure projects in Serbia, often funded by international loans, must comply with stringent biodiversity conservation standards set by international financial institutions (IFIs). These standards, surpassing those of Serbian legislation, necessitate additional biodiversity impact assessments and plans. Failure to meet these standards leads to project delays, redesigns, and, at times, suspension. The disparity in requirements places investors and project implementers at a disadvantage, requiring adherence to stricter standards than locally financed projects. This disparity jeopardizes biodiversity preservation by overlooking best conservation practices.

Serbia faces challenges in data availability and quality for biodiversity assessments. Existing data is often outdated or insufficiently detailed, making it challenging to conduct thorough assessments. While Serbia has published Red Books listing species at risk, accessing these resources is cumbersome, hindering effective Environmental Impact Assessments (EIAs). Establishing a unified biodiversity database accessible online could streamline data access and improve assessment efficiency.

A shortage of experts with experience in addressing biodiversity impacts hampers Serbia's ability to meet international standards. While some professionals are adept at local legislation, they lack the expertise needed for projects requiring compliance with IFIs' standards. This leads to delays and compromises in the quality of biodiversity assessments, necessitating additional data collection and research.

Effective collaboration among stakeholders is crucial for integrating biodiversity protection into project designs. However, conflicting sectoral interests sometimes hinder this collaboration, resulting in suboptimal solutions. Aligning project designs with EIAs from the outset can minimize biodiversity impact and contribute to its preservation.

Misconceptions about the time and budget required for biodiversity assessments pose challenges. Project stakeholders often underestimate the duration and scope of research, leading to inadequate budget allocation. Proper planning and budgeting, considering the unique aspects of biodiversity research, are essential for ensuring effective conservation measures.

5. EXPERIENCE IN IMPLEMENTING INTERNATIONAL STANDARDS IN THE REPUBLIC OF SERBIA AND HUMAN RESOURCE CAPACITY

One of the significant challenges in implementing international standards for biodiversity conservation in Serbia is the limited number of experts with experience in addressing the impact of large infrastructure projects on biodiversity. While highly qualified professionals exist in Serbia with experience working according to local legislation, their numbers are insufficient for the current needs of infrastructure project development. This shortage often results in delays and fluctuations in the quality of biodiversity status analyses.

Additionally, infrastructure projects in Serbia often require compliance with international standards for biodiversity conservation, especially when they include international financing. Differences in biodiversity conservation approaches between international financial institutions (IFIs) and Serbia often lead to the need for additional biodiversity impact assessments and plans. This can result in project delays, cost overruns, and, in some cases, complete project suspension.

Moreover, the availability and quality of biodiversity data in Serbia are inadequate for conducting comprehensive impact assessments. Existing data is often outdated or insufficiently detailed, making it challenging to obtain accurate information on biodiversity status. This hinders the timely and efficient process of assessing the impact of projects on biodiversity.

Effective collaboration among stakeholders is crucial for integrating biodiversity protection into project designs. This includes involving experts from various disciplines, such as engineers, planners, and biodiversity conservationists, in the early stages of project planning. Constant communication and collaboration among sectors and disciplines are necessary to ensure that biodiversity conservation measures are adequately implemented.

There is often a lack of awareness among project stakeholders about the time and budget required for proper biodiversity impact assessment. This can lead to inadequate planning and allocation of resources, resulting in delays and increased costs.

Improving expertise and capacity, aligning requirements between Serbian legislation and international standards, enhancing data availability and quality, promoting intersectoral and interdisciplinary collaboration, raising awareness of time and budget needs, and improving planning for monitoring and supervision are crucial for addressing these challenges. By doing so, Serbia can enhance its biodiversity conservation efforts and ensure sustainable development of infrastructure projects.

6. THE ROLE OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN BIODIVERSITY CONSERVATION

Artificial Intelligence (AI) is revolutionizing biodiversity conservation efforts worldwide. By leveraging AI technologies such as deep learning, conservationists can analyze vast amounts of data, create accurate habitat maps, and predict species distributions more effectively than ever before. This chapter explores the various applications of AI in biodiversity conservation, highlighting real-life examples of its impact.

6.1. Habitat Mapping and Species Distribution

AI, particularly deep learning, plays a crucial role in habitat mapping and species distribution modeling. By analyzing satellite imagery, AI algorithms can identify and map habitats with high precision, even in remote or inaccessible areas. This technology enables conservationists to monitor changes in habitats over time, assess the impact of human activities, and prioritize areas for conservation efforts.

Real-life Example: Global Forest Watch uses AI to analyze satellite data and detect deforestation in real-time, helping to protect forests and biodiversity worldwide.

6.2. Species Identification and Monitoring

AI-powered tools are being used to identify species and monitor their populations more efficiently. By analyzing images and sounds collected from cameras and audio recorders placed in the field, AI algorithms can identify species, track their movements, and estimate population sizes.

Real-life Example: The Cornell Lab of Ornithology's eBird uses AI to identify bird species from audio recordings, helping researchers track bird populations and understand their behavior.

6.3. Predictive Modeling for Conservation Planning

AI can help predict how species and ecosystems will respond to environmental changes, allowing conservationists to develop more effective conservation strategies. By analyzing historical data and environmental variables, AI algorithms can forecast future trends and help prioritize conservation actions.

Real-life Example: Conservation International uses AI to predict how climate change will impact biodiversity hotspots, guiding conservation efforts to protect vulnerable species.

6.4. Combatting Illegal Wildlife Trafficking

AI is being used to combat illegal wildlife trafficking by analyzing data to identify patterns and track illegal activities. By monitoring online marketplaces, social media, and transportation networks, AI algorithms can help law enforcement agencies identify and intercept illegal wildlife shipments.

Real-life Example: The SMART (Spatial Monitoring and Reporting Tool) system uses AI to analyze data from anti-poaching patrols and identify poaching hotspots, helping to protect endangered species.

6.5. Enhancing Conservation Research and Monitoring

AI is revolutionizing conservation research and monitoring by enabling faster and more accurate data analysis. By automating tasks such as image and data processing, AI allows researchers to focus on data interpretation and decision-making.

Real-life Example: The Nature Conservancy uses AI to analyze data from acoustic sensors to monitor bat populations, helping to understand the impact of habitat changes on these important species.*

In conclusion, AI has the potential to transform biodiversity conservation by enabling more efficient and effective monitoring, research, and conservation planning. This is particularly relevant for countries like Serbia, where limited expertise, time, and budget often hinder comprehensive conservation efforts. By harnessing the power of AI, Serbia can overcome these challenges and better protect its rich biodiversity. AI technologies can help Serbian conservationists map habitats, monitor species, and plan conservation actions with greater precision and speed. This not only improves the effectiveness of conservation efforts but also reduces the time and resources needed for conservation projects. Overall, AI offers a promising pathway for Serbia to achieve its conservation goals and ensure a sustainable future for its biodiversity.

7. PROPOSED MITIGATION MEASURES FOR IDENTIFIED CHALLENGES

Sustainable development requires efficient and decisive action in biodiversity conservation, as biodiversity plays a crucial role in maintaining ecosystem stability, ensuring the balance of economic, ecological, and social well-being. Therefore, recognizing and effectively addressing the aforementioned challenges are of paramount importance to ensure that infrastructure projects in Serbia do not jeopardize biodiversity but contribute to its preservation. This being said, we will now propose a framework of measures that the authors of this paper see fit for overcoming the identified differences. These measures can lead to achieving a better balance between the development of infrastructure projects and biodiversity conservation [3,14].

