

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ

Грађевински факултет

НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ

Предмет: Извештај комисије о оцени докторске дисертације кандидата Слободана Радовановића

Одлуком Наставно-научног већа Грађевинског факултета Универзитета у Београду од 26.6.2020. године (одлука бр. 344/14-17 од 29.06.2020), именовани смо за чланове Комисије за оцену и одбрану докторске дисертације кандидата Слободана Радовановића, мастер инж. грађ. под насловом:

УТИЦАЈ ЕФЕКТА РАЗМЕРЕ НА ПАРАМЕТРЕ МОДЕЛА МЕХАНИЧКОГ ПОНАШАЊА СТЕНСКЕ МАСЕ

Наслов на енглеском језику:

THE INFLUENCE OF SCALE EFFECT UPON MODEL PARAMETERS OF ROCK MASS MECHANICAL BEHAVIOUR

Након прегледа достављене докторске дисертације, Комисија је сачинила следећи:

ИЗВЕШТАЈ

1 УВОД

1.1 ПОДАЦИ О ПРОЦЕДУРИ ПРИЈАВЉИВАЊА И ПРЕДАЈИ ДИСЕРТАЦИЈЕ

На седници Већа катедре за грађевинску геотехнику одржаној 04.09.2017. Слободан Радовановић изложио је предложену тему докторске дисертације под насловом „Анализа утицаја ефекта размере на параметре модела механичког понашања стенске масе“. Комисија коју је образовало Веће Катедре је донела одлуку да прихвати тему докторске дисертације и предложила је кандидату да тему пријави Наставно-научном већу Грађевинског факултета.

Одлуком Наставно-научног већа Грађевинског факултета Универзитета у Београду од 14.9.2017. године, заведену под бројем 344/4, именована је комисија за оцену научне заснованости теме докторске дисертације под насловом „Анализа утицаја ефекта размере на параметре модела механичког понашања стенске масе“ у саставу: в.проф. др Дејан Дивац, доц. др Снежана Мараш-Драгојевић, проф. др Драгослав Шумарац, проф. др Ненад Грујовић (Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу), в.проф. др Бобан Стојановић, дипл.маш.инж. (Природно-математички факултет Универзитета у Крагујевцу).

Комисија за оцену научне заснованости теме докторске дисертације је формирала позитиван извештај и предложила Наставно-научном већу Грађевинског факултета да прихвати предложену тему докторске дисертације под коригованим насловом: „Утицај ефекта размере на параметре модела механичког понашања стенске масе“, на енглеском: „The influence of scale effect upon model parameters of rock mass mechanical behaviour“.

Позитиван извештај Комисије за оцену научне заснованости теме докторске дисертације је усвојен на седници Наставно-научног већа Грађевинског факултета одржаној 26.10.2017 (одлука бр. 10/2017 од 31.10.2017.). Веће научних области грађевинско-урбанистичких наука Универзитета у Београду на седници одржаној 7.11.2017. године (одлука бр. 61206-4477/2-17 од 7.11.2017), усвојило је предлог теме докторске дисертације кандидата Слободана Радовновића.

Кандидат је урађену докторску дисертацију предао Служби за студентска питања Грађевинског факултета Универзитета у Београду дана 19.06.2020.

Наставно-научно веће Грађевинског факултета Универзитета у Београду на седници одржаној 26.6.2020 је донело одлуку (одлука број 344/14-17 од 29.06.2020) о именовању чланова комисије за оцену и одбрану докторске дисертације у саставу:

- в. проф. др Дејан Дивац, дипл.грађ.инж. (Грађевински факултет Универзитета у Београду),
- р. проф. др Мирјана Вукићевић (Грађевински факултет Универзитета у Београду),
- р. проф. др Драгослав Шумарац, дипл.грађ.инж. (Грађевински факултет Универзитета у Београду),
- р. проф. др Владан Кузмановић дипл.грађ.инж. (Грађевински факултет Универзитета у Београду),
- доц. др Драган Ракић, дипл.маш.инж. (Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу).

