

НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ

Предмет: Реферат о урађеној докторској дисертацији кандидата Андрије Радовића

Одлуком бр. 339/13-21 од 22.05.2025. године именовани смо за чланове Комисије за преглед, оцену и одбрану докторске дисертације кандидата Андрије Радовића, маг. инж. грађ., под насловом:

**КОНСТРУКЦИЈСКИ БЕТОНИ СА РЕДУКОВАНИМ САДРЖАЈЕМ ЦЕМЕНТА И
ВЕЛИКИМ САДРЖАЈЕМ КРЕЧЊАЧКОГ БРАШНА**

Наслов на енглеском језику:

**STRUCTURAL CONCRETE WITH REDUCED CEMENT AND HIGH LIMESTONE
POWDER CONTENT**

После прегледа достављене дисертације и других пратећих материјала и разговора са кандидатом, Комисија је сачинила следећи

РЕФЕРАТ

1. УВОД

1.1.Хронологија одобравања и израде дисертације

На седници Већа Катедре за материјале и конструкције одржаној 09.09.2021. Андрија Радовић је јавно излагао предложену тему докторске дисертације под насловом „Конструкцијски бетони са редукованим садржајем цемента и великим садржајем кречњачког брашна” (на енглеском језику „Structural concrete with reduced cement and high limestone powder content“). Комисија у саставу проф. др Снежана Маринковић, проф. др Властимир Радоњанин (Факултет техничких наука, Универзитет у Новом Саду), в. проф. др Иван Игњатовић, в. проф. др Александар Савић и др Никола Тошић, MSCA Individual Fellow (Civil and Environmental Engineering Department, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona) је прихватила предложену тему.

Одлуком Наставно-научног већа Грађевинског факултета бр. 339/4 од 22.09.2021. године, одређена је Комисија за оцену научне заснованости теме докторске дисертације под насловом „Конструкцијски бетони са редукованим садржајем цемента и великим садржајем кречњачког брашна” (на енглеском језику „Structural concrete with reduced cement and high limestone powder content”) у саставу проф. др Снежана Маринковић, проф. др Властимир Радоњанин (Факултет техничких наука, Универзитет у Новом Саду), в. проф. др Иван Игњатовић, в. проф. др Александар Савић и др Никола Тошић, MSCA Individual Fellow (Civil and Environmental Engineering Department, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona). Позитиван извештај Комисије за оцену научне заснованости теме докторске дисертације усвојен је на седници Наставно-научног већа Грађевинског факултета одржаној 24.10.2021. године (одлука бр. 339/6 од 25.10.2021. године). Веће научних области грађевинско-

урбанистичких наука Универзитета у Београду на седници одржаној 02.11.2021. (одлука бр. 339/9 од 03.11.2021. године) усвојило је предлог теме докторске дисертације кандидата Андрије Радовића.

Кандидат је урађену докторску дисертацију предао Служби за студентска питања Грађевинског факултета 14.05.2025. године.

1.2. Научна област дисертације

Тема докторске дисертације припада научној области Грађевинарство и ужој научној области Бетонске конструкције која је дефинисана Статутом Грађевинског факултета Универзитета у Београду. За ментора дисертације одређена је др Снежана Маринковић, редовни професор Грађевинског факултета Универзитета у Београду.

Радови публиковани у међународним часописима који квалификују ментора проф. др Снежану Маринковић, за вођење докторске дисертације су:

1. Radović A., Carević V., **Marinković S.**, Plavšić J., Tešić K.: *Prediction model for calculation of the limestone powder concrete carbonation depth*, Journal of Building Engineering 86, 2024, 108776, <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.108776> [M21a]
2. Radović A., Hafez H., Tošić N., **Marinković S.**, de la Fuente A.: *ECO₂ framework assessment of limestone powder concrete slabs and columns*, Journal of Building Engineering 57, 2022, 104928, <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.104928> [M21a]
3. **Marinković S.**, Carević V., Dragaš J.: *The role of service life in Life Cycle Assessment of concrete structures*, Journal of Cleaner Production. 290, 2021, pp.125610, <https://10.1016/j.jclepro.2020.125610> [M21a]
4. Tošić N., de la Fuente A., **Marinković S.**: *Creep of recycled aggregate concrete: Experimental database and creep prediction model according to the fib Model Code 2010*, Construction and Building Materials. 195, 2019, pp.590-599. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.048> [M21a]
5. Tošić N., **Marinković S.**, Pecić N., Ignjatović I., Dragaš J.: *Long-term behaviour of reinforced beams made with natural or recycled aggregate concrete and high-volume fly ash concrete*, Construction and Building Materials, 176, 2018, pp.344-358, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.002> [M21a]

1.3. Биографски подаци о кандидату

Андрија Радовић, мастер инжењер грађевинарства, рођен је 23.10.1992. године у Косовској Митровици, где је завршио основну школу „Свети Сава” и средњу техничку школу „Михаило Петровић Алас”, смер грађевински техничар за високоградњу.

Трогодишње Основне академске студије на Факултету техничких наука Универзитета у Приштини – Грађевински одсек уписао је 2011. године, а завршио 2014. године са просечном оценом 9,08 и оценом 10 на завршном раду из области бетонских конструкција. Мастер академске студије на Факултету техничких наука Универзитета у Приштини – Грађевински одсек уписао је 2014. године, а завршио 2016. године на Модулу за конструкције са просечном оценом 9,95 и оценом 10 на дипломском – мастер раду из области бетонских конструкција.