7.1. Measures that could lead to overcoming the differences in requirements between Serbian Legislation and International Institutions

In line with the analysis presented earlier in the text, the authors propose the implementation of the following measures to reduce and eventually bridge the differences:

- Harmonization of domestic legislation with international standards and clear definition of biodiversity conservation requirements within national laws and regulations.
- Development of new legal frameworks and guidelines to more effectively regulate biodiversity protection [8,20].
- Development of additional detailed guidelines and instructions for investors and contractors, aimed at precisely defining the procedures that investors should follow to meet biodiversity conservation requirements. These guidelines should cover all relevant aspects, including procedures for collecting baseline biodiversity data, impact assessments, biodiversity management plan development, ecological damage compensation, and other relevant steps [17].

Such alignment would lead to creating a clear legal framework for biodiversity protection in Serbia, improve transparency, and facilitate the assessment of biodiversity impact during project implementation. Furthermore, these measures could contribute to precisely defining the procedures that investors should follow to meet biodiversity conservation requirements, set criteria for identifying critical and protected habitats, priority biodiversity features, protected species, and enable efficient planning and implementation of protective measures.

7.2. Measures related to Availability and Quality of Biodiversity Data in the Republic of Serbia

We have previously presented challenges related to this topic, which hinder the timely and efficient process of assessing the status of the biodiversity features and subsequently, the impact on those. The proposed measures are just some of the possibilities:

- Planned investments from the government in the projects related to biodiversity status determination in areas designated for infrastructure (and other) project development.
- Encouragement of investors to finance the determination of the status of biodiversity in areas planned for infrastructure (and other) projects.

• Establishment of a unified biodiversity status database, which would contain all relevant data in one place and be regularly renewed with up to date data. The premise here is a clear obligation for investors and state institutions to incorporate research data into a unified digital format, as well as to publicly disclose all collected data and provide easy access to all interested parties.

The proposed measures would lead to improvements in available desktop, i.e., input data on biodiversity status, necessary to serve as a basis for further detailed analysis and assessments. This would potentially lead to shorter field research times due to the availability of up-to-date initial data to complement the collected on-site baseline information.

Proper budget planning, both at the project and state levels, can ensure the allocation of necessary funds for biodiversity research. Effective implementation of these measures and addressing these challenges require good collaboration among relevant stakeholders, including government institutions, investors, international institutions and funds, as well as non-governmental organizations, to identify and leverage available sources of funding. The use of available international funds can potentially represent a significant step toward increasing financial resources for biodiversity conservation in Serbia and contribute to more efficient compliance with requirements in this field [19,20,21].

7.3. Experience with the Implementation of International Standards in the Republic of Serbia and Human Resources Capacities

The following measures have been recognized as having the potential to help overcome a lack of sufficient experience in implementation of IFI standards in national projects:

• Alignment of educational programs to ensure a better understanding of biodiversity in all sectors that can have an impact on biodiversity conservation.

• Inclusion of relevant international standards and guidelines into educational programs, and linking and integration of biodiversity conservation requirements with traditional engineering standards and approaches.

• Educating investors about the specifics of biodiversity in the Republic of Serbia, thereby raising their awareness of its baseline status and related potential impacts.

These training programs should be dedicated to various stakeholders and participants in project-related processes, including relevant universities, investors, contractors, relevant state agencies, institutes, non-governmental organizations, and others involved in processes related to the construction of infrastructure (and other) projects and biodiversity conservation processes. Training and education can include university programs, workshops, seminars, public campaigns, and other forms of information dissemination and education. It is crucial to provide access to relevant information and resources to promote awareness of the need to achieve the balance between the development of infrastructure projects and biodiversity conservation [19,11,20].

7.4. Measures to Improve Intersectoral and Interdisciplinary Collaboration

To improve intersectoral and interdisciplinary collaboration, it is first necessary to raise awareness of the cause-and-effect relationship between the development of infrastructure projects and biodiversity conservation. All recommendations given in previous chapters i.e. education and awareness-raising of stakeholders, consultation and collaboration among different disciplines involved in the project and inclusion of experts of various roles and backgrounds in planning and decision-making processes, are relevant for overcoming said challenge. In addition, the implementation of the following measures is recommended:

• Inclusion of biodiversity conservation experts in project development teams from the earliest stages of project planning.

• Ensuring the early involvement of relevant institutions and stakeholders in project planning and development.

• Ensuring constant iterative communication and collaboration among different disciplines (teams) involved in project preparation to adequately implement all necessary solutions.

• Conducting an Impact Assessment Study as early as possible in the project cycle, in parallel with project design (defining project solutions) to achieve incorporation of biodiversity conservation measures in the early stage of project design, where it is possible to eliminate, replace, and reduce impacts long before the start of construction and operation phases, and achieve optimal project solutions that will maximize biodiversity conservation and enhancement.

As mentioned earlier, experience has shown that it is not always possible to reconcile the requirements of all disciplines, which further emphasizes the importance of interdisciplinary collaboration to find compromise solutions based on integrative risk and impact analysis.

7.5. Improving Planning for Monitoring and Supervision

As previously mentioned, the lack of monitoring and supervision activities to confirm the actual level of impact and track the implementation of planned measures and their effectiveness, often results from differences in approaches between national legislation and international standards, as well as the lack of time and budget planning for these activities. Therefore, the previously recommended measures are applicable and valid when it comes to this topic. Additionally, the following measures are proposed:

- Inclusion of clear activities related to monitoring and supervision in the time and budget planning during the construction and operation phases of the project.
- Ensuring that these activities involve the sufficient number of experts with the adequate experience in biodiversity conservation, with a clear obligation to collect necessary data and report on implementation and impacts during construction and operation at regular intervals.
- Allocating adequate time and financial resources for monitoring and record keeping.

These recommendations should contribute to confirming real impacts and identification of new, unforeseen ones, and the monitoring of the effectiveness of planned measures. Based on this, if necessary, timely revision and adaptation of existing plans and measures can be carried out, all with the aim of achieving maximum results in biodiversity conservation.

8. CONCLUSION

Achieving a balance between developing infrastructure and preserving biodiversity is a major challenge today. However, biodiversity conservation is not a barrier to development but a path to sustainable solutions that bring long-term benefits.

This paper has highlighted many challenges in finding this balance, especially in developing countries like Serbia. Obstacles include a lack of alignment with international standards, inadequate biodiversity baseline data, insufficient capacity, expertise, and experience among project stakeholders, poor collaboration across sectors and disciplines, and a lack of awareness of the time and budget requirements for biodiversity protection throughout all project phases, including monitoring and supervision.

Addressing these challenges requires integrated approaches, improved communication between sectors, regular updating of biodiversity information, and promoting awareness and education about biodiversity's importance across all sectors. The key is to establish mechanisms to ensure adequate expertise, time, and financial resources for proper biodiversity conservation in infrastructure projects. This would facilitate sustainable infrastructure development models that allow Serbia to benefit from infrastructure projects while preserving the environment and biodiversity in these areas.

The journey to harmonize infrastructure development and biodiversity conservation in contexts like Serbia has highlighted several key challenges. It is important to acknowledge the limitations of this study. Its focus on Serbia may limit broader generalization, and the identified obstacles may not encompass all the issues encountered in such endeavors. The study aims to highlight issues rather than provide comprehensive solutions. Constraints such as data quality and availability, as well as the need for detailed methodologies for interdisciplinary collaboration, should be addressed in future research.

