НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ
ГРАЂЕВИНСКОГ ФАКУЛТЕТА
УНИВЕРЗИТЕТА У БЕОГРАДУ

Предмет: Реферат о урађеној докторској дисертацији кандидаткиње **Марије Милојевић**

Одлуком Наставно-научног већа Грађевинског факултета Универзитета у Београду бр. 349/9-24 од 22.10.2026. године, именовани смо за чланове Комисије за оцену и одбрану докторске дисертације кандидаткиње Марије Милојевић, маст.инж.грађ. под насловом:

МОДЕЛИРАЊЕ ВИБРАЦИЈА CLT МЕЂУСПРАТНИХ КОНСТРУКЦИЈА УСЛЕД ПЕШАЧКОГ ОПТЕРЕЋЕЊА ПРИМЕНОМ АНАЛИЗЕ НЕПОУЗДАНОСТИ

Докторска дисертација је написана на енглеском језику. Наслов дисертације на енглеском језику гласи:

UNCERTAINTY APPROACH TO MODELLING PEDESTRIAN-INDUCED VIBRATIONS OF CLT FLOORS

После прегледа достављене дисертације и других пратећих материјала и разговора са кандидаткињом, комисија је сачинила следећи

Р Е Ф Е Р А Т

1. УВОД

1.1. Хронологија одобравања и израде дисертације

- 10.10.2018. године кандидаткиња је уписала Докторске академске студије на Грађевинском факултету Универзитета у Београду, на студијском програму Грађевинарство;
- 18.11.2024. на седници Катедре за техничку механику и теорију конструкција кандидаткиња је изложила предложену тему докторске дисертације под насловом "Моделирање вибрација CLT међуспратних конструкција услед пешачког оптерећења применом анализе непоузданости". Комисија коју је образовало Веће Катедре је прихватила тему докторске дисертације и предложила кандидаткињи да тему пријави Наставно-научном већу Грађевинског факултета Универзитета у Београду;
- 18.06.2025. кандидаткиња је пријавила тему докторске дисертације Наставно-научном већу Грађевинског факултета Универзитета у Београду;
- 03.07.2025. Наставно-научно веће Грађевинског факултета Универзитета у Београду именовало је Комисију за писање извештаја о оцени научне заснованости теме докторске дисертације у саставу: в.проф. др Витомир Рацић, в. проф. др Марија Нефовска-Даниловић и проф. др Стана Живановић (Одлука бр. 349/4-24 од 04.07.2025.);
- 18.09.2025. Наставно-научно веће Грађевинског факултета Универзитета у Београду прихватило је извештај Комисије за оцену научне заснованости теме докторске дисертације под насловом "Моделирање вибрација CLT међуспратних конструкција услед пешачког оптерећења применом анализе непоузданости" и своју одлуку доставило Већу научних области грађевинско–урбанистичких наука Универзитета у Београду на давање сагласности (Одлука бр. 349/6-24 од 18.09.2025.).
- 30.09.2025. Веће научних области грађевинско-урбанистичких наука Универзитета у Београду дало је сагласност на предлог теме докторске дисертације под насловом "Моделирање вибрација CLT међуспратних конструкција услед пешачког оптерећења применом анализе непоузданости" (Одлука бр. 61206-3431/2-25 од 30.09.2025.).

- 9.10.2026. докторска дисертација је предата на преглед и оцену.
- На седници одржаној 22.10.2026. године (Одлука бр. 349/9-24 од 22.10.2026.) Наставно-научно веће Грађевинског факултета у Београду именовало је Комисију за оцену и одбрану докторске дисертације у следећем саставу:
    - др Стана Живановић, дипл.грађ.инж., редовни професор, Универзитет у Ворику, Уједињено Краљевство,
    - др Мирослав Марјановић, маст.инж.грађ., ванредни професор, Грађевински факултет Универзитета у Београду,
    - др Иван Глишовић, дипл.инж.грађ., ванредни професор, Грађевински факултет Универзитета у Београду.

1.2. Научна област дисертације

Дисертација кандидаткиње Марије Милојевић припада научној области Грађевинско инжењерство и ужој научној области Техничка механика и теорија конструкција. За ментора дисертације одређени су: проф. др Витомир Рацић и проф. др Марија Нефовска-Даниловић са Грађевинског факултета Универзитета у Београду.

1.3. Биографски подаци о кандидаткињи

Марија Милојевић рођена је 25. јула 1994. године у Панчеву, Република Србија. Основну школу и гимназију природно-математичког смера је завршила у Панчеву, као носилац дипломе "Вук Караџић" за ученике основних и средњих школа. Основне академске студије на Грађевинском факултету Универзитета у Београду уписала је школске 2013/14. године, а дипломирала је 2017. године на модулу Конструкције, са просечном оценом 9.61. Дипломски из области Теорије конструкција под насловом „Анализа вибрација греде са прслинама“ одбранила је са оценом 10 (десет) и тиме стекла звање дипломираног инжењера грађевинарства. Мастер студије на Грађевинском факултету у Београду уписала је школске 2017/2018. године, а дипломирала је 2018. године на модулу Конструкције, са просечном оценом 9.71. Мастер рад под насловом „Детекција и локализација оштећења FRP греде заснована на анализи облика осциловања“ одбранила је на Катедри за техничку механику и теорију конструкција са оценом 10 (десет) и тиме стекла звање мастер инжењера грађевинарства.

Током основних и мастер академских студија је награђивана више пута за постигнут успех. За изузетне резултате постигнуте на групи предмета Теорије конструкција награђена је наградом из Фонда академика проф. др Милана Ђурића у школској 2016/17. години. Добитник је и награде из Фонда проф. др Владимира Королије за студенте са највећом просечном оценом током студија на Одсеку за конструкције. Проглашена је Студентом генерације на студијском програму Грађевинарство Грађевинског факултета у Београду. Школске 2016/17. године добила је стипендију из Фонда за младе таленте Републике Србије („Доситеја“). Докторске академске студије на Грађевинском факултету Универзитета у Београду уписала је 2018. године. Положила је све испите предвиђене наставним планом с просечном оценом 9.89. Добитник је стипендије фондације British Scholarship Trust за школску 2023/24. годину, на основу које је провела 10 недеља (март-мај 2024. године) на истраживачком боравку у School of Engineering, University of Warwick, UK (под менторством проф. др Стане Живановић).

Користи програмске језике MathWorks MATLAB и Python, као и програме из области грађевинарства: Abaqus, CSI SAP2000, Radimpex Tower, Autodesk AutoCAD, ArmCAD, AdvanceSteel и др. Члан је Друштва грађевинских конструктера Србије и Српског друштва за механику. Говори и пише енглески језик.

Рад на Грађевинском факултету започиње фебруара 2019. године као истраживач приправник у Институту за нумеричку анализу и пројектовање конструкција. У овом периоду је била ангажована и на одржавању вежби и наставе на више предмета на основним академским студијама на модулу Конструкције. Од јануара 2020. године до данашњег дана је запослена у звању асистента за ужу научну област Техничка механика и теорија конструкција. Одржава вежбе и учествује у извођењу наставе на предметима Статика конструкција, Теорија плоча и љуски, Статика конструкција 1 и Метод коначних елемената.

Поље научног рада Марије Милојевић везано је за динамичку анализу међуспратних конструкција, у погледу вибрација проузрокованих ходом пешака. Посебан фокус њеног рада су непоузданости које се јављају у овој области и њихово моделирање. У периоду од 2019. до 2020. године је била ангажована на пројекту ТР 36046: "Истраживање утицаја вибрација од саобраћаја на зграде и људе у циљу одрживог развоја градова" финансираног од стране Министарства просвете, науке и технолошког развоја Републике Србије. Од јануара 2022. до јануара 2025. године је била учесник пројекта Substrate4CLT: "Towards Sustainable Buildings: Novel Strategies for the Design of Vibration Resistant Cross-Laminated Timber Floors", финансиран од стране Фонда за науку Републике Србије у оквиру Програма ИДЕЈЕ.

Као аутор или коаутор, Марија Милојевић је до сада објавила 6 научних радова у међународним часописима и 16 радова у зборницима међународних научних скупова. Након презентације радова на Симпозијуму (2021.) и Конгресу (2022.) Друштва грађевинских конструктера Србије (ДГКС) два пута је добила награду за најбољи рад младих истраживача.

2. ОПИС ДИСЕРТАЦИЈЕ

2.1. Садржај дисертације

Докторска дисертација "Моделирање вибрација CLT међуспратних конструкција услед пешачког оптерећења применом анализе непоузданости" написана је на енглеском језику, на 206 страна. Дисертација садржи 166 слика и 34 табеле. Подељена је на десет поглавља: 1) Увод; 2) Преглед литературе вибрација CLT међуспратних конструкција услед пешачког оптерећења; 3) Теоријске основе анализе непоузданости; 4) Експериментално тестирање; 5) Нумерички модели CLT међуспратних конструкција; 6) Анализа непоузданости модалних карактеристика CLT међуспратних конструкција; 7) Моделирање динамичке силе; 8) Верификација предикције детерминистичког одговора; 9) Анализа непоузданости одговора CLT међуспратних конструкција; 10) Закључна разматрања. У списку коришћене литературе налази се 181 референца.

2.2. Кратак приказ појединачних поглавља

У уводном поглављу дисертације најпре је указано на допринос грађевинског сектора потрошњи природних ресурса и енергије, као и емисији гасова са ефектом стаклене баште. У том контексту, представљено је унакрсно ламелирано дрво (CLT) као савремени инжењерски производ, који представља одрживу алтернативу традиционалним грађевинским материјалима са високим угљеничним отиском, нарочито у изградњи ниских и средње високих зграда.

Затим је истакнут проблем прекомерних вибрација CLT међусратних конструкција услед људских активности, пре свега ходања, због чега је гранично стање употребљивости у погледу вибрација (ГСУВ) често меродавно за њихово димензионисање. Представљена су основна начела традиционалних и савремених приступа оцени ГСУВ, уз осврт на ограничења конвенционалних детерминистичких поступака. Посебна пажња је посвећена непоузданостима параметара конструкције и пешачког оптерећења које се јављају при прорачуну. Као кључни недостатак досадашњих истраживања идентификовано је одсуство свеобухватног приступа који истовремено разматра ове изворе непоузданости и њихов утицај на динамички одговор конструкције.

На основу идентификованих недостатака постојећих истраживања, дефинисани су циљеви и научни допринос дисертације. На крају је представљена методологија истраживања, организована у пет (међусобно повезаних) фаза, као и структура докторске дисертације.

У другом поглављу је извршен преглед постојеће литературе и претходних истраживања у области ГСУВ CLT међуспратних конструкција. Најпре су представљени основни принципи и терминологија релевантни за ГСУВ, у оквиру устаљеног концепта извора, преносника и пријемника вибрација. Затим је извршена систематизација и анализа постојећих смерница за пројектовање дрвених међуспратних конструкција, са посебним освртом на ограничења њихове примене на CLT међуспратне конструкције. На крају су приказана актуелна истраживања у области вибрација CLT међуспратних конструкција. Анализом литературе, идентификовани су недостаци постојећих приступа и могућности за њихово унапређење, нарочито у погледу моделирања конструкције и пешачког оптерећења, као узимања у обзир њихових непоузданости.

У трећем поглављу су представљене теоријске основе анализе непоузданости, са циљем разумевања метода примењених у наставку дисертације. Објашњена су ограничења детерминистичког приступа и основни принципи моделирања и квантификације непоузданости, као и анализе осетљивости. Посебна пажња је посвећена методама глобалне анализе осетљивости заснованим на Собол индексима (енг. Sobol' indices) и Шеплијевим ефектима (енг. Shapley effects), које су примењене у истраживању. На крају је представљен концепт метамоделирања као начин повећања прорачунске ефикасности, уз образложење избора метамодела заснованог на развоју по полиномима хаоса (енг. Polynomial Chaos Expansion).

У четвртом поглављу су описане анализиране CLT међуспратне конструкције и спроведени експериментални тестови у оквиру научног пројекта *Substrate4CLT*. Тестови обухватају идентификацију модалних карактеристика три реалне CLT међуспратне конструкције састављене од једног, два и три повезана панела, као и мерење убрзања међуспратне конструкције састављене од три панела услед хода пешака. Иако сама испитивања нису примарно предмет дисертације, кандидаткиња је учествовала у прикупљању експерименталних података. Добијени резултати представљају основу за развој и валидацију нумеричких модела у наставку истраживања.

У петом поглављу су приказани развој и валидација нумеричких модела CLT међуспратних конструкција, са посебним освртом на моделирање веза између панела применом еквивалентне еластичне траке. На основу експериментално идентификованих модалних карактеристика плоча које се састоје из једног и два панела, извршена је калибрација параметара модела коначних елемената (гранични услови, параметри материјала дрвета и параметри еквивалентне еластичне траке). Овако одређени параметри су валидирани користећи идентификоване модалне карактеристике међуспратне конструкције која се састоји из три панела. Након валидације комплексног 3Д модела, показано је да се модалне карактеристике могу срачунати са упоредивом тачношћу применом знатно једноставнијих 2Д коначних елемената. Формирана су два нумеричка модела, тзв. нискофреквентне и високофреквентне међуспратне конструкције. Наведени модели су коришћени у наставку истраживања.

У шестом поглављу су анализиране непоузданости сопствених фреквенција и модалних маса CLT међуспраних конструкција, које потичу од варијабилности параметара материјала и веза између панела, представљених еквивалентном еластичном траком. Квантификације непоузданости и *Sobol' indices* анализа осетљивости за нискофреквентне и високофреквентне међуспратне конструкције су извршене применом претходно развијеног и валидираног *Polynomial Chaos Expansion* метамодела. Идентификован је мали број параметара који утиче на варијабилност посматраних модалних карактеристика.

У седмом поглављу је приказан развој пробабилистичких модела пешачког опретећења за нискофреквентне и високофреквентне међуспратне конструкције, који узимају у обзир непоузданост пешачког оптерећења. У ту сврху, постојећи хармонијски и импулсни модели оптерећења према смерницама актуелног приручника CCIP-016 су проширени како би обухватили варијабилност параметара хода између узастопних корака једног пешака, као и варијабилност у ходу различитих пешака. На основу постојеће базе експериментално измерених сила ходања, одређене су статистичке величине параметара модела силе и њихова међусобна зависност. Поред пробабилистичких модела, развијене су и поједностављене детерминистичке формулације које задржавају основне карактеристике предложених модела, а истовремено омогућавају једноставнију примену у свакодневној инжењерској пракси.

У осмом поглављу је представљен детерминистички приступ оцени ГСУВ заснован на смерницама приручника CCIP-016 и поједностављеним моделима пешачког оптерећења развијеним у седмом поглављу. На основу овог приступа, развијен је алгоритам за прорачун динамичког одговора међуспратне конструкције услед пешачког оптерећења, имплементиран у софтвер *Hindu*, написан у програмском језику *Python* у оквиру дисертације.

У деветом поглављу је приказана завршна фаза истраживања, у којој су обједињене непоузданости параметара конструкције и пешачког оптерећења ради квантификације њиховог заједничког утицаја на динамички одговор CLT међуспратне конструкције. Анализа је спроведена на примерима нискофреквентне и високофреквентне међуспратне конструкције, при чему су у случају нискофреквентне међуспратне конструкције посебно разматрани услови нерезонантног и резонантног динамичког одговора. За сваки од анализираних случајева извршене су квантификација

непоузданости и *Shapley effects* анализа осетљивости за два типа варијабилности пешачког оптерећења. Први тип узима у обзир варијабилност параметара хода између узајамних корака једног пешака и варијабилност у ходу различитих пешака, док други тип узима у обзир само варијабилност у ходу различитих пешака.

На крају дисертације, у десетом поглављу, сумирани су резултати, закључци и доприноси свих фаза истраживања. Истакнути су главни научни доприноси, као и практичне препоруке за процену ГСУВ CLT међуспратних конструкција. Коначно, дате су смернице и препоруке за даљи рад и истраживања у овој области.

3. ОЦЕНА ДИСЕРТАЦИЈЕ

3.1. Савременост и оригиналност

Докторска дисертација под насловом "Моделирање вибрација CLT међуспратних конструкција услед пешачког оптерећења применом анализе непоузданости" бави се актуелном проблематиком оцене ГСУВ CLT међуспратних конструкција услед пешачког оптерећења. Све већа примена CLT међуспратних конструкција у савременом грађевинарству намеће потребу за поузданим методама процене динамичког понашања ових конструкција, које су посебно осетљиве на вибрације изазване људским активностима. Постојеће смернице за пројектовање оцењују ГСУВ применом детерминистичких поступака, којима се не могу узети у обзир непоузданости параметара конструкције и пешачког оптерећења. У том контексту, дисертација представља допринос развоју савремених метода анализе вибрација CLT међуспратних конструкција, заснованих на пробабилистичком моделирању и систематском разматрању свих извора непоузданости.

Ова докторска дисертација представља оригинални научни рад у области вибрација грађевинских конструкција услед динамичке силе пешака. Оригиналност се огледа пре свега у интегралном приступу анализи вибрација CLT међуспратних конструкција услед пешачког оптерећења, који обједињује различите изворе непоузданости и омогућава процену њиховог заједничког утицаја на динамички одговор. За разлику од досадашњих истраживања, у којима су варијабилност параметара конструкције и пешачког оптерећења разматране одвојено, у дисертацији су ови утицаји систематски анализирани у оквиру јединственог пробабилистичког приступа. Посебна пажња је посвећена различитим компонентама варијабилности ходања и њиховом значају за поузданост срачунатог динамичког одговора.

Истраживање превазилази ограничења конвенционалних детерминистичких поступака и пружа основу за свеобухватнију оцену ГСУВ CLT међуспратних конструкција. Дисертација припада савременој и комплексној области динамике конструкција у ужем, односно теорије конструкција у ширем контексту. Поред значајног теоријског доприноса, одликује се и израженим практичним значајем, који се огледа у развијеним софтверским алатима и изведеним закључцима применљивих у инжењерској пракси. Савременост и оригиналност дисертације потврђена је и публиковањем већег броја радова, насталих током истраживања, у врхунским међународним часописима и међународним конференцијама.

3.2. Осврт на референтну и коришћену литературу

Током израде докторске дисертације кандидаткиња је проучила релевантну литературу. Навела је 181 референцу које су директно везане за област истраживања. Преглед литературе обухвата широк опсег тема обрађених у дисертацији и чини одличну основу за спроведено истраживање. Кандидаткиња се адекватно позивала на постојећу литературу током израде рада.

3.3. Опис и адекватност примењених научних метода

У докторској дисертацији кандидаткиња је користила адекватне научне методе, укључујући савремене нумеричке методе за решавање веома сложеног проблема динамике конструкција.

Неке од примењених научних метода су:

- Метод коначних елемената (МКЕ) у домену линеарне еластичности,
- Модална суперпозиција
- Монте Карло анализа

- Теорија вероватноће и статистика
- Релевантне нумеричке методе примењене у коришћеним програмским пакетима

Посебне научне методе
- Методе оптимизације – *Harmony Search Algorithm*
- Стохастичка метода коначних елемената
- Глобална анализа осетљивости применом метода *Sobol' indices* и *Shapley effects*
- Метамоделирање – *Polynomial Chaos Expansion*
- Анализа непоузданости

3.4. Применљивост остварених резултата

Резултати истраживања представљени у докторској дисертацији имају значајан потенцијал за примену у пројектовању и оцени ГСУВ CLT међуспратних конструкција. Развијена методологија омогућава поузданије сагледавање утицаја параметара конструкције и пешачког оптерећења на динамички одговор, што доприноси рационалнијем избору пројектних параметара и смањењу степена конзервативности постојећих поступака.

Практичан значај имају резултати који се односе на нумеричко моделирање CLT међуспратних конструкција састављених из више панела. Показано је да се применом једноставнијих 2Д модела могу добити модалне карактеристике довољне тачности, у односу на комплексне 3Д моделе, уз знатно смањење трајања прорачуна. Указано је на неопходност моделирања веза између CLT панела. Усвојен модел еквивалентне еластичне траке је једноставан и практичан, и може се применити у готово свим комерцијалним програмима заснованих на методу коначних елемената (МКЕ). Поред тога, идентификација доминантних извора непоузданости омогућује да се пробабилистичка анализа усмери на ограничен број утицајних параметара, чиме се додатно повећава рачунска ефикасност.

Посебну практичну вредност имају поједностављени модели пешачког оптерећења, који представљају унапређење постојећих формулација према смерницама CCIP-016. У анализираним примерима, модели из CCIP-016 и предложени поједностављени модели су дали сличне резултате, с тим да предложени модели имају већу могућност примене.

Свеобухватна пробабилистичка анализа, због сложености моделирања и обима прорачуна, није непосредно погодна за свакодневну инжењерску примену. Међутим, од изузетног је значаја у случајевима када су прорачунате вредности динамичког одговора блиске дозвољеним границама, као и када је потребно проценити вероватноћу прекорачења критеријума употребљивости. На тај начин, резултати дисертације могу допринети развоју поузданијег и економичнијег решења у пројектовању CLT међуспратних конструкција.

Поред непосредне примене остварених резултата на CLT међуспратне конструкције, значајан потенцијал за ширу примену имају и методолошки поступци који су развијени и коришћени у дисертацији. Поступак одређивања параметара везе између панела калибрацијом нумеричког модела према експерименталним резултатима, методе статистичке обраде измерених сила ходања, као и примењене методе квантификације непоузданости и анализе осетљивости, могу се прилагодити различитим проблемима динамике конструкција. На тај начин, применљивост развијене методологије превазилази оквире конкретног конструктивног система разматраног у дисертацији и пружа основу за даља истраживања.

3.5. Оцена достигнутих способности кандидата за самостални научни рад

Кандидаткиња је стекла изузетну самосталност у научном раду кроз:
- полагање испита у оквиру докторских академских студија,
- припрему и израду докторске дисертације,
- студијски боравак на Универзитету у Ворику, под менторством проф. др Стане Живановић,
- објављивање три рада у часописима са SCI листе и великог броја радова на међународним конференцијама.

Библиографија кандидаткиње далеко превазилази просечан ниво студената докторских студија на Грађевинском факултету Универзитета у Београду, као и на осталим међународним универзитетима истог ранга. Кандидаткиња је такође показала способност за критичку анализу научне литературе,

развој и предлагање оригиналних решења која доводе до бољих резултата у односу на оне које карактеришу до сада публикована решења. Све заједно недвосмислено потврђује научну зрелост и изузетан истраживачки потенцијал кандидаткиње Марије Милојевић.

4. ОСТВАРЕНИ НАУЧНИ ДОПРИНОС

4.1. Приказ остварених научних доприноса

Научни допринос дисертације се у првом реду огледа у систематском разматрању заједничког утицаја варијабилности параметара конструкције и пешачког оптерећења на динамички одговор међуспратних CLT конструкција, у циљу поузданије и рационалније оцене граничног стања употребљивости CLT међуспратних конструкција у погледу вибрација. Предложена методологија обједињује непоузданости повезане са конструкцијом са једне, и оптерећењем услед ходања са друге стране, и квантификује колико њихова комбинована варијабилност утиче на одговор конструкције.

Кључни научни доприноси дисертације могу се систематизовати у пет наредних ставки:

1. Успешно усвајање и калибрација нумеричког модела еквивалентне еластичне траке, за моделирање везе између суседних CLT панела. Предложени приступ, демонстриран на једном типу споја, може се применити и на друге типове веза, уз одговарајућу калибрацију параметара еквивалентне траке.
2. У анализи непоузданости, МКЕ модели успешно су замењени метамоделима заснованим на Polynomial Chaos Expansion методи. Резултати су показали да су запреминска маса дрвета, модул еластичности паралелно влакнима и модул смицања у правцу влакана главни параметри који утичу на сопствене фреквенције и модалне масе анализираних међуспратних конструкција, релевантне за вибрације изазване људским активностима.
3. Анализом 744 мерених записа сила услед ходања квантификована је и статистички описана варијабилност параметара који дефинишу моделе пешачког оптерећења. При томе су обухваћене разлике између појединачних пешака, као и варијабилност и временска зависност узастопних корака током ходања појединаца. Оваква карактеризација омогућила је проширење постојећих модела са детерминистичких на пробабилистичке формулације, којима се узимају у обзир експериментално утврђена варијабилност и међусобна зависност параметара оптерећења.
4. Успешно су идентификовани параметри који утичу на варијабилност одговора конструкције при различитим условима побуде. У случају нерезонантног одговора нискофреквентних међуспратних конструкција (LFF), показано је да највећи утицај имају средња фреквенција корака, модул еластичности паралелно влакнима и запреминска маса дрвета. У резонантним условима доминантан утицај имају тежина пешака и амплитуде релевантних хармоника силе, док пригушење остаје најутицајнији параметар конструкције. Код високофреквентних међуспратних конструкција, варијабилност одговора првенствено је одређена средњом вредношћу и стандардном девијацијом ефективног импулса, средњом фреквенцијом корака и тежином пешака. Утицај параметара конструкције је релативно мали. Показано је да је варијабилност између различитих пешака знатно израженија од варијабилности између узастопних корака током ходања истог пешака.
5. Успешно су развијени поједностављени модели пешачког оптерећења, погодни за ефикасну анализу вибрација. За анализиране међуспратне конструкције, предложени модели дали су одговоре задовољавајуће тачности са резултатима добијеним применом модела према смерницама CCIP-016, уз шири опсег применљивости.

4.2. Критичка анализа резултата истраживања

Резултати истраживања представљени у докторској дисертацији пружају детаљан увид у утицај непоузданости параметара конструкције и пешачког оптерећења на динамичко понашање CLT међуспратних конструкција. Примењена методологија обједињује резултате експерименталних испитивања, нумеричко моделирање, квантификацију непоузданости и анализу осетљивости, што омогућава систематско сагледавање разматраног проблема. Посебна вредност остварених резултата огледа се у идентификацији доминантних извора непоузданости динамичког одговора у различитим условима динамичке побуде, као и утврђивање њиховог релативног значаја за оцену ГСУВ.

Анализом непоузданости модалних карактеристика утврђено је да непоузданост сопствених фреквенција и модалних маса анализираних међуспратних конструкција зависи превасходно од запреминске масе дрвета, модула еластичности паралелно влакнима и модула смицања. Насупрот томе, варијабилност параметара везе између панела има релативно мали утицај. Овај резултат указује на могућност поједностављења пробабилистичких модела без значајног губитка тачности. Истовремено, показано је да се утицај веза између панела не сме занемарити приликом формирања нумеричког модела, чиме је јасно разграничен значај реалистичног моделирања веза од утицаја њихове варијабилности на динамички одговор.

Резултати динамичког одговора су показали да значај појединих извора непоузданост зависи од типа међуспратне конструкције (нискофреквентне, високофреквентне) и од услова побуде. Код нискофреквентних међуспратних конструкција у нерезонантним условима побуде, највећи утицај имају средња вредност фреквенције корака пешака, модул еластичности паралелно влакнима и запреминска маса дрвета. Њихова међусобна зависност условљава појаву резонантног и блиског резонантног одговора. У резонантним условима, доминантан утицај преузимају параметри пешачког оптерећења, пре свега тежина пешака и амплитуде релевантних хармоника, док је од параметара конструкције најважније пригушење. Код високофреквентних међуспратних конструкција, варијабилност динамичког одговора потиче од параметара пешачког оптерећења. Ови резултати указују на потребу за различитим приступима моделирању непоузданости у зависности од динамичких карактеристика конструкције и разматраног случаја побуде.

Посебно значајан резултат представља утврђивање релативног утицаја варијабилности параметара хода између узастопних корака једног пешака (енг. intra-subject variability) и варијабилности у ходу различитих пешака (енг. inter-subject variability). Показано је да варијабилност током хода једног пешака има мањи утицај на укупну варијабилност динамичког одговора. Због тога се њено експлицитно моделирање у поједностављеним пробабилистичким анализама може изоставити, без значајног нарушавања поузданости резултата.

Поређење детерминистичких и пробабилистичких прорачуна је показало да детерминистички приступ даје вредности одговора у горњим деловима одговарајућих расподела вероватноће. Тиме је потврђена оправданост њихове примене у свакодневној инжењерској пракси. Са друге стране, пробабилистички приступ пружа додатне информације о вероватноћи појаве различитих нивоа одговора и омогућава објективније сагледавање конзервативности резултата.

Детерминистички приступ за анализу ГСУВ међуспратних конструкција, заједно са предложеним поједностављеним моделима оптерећења, имплементиран је у софтвер Hindu, у програмском језику Python. Ова апликација интегрише модалне карактеристике међуспратних конструкција, покретно оптерећења услед ходања, праволинијске путање кретања пешака, положаје тачака у којима се прати одговор конструкције у оквиру јединственог рачунарског окружења. На тај начин, софтвер представља практичну имплементацију методолошких решења развијених у дисертацији, и може се директно применити у инжењерским прорачунима.

Софтверски алати за прорачун развијени у оквиру дисертације пружају изузетну основу за даљи напредак ка ефикаснијој и практичнијој анализи граничног стања употребљивости грађевинских конструкција у погледу вибрација. Будући развој софтвера Hindu могао би укључити директно срачунавање модалних карактеристика конструкције, аутоматско тренирање и валидацију метамодела и имплементацију пробабилистичког приступа развијеног у дисертацији. На овај начин би се омогућила потпуно интегрисана квантификација непоузданости и анализа осетљивости, што би било од изузетне користи не само у истраживачке сврхе, већ и у стручном смислу.

4.3. Верификација научних доприноса

У току истраживачког рада у ужој области теме докторске дисертације, кандидаткиња Марија Милојевић објавила је следеће радове:

Категорија М21а+:

1. **M. Milojević**, V. Racic, M. Nefovska-Danilović. Uncertainty analysis of CLT floor vibrations due to inherent variability in structural properties. *Journal of Building Engineering* 113 (2025), p.113725.

2. **M. Milojević**, V. Racic, M. Nefovska-Danilović, S. Ereiz, I. Duvnjak. Characterization of inter-panel connections in CLT floors usingfinite element model updating. *Journal of Building Engineering* 97 (2024), p.110682.

Категорија М21а:

1. **M. Milojević**, V. Racic, M. Marjanović, M. Nefovska-Danilović. Influence of interpanel connections on vibration response of CLT floors due to pedestrian-induced loading. *Engineering Structures* 277 (2023), p.115432.

Категорија М23:

1. **M. Milojević**, E. Damnjanović, M. Nefovska-Danilović, M. Marjanović. Effects of material uncertainties on vibration performance of cross laminated timber floors. *Building Materials and Structures* 64 (2021), pp.153–157.

Категорија М33:

1. **M. Milojević**, V. Racic, M. Nefovska-Danilović. Impact of natural variability in structural properties on vibrations of CLT floors. *XIII International Conference on Structural Dynamics EURODYN 2026* (2026), pp. 2196–2206.
2. V. Racic, M. Nefovska-Danilović, **M. Milojević**, N. Simović, I. Glišović. Impact of interpanel connections on vibrations of CLT floors. *World Conference on Timber Engineering WCTE 2025* (2025), pp. 5746–5751.
3. M. Nefovska-Danilović, V. Racic, **M. Milojević**, Z. Mišković, S. Savatović. Experimental analysis of cross-laminated timber floors. *Journal of Physics: Conference Series EURODYN 2023 2647.13* (2023), p.132004.
4. **M. Milojević**, V. Racic, M. Marjanović, M. Nefovska-Danilović. Vibration serviceability assessment of complex-shaped CLT floor. *Journal of Physics: Conference Series EURODYN 2023 2647.13* (2023), p.132002.
5. M. Nefovska-Danilović, V. Racic, I. Glišović, M. Popović, M. Todorović, **M. Milojević**, R. Cvetković, N. Simović. Experimental study of pedestrian-induced vibration of cross-laminated timber floors. *International Symposium hosted by ASES* (2024), pp. 155–163.
6. V. Racic, M. Nefovska-Danilović, **M. Milojević**, M. Marjanović. Effect of Inter-panel Connections on Modal Properties of Cross-Laminated Timber Floors. *Experimental Vibration Analysis for Civil Engineering Structures EVACES 2023. Lecture Notes in Civil Engineering 432* (2023), pp. 589-598.
7. **M. Milojević**, S. Ljaljević, V. Racic, M. Marjanović, M. Nefovska-Danilović. Software for calculation of pedestrian-induced vibration of floor. *16th Congress hosted by ASES* (2022), pp. 256–265.
8. **M. Milojević**, E. Damnjanović, M. Nefovska-Danilović, M. Marjanović. Effects of material uncertainties on vibration performance of cross laminated timber floors. *International Symposium hosted by ASES* (2020).
9. **M. Milojević**, M. Nefovska-Danilović, S. Živanović, M. Marjanović. Effects of mechanical uncertainties on dynamic properties of cross-laminated timber floors. *XI International Conference on Structural Dynamics EURODYN 2020* (2020), pp. 3519–3526.

5. ЗАКЉУЧАК И ПРЕДЛОГ

На основу претходне анализе приложене докторске дисертације, испуњености задатака и циљева истраживања, примењене методологије, научног доприноса и добијених резултата, може се констатовати да докторска дисертација под насловом **Моделирање вибрација CLT међуспратних конструкција услед пешачког оптерећења применом анализе непоузданости** представља оригинални научни допринос и потврду да је кандидаткиња Марија Милојевић способна за самостални научно-истраживачки рад. Изузетан квалитет рада потврђен је чињеницом да су резултати дисертације изузетно добро прихваћени у међународној научној јавности. Са три рада у врхунским међународним часописима са SCI листе, као и са девет радова у зборницима међународних научних скупова, научни допринос Марије Милојевић може се сматрати изузетним.

На основу напред изнетог, Комисија предлаже Наставно-научном већу Грађевинског факултета Универзитета у Београду да се прихвати позитивна оцена докторске дисертације Марије Милојевић, мастер.инж.грађ, под насловом **Моделирање вибрација CLT међуспратних конструкција услед пешачког оптерећења применом анализе непоузданости** и да се упути захтев Већу научних области грађевинско-урбанистичких наука Универзитета у Београду за давање сагласности за јавну одбрану дисертације.

У Београду, 10. новембра 2026. године

ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ

.....
Проф. др Стана Живановић,
Универзитет у Ворику, Уједињено Краљевство

.....
В. проф. др Мирослав Марјановић,
Универзитет у Београду, Грађевински факултет

.....
В. проф. др Иван Глишовић,
Универзитет у Београду, Грађевински факултет