Докторске академске студије уписао је на Грађевинском факултету Универзитета у Београду 2016. године на модулу Грађевинарство, где је положио све испите предвиђене студијским програмом са просечном оценом 9,75.

У току школовања и студирања више пута је награђиван стипендијама Министарства просвете, науке и технолошког развоја Републике Србије, Општине Косовска Митровица, Канцеларије за Косово и Метохију и Компаније Телеком Србија. Школске 2018/19 године добитник је награде „BW Exceptional“ као најбољи студент докторских студија Грађевинског факултета Универзитета у Београду.

Од јуна до новембра 2018. године ангажован је на пословима истраживача-приправника на Институту за материјале и конструкције Грађевинског факултета Универзитета у Београду.

Од новембра 2018. године ангажован је као асистент на Факултету техничких наука у Косовској Митровици, где је изводио вежбе на предметима из уже научне области Материјали и конструкције на студијским програмима Грађевинско инжењерство и Архитектура.

Као аутор и коаутор, до сада је публиковао 17 научних и стручних радова, од којих је пет индексирано на SCI/JCR листи, укључујући два рада публикована у међународним часописима изузетних вредности.

Био је ангажован на научно-истраживачком пројекту Министарства просвете, науке и технолошког развоја Републике Србије ТР 36017, под називом „Истраживање могућности примене отпадних и рециклираних материјала у бетонским композитима, са оценом утицаја на животну средину, у циљу промоције одрживог грађевинарства у Србији”.

Поседује активно знање енглеског језика. Користи компјутерске програме општег и стручног значаја као што су MS Office, Tower, ArmCAD, AutoCAD, IBM SPSS, Design Builder, као и вишенаменски програм за линеарну и нелинеарну анализу TNO DIANA.

Члан је следећих научних и стручних организација: The International Federation for Structural Concrete - fib (young members group), International Association for Life-Cycle Civil Engineering, Друштва грађевинских конструктора Србије, Српског удружења за земљотресно инжењерство, Савеза инжењера и техничара Србије, као и Удружења инжењера Србије за заштиту и корозију материјала.

2. ОПИС ДИСЕРТАЦИЈЕ

2.1. Садржај дисертације

Докторска дисертација Андрије Радовића под насловом „Конструкцијски бетони са редукованим садржајем цемента и великим садржајем кречњачког брашна” (на енглеском језику „Structural concrete with reduced cement and high limestone powder content”) садржи укупно 316 страна, од којих је основни текст на 277 страна. Дисертација је писана на српском језику и подељена је у шест поглавља:

1. Уводни део
2. Преглед литературе
3. Сопствени експериментални програм: приказ резултата, анализа и дискусија
4. Анализа и предлози модела за предикцију својстава бетона и понашања елемената при дуготрајном оптерећењу
5. Анализа животног циклуса и трошкова
6. Закључци и препоруке за будућа истраживања

Поред тога, дисертација садржи и следеће целине:

- Литература
- Прилог

Дисертација садржи 297 слика и 49 табела. Списак цитиране литературе садржи 226 наслова. На почетку дисертације је дат резиме на српском и енглеском језику, са кључним речима. Дисертација садржи један прилог. Биографија аутора дата је на крају дисертације.

Дисертација је технички обликована према упутствима Сената Универзитета у Београду и посебним упутствима за обликовање штампане и електронске верзије доктората. Садржи обавезна поглавља и обрасце: изјава о ауторству, изјава о истоветности електронске и штампане верзије и изјава о коришћењу.

2.2. Кратак приказ појединачних поглавља

Основни текст разматране докторске дисертације има шест поглавља, преглед коришћене литературе и један прилог. На почетку текста је дат садржај, изјава захвалности, апстракт и списак кључних речи на српском и енглеском језику.

Уводно поглавље представља свеобухватну позадину и предмет истраживања, у оквиру којег се образлажу разлози, потребе и практичан значај употребе кречњачког брашна у конструкцијским бетонима. Посебна пажња посвећена је актуелним еколошким проблемима који погађају бетонску индустрију, као и потреби за промоцијом одрживог развоја у читавом грађевинском сектору. Истакнута је и значајна улога детаљног познавања својстава материјала, као и њиховог утицаја на понашање елемената направљених од ове врсте еколошки прихватљивих бетона. На крају поглавља дефинисани су циљеви истраживања, описана примењена методологија и представљена организациона структура дисертације.

Друго поглавље обухвата критички преглед релевантне литературе и досадашњих истраживања у области примене кречњачког брашна у бетону. Упућује се на релеванте прописе који се односе на употребу кречњачког брашна у бетону, било као замене за клинкер или додатак у виду филера. У оквиру овог поглавља детаљно су приказани постојећи теоријски и емпиријски модели за прорачун кључних физичко-механичких својстава класичних цементних бетона, уз осврт на њихова ограничења и предложене адаптације за примену код бетона са високим садржајем кречњачког брашна. Разматрани су и модели који се баве реолошким својствима очврслог бетона, као и они који се односе на одређивање утица армирано-бетонских елемената. Посебно је анализиран утицај замене цемента овим минералним додатком на различита својства бетона која су од значаја за његову конструкцијску примену, као што су: обрадљивост свежег бетона, чврстоћа при притиску, чврстоће при затезању цепањем и савијањем, модул еластичности, продор воде под притиском, дејство мрза и соли за одмрзавање, пенетрација хлорида, карбонатизација, као и скупљање и течење бетона. На крају, издвојене су кључне спознаје, отворена питања и недовољно истражени аспекти, који представљају основ за формулисање циљева и методологије у наставку рада, као и за планирање сопственог експерименталног програма.