Future research should focus on formulating adaptable solutions tailored to individual contexts and regions. This includes enhancing capacity and expertise among stakeholders, fostering interdisciplinary collaboration, and establishing mechanisms for efficient biodiversity conservation in infrastructure projects. Research should explore case-specific applications and strategies, acknowledging international standards while recognizing local nuances. Moreover, there is a need to explore the potential for sustainable infrastructure models and quantify their economic and environmental benefits. In practical terms, the insights from this study should guide policymakers and practitioners in Serbia and beyond to allocate adequate resources and time for biodiversity conservation in infrastructure development.

In the coming years, sustainable development and environmental conservation will be critical considerations for investment and project implementation. Effectively addressing challenges in implementing biodiversity conservation requirements is essential to balancing economic activities and progress with biodiversity protection. Biodiversity is not a luxury; it is an irreplaceable resource that provides clean air, water, food, and medicine. By preserving biodiversity, we are also preserving our own well-being. This paper aims to raise awareness of this crucial issue and call for action, education, and collaborative efforts across sectors and disciplines to protect biodiversity while building a better future for all. Achieving a balance between

infrastructure development and biodiversity conservation is not just a moral responsibility but also an investment in the planet's future.

References

[1] Brundtland Commission. 1987. Our Common Future. Oxford University Press.

[2] Cardinale, B. J., Duffy, J. E., Gonzalez, A., Hooper, D. U., Perrings, C., Venail, P. & Naeem, S. (2012). Biodiversity loss and its impact on humanity. Nature, 486(7401), 59-67.

[3] CBD. (1992). Convention on Biological Diversity. Retrieved from [https://www.cbd.int/convention/text/]

[4] Convention on Biological Diversity (CBD). (2005). Invasive Alien Species. Retrieved from [link]

[5] Costanza, R., et al. (1997). The value of the world's ecosystem services and natural capital. Nature, 387(6630), 253-260.

[6] Daily, G. C. (1997). Nature's services: Societal dependence on natural ecosystems. Island Press.

[7] EBRD. (2019). Environmental and Social Policy. European Bank for Reconstruction and Development. Retrieved from [https://www.ebrd.com/cs/Satellite?c=Content&cid=1395253540041&pagename=EBRD%2FContent%2FDownloadDocument]

[8] EBRD. (2022). Guidance Note 6: Biodiversity Conservation and Sustainable Management of Living Natural Resources. European Bank for Reconstruction and Development. Retrieved from [https://www.ebrd.com/cs/Satellite?c=Content&cid=1395253540041&pagename=EBRD%2FContent%2FDownloadDocument]

[9] Equator Principles Association. (2019). The Equator Principles. Retrieved from [https://equator-principles.com/]

[10] IFC. (2012). Performance Standard 6: Biodiversity Conservation and Sustainable Management of Living Natural Resources. International Finance Corporation. Retrieved from [https://www.ifc.org/wps/wcm/connect/8e945680487a06d3b0c6fe2a6515c5bb/IFC_Performance_Standard_6_Biodiversity_Conservation_and_Sustainable_Management_of_Living_Natural_Resources.pdf?MOD=AJPERES&CVID=lN08Tl7]

[11] IFC. (2019). Guidance Note 6: Biodiversity Conservation and Sustainable Management of Living Natural Resources. International Finance Corporation. Retrieved from [https://www.ifc.org/wps/wcm/connect/6112b48049d8411b89a2ff16d0818e65/Final+-+IFC+Performance+Standard+6+(IFC+PS+6)+and+Guidance+Note.pdf?MOD=AJPERES&CVID=lN1-RZ5]

[12] ILO. (2020). World Employment and Social Outlook: Trends 2020. International Labour Organization.

[13] McFarland, K., et al. (2010). Green infrastructure: Smart conservation for the 21st century. Renewable Resources Journal, 28(4), 6-11.

[14] Millennium Ecosystem Assessment. (2005). Ecosystems and Human Well-being: Biodiversity Synthesis. World Resources Institute, Washington, DC.

[15] Ministry of Environmental Protection of the Republic of Serbia. (2020). Report on Environmental Conditions in the Republic of Serbia for the period 2016-2020.

[16] Sala, O. E., et al. (2000). Global biodiversity scenarios for the year 2100. Science, 287(5459), 1770-1774.

[17] Secretariat of the Convention on Biological Diversity. (2010). Global Biodiversity Outlook 3. Montreal, Canada: Secretariat of the Convention on Biological Diversity.

[18] Shanahan, D. F., et al. (2016). Health benefits from nature experiences depend on dose. Scientific reports, 6, 28551.

[19] The Nature Conservancy. (2018). Benefits of Floodplains and Wetlands. Retrieved from [https://www.nature.org/en-us/what-we-do/our-priorities/protect-water-and-land/land-and-water-stories/benefits-of-healthy-floodplains/]

[20] UN Environment Programme. (2021). About UNEP. United Nations Environment Programme. Retrieved from [https://www.unep.org/about-un-environment-programme]

[21] World Bank. (2016). Environmental and Social Framework. World Bank Group. Retrieved from [https://www.worldbank.org/en/projects-operations/environmental-and-social-framework/brief/environmental-and-social-framework]

[22] World Bank. (2018). Biodiversity Conservation and Sustainable Management of Living Natural Resources. World Bank Group. Retrieved from [https://www.worldbank.org/en/topic/environment/brief/biodiversity-conservation-and-sustainable-management-of-living-natural-resources]

ENVIRONMENTAL LIFE CYCLE ASSESSMENT OF SUSTAINABLE SOLUTIONS FOR ROAD ASPHALT PAVEMENTS

Cristina Oreto[1,2], Rosa Veropalumbo[1], Nunzio Viscione[1], Francesca Russo[1]
[1] Roads Laboratory Luigi Tocchetti, Department of Civil, Construction and Environmental Engineering, Università degli Studi di Napoli Federico II, Via Claudio 21, Naples 80125, Italy.

Abstract: *As new environmentally-sound asphalt concrete production technologies are becoming more and more widespread, their practical application is still hindered by the lack of proper environmental sustainability criteria into the design and maintenance of asphalt road pavements.*
The present work focused on the quantification of a set of impact indicators through a comprehensive environmental life cycle assessment, according to a "from cradle to grave" approach, of two alternative asphalt pavement solutions containing high percentage of reclaimed asphalt pavement incorporated through hot or cold in-place recycling technologies into the binder and base layers, versus a conventional one.
The results showed that 50% RAP recycling into the binder and base layers achieved on average 18% reduction of the global warming, terrestrial ecotoxicity, particulate matter formation and fossil resource scarcity indicators compared to the conventional 100% virgin solution; nevertheless, the same indicators lowered up to 54% when a cold in-place recycling of the base layer coupled with a hot recycled binder layer was adopted.
A sensitivity analysis was conducted to detect the influence of the service life of both the binder and base layers on the outcome of life cycle assessment in terms of global warming indicator. The results highlighted that the alternative solutions have better environmental performance than the conventional one if the service life is greater than 4 years, for the hot recycled binder layer, and 12 years, for the cold base layer.
The study allowed the quantification of some environmental indicators and the identification of the most-sustainable asphalt paving alternative with consideration of a key aspect for life cycle assessments that is the service life.

Keywords: *LCA, sustainable roads, alternative materials, cold recycling.*

1. INTRODUCTION

A major challenge for the industrial sector of asphalt pavements is to build roads that are, at the same time, environmentally sustainable (i.e. minimize their environmental impact) and resilient (i.e. durable). Such goals can be achieved through the proper mix design of asphalt concrete materials, applying the principles of circular economy and conservation of energy, with concern of the durability and environmental impact of the life cycle of the asphalt pavement, including minimizing maintenance activities within a predetermined analysis period.
Nevertheless, the transition from a linear to a circular economy requires to gain new value from waste transformed into secondary materials without negatively affecting the mechanical performance and service life of the resulting products. Researchers have long-way studied road pavement solutions fabricated by mixing various components (including aggregates, bitumen, and fillers) at 170–180 °C, and containing secondary raw materials reused, i.e. Reclaimed Asphalt Pavement (RAP), or recycled, like recycled concrete aggregates [1], construction and demolition waste [2], steel slag aggregates [3], fly ash [4], red mud waste [5], foundry waste sand [6], crumb rubber powder [7], glass powder waste [8], and plastic waste [9] in substitution of natural aggregates and fillers.
Among the possible circularity paths, reusing the RAP from the milling or demolition of existing distressed asphalt pavements into hot asphalt mixtures has long been one of the most studied and applied; current challenges concern the increase of RAP content without significantly affect mixture performance towards rutting, fatigue and thermal distresses.
Mulatu et al. [10] explored the feasibility of introducing up to 65% RAP into a hot asphalt mixture through a Marshall mix design procedure; the results showed that the greater the RAP percentage, the lower the optimum bitumen content, the lower the need for virgin fresh bitumen in the final mixture. Nevertheless, the maximum RAP percentage to comply with the local technical specifications in terms of moisture resistance and Marshall stability was equal to 45%.
Izaks et al. [11] investigated the effect of RAP percentage between 30% and 50% into hot asphalt mixtures with neat bitumen; they showed that rutting performance improvement can be achieved with increasing RAP content, but a significant drop in the fatigue resistance is detected when the RAP percentage is equal to 50%.
The integration of sustainability principles into road pavement construction and maintenance practices also promotes the adoption of low-temperature production technologies, like cold in-place recycling of road asphalt pavements, to maximize secondary resources content and minimize non-renewable resource use and pollution from hot bitumen handling.

[2] Corresponding author: cristina.oreto@unina.it

For these reasons, research has long focused on the design and performance optimization of cold recycled mixtures produced in-plant or in-situ by adopting mass percentage of reclaimed asphalt pavement in the range between 50% and 100% [12].
Dash and Panda [13] explored the effect of different mix parameters on the performance of cold recycled mixtures in terms of Marshall stability. In absence of RAP, cold mixtures reached the Marshall stability value of a typical hot mix asphalt when cement filler was adopted in percentage up to 2%.
Li et al. [14] found that the addition of cement reduced the phase angle of a cold mixture with 100% RAP and increased the elastic modulus, which resulted in higher temperature stability and less tendency to rutting distress. The same asphalt mixture was also compliant with the hot mix asphalt specifications in terms of indirect tensile strength and moisture resistance.
Cheng et al. [15] evaluated the fatigue resistance of a cold recycled mixture containing 81% RAP and compared that to a conventional hot mix asphalt through cores extracted from an in-service pavement. The results of the study showed that the drop in the initial stiffness modulus was sharper in the case of the hot mix asphalt compared to that of the cold mixture; as a whole, the mixtures showed very similar fatigue lines.
Owing to the significant environmental impact of road construction and maintenance works, life cycle assessment (LCA) was performed in several research works to compare alternative treatments [16, 17].
Bizarro et al. [18] explored the global warming indicator of several innovative technologies that maximize RAP content into hot asphalt mixtures for the binder and base layers according to a cradle to gate approach where the functional unit was 1 t of asphalt mix. They observed that the global warming indicator of hot asphalt mixtures with RAP percentage in the range between 30% and 55% ranged between 60 kg CO_2 eq./t and 40 kg CO_2 eq./t. A key limitation of the study, as expressed by the authors, was the assumption that all the mixes had the same durability, thus disregarding the environmental burdens associated with more frequent maintenance and rehabilitation activities.
Gu et al. [19], similarly, applied a cradle to place LCA to several cold asphalt mixtures, either produced in-plant or in-situ with foamed or emulsified bitumen versus a conventional hot mix asphalt. The analysis period was equal to 15 years. They found that cold in-place recycling had a greenhouse gas emission indicator equal to 20.5 kg/t, approximately 50% lower than that of the conventional hot mix asphalt. Although cold in-place recycled mixtures had lower service life towards the accumulation of ruts compared to the conventional hot mix asphalt, which resulted in 5 years shorter service life of the binder layer and consequently more frequent maintenance activities, this aspect was not accounted for in the LCA calculations.
Santos et al. [20], applied LCA methodology to a 5.9-km road segment to compare two different base layers with a thickness of 13 cm, which, in turn, were built with a traditional hot mix asphalt and a cold in-place recycled mixture with 100% RAP produced by milling the existing asphalt base layer. Both stratigraphies envisaged the same maintenance and rehabilitation treatments during the service life, and no additional considerations were made regarding the durability of the base layer. A climate change (CC) impact indicator was selected to express the contribution of CO_2, CH_4, and N_2O gases to the warming of Earth's climate due to human activities. The obtained results showed that the CC indicator of the cold solution was 81% lower than that of the conventional hot mix asphalt under the hypothesis of equal service life of the solutions.
Nevertheless, when approaching innovative solutions, the LCA should be conducted with particular concern of the service life of the specific layer or the pavement as a whole. Specifically, alternative paving solutions could have higher production-related impacts compared to a conventional alternative but, due to lower maintenance frequency and longer service life, lower impacts over its complete life cycle. In that case, a LCA that assumes that both alternatives have the same maintenance frequency would miss the benefits of the innovative material and there would be little incentive to use and develop such innovative materials in road engineering [21].
In this context, this research develops a methodological framework for selecting the most environmentally-sound design solution for a road asphalt pavement where reclaimed asphalt pavement is reused as substitute for natural resources according to both hot and cold recycling technologies; the LCA methodology is applied to three alternative paving solutions where the binder and base layers incorporate reclaimed asphalt pavement in percentage between 50% and 75%, with specific consideration of the maintenance frequency of the asphalt layers during a 30 years analysis period. A sensitivity analysis on the outcome of the LCA in terms of the global warming indicator was performed by varying the service life of the binder and base layers produced with innovative technologies.

2. Life cycle assessment

The LCA methodology was applied to measure the environmental impact of the production, construction, maintenance and end-of-life stages of the designed pavement solutions. The international standard ISO 14040 sets the methodological framework of LCA, which involves three mandatory phases: 1) the goal and scope definition phase, which sets the motivation of the analysis, the reference functional unit and the system

boundary; 2) the life cycle inventory (LCI), which lists the data sources adopted for the quantification of the flows of materials and pollutants that stream in and out of the unit processes included in the system boundary; 3) the life cycle impact assessment (LCIA), which covers the selection of the impact categories and indicators and the characterization of the LCI results into the selected indicators.

2.1. Functional units

The present work focuses of the comparative analysis of 1 m^2 of asphalt pavement according to 3 different road asphalt pavement solutions under uniform design conditions (annual average daily traffic, traffic growth rate, subgrade bearing capacity, service temperature, service life etc.). In detail the 3 asphalt pavement solutions with 30 y design service life are as follows:

1) Solution 1: a conventional stratigraphy where the base (AC31.5_HMA), binder (AC16_HMA) and wearing course (AC12_HMA) are composed of HMA with a SBS-modified bitumen 45/80-70 penetration grade and natural limestone and basaltic aggregates. The thickness is equal to 3, 5 and 15 cm respectively for the wearing, binder and base layers;
2) Solution 2: a stratigraphy in which the wearing course is a conventional HMA with natural basaltic and limestone aggregates and a SBS-modified bitumen 45/80-70 penetration grade (AC12_HMA), while both the binder (AC16_HMA50RAP) and base layers (AC31.5_HMA50RAP) are HMAs with 50% RAP and a SBS-modified bitumen 40/100-90 penetration grade. The thickness is equal to 3, 5 and 15 cm respectively for the wearing, binder and base layers;
3) Solution 3: a stratigraphy in which the wearing course is a conventional HMA with natural basaltic and limestone aggregates and a SBS-modified bitumen 45/80-70 penetration grade (AC12_HMA), the binder layer is a HMA with 50% RAP and a SBS-modified bitumen 40/100-90 penetration grade (AC16_HMA50RAP), and the base layer is a CMA produced directly in the construction site with 75% RAP, 25% natural limestone aggregates, bitumen emulsion, cement and water (AC31.5_CMA). The thickness is equal to 3, 5 and 20 cm respectively for the wearing, binder and base layers.

The mass of materials needed to build 1 m^2 of asphalt pavement with the 3 solutions under analysis is shown in Table 1.

Table 1. *Tonnes of raw materials needed to build 1 m^2 of asphalt pavement with each of the 3 pavement solutions.*

Component (t/m^2)	**Solution 1** AC12_HMA - 3 cm AC16__HMA - 5 cm AC31.5_HMA - 15 cm	**Solution 2** AC12_HMA - 3 cm AC16__HMA50RAP - 5 cm AC31.5_HMA50RAP - 15 cm	**Solution 3** AC12_HMA - 3 cm AC16__HMA50RAP - 5 cm AC31.5_CMA75RAP 20 cm
Basalt 6/12 mm	0.0264	0.0264	0.0264
Basalt 3/6 mm	0.0139	0.0139	0.0139
Limestone 16/31.5 mm	0.1653	0.1125	0.0839
Limestone 10/20 mm	0.0292	0.0315	0.0315
Limestone 6/12 mm	0.1088	0.0093	0.0093
Limestone 3/6 mm	0.0176	0	0
Limestone sand	0.1573	0.0847	0.0425
Limestone filler	0.0194	0.0253	0.0202
RAP	0	0.2432	0.3603
PMB 45/80-70	0.0257	0.0040	0.0040
PMB 40/100-90	0	0.0126	0.0036
Bitumen emulsion	0	0	0.0210
Cement	0	0	0.0044
Water	0	0	0.0170

The solution 1 is the typical asphalt pavement stratigraphy adopted by the reference road managing authority of the Metropolitan city of Naples for extra-urban roads with 1 million ESALs expected in 30 y service.
The maintenance program envisages the following activities and timing: the wearing course is milled and replaced every 5 years to restore the surface roughness, while the binder layer is milled and replaced with the same material every 10 years to resolve any rutting distress and/or thermal cracks.
At the end of the 30 y analysis period, the whole asphalt pavement is milled and replaced with a new stratigraphy, and the RAP is either reused in place and/or transported to the asphalt plant and stockpiled for future reuse.
The solution 2 and solution 3 are designed to achieve the same durability as solution 1, but due to the uncertainty of service life predictions when it comes to innovative solutions incorporating high percentage of secondary raw materials, a sensitivity analysis on the service life of both the binder and base layers has been performed to broaden the interpretation of the LCA results.

2.2. System boundary and life cycle inventory

The LCI phase involves the collection of data for the modelling of the input and output flows exchanged between the processes included in the system boundary and the environment. The functional unit of the analysis is 1 m^2 of asphalt pavement (wearing, binder and base layers) built in turn with the 3 above-mentioned paving solutions across an analysis period of 30 y, which is the reference useful life of conventional solution 1.
The Life cycle assessment was here applied according to a “cradle to grave” approach; the processes of the life cycle framed within the system boundary are shown in Figure 1 a, b and c respectively for the solution 1, 2 and 3. A thorough description of the main processes of the life cycle is as follows:

- production of primary resources: minerals (limestone and basalt) are initially mined and transported to the aggregates production plant, crushed and sieved into different sizes, loaded into flatbed trucks and transported to the asphalt plant (and eventually to the construction site for cold in-place recycling). The inventory data for the production on 1 kg of coarse limestone and basaltic aggregates were gathered from Ecoinvent 3 database [22]. Polymer modified bitumens and modified bitumen emulsion were produced from the extracted and refined crude oil according to the inventory processes and flows shown in the Eurobitume inventory [23]. The data regarding the production of cement binder used to favor bitumen emulsion breakage and strengthen the cold asphalt were gathered from Ecoinvent 3 [22].
- production of hot asphalt mixture in the asphalt plant: the blending of hot asphalt mixtures (AC12_HMA, AC16_HMA, AC16_HMA50RAP and AC31.5_HMA50RAP) takes place within the asphalt plant; the main unit processes are: a) the handling of the aggregates stockpiled in the plant (with a diesel-powered wheel loader having a productivity equal to 60 m^3/h), b) the drying and heating of the aggregates (natural gas consumption equal to 8.79 m^3/t of asphalt mix), c) the high-temperature storage of bitumen and the blending of the asphalt mixture (electricity consumption equal to 4.37 kWh/t of asphalt mix).
- construction of the pavement: the hot asphalt layers are built using a paver and 2 rollers working in series with a global productivity that depends on the specific layer of the pavement (351 t/h for the wearing course, 205 t/h for the binder layer, 117 t/h for the base layer). Additionally, direct emissions to air equal to 40 mg/kg of PM10, 2 mg/kg of PM2.5 and 16 mg/kg of NMVOC were computed according to tier 2 emission factors published by the United States Environmental Protection Agency for the process “asphalt paving with hot mix asphalt”. The cold in-place recycling operations envisage mixing and compaction simultaneously in place using the RAP milled from the pavement surface and adding the natural aggregates, bitumen emulsion, cement and water. To do so, the train of machinery includes the following: a) 2 tanker trucks, respectively carrying the bitumen emulsion and water, b) a diesel-powered pulvimixer that blends the mixture components directly in place (productivity equal to 750 m^2/h), c) two large pneumatic tire rollers and a large vibratory steel wheel roller that provide the desired density (productivity of the three rollers in series equal to 141 t/h), d) a diesel-powered motor grader that smooths and prepares the surface before moving on with the construction (productivity equal to 540 m^2/h). The leftover reclaimed asphalt that is not recycled is transported to the asphalt plant and stockpiled for future reuse. The impacts from the construction, maintenance and operation of the construction machinery were gathered from Ecoinvent 3 [22].
- end-of-life: each asphalt pavement stratigraphy, once reached the end of the service life after 30 y, is demolished (through a milling machine with a productivity of 150 t/h), hauled to the asphalt plant and stockpiled for future reuse into asphalt mixtures or as a road embankment material. The impacts from the construction, maintenance and operation of the milling equipment were gathered from Ecoinvent 3 [22].
- transportation phases: solid raw materials, finished materials and waste were transported using flatbed trucks with capacity in the range [16;32], while liquid goods were hauled using tanker trucks with the same capacity. The diesel fuel consumption was assumed equal to 3.6 l/km with full capacity and 3.0 l/km with empty truck. In detail, the following distances were covered: 63 km (from the limestone crushing and sieving facility to the asphalt plant), 50 km (from the basalt crushing and sieving facility to the asphalt plant), 33 km (from the port to the asphalt plant), 20 km (from the asphalt plant to the construction site). Additionally, the bitumen was transported within tankers by sea across a distance equal to 240 nautical miles. The impacts from the construction, maintenance and operation of the transportation equipment were gathered from Ecoinvent 3 [22].

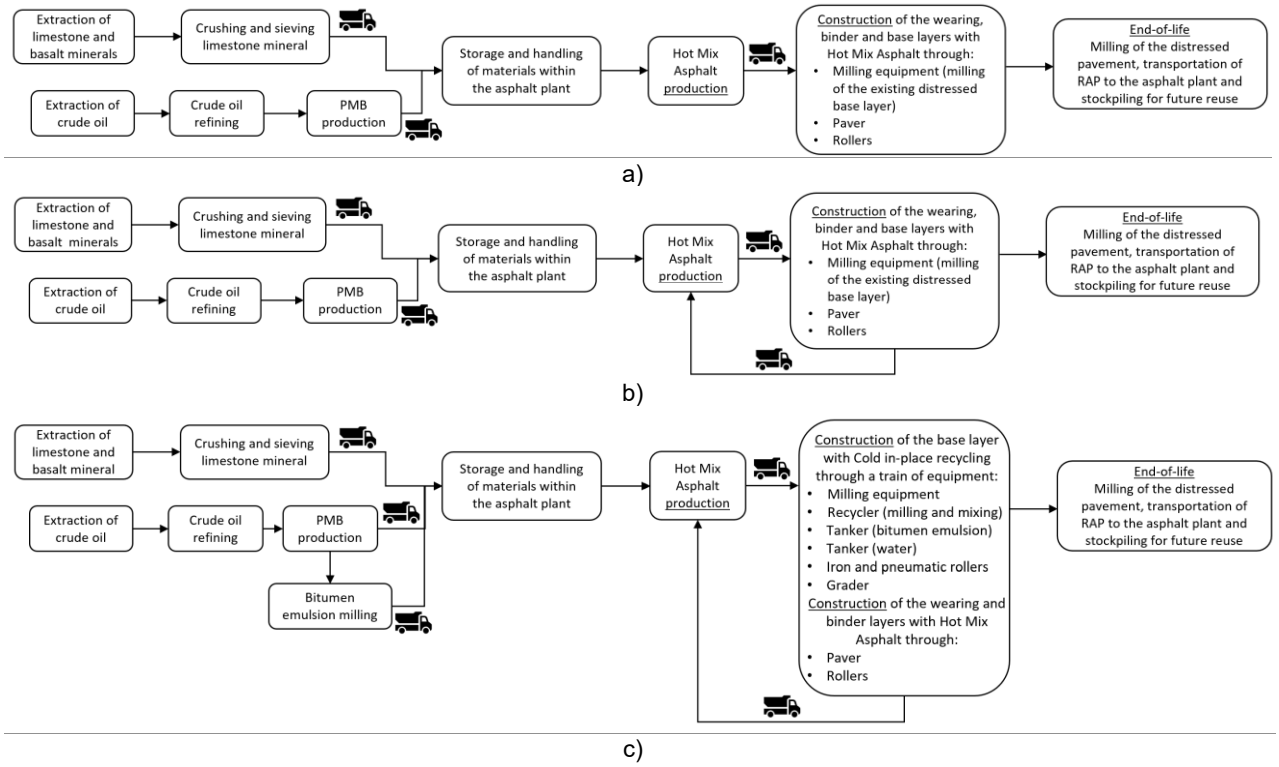


Figure 1. *Processes included in the system boundary of the life cycle assessment for: a) solution 1, b) solution 2 and c) solution 3.*

2.3. Life cycle impact assessment

The third mandatory phase of LCA is the life cycle impact assessment, where input and output flows are converted into understandable measures of specific environmental problems. In this study, the impact assessment of the 3 alternative pavement solutions was computed using SimaPro 9® software [24] according to the Hierarchical ReCiPe [25] impact assessment method. In detail, the 3 pavement solutions were compared basing on 4 midpoint impact indicators, namely the global warming (GW), expressed in kg CO_2 eq., the terrestrial ecotoxicity (TECO), expressed in kg 1,4-DCB eq., the particulate matter formation (PM), expressed in kg PM2.5 eq. and fossil resource scarcity (FR), expressed in kg oil eq.

3. RESULTS

The results of the LCA applied to the 3 solutions under analysis in terms of GW, TECO, PM and FR are shown respectively in Figure 2a, b, c and d. In the first instance, the analysis purposefully neglects the impacts from periodic maintenance, which are addressed separately with a dedicated analysis.

First of all, both the solution 2 and 3 entail lower environmental impacts compared to the conventional asphalt pavement, respectively lowering the environmental impact indicators on average by 18.3% and 52.7% compared to the traditional pavement (solution 1).

Looking at the GW indicator results, 1 m^2 of asphalt pavement built with the solution 1 accounts for 44.9 kg CO_2 eq., while the solution 2 and 3 respectively account for 36.8 and 18.2 kg CO_2 eq. The main contributor to the GW indicator for the solutions 1 and 2 is the asphalt mixture production stage (respectively accounting for 35.9% and 43.8%), while transportation is the main source of GW for the solution 3 (38.5%). Within the raw materials production stage, the main contributor to the GW indicator is the asphalt binder production (either polymer modified bitumen and bitumen emulsion), which accounts between 50% and 70% of its total value. Notably, the reduction of primary resources in the composition of the final pavement structure affects proportionally both the raw materials production and the transportation stages. The construction of the pavement structure where the base layer is recycled in place (solution 3) contributes to the emission of 1.7 kg CO_2 eq., 86% more than the emissions from construction for the solution 1 and 2 (0.90 kg CO_2 eq.) due to the greater number of operating machineries.

In terms of the TECO indicator, the emissions of dichlorobenzene equivalents result mainly from the heavy metals released from vehicular traffic linked to the transportation of raw and finished materials, as well as waste or recycled products. The greatest TECO indicator is that of solution 1, equal to 225 kg 1,4-DCB eq.; the solution 2 and 3 have respectively 22.3% and 50.7% lower TECO indicator. In the case of solution 1 and 2, which share a stratigraphy fully composed of hot asphalt mixtures, the life cycle of the base layer accounts on average for 64% of the whole TECO indicator; on the contrary, 41% of the TECO indicator of solution 3,

which features a cold in-place recycled base, is accountable to the production and transportation phases of the life cycle of the base layer.
The greatest and smallest impact indicator reduction is detected in correspondence of the PM indicator, which drops compared to that of solution 1 respectively by 4.7% and by 64.6% for solution 2 and 3. The main contribution to the PM indicator is the construction phase, and specifically the emissions from hot asphalt mixture handled and laid at approximately 150-160 °C, which are proportional to the mass of hot bitumen per square meter of built asphalt pavement, equal to 25.7, 16.6 and 7.6 kg/m^2 for solution 1, 2 and 3, respectively. The sharp drop of the PM indicator is therefore accountable to the adoption of a cleaner construction technology like cold in-place recycling.
Lastly, the FR indicator computes the consumption of fossil resources used both as fuels (oil, diesel, natural gas) and raw materials (bitumen), which alone contributes for approximately 60% of the FR indicator of the life cycle. The life cycle of 1 m^2 of asphalt pavement built with solution 1 requires 38.6 kg oil eq. in 30 y, while the adoption of alternative design configurations, namely solution 2 and 3, achieves respectively 28.3 and 65.5% FR reduction; this is due to the rejuvenation of the aged asphalt binder in the RAP reused in the binder and base layers, which lowers the amount of fresh bitumen in the hot asphalt mixtures (solution 2) and a combination of the previous with the adoption of an alternative asphalt binder, i.e. the bitumen emulsion, and the avoided consumption of natural gas and electricity when shifting from hot to cold asphalt mixture production.

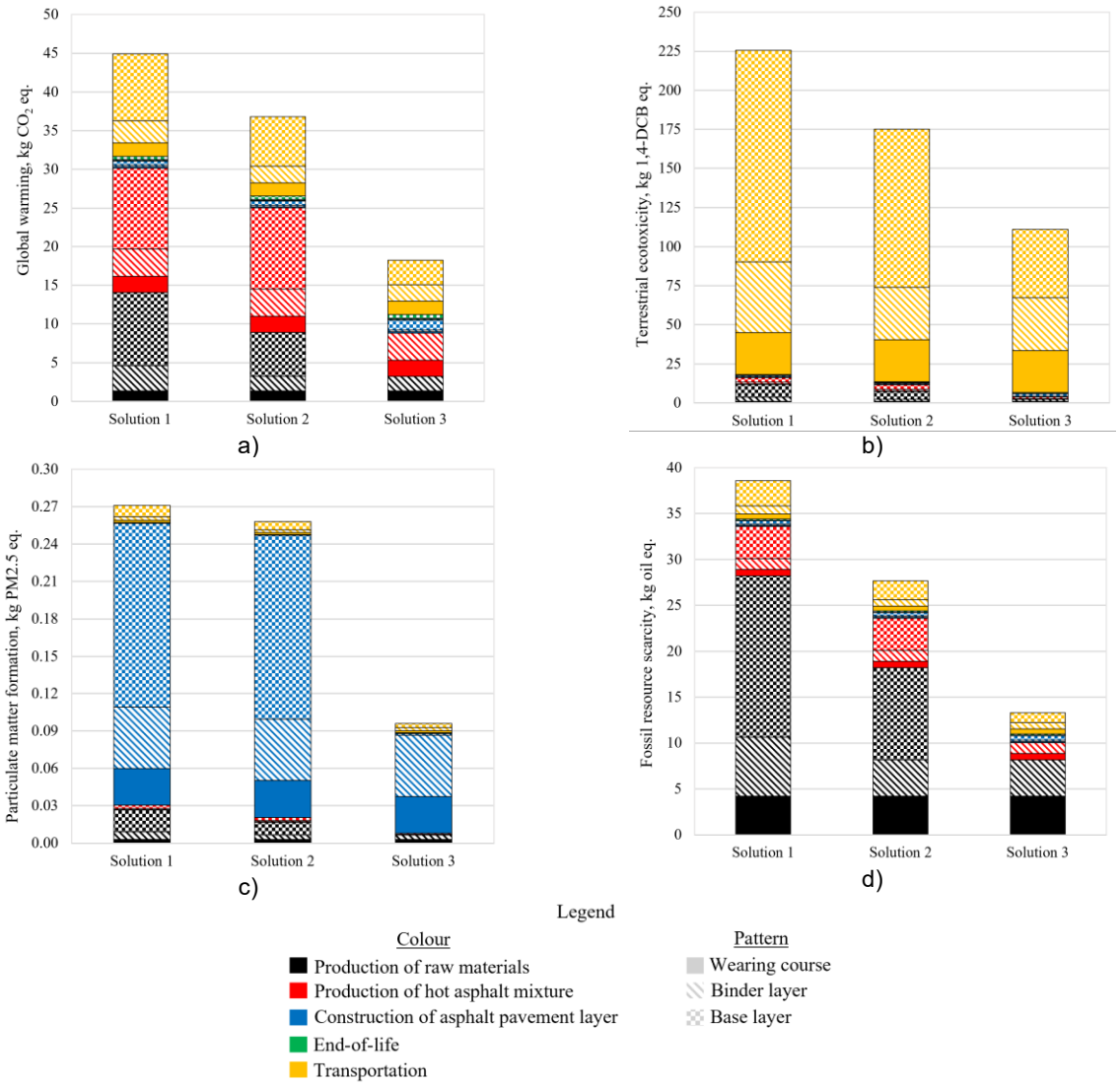
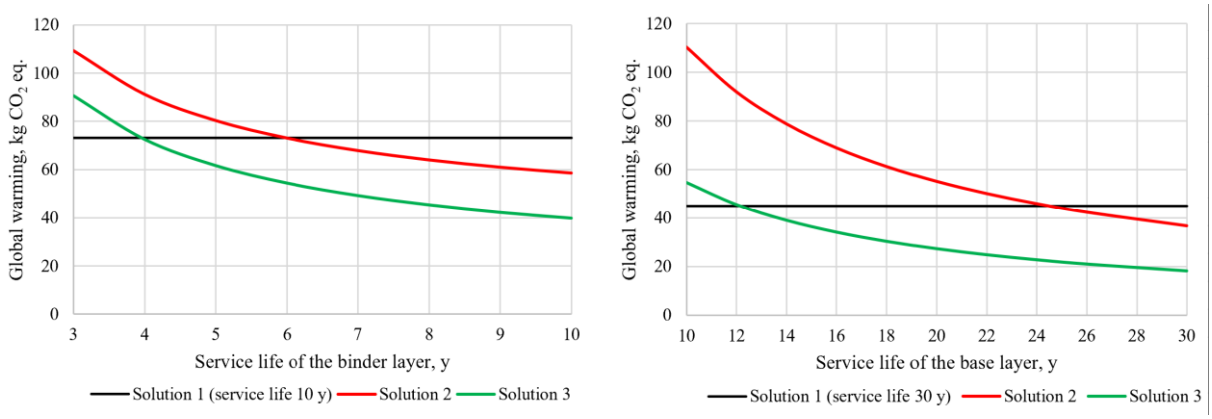


Figure 2. *Results of life cycle assessment for the 3 solutions under analysis in terms of: a) global warming, b) terrestrial ecotoxicity, c) particulate matter formation and d) fossil resource scarcity.*

Aiming to account for the uncertainty in the service life of innovative solutions and consequent timing of the maintenance actions in the LCA results, an environmental break-even point for the service life of both the

binder and base layers was calculated considering the GW indicator and referring to the concept of competitive equilibria between the solutions [26].
Looking at Figure 3a, it shows the value of the GW indicator of solution 2 and 3 when varying the number of years between subsequent replacement of the binder layer; the black line represents the GW indicator of solution 1, where the conventional maintenance timing applied by the road managing authority is considered. The underlining hypothesis is equal durability of the base layer (30 y). The results highlight that the minimum service life of the AC16_HMA50RAP needed to achieve at least equal environmental soundness compared to the conventional AC16_HMA is 6 years in the case of solution 2, and 4 years in the case of solution 3.
Considering the replacement of the base layer, Figure 3b shows the value of the GW indicator of solution 2 and 3 when varying the service life of the base layer; the black line represents the GW value of solution 1, where the base layer is replaced after 30 y from initial construction. The hypothesis is that the binder layer has the same service life for solution 1, 2 and 3. The results highlight that the minimum service life required to achieve the same environmental performance of the reference solution (AC31.5_HMA) equals 24 years, for the AC31.5_HMA50RAP, and equals 12 years for the AC31.5_CMA75RAP.



a) b)

Figure 3. *Global warming indicator as a function of the service life of a) the binder layer and b) the base layer. The black line is the global warming indicator of solution 1 according to the conventional frequency of maintenance.*

4. CONCLUSIONS

In conclusion, the present study focused on the application of an environmental life cycle assessment to some sustainable paving solutions alternative to the current approach of an Italian local road managing authority. In detail, the sustainable solutions involved some hot asphalt mixtures with high rate of RAP incorporation (50%) for the binder and base layers and a cold in-place recycled base layer with 75% RAP, bitumen emulsion, cement and water.
The alternative asphalt mixtures were placed into a realistic broad context, considering a conventional 3-cm thick wearing course, 5 cm-thick binder layers and a 15 or 20 cm-thick base layer according to the conventional stratigraphies put in place by the road managing authority to achieve 30 y design service life.
The results of the LCA in terms of global warming, terrestrial ecotoxicity, particulate matter formation and fossil resource scarcity indicators highlight that both the solutions involving either hot or cold RAP recycling techniques are environmentally beneficial compared to a conventional 100% virgin hot mix asphalt.
In detail, the solution in which 50% RAP is reused in the hot mix asphalts for the binder and base layer has respectively 18%, 22%, 5% and 28% lower global warming, terrestrial ecotoxicity, particulate matter formation and fossil resource scarcity indicators compared to those of the conventional one.
When a cold base layer is recycled in-place with 75% RAP content and combined with a hot recycled binder layer with 50% RAP, the same indicators further lower respectively by 50%, 36%, 63% and 52% compared to those of the hot recycled solution.
The environmental performance is also evaluated as a function of the service life of either the binder or base layer. The results confirm that the hot recycled binder layer is better than the conventional one as long as its service life is greater than 4 years (when coupled with a cold base layer) or 6 years (when coupled with a hot recycled base layer). The hot recycled base layer has equal or better environmental performance compared to that of the conventional base layer as long as its service life is greater than 24 years, while the cold base layer requires a service life equal or greater than 12 years to equalize or overcome the environmental performance of the conventional solution.

The study was intended to formalize and apply a comprehensive and objective evaluation process to promote the valorization of circular and energy-saving practices when designing and tendering road construction and maintenance works.

References

[1] Al-Bayati HKA, Tighe SL, Achebe J. 2018. Influence of recycled concrete aggregate on volumetric properties of hot mix asphalt. Resour Conserv Recy 130:200–214.
[2] Gedik, A. 2020. A review on the evaluation of the potential utilization of construction and demolition waste in hot mix asphalt pavements. Resour. Conserv. Recy., 161, 104956.
[3] Hasita, S., Rachan, R., Suddeepong, A., Horpibulsuk, S., Arulrajah, A., Mohammadinia, A., & Nazir, R. (2020). Performance improvement of asphalt concretes using steel slag as a replacement material. J. Mater. Civil Eng., 32(8), 04020227.
[4] Woszuk, A., Bandura, L., & Franus, W. 2019. Fly ash as low cost and environmentally friendly filler and its effect on the properties of mix asphalt. J. Clean. Prod., 235, 493-502.
[5] Zhang, J., Liu, S., Yao, Z., Wu, S., Jiang, H., Liang, M., & Qiao, Y. 2018. Environmental aspects and pavement properties of red mud waste as the replacement of mineral filler in asphalt mixture. Construction and Building Materials, 180, 605-613.
[6] Dyer, P.P., Lima, M.G., Klinsky, L.M.G., Silva, S.A., Coppio, G.J. 2018. Environmental characterization of Foundry Waste Sand (WFS) in hot mix asphalt (HMA) mixtures. Constr. Build. Mater. 171:474-484.
[7] Tahami, S. A., Mirhosseini, A. F., Dessouky, S., Mork, H., & Kavussi, A. (2019). The use of high content of fine crumb rubber in asphalt mixes using dry process. Constr. Build. Mater., 222, 643–653.
[8] Simone, A., Mazzotta, F., Eskandarsefat, S., Sangiorgi, C., Vignali, V., Lantieri, C., & Dondi, G. 2019. Experimental application of waste glass powder filler in recycled dense-graded asphalt mixtures. Road Mater. Pavement Des., 20(3), 592-607.
[9] Veropalumbo, R., Russo, F., Viscione, N., Biancardo, S. A., & Oreto, C. 2021. Investigating the rheological properties of hot bituminous mastics made up using plastic waste materials as filler. Construction and Building Materials, 270, 121394.
[10] Mulatu T, Yigezu B, Geremew A. 2021. Study on the suitability of reclaimed asphalt pavement aggregate (RAPA) in hot mix asphalt production. J Eng Res.
[11] Izaks R, Haritonovs V, Klasa I, Zaumanis M. 2015. Hot Mix Asphalt with High RAP Content. Procedia Eng 114:676–684.
[12] Liu, Z., Sun, L., Zhai, J., & Huang, W. 2022. A review of design methods for cold in-place recycling asphalt mixtures: Design processes, key parameters, and evaluation. Journal of Cleaner Production, 370, 133530.
[13] Dash, S.S., & Panda, M. 2018. Influence of mix parameters on design of cold bituminous mix. Constr. Build. Mater., 191, 376-385.
[14] Li, Y., Lyv, Y., Fan, L., & Zhang, Y. 2019. Effects of cement and emulsified asphalt on properties of mastics and 100% cold recycled asphalt mixtures. Mater., 12(5), 754.
[15] Cheng, H., Sun, L., Liu, L., & Li, H. 2018. Fatigue characteristics of in-service cold recycling mixture with asphalt emulsion and HMA mixture. Construction and Building Materials, 192, 704-714.
[16] Veropalumbo, R., Oreto, C., Viscione, N., Biancardo, S. A., & Russo, F. 2022. Environmental assessment of asphalt mastics containing plastic bottles and jet grouting waste. Environmental Impact Assessment Review, 93, 106736.
[17] Oreto, C., Veropalumbo, R., Viscione, N., Biancardo, S. A., Botte, M., & Russo, F. 2021. Integration of life cycle assessment into a decision support system for selecting sustainable road asphalt pavement mixtures prepared with waste. The International Journal of Life Cycle Assessment, 26, 2391-2407.
[18] Bizarro, D. E. G., Steinmann, Z., Nieuwenhuijse, I., Keijzer, E., & Hauck, M. 2021. Potential carbon footprint reduction for reclaimed asphalt pavement innovations: LCA methodology, best available technology, and near-future reduction potential. Sustainability, 13(3), 1382.
[19] Gu, F., Ma, W., West, R. C., Taylor, A. J., & Zhang, Y. 2019. Structural performance and sustainability assessment of cold central-plant and in-place recycled asphalt pavements: A case study. Journal of cleaner production, 208, 1513-1523.
[20] Santos, J., Bryce, J., Flintsch, G., Ferreira, A., & Diefenderfer, B. 2015. A life cycle assessment of in-place recycling and conventional pavement construction and maintenance practices. Structure and Infrastructure Engineering, 11(9), 1199-1217.
[21] Liljenström, C., Björklund, A., & Toller, S. 2022. Including maintenance in life cycle assessment of road and rail infrastructure—a literature review. The International Journal of Life Cycle Assessment, 27(2), 316-341.

[22] Wernet, G., Bauer, C., Steubing, B., Reinhard, J., Moreno-Ruiz, E., & Weidema, B. 2016. The ecoinvent database version 3 (part I): overview and methodology. The International Journal of Life Cycle Assessment, 21, 1218-1230.
[23] European Bitumen Association. 2021. Life cycle inventory: Bitumen, Version 3.1. European Bitumen Association, Brussels, Belgium.
[24] PRé Sustainability. 2023. Simapro 9.5. Available at http://www. simapro.com
[25] Huijbregts, M.A.J., Steinmann, Z.J.N., Elshout, P.M.F., Stam, G., Verones, F., Vieira, M., Zijp, M., Hollander, A., van Zelm, R., 2016. ReCiPe2016: a harmonized life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level. Int. J. LCA.
[26] Praticò, F. G., Perri, G., De Rose, M., & Vaiana, R. 2023. Comparing bio-binders, rubberised asphalts, and traditional pavement technologies. Construction and Building Materials, 400, 132813.