

**НАСТАВНО - НАУЧНОМ ВЕЋУ  
ГРАЂЕВИНСКОГ ФАКУЛТЕТА  
УНИВЕРЗИТЕТА У БЕОГРАДУ**

Предмет: Извештај Комисије о оцени докторске дисертације кандидата Николе Обрадовића

Одлуком Наставно-научног већа Грађевинског факултета Универзитета у Београду бр. 261/8-21 од 29.3.2024. године именовани смо за чланове Комисије за оцену и одбрану докторске дисертације кандидата Николе Обрадовића, маг. инж. грађ. под називом:

**РАЗВОЈ “НАSP” КОНСТИТУТИВНОГ МОДЕЛА ЗА ПРЕКОНСОЛИДОВАНЕ  
ГЛИНЕ СА ПРИМЕНОМ У НУМЕРИЧКОЈ АНАЛИЗИ МЕТОДОМ  
КОНАЧНИХ ЕЛЕМЕНАТА**

Наслов на енглеском језику:

**DEVELOPMENT OF “НАSP” CONSTITUTIVE MODEL FOR  
OVERCONSOLIDATED CLAYS WITH APPLICATION IN FINITE ELEMENT  
NUMERICAL ANALYSIS**

Након прегледа докторске дисертације, Комисија подноси следећи

**ИЗВЕШТАЈ**

**1. УВОД**

**1.1. Хронологија одобравања и израде дисертације**

На седници Већа Катедре за грађевинску геотехнику одржаној 10.6.2021. године Никола Обрадовић је изложио све релевантне елементе потребне за пријаву теме докторске дисертације под називом *Развој “НАSP” конститутивног модела за преконсолидоване глине са применом у нумеричкој анализи методом коначних елемената*. Комисија у саставу проф. др Мирјана Вукићевић, доц. др Селимир Леловић и доц. др Сања Јоцковић је донела одлуку о прихватању предлога теме кандидата.

Никола Обрадовић поднео је пријаву предлога истраживања у оквиру докторске дисертације Наставно-научном већу Грађевинског факултета дана 21.6.2021. За менторе су предложени проф. др Мирјана Вукићевић и доц. др Сања Јоцковић. Одлуком Наставно-научног већа 261/3 од 29.6.2021. године одређена је Комисија за оцену научне заснованости теме докторске дисертације у саставу: проф. др Мирјана Вукићевић, доц. др Селимир Леловић, доц. др Сања Јоцковић и в. проф. др Драган Ракић, дипл. маш. инж. са Универзитета у Крагујевцу, Факултета инжењерских наука. Позитиван Извештај Комисије за оцену научне заснованости теме докторске дисертације усвојен је 16.9.2021. године на седници Наставно-научног већа Грађевинског факултета. Дана 23.9.2021. године Веће грађевинско-урбанистичких наука Универзитета у Београду дало је сагласност на предлог теме докторске дисертације.

Кандидат је завршену докторску дисертацију предао Служби за студентска питања дана 21.3.2024. године. Наставно-научно веће Грађевинског факултета именовало је Комисију за оцену и одбрану докторске дисертације у следећем саставу: доц. др Сања Јоцковић, доц.

др Снежана Мараш-Драгојевић, доц. др Милош Марјановић, доц. др Вељко Пујевић и проф. др Лидија Здравковић (Imperial College of Science, Technology and Medicine, London, Faculty of Engineering, Department of Civil and Environmental Engineering).

## 1.2. Научна област дисертације

Дисертација кандидата Николе Обрадовића припада научној области Грађевинарство, а ужа научна област је Механика тла, фундаирање и геоеколошко инжењерство. За менторе дисертације именовани су др Мирјана Вукићевић, редовни професор Грађевинског факултета Универзитета у Београду и др Сања Јоцковић, доцент Грађевинског факултета Универзитета у Београду. Како су у септембру 2023. године проф. др Мирјани Вукићевић истекле две године ангажовања из пензије, даље менторство преузела је доц. др Сања Јоцковић.

## 1.3. Биографски подаци о кандидату

Никола Обрадовић рођен је 1. децембра 1991. године у Ваљеву. Основну школу завршио је у Лајковцу, а гимназију (природно-математички смер) завршио је у Лазаревцу. Носилац је Вукове дипломе у основној школи и гимназији. Основне академске студије на Грађевинском факултету Универзитета у Београду уписао је 2010. године на студијском програму Грађевинарство. На Модулу за конструкције дипломирао је 6. октобра 2014. године са просечном оценом 9.75 и оценом 10 на синтезном пројекту са темом “Пројекат армиранобетонске конструкције вишеспратно стамбено пословне зграде према Еврокоду”. Мастер академске студије на Грађевинском факултету Универзитета у Београду уписао је 2014. године, и завршио 29. маја 2015. године на Модулу за конструкције са просечном оценом 9.86 и оценом 10 на дипломском-мастер раду са темом “Пројекат темељне конструкције ветрогенератора према задатим подацима”. Докторске академске студије на Грађевинском факултету Универзитета у Београду уписао је у октобру 2015. година на студијском програму Грађевинарство.

На Грађевинском факултету Универзитета у Београду запослен је од фебруара 2016. године, када је изабран у звање асистента-студента докторских студија за ужу научну област Фундирање, на Катедри за Грађевинску геотехнику. Током свог рада, држао је вежбе из предмета Основе фундаирања, Фундирање, Специјални проблеми фундаирања, Потпорне конструкције и Основе геотехничких конструкција. Учествовао је у изради преко тридесет завршних радова из области Фундирања.

Аутор је и коаутор више научних радова: два рада у међународним часописима индексираним на SCI листи, преко петнаест радова публикованих у зборницима домаћих и међународних конференција, и једног техничког решења. Уже подручје научно истраживачког рада је Механика тла, фундаирање и геоеколошко инжењерство. Био је ангажован у оквиру пројекта ТР 36046 (2018-2020), који је финансирало Министарство просвете, науке и технолошког развоја Републике Србије.

Током рада на Грађевинском факултету Универзитета у Београду, у оквиру рада Института за саобраћајнице и геотехнику, учествовао је у изради неколико пројеката темељних конструкција, пројеката санације темељних конструкција, у изради стручних мишљења и техничких контрола. Члан је Српског и Међународног друштва (ISSMGE) за механику тла и геотехничко инжењерство, комисије за стандарде KS U182 - Геотехника Института за стандардизацију Србије и Инжењерске коморе Србије..

## 2. ОПИС ДИСЕРТАЦИЈЕ

### 2.1. Садржај дисертације

Докторска дисертација под називом *Развој “HASP” конститутивног модела за преконсолидоване глине са применом у нумеричкој анализи методом коначних елемената* има 375 страна, садржи 96 слика, 26 табела и 3 прилога. На почетку дисертације дат је резиме на српском и енглеском језику са кључним речима, а затим садржај, листа слика, табела и симбола. Подељена је на шест поглавља:

1. Увод
2. Теоријске основе и примењене методе
3. Проширени HASP конститутивни модел за преконсолидоване глине, HASP-E модел
4. Имплементација HASP и HASP-E модела
5. Валидација HASP-E модела
6. Закључна разматрања и препоруке за даља истраживања

Након закључка, дат је списак литературе који садржи 138 библиографских јединица које су коришћене у изради дисертације. У наставку, дата су три прилога која садрже Fortran код за имплементацију конститутивног модела у софтверски пакет PLAXIS.

Према структури рада дисертација у потпуности задовољава критеријуме и стандарде предвиђене за овакву врсту научног рада.

### 2.2. Кратак приказ појединачних поглавља

Садржај докторске дисертације је изложен у шест поглавља.

У **Поглављу 1** дата су уводна разматрања, задаци и циљеви истраживања и приказан је садржај сваког поглавља. Након уводног разматрања следи:

**Поглавље 2.** На почетку другог поглавља дат је преглед основних једначина механике континуума које се користе за формулисање конститутивних модела за тло. Након тога приказане су напонско-деформацијске релације које описују еластично и еласто-пластично понашање тла, као и приказ концепта критичног стања тла. Следи преглед понашања преконсолидованих глина и одговарајућих конститутивних модела. На крају овог поглавља дат је кратак опис методе коначних елемената као нумеричке методе која се најчешће користи за решавање геотехничких проблема, алгоритама за имплементацију конститутивних модела и рачунарског програма PLAXIS који је заснован на овој нумеричкој методи.

**Поглавље 3.** На почетку трећег поглавља дат је детаљан приказ напонско-деформацијских релација и параметара основне формулације HASP модела. У наставку је приказана проширена и унапређена формулација HASP модела под називом HASP-E модел. Описане су релације на основу којих је извршено проширење основне формулације HASP модела на генерални напонски простор, релације преко којих је узета у обзир крутост тла у подручју веома малих и малих деформација, као и начин на који се може узети у обзир хистерезисно понашање тла. На крају поглавља дат је опис OC\_CLAY модела који је развијен из основне формулације HASP модела са освртом на разлике у односу на HASP и HASP-E моделе.

**Поглавље 4.** У првој половини овог поглавља приказани су алгоритми за нумеричку интеграцију конститутивних релација HASP и HASP-E модела. Имплементација HASP модела је извршена:

- методом водећег параметра,
- имплицитним алгоритмом Borja & Lee, 1990,
- модификованим Euler-овим поступком са аутоматском субинкрементацијом и контролом грешке,
- Runge-Kutta-Dormand-Prince поступком са аутоматском субинкрементацијом и контролом грешке.

Имплементација HASP-E модела извршена је:

- методом водећег параметра,
- модификованим Euler-овим поступком са аутоматском субинкрементацијом и контролом грешке,
- Runge-Kutta-Dormand-Prince поступком са аутоматском субинкрементацијом и контролом грешке.

У другој половини поглавља приказана је верификација поступка имплементације конститутивних модела и анализа ефикасности, тачности и робустности алгоритама за нумеричку интеграцију конститутивних релација. Верификација поступка имплементације извршена је:

- поређењем резултата симулације триаксијалних опита у PLAXIS-у 2D са резултатима за Euler-ову интеграцију деформација дуж познате путање напона (EIPN) и
- поређењем са резултатима предвиђања OC\_CLAY модела.

Анализа ефикасности, тачности и робустности алгоритама за интеграцију конститутивних релација извршена је на примеру граничног проблема у програму PLAXIS 2D. За гранични проблем је изабран пример одређивања носивости крутог тракастог темеља са храпавом контактном површином који се налази на површини терена у недренираним условима на слоју водом засићене глине.

**Поглавље 5:** У овом поглављу извршена је валидација HASP-E модела поређењем публикованих резултата лабораторијских опита или теренских мерења са резултатима нумеричког модела. У првој половини поглавља, приказани су резултати нумеричких симулација цикличних дренираних триаксијалних опита на Fujinomi глини и цикличних недренираних триаксијалних опита на Newfield глини. Такође, извршена је параметарска анализа са циљем да се утврди како и колико промене материјалних параметара HASP-E модела утичу на предвиђање понашања глине. У другој половини поглавља приказане су могућности HASP-E модела да предвиди понашање слоја преконсолидоване глине услед изградње насипа. Резултати предвиђања HASP-E модела су упоређена са мерењима и са предвиђањима MCC модела. Изведени су општи закључци о могућностима HASP-E модела да реално опише понашање преконсолидованих глина при монотоним и немонотоним оптерећењу.

**Поглавље 6:** У завршном поглављу је дат резиме истраживања са закључцима и наведене су препоруке за даља истраживања.

### **3. ОЦЕНА ДИСЕРТАЦИЈЕ**

#### **3.1 Савременост и оригиналност**

С обзиром да поузданост анализа геотехничких проблема методом коначних елемената у великој мери зависи од могућности конститутивног модела да адекватно опише механичко понашање тла, сваки напредак у области конститутивног моделирања тла има

суштински значај у геотехници. Проширење и унапређење HASP модела омогућава реалније описивање механичког понашања нормално консолидованих, благо преконсолидованих и јако преконсолидованих глина, у условима монотоног и цикличног оптерећења.

Битну улогу у решавању бројних проблема стабилности и носивости има одређивање параметара смичуће отпорности тла, односно потреба да се усвоји адекватан критеријум лома у конститутивном моделу. HASP модел користи Drucker-Prager-ов услов лома, који подразумева круг у девијаторској равни и представља критеријум који је много једноставније имплементирати у програме за нумеричку анализу, док са друге стране постоје велика одступања у односу на експерименталне резултате за оне путање напона које одступају од триаксијалне компресије или екстензије. Такође занемарује утицај средњег главног напона  $\sigma_2$ , што може бити веома значајно за услове равнот стања деформација. Проширивањем релација HASP модела на глобални напонски простор, укључивањем треће инваријанте (Лоде-ов угао), резултирао је адекватнијим дефинисањем површи течења/лома у девијаторској равни и значајно побољшао предвиђање модела у решавању раванских проблема.

За потребе рационалног пројектовања геотехничких конструкција и адекватно предвиђање померања у тлу, конститутивни модел треба да на одговарајући начин предвиђа величину крутости тла у подручју веома малих и малих деформација. Да би се предвиделе деформације тла, потребно је поред квалитетног узорковања и лабораторијских испитивања, користити напредне конститутивне моделе који узимају у обзир изразиту нелинеарност тла. Релације “Brick” модела као “overlay” модела придружене су релацијама HASP модела, како би се побољшало предвиђање понашања тла у подручју веома малих и малих деформација, као и при промени путање оптерећивања. Улога “Brick” модела у проширеној формулацији HASP модела је да на основу претходне историје деформисања одређује колика је вредност тангентног модула смицања  $G$ . Увођењем промене модула смицања са променом смичућих деформација у релације HASP модела, омогућено је адекватно предвиђање деформација у тлу при радном оптерећењу и описивање понашање тла при цикличном оптерећењу.

HASP-E модел имплементиран је у рачунарски програм PLAXIS заснован на методи коначних елемената, што омогућава корисницима програма да користе развијени модел за решавање бројних геотехничких проблема. Имплементација конститутивног модела обухватила је формулацију нумеричких процедура за интеграцију напона за задати инкремент деформација. За имплементацију основне и проширене формулације HASP модела коришћене су имплицитне и експлицитне методе нумеричке интеграције напона. Алгоритми за нумеричку интеграцију су међусобно упоређени према критеријумима ефикасности, тачности и робустности, што је пружило јасан увид како метода нумеричке интеграције утиче на резултат геотехничке анализе методом коначних елемената.

Параметри проширеног HASP-E модела имају јасно физичко значење и могу да се одреде из конвенционалних лабораторијских опита, што представља један од императива за коришћење конститутивног модела за тло у геотехничкој пракси.

Узимајући у обзир наведено, докторска дисертација представља оригинални и савремен научни рад у области конститутивног моделирања тла.

### 3.2. Осврт на референтну и коришћену литературу

Наведено је 138 референци које су од значаја за тему докторске дисертације. Преглед литературе обухвата широк опсег доступних публикација из области геотехнике и нумеричког моделирања. Већину референци чине радови објављени у врхунским међународним часописима: *Geotechnique*, *International Journal for Numerical and Analytical*

*Methods in Geomechanics, Computers and Geotechnics, Journal of Applied Mechanics, International Journal of Geomechanics, Soils and Foundations, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Canadian Geotechnical Journal, International Journal for Numerical Methods in Engineering, Computational Mechanics.* Списком литературе обухваћено је и девет књига из области конститутивног моделирања тла и нумеричке интеграције конститутивних модела.

### 3.3 Опис и адекватност примењених научних метода

Конститутивно моделирање преконсолидованих глина представља у механичком и математичком смислу сложен задатак. Користећи механику континуума и теорију пластичности, уз одређен ниво апроксимација у дисертацији су симулиране кључне карактеристике понашања преконсолидованих глина. Приликом проширења конститутивног модела, примењена је синтеза постојећих достигнућа из области конститутивног моделирања тла. Иако поједини еласто-пластични модели из литературе добро описују напонско-деформацијско понашање преконсолидованог тла, основни недостатак је укључивање великог броја конститутивних константи које немају јасно физичко значање. Из тог разлога, у дисертацији је примењен приступ да се унапређење модела врши кроз адекватно дефинисање параметара који имају јасно физичко значење. Параметарском анализом утврђена је како и колико промене материјалних параметара HASP-E модела утичу на предвиђање понашања глине. Валидација модела извршена је на публикованим резултатима лабораторијских испитивања, као и резултатима мерења померања у тлу у дужем временском периоду.

Коришћене методе нумеричке интеграције су упоређене према критеријумима ефикасности, тачности и робустности. Извршена је и верификација поступка имплементације поређењем резултата симулације триаксијалних опита у PLAXIS-у 2D са резултатима за Euler-ову интеграцију деформација дуж познате путање напона (EIPN), као и поређењем са резултатима предвиђања другог конститутивног модела.

### 3.4 Применљивост остварених резултата

Проширивањем релација основног HASP модела и формирањем HASP-E модела омогућено је описивање механичког понашања нормално консолидованих и преконосолидованих глина, при монотоним и цикличним оптерећењима, при радним условима и условима блиским лому. Модел користи материјалне параметре који се могу одредити из конвенционалних лабораторијских опита доступних у свакој стандардној лабораторији за механику тла. За параметре који описују крутост тла при малим деформацијама дат је преглед емпиријских релација за процену њихове вредности.

Приказани поступци нумеричке интеграције релација модела омогућавају да се модел имплементира у различите програме за нумеричку анализу конструкција. У прилозима 1-3 дат је комплетан код написан Fortran програмским језиком за имплементацију конститутивног модела HASP-E у PLAXIS.

### 3.5 Оцена достигнутих способности кандидата за самостални научни рад

На основу анализе докторске дисертације, литературе која је коришћена у раду, оригиналних резултата добијених у дисертацији, као и на основу радова које је кандидат објавио од којих је један у међународном часопису са SCI листе категорије M22, Комисија сматра да је кандидат несумњиво доказао способност за самостални научноистраживачки рад.

## 4. ОСТВАРЕНИ НАУЧНИ ДОПРИНОС

### 4.1 Приказ остварених научних доприноса

Основни научни доприноси у дисертацији су:

1. Проширивање релација основне формулације HASP модела на генерални напонски простор узимањем у обзир утицај треће напонске инваријанте (Lode-ов угао)
2. Проширивање релација основне формулације HASP модела узимањем у обзир промене модула смицања са променом смичућих деформација.
3. Реално описивање механичког понашања преконсолидованих глина у случају разматрања раванских проблема
4. Реално описивање механичког понашања преконсолидованих глина у случају немонононог и цикличног оптерећења
5. Реално описивање померања у преконсолидованом тлу при радном оптерећењу
6. Развој имплицитних и експлицитних алгоритама за нумеричку интеграцију конститутивних релација HASP и HASP-E модела, са анализом ефикасности, тачности и робустности алгоритама за нумеричку интеграцију конститутивних релација
7. Имплементација HASP и HASP-E модела у рачунарски програм PLAXIS, са извршеном верификацијом поступка имплементације.

### 4.2 Критичка анализа резултата истраживања

Релације HASP-E модела су формиране тако да превазилазе недостатке основног HASP модела, уз задовољење следећих критеријума: да релације буду релативно једноставне за имплементацију у рачунарски програм заснован на МКЕ, да основни принципи на којима је развијен HASP модел буду задржани, да сви параметри модела буду јасно дефинисани и да се могу одредити из конвенционалних лабораторијских опита. Са овако проширеним релацијама, HASP-E модел адекватно описује понашање преконсолидованих глина у анализи граничних проблема, при монононом и цикличном оптерећењу, уз релативно мали број материјалних параметара са јасним физичким значењем, који се могу на једноставан начин одредити из конвенционалних лабораторијских опита. Анализа резултата дата је у наставку:

- 1) У изразима за површ течења и граничну површ, параметар  $M$ , који је константа у HASP моделу, у HASP-E моделу је променљива која зависи од вредности Lode-овог угла. Облик површи течења и граничне површи у девијаторској равни је заобљена конвексна површ. За облик површи пластичног потенцијала у девијаторској равни усвојен је облик круга, тако да HASP-E користи неасоцијативан закон течења, за разлику од HASP модела који користи асоцијативан закон течења. Асоцијативни закон течења генерално важи за метале, док се фрикциони материјали не уклапају добро у овај концепт, пре свега зато што може значајно да прецени вредност запреминских деформација.
- 2) Крутост тла у подручју веома малих и малих деформација, као и промена величине крутости тла при промени путање напона и деформација узета је у обзир прикључењем “overlay” “Brick” модела релацијама HASP модела. Тангентни модул смицања у HASP-E моделу се рачуна из “overlay” “Brick” модела. Poisson-ов коефицијент има константну вредност у HASP-E (као и у HASP), тако да се из познате вредности тангентног модула смицања може одредити тангентни запремински модул.

“Brick” компонента HASP-E модела омогућава да се модел користи за немонотона оптерећења, као што је растерећење тла и циклично оптерећење, као и описивање хистерезисног понашања тла при растерећењу и поновном оптерећењу.

- 3) У односу на HASP, HASP-E модел користи четири нова материјална параметра. Уместо параметра дрениране смичуће чврстоће  $M$ , користе се параметри  $M_c$  и  $M_e$  који представљају нагибе линије критичног стања у  $q$ - $p'$  равни за триаксијалну компресију и триаксијалну екстензију. За описивање облика S-криве користе се референтни модул смицања при веома малим деформацијама  $G_{0,ref}$  и смичућа деформација  $\gamma_{0,7}$  при којој је секантни модул смицања редукован на 70 % иницијалне вредности.
- 4) Валидација HASP-E модела је извршена кроз симулацију дренираних и недренираних цикличних триаксијалних опита и кроз примену конститутивног модела у анализи граничног проблема – понашање слоја преконсолидоване глине услед изградње насипа. На основу поређења са експерименталним резултатима, може се закључити да у дренираним и недренираним цикличним опитима HASP-E модел квалитативно и уз адекватну калибрацију материјалних параметара и квантитативно добро описује понашање тла, величину деформација, као и развој и порног притиска. Такође, HASP-E модел адекватно описује величину хистерезиса. Извршена параметарска анализа показала је осетљивост модела на промену материјалних параметара, односно HASP-E модел најосетљивији је на промену параметара деформабилности  $\lambda$  и  $\kappa$ . Поређењем са теренским мерењима слегања и порних притисака у примеру анализе понашање слоја преконсолидоване глине услед изградње насипа, потврђене су могућности HASP-E модела да адекватно описује развој деформација и порних притисака током дужег временског периода. HASP-E модел може да на основу стања напона предвиди понашање глине, односно да ли је у питању екстензија или компресија.
- 5) Конститутивни модели HASP и HASP-E модел су имплементирани у рачунарски програм PLAXIS заснован на МКЕ преко UDSM потпрограма користећи рачунарски језик FORTRAN. За имплементацију оба конститутивна модела развијени су експлицитни и имплицитни алгоритми за нумеричку интеграцију конститутивних релација, и то имплицитна метода водећег параметра са средњим ефективним напонем као водећим параметром, имплицитни алгоритам (Vorja & Lee, 1990), експлицитни модификовани Euler-ов поступак са аутоматском субинкрементацијом и контролом грешке и експлицитни Runge-Kutta-Dormand-Prince поступак са аутоматском субинкрементацијом и контролом грешке. То је омогућило да се методе упореде према критеријумима ефикасности, тачности и робустности, односно да се да критички осврт на утрошак рачунарског времена и тачност решења, као и да се идентификују проблеми са конвергенцијом глобалног инкрементално-итеративног поступка за јако преконсолидовано тло. Генерално, имплицитне методе захтевају мање рачунарског времена, док експлицитне са аутоматском субинкрементацијом и контролом грешке дају решења највеће тачности. У односу на утицај иницијалних услова и величину инкремената, експлицитни алгоритми су робустнији него имплицитни. Такође, имплицитни алгоритми имају потешкоће када напонска путања прелази први пут линију критичног стања. То би могло да се превазиђе увођењем субинкрементације или коришћењем мањих инкремената.

HASP-E модел формулисан у оквиру предметне докторске дисертације представља оригинални конститутивни модел за описивање механичког понашања преконсолидованих глина. Задржана је једноставност HASP модела и сви материјални параметри модела се могу одредити из конвенционалних лабораторијских опита. HASP-E модел превазилази многе недостатке основног HASP модела приликом описивања механичког понашања преконсолидованих глина. Представља добар методолошки оквир за описивање механичког понашања преконсолидованих глина при монотоним и цикличном оптерећењу.



Као што је у препорукама за даља истраживања наглашено, могуће је унапређење модела и то:

1. Проширење релација модела за предвиђање механичког понашања преконсолидованих делимично засићених глина, узимање у обзир напонски индуковане анизотропије, описивање реолошког понашања преконсолидованих глина склоних секундарној компресији, као и узимање у обзир деструктурирања глинe;
2. Формирање и имплементација еласто-пластичне матрице како би се повећала брзина конвергенције у глобалном Newton-Raphson-овом итеративном поступку;
3. Унапређење имплицитних алгоритама који су разматрани у оквиру ове дисертације у погледу превазилажења проблема који се јавља при прорачуну напона када напонска путања прелази први пут линију критичног стања укључивањем субинкрементације и контроле грешке;
4. Развој методе водећег параметра разматрањем могућности употребе других величина за водећи параметар, као што су прираштај пластичних запреминских деформација и параметар ојачања на крају инкремента.

#### 4.3 Верификација научних доприноса

Током истраживања и рада на докторској дисертацији кандидат Никола Обрадовић је објавио следеће радове из области конститутивног моделирања тла:

##### Категорија M22:

1. **Obrovic, N., Jockovic, S., & Vukicevic, M. (2023).** Application of Hardening State Parameter Constitutive Model for Prediction of Overconsolidated Soft Clay Behavior Due to Embankment Loading. *Applied Sciences*, 13(4), 2175.  
<https://doi.org/10.3390/app13042175>

##### Категорија M33:

1. **Obrovic, N., Vukicevic, M., & Jockovic, S. (2021).** An evaluation of methods for numerical integration of constitutive relations of elasto-plastic soil models. In *Proceedings International Scientific Conference Earthquake Engineering and Geotechnical aspects of Civil Engineering* (pp. 548-557).
2. Jockovic, S., Vukicevic, M., & **Obrovic, N. (2021).** Parametar stanja za predviđanje ponašanja tla u nedreniranim uslovima. *Zbornik radova međunarodno naučno-stručnog savetovanja zemljotresno inženjerstvo i geotehnički aspekti građevinarstva*,

## 5. ЗАКЉУЧАК И ПРЕДЛОГ

На основу анализе дисертације, испуњености циљева и задатака истраживања, примењене методологије, добијених резултата и остварених научних доприноса, може се констатовати да докторска дисертација *„Развој “HASP” конститутивног модела за преконсолидоване глине са применом у нумеричкој анализи методом коначних елемената“* представља оригиналан и вредан научни допринос, као и да је кандидат Никола Обрадовић показао способност за бављење научно-истраживачким радом.

Докторска дисертација кандидата Николе Обрадовића представља оригинални научни рад у области грађевинске геотехнике, посебно у области конститутивног моделирања тла и даје добру основу и могућност за наставак истраживања у овој области. На основу наведеног, Комисија предлаже Наставно-научном већу Грађевинског факултета Универзитета у Београду да се прихвати докторска дисертација Николе Обрадовића, магистарског инжењера грађевинарства, под називом *„Развој “HASP” конститутивног модела за преконсолидоване глине са применом у нумеричкој анализи методом коначних елемената“* и да се одобри јавна одбрана.

### ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ

---

др Сања Јоцковић, доцент,  
Универзитет у Београду, Грађевински факултет

---

др Снежана Мараш-Драгојевић, доцент,  
Универзитет у Београду, Грађевински факултет

---

др Милош Марјановић, доцент,  
Универзитет у Београду, Грађевински факултет

---

др Вељко Пујевић, доцент,  
Универзитет у Београду, Грађевински факултет

---

др Лидија Здравковић, редовни професор,  
Imperial College of Science, Technology and Medicine,  
Department of Civil and Environmental Engineering, UK