У поглављу „Сопствени експериментални програм: приказ резултата, анализа и дискусија“ детаљно је описан програм сопствених експерименталних испитивања, која су систематизована у оквиру три тематске целине. Након приказа својстава компонентних материјала, у првој фази акценат је стављен на пројектовање и одабир оптималних бетонских мешавина са великим садржајем кречњачког брашна. При томе су као главни критеријуми разматрани обрадљивост свеже мешавине и чврстоћа при притиску. Током ове фазе припремљено је и при различитим старостима тестирано, преко 180 бетонских мешавина са различитим уделом кречњачког брашна. Коришћена су четири типа кречњачког брашна истог хемијског састава, али различитог гранулометријског састава, док је маса цемента у односу на референтне мешавине сукцесивно умањена за 30%, 45%, 55% и 65%. У другој фази детаљно су испитана физичко-механичка својства десет пажљиво одабраних мешавина из претходне фазе. Поред класичних испитивања чврстоћа (притисак, затезање цепањем и савијањем) и модула еластичности, посебан нагласак стављен је на параметре трајности као што су продор воде под притиском, дејство мрза и соли за одмрзавање, пенетрација хлорида

и карбонатизација. Трећа целина обухвата анализу понашања армиранобетонских гредних носача под дуготрајним оптерећењем, с акцентом на величину угиба, као и испитивање реолошких својстава (скупљања и течења бетона). Детаљно је објашњен начин припреме гредних елемената и пратећих узорака, поступак њихове неге и начин испитивања. У оквиру овог дела изведена су три пара гредних елемената, две референтне греде од класичног бетона и четири од бетона са 45% замењеног цемента, што је омогућило упоредну анализу утицаја примене кречњачког брашна на понашање реалних конструктивних елемената.

Четврто поглавље „Анализа и предлози модела за предикцију својстава бетона и понашања елемената при дуготрајном оптерећењу“, поред претходног, представља централни део дисертације у коме се сопствени експериментални резултати проширују уношењем релевантних података из доступне литературе, чиме је формирана јединствена и свеобухватна база података. Управо та база представља полазну основу за верификацију постојећих прорачунских модела и предлагање модификација у циљу омогућавања њихове примене и на бетоне са великим садржајем кречњачког брашна. Најпре су детаљно анализирана основна механичка својства (чврстоћа при притиску, чврстоћа при затезању и модул еластичности) код бетона са различитим учешћем кречњачког брашна (до 75% укупне прашкасте компоненте). На основу свеобухватне и систематске анализе, уведен је фактор ефикасности (k) који омогућава квантификовање доприноса кречњачког брашна чврстоћи при притиску, за бетоне са различитим садржајем овог минералног додатка. Предложене су корекције постојећих модела за процену чврстоће при затезању класичних бетона, како би се омогућила њихова примена код бетона са великим уделом кречњачког брашна. Такође, приказани су поступци калибрације модела за процену модула еластичности, након чега је верификована њихова примена код бетона са редукованим садржајем цемента и великим садржајем кречњачког брашна. У другом делу поглавља, формулисане су везе природне и убрзане инверзне функције карбонатизационе отпорности, као и природне инверзне функције карбонатизационе отпорности и чврстоће при притиску. На основу ових релација, дате су препоруке у вези са минималним дебљинама заштитног слоја бетона код различитих садржаја кречњачког брашна, у условима корозије изазване карбонатизацијом. Завршни део овог поглавља анализирао је временски развој угиба гредних елемената под сталним оптерећењем, уз примену ригорозније методе нумеричке интеграције кривине. Поред тога, извршена је процена скупљања и течења бетона, као и калибрација модела коришћењем експериментално добијених података.

Пето поглавље „Анализа животног циклуса и трошкова“ доноси свеобухватну вишекритеријумску анализу одрживости бетона са кречњачким брашном, сагледану кроз техничке, економске и еколошке показатеље. У циљу реалне процене потенцијала примене ових бетона, извршена је анализа два типична конструктивна елемента (плоча и стубова), који се разликују по напонском стању и геометрији, чиме су формирана четири могућа сценарија. Оваквим приступом омогућено је сагледавање ефеката примене бетона са великим уделом кречњачког брашна у различитим инжењерским аспектима. Резултати добијени кроз интеграцију техничких карактеристика, финансијске оправданости и утицаја на животну средину указују на јасне еколошке предности ових бетона, као и на економску исплативост у појединим случајевима. Ово поглавље наглашава значај избалансираног приступа у примени алтернативних материјала, који не угрожавају техничке перформансе, а доприносе одрживом развоју грађевинског сектора.

Општи закључци овог истраживања, као и препоруке за будућа истраживања дати су у шестом поглављу.

Након списка литературе, у прилогу су приказане рецептуре бетонских мешавина испитаних у оквиру експерименталног дела ове дисертације.

3. ОЦЕНА ДИСЕРТАЦИЈЕ

3.1. Савременост и оригиналност

Вишедеценијска глобална промоција концепта одрживог развоја довела је до значајног подизања свести о негативним последицама људских активности по животну средину. Међу бројним привредним секторима, грађевинска индустрија се издваја као један од највећих потрошача природних ресурса и енергије, али и један од највећих загађивача. Бетонска индустрија, као окосница грађевинског сектора, носи посебно велики еколошки терет. Њен највећи негативни утицај на животну средину огледа се у производњи цемента, који представља основну везивну компоненту бетона. Процес производње цемента одговоран је за чак 7–10% укупне глобалне емисије CO₂ антропогеног порекла, при чему се већина остварује током декарбонизације кречњака и сагоревања фосилних горива. Истовремено, свет се суочава са сталним растом популације и урбанизације, што захтева све већу изградњу инфраструктуре и директно води ка порасту потражње за бетоном. Пројекције показују да би до 2050. године глобална производња бетона могла достићи чак 50 милијарди тона годишње.

У светлу ових изазова, бетонска индустрија пролази кроз фазу интензивне трансформације од традиционалног модела производње ка модернијем, ефикаснијем и одрживом концепту. Једна од економски најприступачнијих и технолошки најизводљивијих мера у правцу смањења еколошког отиска цемента јесте делимична замена клинкера јефтинијим и еколошки прихватљивијим материјалима. У том контексту, минерални додаци – филери, као што је кречњачко брашно, све више добијају на значају. Овај материјал је у Србији, али и широм света, лако доступан као комерцијални производ, што омогућава његову примену без потребе за значајним улагањима у нову опрему или измене постојећих технолошких процеса у производњи бетона и цемента. Савремени нормативи омогућавају замену до 35% клинкера кречњачким брашном, али у пракси та вредност на глобалном нивоу ретко прелази 6–7%, без јасне тенденције раста у последњој деценији.

Предмет ове докторске дисертације су управо бетони са редукованим садржајем цемента и великим садржајем кречњачког брашна, као потенцијално важна карика у правцу унапређења одрживости грађевинског сектора. Ипак, упркос потенцијалним техничким, економским и еколошким предностима, њихова шира практична примена у армиранобетонским конструкцијама тренутно није могућа из више разлога.

Пре свега, недовољан је број систематских и свеобухватних истраживања на нивоу материјала, која би омогућила дубље разумевање процеса који се одвијају током формирања структуре оваквих бетона, као и идентификацију кључних параметара који утичу на њихова својства. Иако су у литератури развијени бројни теоријски модели за повећање густине паковања, њихова примена често захтева специфичну лабораторијску опрему и велики број улазних параметара, који се морају емпиријски одредити за сваки појединачни случај, што значајно отежава примену у инжењерској пракси. Поред тога, не постоје довољно поуздани емпиријски изрази којима би се могли описати основни закони чврстоће ових бетона. То значи да није могуће у раним фазама пројектовања предвидети њихову чврстоћу на основу улазних података о саставу мешавине.

Недостају и поуздане релације између физичко-хемијских својстава кречњачког брашна, његове количине и гранулометријског састава, као и најбитнијих параметара мешавине (водо-цементни или водо-прашкasti фактори), с једне стране, и механичких својстава и параметара трајности бетона, с друге стране.

Поред ограничених података на нивоу материјала, у потпуности изостају истраживања која се баве понашањем реалних армиранобетонских елемената изведених од бетона са великим садржајем кречњачког брашна, било под краткотрајним, било под дуготрајним оптерећењем.

Услед тога, остаје отворено питање да ли се постојећи прорачунски модели, развијени за конвенционалне бетоне, могу применити и на ову врсту бетона.

Како би се боље сагледале могућности примене бетона са великим садржајем кречњачког брашна у армиранобетонским конструкцијама, неопходно је детаљније разумевање кључних параметара који утичу на њихова својства у свежем и очврслом стању. У том смислу, истраживање представљено у оквиру ове докторске дисертације има за циљ да допринесе превазилажењу тренутних ограничења и унапреди постојећа сазнања о овој врсти материјала, са идејом да се у перспективи искористи велики потенцијал и подстакне одговорна и иновативна примена ових бетона у инжењерској пракси.

На основу претходног, може се закључити да се ова дисертација бави врло савременим проблемом који се односи превасходно на материјална својства и трајност предметне врсте бетона, уз посебан осврт на понашање реалних елемената изведених од бетона са великим садржајем кречњачког брашна. Поред систематизације и анализе постојећих резултата, нарочити допринос дисертације огледа се у спроведеном обимном експерименталном испитивању бројних својстава ових бетона. Такође, резултати спроведених анализа у оквиру дисертације имају тренутну практичну вредност и могућност примене у грађевинској пракси.

3.2. Осврт на референтну и коришћену литературу

Приликом израде ове докторске дисертације је коришћено 226 библиографских јединица. Већину референци чине радови објављени у међународним часописима изузетних вредности попут: Cement and Concrete Research, Cement and Concrete Composites, Construction and Building Materials, Journal of Building Engineering, Materials and Structures, као и радови који су објављени на значајним међународним конференцијама, извештаји истраживачких пројеката, докторске дисертације и међународни стандарди у области цемента, бетона и армиранобетонских конструкција.

Највећи број референци је новијег датума: 208 референци је публикувано након 2000. године, од чега 127 у периоду између 2015. и 2025. године.

3.3. Опис и адекватност примењених научних метода

Рад у дисертацији реализован је паралелном применом теоријског приступа ослоњеног на податке добијене из постојеће литературе и практичног приступа заснованог на сопственом експерименталном истраживању.

За сагледавање постојећих сазнања из предметне области извршена је синтеза досадашњих истраживања применом структурално-функционалне и компаративне анализе објављених резултата, док је за планирање и анализу резултата експерименталног истраживања примењена хипотетичко-дедуктивна метода.

У оквиру експерименталног истраживања, поред испитивања својстава компонентних материјала, извршено је испитивање физичко-механичких својстава бетонских мешавина са различитим уделом (0%, 30%, 45%, 55% и 65%) замењеног цемента, различитим садржајем и гранулометријским саставом кречњачког брашна, при различитим водо-цементним факторима. Поред обрадљивости мешавина које су квантификоване на основу измерене величине слегања, код свих мешавина извршена су мерења запреминских маса и чврстоћа при притиску бетона различитих старости. Додатно, на одабраним мешавинама извршена су и испитивања: чврстоће при затезању цепањем и савијањем, модула еластичности, продора воде под притиском, пенетрације хлорида, дејства мраза у присуству соли за одмрзавање, као и карбонатизационе отпорности убрзаним и природним тестовима. Мерење карбонатизације у природним условима извршено је након 2 године излагања узорака природној концентрацији CO₂ у лабораторијски контролисаним условима. Анализиран је и утицај

дужине трајања неге на одређена физичко-механичка својства бетона. Непосредно пре извођења гредних носача извршено је испитивање: напона на граници развлачења, чврстоће при затезању, модула еластичности и одговарајућих дилатација арматуре. Понашање гредних носача при дуготрајном оптерећењу праћено је током 1000 дана, при чему су у различитим временским тренуцима мерене величине угиба на 5 места дуж распона носача, као и величине прслина и вредности дилатација (у притиснутом бетону и затегнутој арматури). На одговарајућим пратећим узорцима константно су мерене и реолошке појаве – скупљање и течење бетона, током 1000 дана.

Постојећи резултати из литературе проширени су сопственим резултатима чиме је формирана свеобухватна база података која је послужила за спровођење даљих анализа и извођење поузданих закључака. У анализи сопствених и постојећих резултата коришћене су компаративне и статистичке методе испитивања. Наведене методе истраживања су савремене и у потпуности примерене за примену у предметном истраживању.

На основу свега наведеног, добијене резултате и закључке изведене у дисертацији треба прихватити као потпуно валидне. Комбинација теоријског и практичног приступа, уз примену одговарајућих научних метода, обезбедила је научну утемељеност и поузданост резултата истраживања.

3.4. Применљивост остварених резултата

Резултати добијени у оквиру истраживања указују: (1) да се може направити конструкцијски бетон код кога је редуковано 65% (и више) цемента уз додавање адекватне количине кречњачког брашна, са механичким својствима која су конкурентна, чак и супериорна, у односу на упоредне цементне бетоне; (2) проценат замене цемента, количина кречњачког брашна и водо-цементни фактори имају највећи утицај на физичко-механичка својства бетона са великим садржајем кречњачког брашна, док је утицај гранулометријског састава нешто мање изражен; (3) модели за предикцију физичко-механичких својстава класичних бетона су, уз одговарајуће модификације, применљиви и код бетона са великим садржајем кречњачког брашна; (4) прорачун угиба гредних носача од бетона са великим садржајем кречњачког брашна може се са задовољавајућом тачношћу спровести применом постојећих модела за класичне бетоне, уз посебан нагласак на важност правилног узимања у обзир различитог скупљања и течења ових бетона.

Добијени резултати, предложене модификације и изведени закључци последица су статистичких анализа спроведених на формираним базама података које су поред сопствених, укључивале и велики број резултата из доступне литературе што омогућава даљу надоградњу у будућности. Кориговани модели за процену механичких својстава бетона са редукованим садржајем цемента и великим садржајем кречњачког брашна који су резултат ове дисертације се могу директно и без одлагања применити у свакодневној инжењерској пракси.

3.5. Оцена достигнутих способности кандидата за самостални научни рад

Кандидат се у оквиру своје докторске дисертације бавио систематизацијом, изучавањем и критичком анализом доступне релевантне литературе, као и планирањем, спровођењем, обрадом и анализом резултата експерименталног истраживања. Систематичним приступом постављеном проблему, повезујући различите сегменте научно-истраживачког рада, Андрија Радовић успешно је решио постављене задатке и доказао да поседује способност за самостални научно-истраживачки рад.

4. ОСТВАРЕНИ НАУЧНИ ДОПРИНОС

4.1. Приказ остварених научних доприноса

У оквиру докторске дисертације Андрије Радовића остварени су следећи научни доприноси:

1. Формирана је обимна база података сопствених и експерименталних резултата из литературе која је послужила за спровођење анализа, тестирање модела и доношење одговарајућих закључака. У зависности од садржаја кречњачког брашна у укупној прашкастој компоненти (цемент + кречњачко брашно) мешавине су подељене на четири одговарајуће групе I (0-20%), II (21-35%), III (36-75%), и четврта (заједничка) група IV (21-75%). Извршено је поређење физичко-механичких својстава класичних бетона и бетона са великим садржајем кречњачког брашна.
2. Показано је да приликом пројектовања мешавина са великим садржајем кречњачког брашна посебну пажњу треба обратити на избор компонентних материјала. Код мањих процената (до 30%) редукције цемента могу се и једноставним масеним заменама и коришћењем крупнијих кречњачких брашна добити задовољавајуће перформансе бетона. За веће редукције цемента препоручује се приступ запреминске замене цементне пасте (цемент + вода) уз коришћење брашна која су веће финоће млива од цемента.
3. Упоредна анализа показала је да се релативно једноставно могу постићи слична механичка својства класичних и бетона са великим садржајем кречњачког брашна, али се са повећањем његовог садржаја нарушавају обрадљивост и параметри трајности.
4. Показано је да се постојећи емпиријски изрази за процену чврстоће класичних бетона не могу применити код бетона са великим садржајем кречњачког брашна. Зато су препоручена њихова проширења увођењем одговарајућих фактора ефикасности којима се адекватно узима у обзир допринос кречњачког брашна. Затим су предложене и вредности коефицијената ефикасности за различите садржаје кречњачког брашна у мешавини (различите групе мешавина). Ово је уједно и предлог за допуну одговарајућег стандарда који до сада није на одговарајући начин третирао утицај овог минералног додатка на механичке карактеристике бетона.
5. Предложен је израз за квантификацију утицаја крупноће кречњачког брашна на чврстоћу при притиску, коришћењем просечне величине зрна.
6. Утврђено је да изрази из прописа који се односе на предикцију чврстоће при затезању цепањем нису применљиви код бетона са великим садржајем кречњачког брашна. Стога је извршена њихова корекција, предлагањем одговарајућих коефицијената за сваку групу бетона посебно. Применом поменутих корекција прецизност предикције значајно је повећана.
7. Доказано је да постојећи изрази за процену вредности модула еластичности класичних бетона у функцији њихових чврстоћа не дају резултате задовољавајуће прецизности код бетона са великим садржајем кречњачког брашна. Зато је предложен поступак калибрације како би се правилно обухватио ефекат агрегата. Након одређивања калибрационог коефицијента процењене вредности модула еластичности показале су веома добро слагање са експериментално добијеним вредностима.
8. Утврђено је да веза природне и убрзане инверзне ефективне карбонатизационе отпорности класичних бетона не одговара бетонима са великим садржајем кречњачког брашна. Потом су предложене модификације ове везе за групе бетона са

различитим садржајима кречњачког брашна. Такође, дефинисани су изрази који описују везу природне инверзне ефективне карбонатизационе отпорности и чврстоће при притиску бетона са различитим садржајем кречњачког брашна. Коначно, дефинисане су дебљине заштитних слојева бетона са великим садржајем кречњачког брашна, за различите класе изложености, класе чврстоћа и употребне векове конструкција.

9. С обзиром на велика одступања експерименталних и процењених вредности скупљања и течења бетона која су добијена анализом сопствених резултата, указано је на неопходност калибрације поменутих модела на основу експерименталних резултата. Слагања резултата након извршене калибрације била су веома добра код свих врста бетона.
10. Извршено је поређење понашања армиранобетонских греда од конвенционалних бетона и бетона са великим садржајем кречњачког брашна при дуготрајном оптерећењу, уз експланаторну дискусију резултата.
11. Нумеричком интеграцијом у 50 пресека дуж носача показано је веома добро слагање процењених и реалних вредности угиба у свим временским тренуцима. То указује да се постојећи модели за процену угиба елемената од конвенционалних бетона могу подједнако успешно применити и код бетона са великим садржајем кречњачког брашна, уз адекватно узимање у обзир скупљања и течења ових бетона.
12. Компаративна анализа животног циклуса и трошкова указала је на несумњиву еколошку предност бетона са редукованим садржајем цемента, док су економске оцене углавном подељене. Коначни резултат истиче недвосмислену предност примене бетона са редукованим садржајем цемента код хоризонталних елемената (плоча), док су код вертикалних елемената (стубова) добијени приближно исти резултати.

4.2. Критичка анализа резултата истраживања

Истраживачки рад Андрије Радовића, маг. инж. грађ. на истраживању својстава бетона са редукованим садржајем цемента и великим садржајем кречњачког брашна је показао неопходност проширења постојећих емпиријских израза за процену чврстоће класичних бетона увођењем коефицијената ефикасности за различите садржаје кречњачког брашна у мешавини, као и дефинисање везе којом се описује ефекат гранулометријског састава кречњачког брашна и чврстоће при притиску. Поред тога, показано је да је потребно модификовати постојеће предикционе моделе за одређивање чврстоће при затезању цепањем, модула еластичности и карбонатизационе отпорности бетона. Док је примена постојећих модела за прорачун угиба армиранобетонских елемената од класичних бетона, са сличном поузданошћу, могућа и код елемената од бетона са великим садржајем кречњачког брашна.

У истраживању је поред утврђивања основних својстава компонентних материјала, спроведен изузетно обиман експериментални програм испитивања физичко-механичких својстава и параметара трајности бетона, као и понашања АБ греда под дејством дуготрајног оптерећења, који захтева обимне припремне активности и тачно и прецизно спровођење. Такође, ови резултати искоришћени су као савремена допуна постојећих података из литературе. Добијени резултати омогућавају извођење адекватних закључака, као и употребу истих од стране других истраживача.

На основу сопствених експерименталних резултата (175 бетонских мешавина са великим садржајем кречњачког брашна и 13 мешавина класичних бетона) је утврђено да је могуће направити конструкцијски бетон са великим садржајем кречњачког брашна који има задовољавајућу уградљивост, чврстоћу при притиску и друга механичка својства, али је

трајност ових бетона често инфериорна у поређењу са класичним бетонима. Поред тога, утврђен је ефекат величине средњег зрна кречњачког брашна на чврстоћу бетона при притиску.

Анализа чврстоће при притиску спроведена у оквиру дисертације била је заснована на веома обимним сопственим експерименталним резултатима (175 мешавина са великим садржајем кречњачког брашна и 13 мешавина цементних бетона), као и на свеобухватној бази података из литературе (додатних 273 мешавина са великим садржајем кречњачког брашна и 91 мешавина цементних бетона). Обрадом података доступних у формираној бази дошло се до закључка да се исте релације за предикцију чврстоће при притиску цементних бетона могу користити и у случају бетона са великим садржајем кречњачког брашна, уз увођење модификација којима се узима у обзир ефикасност кречњачког брашна.

Анализа чврстоће при затезању цепањем спроведена на основу 61 мешавине (од којих је 13 сопствених мешавина аутора и 48 из литературе), док је анализа модула еластичности обухватила укупно 74 мешавина (13 сопствених мешавина и 61 из литературе). Анализом ових резултата дошло се до закључка да предикциони модели за процену чврстоће при затезању цепањем и модула еластичности бетона који су предложени у европским нормама и смерницама имају значајна одступања од експериментално добијених вредности. Сви модели који се односе на поменута својства су стога модификовани у зависности од садржаја кречњачког брашна у мешавини. У случају чврстоће бетона при затезању усвојене су исте вредности ових коефицијената у оквиру групе са истим садржајем кречњачког брашна. Код модула еластичности је предложена калибрација модела на референтним мешавинама од класичног бетона, како би се правилно обухватио ефекат агрегата у свакој студији посебно, што за последицу има различите калибрационе коефицијенте унутар групе са истим садржајем кречњачког брашна.

Карбонатизациона отпорност бетона анализирана је коришћењем 211 мешавина (од којих 10 сопствених). Закључено је да се постојећи модел који описује везу природне и убрзане инверзне ефективне карбонатизационе отпорности класичних бетона не може применити у изворном облику код бетона са великим садржајем кречњачког брашна. Зато су предложене одговарајуће модификације и дефинисане одговарајуће величине заштитних слојева бетона са великим садржајем кречњачког брашна.

Сопствени експериментални резултати (1 мешавина од класичног бетона и 2 мешавине са великим садржајем кречњачког брашна различитог гранулометријског састава) су показали значајно мање скупљање бетона са великим садржајем кречњачког брашна у поређењу са класичним цементним бетоном. Додатно, најмање скупљање и течење имала је мешавина код које је коришћено финије кречњачко брашно. Спроведене анализе показују да предикциони модели за процену ових величина имају велика одступања од експерименталних вредности, али и да се ови проблеми могу предупредити калибрацијом модела на основу експерименталних резултата.

Када се говори о понашању АБ греда при дуготрајном оптерећењу, показано је да су греде изведене од бетона са великим садржајем кречњачког брашна имале значајно боље понашање које се огледало у мањем прирасту угиба, као и мањим бројем и просечном ширином прслина. Најбоље перформансе показале су греде са најфинијим кречњачким брашном. Показано је да се модели за процену угиба АБ носача од класичних бетона могу подједнако ефикасно применити и код носача од бетона са великим садржајем кречњачког брашна. Међутим, за извођење поузданијих закључака неопходно је спровођење додатних испитивања, с обзиром на то да су сопствени резултати аутора једини који се баве анализом понашања гредних носача при дуготрајном оптерећењу.

4.3. Верификација научних доприноса

У току израде дисертације, Андрија Радовић је међународној и домаћој, научној и стручној јавности представио свој рад кроз следеће публикације:

1. **Radović A.**, Carević V., Marinković S., Plavšić J., Tešić K.: *Prediction model for calculation of the limestone powder concrete carbonation depth*, Journal of Building Engineering 86, 2024, 108776, <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.108776> [M21a]
2. **Radović A.**, Hafez H., Tošić N., Marinković S., de la Fuente A.: *ECO₂ framework assessment of limestone powder concrete slabs and columns*, Journal of Building Engineering 57, 2022, 104928, <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.104928> [M21a]
3. Carević V., Marinković S., Plavšić J., **Radović A.**: *Service life design of concrete structures made of high-volume limestone powder concrete - case of the carbonation induced corrosion*, Buildings 13(12), 2023, 3112, <https://doi.org/10.3390/buildings13123112> [M22]
4. **Radović A.**, Carević V., Radević A., Stupar B., Veličkov D.: *Influence of curing period on some mechanical and durability-related properties of limestone powder concrete*, Building materials and Structures 67(3), 2024, 2400007R, <https://doi.org/10.5937/GRMK2400007R> [M24]
5. Marinković M., **Radović A.**, Carević V.: *Carbonation of the limestone powder concrete: state-of-the-art overview*, Building materials and Structures 66(2), 2023, 2300005M, <https://doi.org/10.5937/GRMK2300005M> [M24]
6. **Radović A.**, Marinković S., Savić A.: *Compressive strength of green concrete with low cement and high filler content*, Building materials and Structures 64(2), 2021, pp. 93–108, <https://doi.org/10.5937/GRMK2102093R> [M24]
7. **Radović A.**, Hafez H., Tošić N., Marinković S., de la Fuente A.: *Multi-criteria assessment of reinforced limestone powder concrete slabs and columns*, Life-Cycle of Structures and Infrastructure Systems, Eighth International Symposium on Life-Cycle Civil Engineering – IALCCE 2023, International Association for Life-Cycle Civil Engineering, Milan, Italy, 2023, pp. 3602–3609, <https://doi.org/10.1201/9781003323020-441> [M33]
8. **Radović A.**, Marinković S., Savić A.: *Improving sustainability of structural concrete by application of limestone filler*, 9th International Conference on Renewable Electrical Power Sources, Union of Mechanical and Electrical Engineering and Technicians of Serbia, Belgrade, Serbia, 2021, pp. 131–136 [M33]
9. **Radović A.**: *The influence of supplementary cementitious materials on some properties of structural concretes*, 3rd DIFENEW International Student Conference - DISC2023, University of Novi Sad, Faculty of Technical Sciences, Novi Sad, Serbia, 2023, pp. 3 [M34]
10. **Radović A.**, Marinković S.: *Properties of green concrete with reduced cement and high limestone powder content*, 2nd DIFENEW International Student Conference - DISC2022, University of Novi Sad, Faculty of Technical Sciences, Novi Sad, Serbia, 2022, pp. 4 [M34]

5. ЗАКЉУЧАК И ПРЕДЛОГ

У оквиру докторске дисертације под насловом „Конструкцијски бетони са редукованим садржајем цемента и великим садржајем кречњачког брашна” (на енглеском језику „Structural concrete with reduced cement and high limestone powder content”) извршено је експериментално испитивање физичко-механичких својстава и параметара трајности бетона са редукованим садржајем цемента и великим садржајем кречњачког брашна, као и понашања армиранобетонских греда изведених од конвенционалних и бетона са великим садржајем кречњачког брашна. Формирана је обимна база експерименталних резултата на основу сопствених резултата и података из доступне литературе. У зависности од садржаја кречњачког брашна уведени су одговарајући фактори ефикасности, којима се узима у обзир

допринос кречњачког брашна чврстоћи при притиску бетона. Такође, дефинисана је и релација којом се описује ефекат гранулометријског састава кречњачког брашна и чврстоће при притиску. Показано је да су изрази за предикцију чврстоће бетона при затезању цепањем, као и модула еластичности неадекватни и предложене су њихове модификације за бетоне са различитим садржајима кречњачког брашна. Неадекватност модела за процену карбонатизационе отпорности условила је корекцију истих. На основу ових корекција дефинисане су дебљине заштитних слојева бетона са великим садржајем кречњачког брашна, за различите класе изложености, класе чврстоћа и употребне векове конструкција. Указано је и на неопходност калибрације модела за процену скупљања и течења бетона коришћењем експерименталних резултата, како би се добиле процене задовољавајуће тачности. Показано је да не постоје значајне разлике у примени модела које стандарди прописују за прорачун утиба армиранобетонских елемената изведених од класичних бетона, у поређењу са елементима изведеним од бетона са великим садржајем кречњачког брашна, ако се правилно обухвате утицаји скупљања и течења. Закључна вишекритеријумска анализа показала је да бетони са редукованим садржајем цемента могу представљати равноправну, често и вреднију, алтернативу конвенционалним бетонима.

Приказани резултати и спроведене анализе у овој докторској дисертацији представљају оригиналан и изузетно вредан научни допринос у области бетонских конструкција и одрживог грађевинарства уопште. Такође, резултати спроведеног истраживања и закључци дисертације се могу одмах и директно применити у пракси, како приликом пројектовања састава бетонских мешавина, тако и приликом процене појединих својстава бетона, али и при пројектовању елемената изведених од ове врсте бетона. Комисија сматра да урађена докторска дисертација кандидата Андрије Радовића, маг. инж. грађ. у потпуности испуњава све захтеване критеријуме и да је кандидат испољио способност за самосталан научно-истраживачки рад у свим фазама израде ове дисертације.

На основу претходног, Комисија предлаже Наставно-научном већу да се докторска дисертација под насловом „Конструкцијски бетони са редукованим садржајем цемента и великим садржајем кречњачког брашна” (на енглеском језику „Structural concrete with reduced cement and high limestone powder content”) кандидата Андрија Радовића, маг. инж. грађ. прихвати, изложи на увид јавности и упути на коначно усвајање Већу научних области грађевинско-урбанистичких наука Универзитета у Београду, као и да након завршетка ове процедуре позове кандидата на усмену одбрану дисертације пред Комисијом у истом саставу.

ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ

Београд, 23.05.2025.

.....
в. проф. др Иван Игњатовић,
Универзитет у Београду, Грађевински факултет

.....
в. проф. др Александар Савић,
Универзитет у Београду, Грађевински факултет

.....
в. проф. др Никола Тошић,
Civil and Environmental Engineering Department,
Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona