

НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ

Предмет: Реферат о урађеној докторској дисертацији кандидата Вељка Пујевића

Одлуком Наставно-научног већа Грађевинског факултета Универзитета у Београду бр. 486/10-17 од 29.06.2021. године, именовани смо за чланове Комисије за преглед, оцену и одбрану докторске дисертације кандидата Вељка Пујевића, дипл.грађ.инж., под насловом:

**НУМЕРИЧКО МОДЕЛИРАЊЕ УТИЦАЈА ВЕГЕТАЦИЈЕ И АТМОСФЕРЕ НА
ПОНАШАЊЕ НАСИПА ГРАЂЕВИНСКЕ ИНФРАСТРУКТУРЕ**

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

**NUMERICAL MODELING OF THE VEGETATION AND ATMOSPHERE EFFECT ON THE
BEHAVIOUR OF CIVIL INFRASTRUCTURE EMBANKMENTS**

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

Р Е Ф Е Р А Т

1. УВОД

1.1 Хронологија одобравања и израде дисертације

- 27.10.2011. године кандидат је уписао Докторске академске студије на Грађевинском факултету у Београду, на студијском програму Грађевинарство.
- 15.12.2017. године на седници Катедре за грађевинску геотехнику кандидат је изложио предложену тему докторске дисертације под насловом "Нумеричка анализа утицаја вегетације и атмосфере на понашање инфраструктурних насипа". Комисија коју је образовало Веће Катедре прихватила је тему докторске дисертације и предложила кандидату да тему пријави Наставно-научном већу Грађевинског факултета.
- 15.12.2017. године кандидат је пријавио тему докторске дисертације Наставно-научном већу Грађевинског факултета у Београду.
- 22.12.2017. године Наставно-научно веће Грађевинског факултета у Београду именовало је Комисију за оцену подобности теме и кандидата докторске дисертације у саставу: проф. др Мирјана Вукићевић, проф. др Мирослав Живковић, доц. др Селимир Леловић, проф. др Лидија Здравковић (Одлука бр. 486/4 од 22.12.2017.).
- 05.04.2018. године Наставно-научно веће Грађевинског факултета у Београду прихватило је извештај Комисије за оцену подобности теме и кандидата докторске дисертације, под коригованим насловом који гласи: "Нумеричко моделирање утицаја вегетације и атмосфере на понашање насипа грађевинске инфраструктуре" и своју одлуку доставило Већу научних области грађевинско-урбанистичких наука Универзитета у Београду на давање сагласности (Одлука бр. 486/6-17 од 10.04.2018.).
- 22.05.2018. године Веће научних области грађевинско-урбанистичких наука Универзитета у Београду дало је сагласност на предлог теме докторске дисертације под насловом

"Нумеричко моделирање утицаја вегетације и атмосфере на понашање насипа грађевинске инфраструктуре" (Одлука бр. 61206-1715/2-18 од 22.05.2018.).

- 18.06.2021. кандидат је предао коначну верзију докторске дисертације на преглед и оцену.
- На седници одржаној 24.06.2021. године (Одлука бр. 486/10-17 од 29.06.2021.), Наставно-научно веће Грађевинског факултета у Београду именовало је Комисију за оцену и одбрану докторске дисертације у следећем саставу:
 - др Мирјана Вукићевић, редовни професор, Грађевински факултет Универзитета у Београду,
 - др Сања Јоцковић, доцент, Грађевински факултет Универзитета у Београду,
 - др Лидија Здравковић, professor, Faculty of Engineering, Department of Civil and Environmental Engineering, Imperial College London редовни професор

1.2. Научна област дисертације

Тема докторске дисертације припада научној области Грађевинарство, и ужим научним областима Фундирање и Механика тла, које су дефинисане Статутом Грађевинског факултета Универзитета у Београду. За ментора дисертације одређена је др Мирјана Вукићевић, редовни професор Грађевинског факултета Универзитета у Београду.

1.3. Биографски подаци о кандидату

Вељко Пујевић рођен је 17.01.1985. године у Београду, где је завршио основну школу и гимназију природно-математичког смера. Носилац је Вукове дипломе за ученике основних школа. На Грађевински факултет Универзитета у Београду уписао се школске 2004. године, а 2011. године завршио Интегрисане академске судије (наставни план из 1993), Одсек за конструкције, са просечном оценом 9,40 и оценом 10 на дипломском раду, на тему "Прорачун темељне плоче на вишеслојном тлу са слојевима у нагибу". Добитник је стипендије предузећа "Енергопројект-Ентел" за постигнут успех током студија и више пута је похваљиван од стране Грађевинског факултета Универзитета у Београду за изузетан успех током редовних студија. Током основних студија учествовао је на Летњој школи у организацији Грађевинског факултета Универзитета у Београду и Техничког Универзитета у Минхену ("Vibrations of Structures due to Rail-Road Traffic", 2009. године).

Докторске академске студије на Грађевинском факултету Универзитета у Београду уписао је школске 2011/2012. године и до краја школске 2013/2014. положио све испите предвиђене наставним планом, са просечном оценом 9.88. Децембра 2017. године кандидат је пријавио тему докторске дисертације која је прихваћена у Априлу 2018. године, под називом "Нумеричко моделирање утицаја вегетације и атмосфере на понашање насипа грађевинске инфраструктуре".

Од јануара 2012. године запослен је на Грађевинском факултету Универзитета у Београду у звању асистента - студента докторских студија за ужу научну област Фундирање. Од избора у звање асистента - студента докторских студија одржава вежбања на предметима Фундирање на свим модулима студијског програма Грађевинарство и Специјални проблеми фондирања на модулу за Конструкције. Такође активно учествује у консултацијама при изради синтезних и мастер пројеката из области фондирања и геотехнике.

Од јесени 2015. као стипендиста боравио је на студијском усавршавању на Imperial College, London на катедри за геотехнику (Department of Civil and Environmental Engineering, шеф катедре проф. Др Лидија Здравковић). Вељко Пујевић је као аутор или коаутор објавио 3 рада у међународним часописима и 18 радова у зборницима домаћих и међународних научних скупова. Такође је коаутор једног националног техничког решења.

Вељко Пујевић је истраживач на Пројекту Министарства просвете, науке и технолошког развоја Републике Србије ТР 36028, од 2018. године. Члан је Српског друштва за механику тла и геотехничко инжењерство и Међународног друштва за механику тла и геотехничко инжењерство (ISSMGE). Такође, члан је комисије U182 за стандардизацију у области геотехнике. Као предавач учествује у курсевима перманентне едукације у организацији Грађевинског факултета у Београду, који се тичу примене Еврокода 7 у решавању геотехничких проблема.

2. ОПИС ДИСЕРТАЦИЈЕ

2.1. Садржај дисертације

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

Докторска дисертација је написана на енглеском језику. Садржи 201 страну, од којих је основни текст на 166 страна. Дисертација садржи 155 слика и 18 табела. На почетку су дате посвета, резиме на српском и енглеском језику са УДК бројем, као и листе слика и табела. На крају дисертације дата је кратка биографија кандидата. Након референци дата су два прилога, која се односе на прорачун референтне евапотранспирације, и математичких релација модификованог Barcelona Basic Model-a.

Дисертација је подељена у шест поглавља:

1. Увод
2. Преглед комонената интеракције система тло-вегетација-атмосфера са становишта инфраструктурних насипа
3. Преглед инжењерских облика понашања незасићених материјала и нумеричких алата за моделирање истих
4. Експериментална деоница - Magnolia road - валидација предложеног нумеричког модела
5. Параметарска анализа и дискусија резултата
6. Закључци и предлози за будућа истраживања

У списку коришћене литературе налази се 140 референци које детаљно приказују тренутно стање проблема предметне интеракције на понашање незасићених геоматеријала из перспективе инфраструктурних насипа.

2.2. Кратак приказ појединачних поглавља

Дисертација се састоји од шест поглавља и два прилога. Дисертација је организована прогресивно, тако да завршне напомене у сваком поглављу служе као основа за наредно поглавље.

У Уводу је објашњен реалан физички проблем који постоји дуж железничке инфраструктуре у Великој Британији, а потиче од интеракције тла-вегетације и атмосфере. Последице које се огледају у рестрикцији брзине кретања шинског саобраћаја и великим финансијским губицима који потичу између осталог и из потребе за редовним скупим нивелационим радовима шинског колосека, чине предметно истраживање недвосмислено оправданим. Такође, дат је кратак преглед досадашњих достигнућа у погледу нумеричког моделирања поменутог проблема, са акцентом на недостатке, који потичу од необухватања свих релевантних физичких феномена који сачињавају овај комплексан мулти-дисциплинарни проблем. У наставку поглавља јасно су дефинисани циљеви истраживања, претпоставке и методологија. На самом крају дат је кратка преглед свих поглавља дисертације.

У уводном делу Другог поглавља описане су технике грађења и врсте материјала коришћене у трасирању Британске железнице у другој половини 19. века, са фокусом на разлике у односу на савремену праксу. У наставку поглавља акценат је стављен на преглед фундаменталних чинилаца интеракције тла-вегетације и атмосфере. Дат је врло детаљан преглед свих релевантних процеса водног биланса тла (хидролошког циклуса). Фокус је усмерен на дубље разумевање механизма евапотранспирације као и на идентификовање адекватних метода за процену стопе потенцијалне евапотранспирације. У наставку дат је преглед постојећих "RWUM" модела за симулацију процеса црпљења воде путем кореног система. На самом крају поглавља приказане су могуће стратегије нумеричког моделирања процеса предметне интеракције, са одговарајућим примерима из доступне литературе.

У Трећем поглављу дат је преглед тренутног стања знања о понашању незасићених геоматеријала. Акцент је стављен објашњење механизма и феномена меродавних за разматрани физички проблем, а који укључују капиларне ефекте и механизме ретенције што се тиче хидрауличног аспекта, односно микро-механичке феномене одговорне за комплексно волуметријско понашање. У наставку поглавља детаљно је објашњена нумеричка формулација спрегнутог хидро-механичког понашања незасићених геоматеријала. У завршном делу дат је преглед постојећих нумеричких алата за моделирање понашања незасићених материјала имплементираних у некомерцијални нумерички код ICFEP.

Четврто поглавље у уводном делу даје детаљни приказ експерименталне деонице Magnolia-road, железничке пруге на југоистоку Енглеске. Уводни део бави се интерпретацијом резултата теренских испитивања из перспективе утицаја вегетације. У наставку систематски је описан процес креирања нумеричког модела и дефинисања свих репрезентативних фаза прорачуна и одговарајућих хидрауличких граничних услова који чине есенцију предметне интеракције. Врло детаљно су елаборирани избор и калибрација релевантних материјалних параметара хидраулично-механичких конститутивних модела. Након тога дат је приказ и дискусија резултата за два фундаментално различита типа механичких конститутивних модела. У завршном делу Четвртог поглавља спроведен је процес валидације предложеног нумеричког модела у форми компаративне анализе са резултатима теренских мерења. Висока поузданост са аспекта репродукције квалитативног понашања као и задовољавајућа способност квантитативног предвиђања потврдили су могућности предложеног нумеричког модела да симулира проблем утицаја вегетације и падавина на понашање инфраструктурних насипа.

У Петом поглављу приказани су резултати опсежне параметарске студије спроведене са циљем да се идентификују и затим рангирају кључни параметри према нивоу осетљивости релевантних резултата. Детаљно је разматрано осам променљивих за фазу сезонских циклуса сушења и влажења, која одговара присуству дрвећа великог капацитета црпљења воде на косинама насипа. Фактори разматрани у овој фази такође су омогућили да се понуде могућа објашњења за велика квантитативна одступања алтернативних прорачунских приступа предложених у публикованој литератури. За фазу након уклањања вегетације анализирани су две променљиве са циљем да се понуде практичне препоруке у погледу управљања вегетацијом дуж инфраструктурних насипа.

У последњем Шестом поглављу резимирани су главни закључци и импликације целокупног истраживања како са аспекта нумеричког моделирања предметног проблема тако и са становишта управљања вегетацијом. На самом крају дат је низ препорука за даља истраживања у области инфраструктурних насипа чије је понашање компромитовано комбинованим утицајем вегетације и падавина.

3. ОЦЕНА ДИСЕРТАЦИЈЕ

3.1. Оригинаалност

Докторска дисертација "Нумеричко моделирање утицаја вегетације и атмосфере на понашање насипа грађевинске инфраструктуре" представља оригинални научни рад у тренутно врло актуелној области одрживости постојеће саобраћајне (железничке) инфраструктуре. Иако први покушаји нумеричког моделирања проблема утицаја вегетације и атмосферских падавина на понашање инфраструктурних насипа датирају још с почетка двехиљадитих, до сада предложени нумерички приступи, као последица бројних идеализација нису имали прогнозни карактер. Широки спектар напредних алата за моделирање понашања незасићених материјала као и софистицирани климатски гранични услови, развијани претходних двадесет година на Imperial College у Лондону, омогућили су да се проблему утицаја интеракције система тло-вегетација-атмосфера на хидро-механички одговор незасићених насипа израђених од глиновите испуне, приступи на један нов свеобухватан начин. Оригинаалност приступа (концептуалног модела) огледа се у обухватању до сада најкомплетнијег сета физичких процеса. Осим тога упоредна анализа резултата добијених применом два фундаментално различита механичка конститутивна модела, омогућила је да се по први пут добије увид у осетљивост хидрауличног понашања инфраструктурних насипа изложених утицају вегетације и атмосфере, на избор типа конститутивног модела. Такође, опсежна

параметарска студија адекватно изабраних променљивих омогућила је да се понуде одговори у погледу узрока квантитативне неподобности до сада коришћених нумеричким модела.

3.2. Осврт на референтну и коришћену литературу

Током израде докторске дисертације, кандидат је проучио релевантну литературу. Навео је 140 референци које су релевантне за област дисертације. Цитиране референце обухватају широк дијапазон тема обрађених у дисертацији и чине одличну основу за будући рад у области дисертације. Кандидат се адекватно позивао на постојећу литературу током израде рада.

3.3. Опис и адекватност примењених научних метода

Као што је већ претходно истакнуто коришћени научни приступ базиран на концепту "нумеричког експеримента" је веома иновативан и свеобухватан и самим тим у потпуности испуњава захтеве докторске дисертације.

Кандидат је детаљно анализирао постојећу литературу везану за феномен интеракције система тло-вегетација-атмосфера. Детаљно су сагледани сви релевантни процеси водног биланса тла. Том приликом процес евапотранспирације се због своје комплексне природе и значаја у погледу дефинисања хидрауличких граничних услова, издвојио као нарочито битан, те је стога посебна пажња посвећена прегледу и идентификовању прикладних метода за процену стопе евапотранспирације. У вези са процесом евапотранспирације, кандидат је опсежно анализирао постојеће поступке за моделирање кореног система вегетације уз оцену адекватности вегетацијског граничног услова доступог у нумеричком коду ICFEP.

Такође детаљно су анализирани потенцијалне стратегије нумеричког моделирања феномена интеракције система тло-вегетација-атмосфера и том приликом је као најподобнији и најкомплетнији поступак идентификована спрегнута филтрационо-деформациона анализа у комбинацији са одговарајућим хидро-механичким конститутивним моделима механике незасићених материјала.

Може се закључити да је кандидат применио одговарајуће научне методе, као и савремене технике нумеричке анализе како би остварио предложене циљеве дисертације. Неке од примењених научних метода сумиране су у наставку:

- метода коначних елемената (МКЕ),
- нелинеарна временска анализа комбинованог утицаја атмосферских падавина и вегетације на понашање инфраструктурног насипа применом МКЕ,
- интеракција тло-вегетација-атмосфера: методе за процену стопе евапотранспирације,
- механика незасићених материјала.

3.4. Применљивост остварених резултата

Импликације спроведеног истраживања могу се поделити у две целине: допринос унапређењу нумеричког моделирања утицаја вегетације и атмосфере на понашање незасићених насипа од глиновите испуне, и допринос управљању вегетацијом дуж косина насипа саобраћајне инфраструктуре.

Демонстрирано је да је усвојени нумерички модел способан да пружи задовољавајуће квантитативне прогнозе временских варијација релевантних излаза (напона сукције и померања). Осим тога демонстрирано је да и релативно једноставан еласто-пластични механички конститутивни модел за незасићене материјале (незасићени Mohr-Coulomb), са свега једним допунским параметром је у стању да једнако квалитетно као и напредни незасићени модел критичног стања, репродукује хидро-механичко понашање насипа изложених климатским утицајима. Та чињеница има значајан практични допринос јер омогућава да се релативно "једноставно" симулирају различите шеме вегетације (дрвећа великог капацитета црпљења подземне воде) и њихов утицај на перформансе инфраструктурних насипа.

Приказани резултати који се односе на утицај вегетације и њеног уклањања имају непосредну практичну примену на процес менаџмента вегетације. То се нарочито односи на оријентационе препоруке у погледу обима уклањања великог дрвећа и последичног утицаја на стабилност инфраструктурних насипа. Осим тога, добијени резултати могу да послуже и за апроксимативно дефинисање поља порних притисака како за фазу постојања тако и за фазу након уклањања

вегетације. На тај начин омогућено је инжењерима у пракси да у комбинацији са класичним методама граничне равнотеже рутински утврде одговарајуће факторе стабилности.

3.5. Оцена достигнутих способности кандидата за самостални научни рад

Кандидат је стекао значајну самосталност у научном раду кроз процес припреме и израде докторске дисертације, полагањем испита на факултету, студијским боравком на престижном европском универзитету и објављивањем научних радова. Кандидат је радио у међународној научној заједници, одабрао је савремене методе, унапредио ове методе и значајно допринео напретку заједнице. Кандидат је кроз свој рад такође показао способност за критичку анализу научне литературе, развој и предлагање оригиналних решења која доводе до бољих резултата у поређењу са постојећим. Све заједно потврђује научну зрелост и изузетан истраживачки потенцијал кандидата у области грађевинске геотехнике.

4. ОСТВАРЕНИ НАУЧНИ ДОПРИНОС ДИСЕРТАЦИЈЕ

4.1. Приказ остварених научних доприноса

Основни научни доприноси у дисертацији су:

1. Демонстрирано је да хидраулички одговор незасићених инфраструктурних насипа изложених комбинованом деловању атмосферских падавина и вегетације практично не зависи од типа механичког конститутивног модела;
2. Показано је да и крајње једноставан незасићени еласто-пластични модел Mohr-Coulomb типа са свега једним допунским параметром, чију је приближну иницијалну вредност могуће директно проценити из модула еластичности грануларног скелета тла, је у стању да пружи задовољавајуће нумеричке прогнозе;
3. Демонстрирано је да је спрезање хидрауличког и механичког понашања од посебног значаја за тачност прогнозних резултата понашања инфраструктурних насипа изложених деловању климе и вегетације, односно да занемаривање флексибилности грануларног скелета тла за последицу има прогнозу много већих сезонских варијација порних притисака и последично већих померања;
4. Параметарском студијом утврђено је да су крива влажења (SWRC) и водопрпусност кључни параметри на које је глобални хидраулички одговор најосетљивији;
5. Илустрована је и објашњена неприкладност анализе за засићено тло, односно неопходност примене првенствено незасићених хидрауличких конститутивних модела;
6. Показано је да је управљање вегетацијом веома комплексан задатак, јер дрвеће великог капацитета црпљења воде делује с једне стране повољно на стабилност, а с друге стране врло неповољно на употребљивост индукујући сукцесивне циклусе деформација скупљања и бубрења;

4.2. Критичка анализа резултата истраживања

Кандидат је предложио и валидирао МКЕ нумерички модел глиновитог инфраструктурног насипа изложеног комбинованом деловању атмосфере и вегетације. Такође, кроз процес поређење са напредним конститутивним моделом за незасићено тло из фамилије модела критичног стања за чије је потпуно дефинисање неопходно калибрисати и унети 23 параметра, демонстрирана је подобност и практичност неупоредиво једноставнијег еласто-пластичног Mohr-Coulomb модела за незасићено тло који се базира на свега 6 материјалних параметара, односно једним више у односу на класични Mohr-Coulomb модел за засићено тло. Због илустроване ефикасности, која се осим тачности огледа и у значајној уштеди времена потребној за извршење високо нелинеарних система једначина МКЕ, поменути еласто-пластични Mohr-Coulomb модел искоришћен је као основа за највећи број нумеричких симулација спроведених у оквиру параметарске студије. Илустровани резултати и закључци проистекли из параметарске анализе имају велики непосредан практични значај са становишта управљања вегетацијом и последичном редукацијом трошкова одржавања. Такође предложена методологија и нумерички приступ има широку примену и на решавање других актуелних инжењерских проблема као што су евалуација одрживости постојеће

саобраћајне инфраструктуре из перспективе климатских промена, и анализа реактивације клизишта проузрокована инфилтрацијом атмосферских падавина.

Добијени резултати представљају одличну основу и мотивацију за даље истраживање. Иако је приказани МКЕ нумерички експеримент пружио значајан увид у понашање инфраструктурних насипа изложених утицају интеракције система тло-вегетација-атмосфера, поједини аспекти понашања који укључују утицај десикационих пукотина и хистерезиса криве влажења (SWRC), нису до краја истражени, превасходно као последица недостатка поузданих експерименталних резултата за њихово калибрисање.

4.3. Верификација научних доприноса

Током свог истраживања, кандидат је објавио следеће радове који су у вези са истраживањем:

Категорија M21:

1. Vukicević M, Marjanović M, **Pujević V**, Jockovic S. The Alternatives to Traditional Materials for Subsoil Stabilization and Embankments Construction. *Materials*. 2019; 12(18): 3018. doi.org/10.3390/ma12183018

Категорија M23:

1. Vukicević M, **Pujević V**, Marjanović M, Jockovic S, Maraš-Dragojevic S. Stabilization of fine-grained soils with fly ash. *Građevinar*. 2015; 67(8): 761-770. doi.org/10.14256/JCE.1281.2014

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 **НУМЕРИЧКО МОДЕЛИРАЊЕ УТИЦАЈА ВЕГЕТАЦИЈЕ И АТМОСФЕРЕ НА ПОНАШАЊЕ НАСИПА ГРАЂЕВИНСКЕ ИНФРАСТРУКТУРЕ** представља значајан и оригинални научни допринос и потврду да је кандидат **Вељко Пујевић** способан за самостални научно-истраживачки рад.

На основу напред изнетог, Комисија предлаже Наставно-научном већу Грађевинског факултета Универзитета у Београду да се докторска дисертација **НУМЕРИЧКО МОДЕЛИРАЊЕ УТИЦАЈА ВЕГЕТАЦИЈЕ И АТМОСФЕРЕ НА ПОНАШАЊЕ НАСИПА ГРАЂЕВИНСКЕ ИНФРАСТРУКТУРЕ** кандидата Вељка Пујевића прихвати, изложи на увид јавности и упуту на коначно усвајање Већу научних области грађевинско-урбанистичких наука Универзитета у Београду за давање сагласности за јавну одбрану докторске дисертације.

ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ

.....
др Мирјана Вукићевић, редовни професор
Грађевински факултет Универзитета у Београду

.....
Др Лидија Здравковић, редовни професор
Faculty of Engineering, Department of Civil and Environmental
Engineering, Imperial College, London

.....
др Сања Јоцковић, доцент
Грађевински факултет Универзитета у Београду