1.2 НАУЧНА ОБЛАСТ ДИСЕРТАЦИЈЕ

Тема дисертације припада научној области Грађевинарство и ужој научној области Механика стена и подземне конструкције, која је дефинисана Статутом Грађевинског факултета Универзитета у Београду. За ментора дисертације одређен је в.проф.др Дејан Дивац, дипл. грађ.инж ванредни професор Грађевинског факултета Универзитета у Београду и научни саветник у Институту за водопривреду „Јарослав Черни“.

1.3 БИОГРАФСКИ ПОДАЦИ О КАНДИДАТУ

Слободан Радовановић је рођен 15.02.1989. године у Ваљеву. Од оца је Драгољуба Радовановић и мајке Радмиле Радовановић. Основну школу „Свети Сава“ завршио је као носилац дипломе Вук Караџић и као Ученик генерације. Природно-математички смер у „Ваљевској гимназији“ је завршио 2008. године као носилац Вукове дипломе и као Ученик генерације и најбољи ученик школе 2007/2008.

Школске 2008/2009. се уписао на основне академске студије на Грађевинском факултету у Београду, а завршио је модул за конструкције школске 2011/2012 са просечном оценом 9,73. За синтетни пројекат на тему „Пројекат челичне конструкције индустријске хале са међуспратном конструкцијом“, добио је оцену 10.

Мастер академске студије, такође на Грађевинском факултету у Београду, уписао је школске 2012/2013. Просечна оцена остварена на мастер студијама је 9,86. Мастер рад на тему „Напонско-деформацијска анализа тунела у изградњи на примеру евакуатора великих вода на ХЕ Бочац“ је одбранио 10. октобра 2013. са оценом 10.

Докторске студије на Грађевинском факултету у Београду је уписао школске 2013/2014. на модулу за конструкције на катедри за Грађевинску геотехнику. Положио је све испите предвиђене наставним планом и програмом са просечном оценом 9,62.

У току студирања Слободан Радовановић је остварио значајна признања и награде од којих се истичу: награда Грађевинског факултета за најбољег студента генерације Грађевинског факултета, повеља Универзитета у Београду за најбољег студента генерације на Грађевинском факултету, награду из фонда професора Владимира Королије за студента са највишом просечном оценом у току студирања

на одсеку за конструкције, награду Града Ваљева за изузетан допринос у области ученичког и студентског стваралаштва, поводом дана Града 20. марта 2014.

Као студент, Слободан Радовановић је био ангажован као студент демонстратор на следећим предметима: Техничка физика, Динамика конструкција и земљотресно инжењерство, Стабилност конструкције и Спрегнуте конструкције.

Поред наставних активности, Слободан Радовановић је био активан члан Студентског парламента Грађевинског факултета од 2009-2013. Обављао је функцију студента продекана школске 2011/2012. и школске 2012/2013. Био је Члан Већа студената продекана Универзитета у Београду и члан Савета Грађевинског факултета 2011-2013. године.

Слободан Радовановић је запослен у Институту за водопривреду „Јарослав Черни“. У периоду од 2014-2020 био је запослен и на Грађевинском факултету као асистент-студент докторских студија где је учествовао у извођењу наставе на предметима: Механика стена и подземне конструкције и Саобраћајни тунели.

Положио је стручни испит за грађевинску струку-смер грађевинске конструкције 22. јуна 2016. у Инжењерској комори Србије. Поред стручног испита у Републици Србији, положио је стручни испит из струке грађевинарство смер грађевинске конструкције у Републици Српској 26.5.2017. На основу досадашњег рада у струци, Слободан Радовановић поседује следеће лиценце: Лиценцу 310 одговорног пројектанта грађевинских конструкција објеката високоградње, нискоградње и хидроградње издату од стране Инжењерске коморе Србије; Лиценцу 316 одговорног пројектанта објеката грађевинске геотехнике, издату од стране Инжењерске коморе Србије и Лиценцу овлашћеног пројектанта за израду техничке документације, конструктивна фаза и надзор издату од стране Министарства за просторно уређење, грађевинарство и екологију Републике Српске.

У оквиру рада у Институту „Јарослав Черни“, Слободан Радовановић је учествовао у изради великог броја идејних пројеката, главних пројеката, студија, анализа и експертиза и то као учесник у изради пројеката, руководилац пројеката и одговорни пројектант.

Члан је српског друштва за тунеле, потпредседник Српског друштва за механику стена и члан је Међународног друштва за механику стена.

2 ОПИС ДИСЕРТАЦИЈЕ

2.1 САДРЖАЈ ДИСЕРТАЦИЈЕ

Докторска дисертација кандидата Слободана Радовановића под насловом „Утицај ефекта размере на параметре модела механичког понашања стенске масе“ садржи укупно 170 страна од којих је основни текст 150 страна. Дисертација је писана на српском језику ћириличним писмом и подељена је у 11 поглавља:

1. Увод
2. Приказ основних структурно-механичких својстава стенских маса
3. Основни приступи у моделирању механичког понашања стенских маса
4. Приказ различитих искустава у истраживању ефекта размере у стенским масама
5. Конститутивни модел са пластичним оштећењем (DP модел)
6. МКЕ модели експерименталних испитивања у стенској маси
7. Параметри DP модела и дискусија
8. Анализа утицаја ефекта размере на параметре DP модела и еластичног модела материјала на основу експерименталних испитивања
9. Утицај хетерогености на параметре DP модела на основу експерименталних испитивања

10. Могућност квантификације параметара DP модела за стенску масу у размери објекта

11. Закључак

Дисертација садржи 139 слика и 23 табеле. Списак цитиране литературе садржи 104 наслова. На почетку дисертације дат је резиме на српском и енглеском језику са кључним речима. Биографија кандидата је дата 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 докторске дисертације има 11 поглавља и преглед коришћене литературе. На почетку текста дат је садржај, изјава захвалности, резиме и списак кључних речи на српском и енглеском језику.

Структура рада је дефинисана тако да се прикажу сви аспекти научног истраживања спроведеног у оквиру ове дисертације.

У првом, уводном поглављу, приказани су предмет, циљеви, задаци и садржај истраживања. Уведени су основни појмови који се односе на механичко понашање стенских маса и утицај ефекта размере. Наведени су основни проблеми при дефинисању параметара механичког понашања и различити аспекти процене тих параметара. Дефинисани су циљеви задаци који су били предмет ове дисертације.

У поглављу 2, приказана су основна структурно-механичка својстава стенских маса са освртом на механичко понашање монолита, дисконтинуитета и структуре стенске масе при одређеним напонским стањима.

У поглављу 3 дат је приказ разних приступа који се користе за моделирање механичког понашања стенских маса као и приказ конститутивних модела (еластични, еласто-пластични, еласто-пластични са ојачањем/оштећењем) који се користе за дефинисање веза између напона и деформација у стенама.

У поглављу 4 сумирана су различита искуства других истраживача везана за истраживање ефекта размере у стенским масама. Приказани су експериментални показатељи присуства ефекта размере у стенским масама и различити приступи за квантификацију ефекта размере које су предложили други истраживачи.

У поглављу 5 приказане су теоријске основе конститутивног модела са пластичним оштећењем (енгл. *damage plasticity model*, који у дисертацији носи ознаку DP модел) који је први пут примењен за моделирање понашања стенске масе у оквиру ове дисертације. У оквиру овог поглавља дате су теоријске основе са свим једначинама које приказују везе између одређених унутрашњих променљивих. Приказан је нумерички алгоритам за имплементацију модела у програму ПАК. Како би се приказало понашање модела при основним опитима (једноосно оптерећење, двоосно оптерећења, циклично једноосно оптерећења) урађени су верификациони примери који су поређени са резултатима из литературе чиме је извршена верификација нумеричког алгоритма.

За нумеричке анализе у оквиру ове дисертације коришћени су резултати експерименталних испитивања у стенској маси (лабораторијски и *in situ* опити) и одговарајући МКЕ модели који су формиран да би се симулирало напонско-деформационо стање при датим опитима. У поглављу 6 дат је опис коришћених опита у стенској маси и приказ МКЕ модела који служе за нумеричку симулацију датих опита.

У поглављу 7 извршена је анализа и дискусија параметара DP модела за стенску масу при различитим нумеричким опитима. Пре свега извршена је дискусија о математичком и физичком значењу појединачних параметара. Извршена је и анализа утицаја параметара модела на механичко понашање при опиту једноосног цикличног притиска на узорку стенске масе, при опиту смицања и опиту притиска у *in situ* условима. На крају, дат је општи алгоритам за одређивање вредности параметара који је примењен у оквиру ове дисертације за различите величине размере стенске масе.

У оквиру поглавља 8 извршена је анализа утицаја ефекта размере на параметре DP модела и параметре еластичног конститутивног модела коришћењем резултата лабораторијских и *in situ* испитивања на локацији будуће бране „Пошћење“. Коришћени су резултати лабораторијских испитивања узорка стенске масе при опиту једноосног цикличног притиска и резултати опита смицања на поменутој локацији. Коришћењем формираних МКЕ модела експеримената, предложеног алгоритма и оптимизационих метода, одређене су вредности параметара DP модела и еластичног модела материјала за обе размере узорка.

Кроз поглавље 9 извршена је анализа утицаја хетерогености и ефекта размере на параметре DP модела на основу резултата експерименталних испитивања *in situ* опитима притиска и опитима смицања на локацији бране ХЕ „Ђердап 1“. Ови опити су изведени на локацији бране у време изградње. *In situ* опити су за потребе нумеричких симулација моделирани применом методе коначних елемената узимајући у обзир све специфичности које се односе на контурне услове и оптерећења при опитима. Одређивање вредности параметара конститутивног модела је извршено применом оптимизационих метода а коришћењем МКЕ модела *in situ* опита и резултата испитивања на истим у складу са предложеним алгоритмом. За анализу утицаја ефекта размере коришћени су и резултати лабораторијских испитивања једноосног притиска на узорцима стенске масе на датој локацији.

У поглављу 10 приказане су могућности примене предложеног алгоритма за одређивање вредности параметара DP модела за стенску масу која је у размери објекта. Овде је приказан најсложенији вид нумеричких симулација и веома сложена процедура за одређивање вредности параметара. Конкретно, анализа је извршена за стенску масу у фундаменту бране ХЕ „Ђердап 1“ узимајући у обзир интеракцију бетонске конструкције, стенске масе и воде. Применом предложеног алгоритма, МКЕ модела интеракције бране и стенске масе и резултата техничког осматрања на брани и других испитивања, одређене су вредности параметара DP модела. Дата је анализа и дискусија добијених резултата.

У оквиру поглавља 11 дат је закључак у коме су приказани основни ставови о резултатима добијеним на основу целокупног истраживања у оквиру дисертације.

3 ОЦЕНА ДИСЕРТАЦИЈЕ

3.1 САВРЕМЕНОСТ И ОРИГИНАЛНОСТ

Стенске масе су по својој структури нехомогене, испуцале, анизотропне, и природно напрегнуте. Састоје се од интактне стене или стенског монолита и макрооштећења у која спадају: пукотине, равни слојевитости, раседи и други облици прекида. Сва макрооштећења се могу једном речју назвати дисконтинуитети. Распоред дисконтинуитета у структури стенске масе може бити произвољан те самим тим условљава њену анизотропију и хетерогеност и веома сложено механичко понашање. Утицај дисконтинуитета доводи до промене механичких карактеристика стенске масе у односу на посматрани стенски монолит. У вези са тим уводи се појам ефекта размере као утицај дисконтинуитета на механичка својства стенских маса. Величина размере утиче на механичке карактеристике стенске масе до одговарајуће размере, након које се даљим повећањем размере стенске масе, механичке карактеристике не мењају. Запремина која представља најмању запремину која се може сматрати репрезентативном за механичке карактеристике стенске масе, назива се репрезентативна елементарна запремина (енгл. *Representative elementary volume*).

Постојање ефекта размере представља велики проблем за дефинисање механичког понашања стенске масе у којој се граде објекти (на пример бране, тунели, косине и друго). Механичко понашање стенских маса се најчешће дефинише испитивањима која се спроводе у лабораторијским или *in situ* условима. Лабораторијским испитивањима се добијају одређене механичке карактеристике које се више односе на интактну стену него на испуцалу стенску масу. Са друге стране опити *in situ* се изводе у већој размери и узимају у обзир и присуство дисконтинуитета у стенској маси. Ово их чини поузданијим у односу на лабораторијске опите приликом дефинисања механичких карактеристика стенских маса.

За напонско-деформационе анализе грађевинских објеката који се граде у стенама неопходно је познавати отпорна својства стенске масе која се дефинишу помоћу параметара механичког понашања.

Због присуства дисконтинуитета, и последично ефекта размере, дефинисање параметара механичког понашања стенских маса је изузетно сложено јер пре свега зависи од сложености структуре стенске масе која се мења у зависности од величине објекта и величине размере која се посматра. Основна чињеница, која је у великом броју случајева експериментално потврђена је да се са повећањем величине размере стенске масе, механичке отпорности стенских маса смањују као последица присуства дисконтинуитета то јест утицаја ефекта размере.

У литератури постоје одређена искуства која су други аутори дали а односе се на проблематику анализе утицаја ефекта размере у стенским масама. Најчешће је утицај ефекта размере анализиран коришћењем разних корелација између појединих отпорних својстава стенске масе и величине узорка стенске масе. Даље, аутори су давали и корелације између различитих отпорних својстава стенске масе и других геомеханичких параметара као што су геомеханичке класификације које нису директно повезани са величином размере али се односе на стенску масу као структуру. У данашње време, најчешће се истраживачи баве анализом ефекта размере, коришћењем сложених нумеричких метода које у структури узимају утицај и монолита и дисконтинуитета. Међутим, сва наведена истраживања имају одређене недостатке и немогућности практичне примене. Успостављене корелације имају велики број ограничења приликом примене и засноване су на коришћењу параметара који представљају субјективне категорије. Примена нумеричких метода са утицајем дисконтинуитета у структури је компликована са становишта практичне примене и у већини случајева није изводљива.

У вези са наведеним чињеницама, може се рећи да је ефекат размере један од најважнијих феномена у стенским масама и да истраживање у овој области представља савремени тренд истраживања у механици стена и анализи конструкција које се граде у стенама. Погрешна интерпретација параметара механичког понашања стенских маса при пројектовању грађевинских конструкција које се граде у стенама може довести до несагледивих последица по стабилност и носивост конструкције. Непознаница параметара и утицај ефекта размере на те параметре је један од главних проблема при напонско-деформационим анализама интеракције стене и објекта.

Предмет истраживања у оквиру ове дисертације је анализа утицаја ефекта размере на параметре модела механичког понашања стенске масе. Као модел механичког понашања стенске масе, коришћен је конститутивни модел са пластичним оштећењем и еластични конститутивни модел. Примењени модел са пластичним оштећење је нумерички имплементиран у програмски пакет ПАК, извршена је његова адаптација и примена за моделирање стенске масе, први пут у оквиру ове дисертације. Наведени модел има могућности да симулира најсложенија напонско-деформациона стања у стенској маси.

Утицај ефекта размере је анализиран посматрањем различитих величина размере стенске масе која је била изложена дејству оптерећења, полазећи од узорка стенске масе, опита ин ситу у стенској маси па до размере стене у интеракцији са браном. Анализиране су могуће примене и квантификације параметара примењеног конститутивног модела са пластичним оштећењем за наведене размере стенске масе.

Имајући у виду да су у оквиру истраживања у овој дисертацији примењена савремена достигнућа у области конститутивног моделирања материјала, затим нумеричког моделирања применом методе коначних елемената и употреба резултата реалних експерименталних испитивања и мерења, може се рећи да читаво истраживање и добијени резултати представљају савремено и оригинално научно достигнуће.

3.2 ОСВРТ НА РЕФЕРЕНТНУ И КОРИШЋЕНУ ЛИТЕРАТУРУ

При изради ове дисертације, коришћене су 104 библиографске јединице. Већину референци чине радови који су објављени у врхунским међународним часописима и на међународним конференцијама. Део референци се односи и на поглавља појединих књига домаћих и страних аутора. Одређене референце се односе на испитивања у стенској маси и дате су као препоруке Међународног друштва за механику стена. Посебно треба нагласити да део референци представља и техничка документација која је израђена у Институту „Јарослав Черни“ а на чијој изради је учествовао и кандидат Слободан Радовановић. Део истраживања у оквиру ове дисертације, публикован је и у датој техничкој документацији.

3.3 ОПИС И АДЕКВАТНОСТ ПРИМЕЊЕНИХ НАУЧНИХ МЕТОДА

У оквиру ове дисертације, коришћене су следеће научне методе:

- Анализа и синтеза постојећих резултата из области предмета истраживања,
- методе експерименталног истраживања,
- систематизација, критичка анализа и компаративна метода при обради резултата експерименталног истраживања,
- анализа проблема методом коначних елемената,
- анализа проблема употребом оптимизационих метода,
- упоредна анализа нумеричких и експерименталних истраживања.

Наведене методе које је кандидат применио у оквиру овог истраживања су адекватне и примерене за примену у истраживању које је предмет дисертације.

3.4 ПРИМЕНЉИВОСТ ОСТВАРЕНИХ РЕЗУЛТАТА

Примена резултата истраживања добијених у оквиру ове дисертације је вишеструка и она се између осталог односи на употребу DP модела за моделирање механичког понашања стенске масе при напонско-деформационим анализама грађевинских конструкција. Примењени конститутивни модел може да симулира најсложеније облике напонско-деформационог понашања стенске масе.

Предложена методологија и приступи за квантификацију параметара такође имају велики значај приликом моделирања и анализа грађевинских конструкција како у фазама пројектовања тако и у фазама експлоатације. Ово се пре свега односи на конструкције које се граде у стенским масама (броне, тунели, косине, подземне конструкције). Анализа ефекта размере пружа могућност за разумевање зависности појединих параметара од посматране размере објекта. Такође, резултати анализа су показали и одређене потешкоће приликом одређивања вредности параметара стенске масе на локацији бране због изразите хетерогености стенске масе и неосетљивости параметара на одређене процесе.

Цео поступак моделирања, интеграције резултата разних испитивања и мерења са резултатима прорачуна, може да се примени на било коју грађевинску конструкцију од било ког материјала за које постоје одређени подаци мерења који показују понашање објекта. Ово је нарочито важно код објеката као што су бране или неки други инжењерски објекти који имају обавезу сталног праћења и мониторинга а што се може користити за одређивање вредности параметара њиховог понашања а након тога и анализе сигурности таквих објеката.

3.5 ОЦЕНА ДОСТИГНУТИХ СПОСОБНОСТИ КАНДИДАТА ЗА САМОСТАЛНИ НАУЧНИ РАД

У оквиру ове дисертације, кандидат се бавио изучавањем и критичком анализом доступне релевантне литературе, затим обрадом и анализом резултата експерименталних испитивања и мерења и нумеричким моделирањем одређених процеса у стенској маси за различите величине размере. Кандидат је показао способност за критичку анализу научне литературе, способност да врши оцену и обраду резултата експерименталних испитивања, затим способност да нумерички моделира одређен процес и да их повезује са реалним мерењима и испитивањима у стенској маси чиме је испунио циљеве и задатке постављене у оквиру дисертације. Све наведено квалификује кандидата Слободана Радовановића да се може самостално бавити научно истраживачким радом.

4 ОСТВАРЕНИ НАУЧНИ ДОПРИНОС

4.1 ПРИКАЗ ОСТВАРЕНИХ НАУЧНИХ ДОПРИНОСА

У оквиру ове дисертације, остварени су следећи научни доприноси:

1. Конститутивни модел са пластичним оштећењем (у тексту *DP* модел) је у оквиру ове дисертације први пут примењен за механичко понашање стенске масе под оптерећењем. Успешно је извршена верификација нумеричког алгоритма са примерима из литературе чиме је потврђена могућност симулације еласто-пластичности са ојачањем и оштећењем. Извршена је анализа и дискусија значења појединих параметара и њиховог утицаја при елементарним оптерећењима. Анализиран је утицај појединачних параметара модела на резултате нумеричких опита једноосног цикличног притиска, опита смицања и притиска при *in situ* условима чиме је утврђен хијерархијски утицај појединих параметара при различитим напонским стањима у стенској маси.
2. Предложен је алгоритам за одређивање вредности параметара *DP* модела на основу резултата експерименталних испитивања и нумеричких и оптимизационих метода.
3. Верификација предложеног алгоритма је спорведена за различите величине размере стенске масе, на основу чега су добијене вредности параметара при чему су добијена веома задовољавајућа поклапања између резултата експеримената и резултата прорачуна применом МКЕ модела.
4. Утврђено је присуство ефекта размере код: једноосијалне чврстоће на притисак, енергије лома на притисак, параметра који дефинише облик криве притисак - деформација при једноосном притиску, деградације при максималном напону притиска. Применом еластичног модела материјала утврђено је присуство ефекта размере на вредност модула деформације стенске масе.
5. Анализиран је утицај хетерогености на параметре *DP* модела, чиме су приказани одговарајући проблеми приликом примене резултата експерименталних испитивања за дефинисање механичког понашања стенске масе.
6. Приказана је могућност квантификације параметара и примене *DP* модела за моделирање напонско-деформационог понашања стенске масе у интеракцији са браном.

4.2 КРИТИЧКА АНАЛИЗА РЕЗУЛТАТА ИСТРАЖИВАЊА

Истраживачки рад Слободана Радовановића се бавио анализом утицаја ефекта размере на параметре конститутивног модела са пластичним оштећењем и параметре еластичног модела материјала. Параметри модела механичког понашања су одређени за различите величине размере а коришћењем резултата експерименталних испитивања, нумеричких и оптимизационих метода. У оквиру дисертације за моделирање механичког понашања стенске масе, примењен је савремени конститутивни модел са пластичним оштећењем који може да симулира најсложеније процесе у стенској маси.

Параметри који су добијени за различите врсте прорачуна, показали су одлична а у неким случајевима веома задовољавајућа поклапања између резултата експеримената са резултатима прорачуна помоћу МКЕ модела. У вези са тим и дискусија и анализа параметара са аспекта ефекта размере је теоријски заснована јер је анализирана на основу реалних испитивања за различите величине размере а са друге стране коришћењем параметара који су дали веома задовољавајућа поклапања. Ефекат размере је анализиран само за поједине параметре јер вредности одређених параметара нису могле да буду квантификоване јер нису постојала адекватна испитивања. Код оних параметара чије вредности су могле да се одреде за различите величине размере, показан је снажан утицај ефекта размере. На пример, добијено је да је вредност једноосијалне чврстоће на притисак која је добијена при опиту једноосног цикличног притиска 75,5 пута већа у односу на једноосијалну чврстоћу на притисак која је добијена при опиту смицања. Добијена вредност енергије лома на притисак је 67 пута већа у случају резултата који су добијени при опиту једноосног цикличног притиска у односу на опит смицања. Уочено је да ефекат размере на конкретном случају нема утицај на вредност почетног модула еластичности E_0 .

Посматрајући величину размере *in situ* опита и комбинацијом појединих резултата испитивања, добијени су параметри који одговарају одређеним квазихомогеним зонама што је показало присуство утицаја хетерогености стенске масе на параметре *DP* модела. Ова анализа спроведена у дисертацији указује на проблематику екстраполације резултата експерименталних испитивања на одређене квазихомогене зоне стенске масе.

У дисертацији је посебно анализирана могућност примене предложеног алгорита за квантификацију параметара стенске масе у размери објекта. Овде се показало да постоји одређени ниво поклапања резултата добијених на основу прорачуна и резултата добијених на основу резултата техничког осматрања на брани. Међутим постоје одређен потешкоће које се односе на квалитет и употребу појединих мерења као и неосетљивост одређених параметара на поједине величине које се мере.

4.3 ВЕРИФИКАЦИЈА НАУЧНИХ ДОПРИНОСА

У току израде дисертације Слободан Радовановић је међународној и домаћој, научној и стручној јавности представио свој рад кроз следеће радове:

Категорија M22

1. **Radovanović S., Ranković V., Anđelković V., Divac D., Milivojević N.** (2017). *Development of new models for the estimation of deformation moduli in rock masses based on in situ measurements*, Bulletin of Engineering Geology and the Environment, ISSN 1435-9529, Publisher: Springer, pp. 1-12, Published online: 01 March 2017. DOI 10.1007/s10064-017-1027-2

Категорија M23

1. **Anđelkovic V., Pavlovic N., Lazarevic Z., Radovanović S.** (2018). *Modelling of shear strength of rockfills used for the construction of rockfill dams*, Soils and Foundations, ISSN 0038-0806, Publisher: Elsevier, In Press, Available online 29 June 2018 <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2018.04.002>

Категорија M51

1. **Babić P., Radovanović S., Mirković U.** (2018) *Korelativni odnosi za definisanje deformabilnosti stene*, Tehnika, ISSN 0040-2176, Izdavač: Savez inženjera i tehničara Srbije, Vol. 73, no. 5, str. 629-634, 2018.

Категорија M63

1. **Bojović M., Rakić D., Vulović S., Živković M., Divac D., Milivojević N., Radovanović S., Milivojević V.** (2016) *Analiza stabilnosti betonske gravitacione brane primenom metode konačnih elemenata*, YU INFO 2016 – 21th Conference and Exhibition, 28.02.-02..03.2016., Kopaonik, ISBN 978-86-85525-17-9, Izdavač: Društvo za informacione sisteme i računarske mreže, Urednik: Prof. dr Miodrag Ivković, str. 276-279, 2016.

5 ЗАКЉУЧАК И ПРЕДЛОГ

Споведено истраживање у оквиру ове дисертације је вредан и оригиналан научни допринос у области механике стена, конкретно у проблематици моделирања механичког понашања чврсте дисконтинуалне стенске масе. Резултати истраживања могу имати шири спектар примене приликом напонско-деформационих анализа грађевинских конструкција које су у значајној интеракцији са стенском масом (тунели и друге подмене конструкције, бране, косине и др.).

Комисија сматра да је докторска дисертација кандидата Слободана Радовановића, урађена према одобреној пријави, да је оригинално и самостално научно дело и да је кандидат испољио способност за самостални научно-истраживачки рад у свим фазама израде ове дисертације.

На основу свега наведеног, Комисија предлаже Наставно-научном већу Грађевинског факултета Универзитета у Београду да се докторска дисертација „Утицај ефекта размере на параметре модела механичког понашања стенске масе“ кандидата Слободана Радовановића, мастер инж.грађ. прихвати, изложи на увид јавности и упути на коначно усвајање Већу научних области грађевинско - урбанистичких наука Универзитета у Београду за давање сагласности за јавну одбрану докторске дисертације.

У Београду, 17.07.2020.

ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ

в. проф. др Дејан Дивац, дипл.грађ.инж.
Грађевинског факултета Универзитета у Београду

р. проф. др Мирјана Вукићевић, дипл.грађ.инж.
Грађевинског факултета Универзитета у Београду

р.проф. др Драгослав Шумарац, дипл.грађ.инж.
Грађевинског факултета Универзитета у Београду

р.проф. др Владан Кузмановић, дипл.грађ.инж.
Грађевинског факултета Универзитета у Београду

доц. др Драган Ракић, дипл.маш.инж.
Факултета инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу