

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

Предмет: Извештај Комисије о оцени докторске дисертације кандидаткиње Сање Јоцковић

Одлуком Наставно-научног већа Грађевинског факултета Универзитета у Београду бр. 218-10/15 од 1.06.2017. године именовани смо за чланове Комисије за преглед, оцену и одбрану докторске дисертације кандидаткиње Сање Јоцковић дипл. грађ. инж. под називом:

**ФОРМУЛАЦИЈА И ИМПЛЕМЕНТАЦИЈА КОНСТИТУТИВНОГ МОДЕЛА ЗА
ПРЕКОНСОЛИДОВАНЕ ГЛИНЕ**

Након прегледа докторске дисертације, Комисија подноси следећи

ИЗВЕШТАЈ

1. УВОД

1.1. Хронологија одобравања и израде дисертације

- 12.06.2015. године кандидаткиња Сања Јоцковић поднела је пријаву предлога истраживања у оквиру докторске дисертације Наставно-научном већу Грађевинског факултета у Београду. За ментора је предложила проф. др Ђорђа Вуксановића, редовног професора на Грађевинском факултету Универзитета у Београду.
- 23.06.2015. године Наставно-научно веће Грађевинског факултета у Београду именовало је Комисију за оцену подобности теме и кандидата докторске дисертације у саставу: проф. др Ђорђа Вуксановића, доц. др Мирјана Вукићевић, доц. др Селимир Леловић, в. проф. др Милош Лазовић, дипл. грађ. инж. (у пензији), проф. др Мирослав Живковић (Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу).
- 14.05.2015. године Наставно-научно веће Грађевинског факултета у Београду је прихватило Извештај Комисије за оцену подобности теме и кандидата докторске дисертације и своју одлуку доставило Већу грађевинско-урбанистичких наука Универзитета у Београду на давање сагласности.
- 1.10.2015. године Веће грађевинско-урбанистичких наука Универзитета у Београду дало је сагласност на предлог теме докторске дисертације под насловом *Формулација и имплементација конститутивног модела за преконсолидоване глине.*
- 20.01.2017. године кандидаткиња је Наставно-научном већу Грађевинског факултета у Београду поднела захтев за промену ментора. За коменторе су предложени в.

проф. др Мирјана Вукићевић и проф. др Мирослав Живковић (Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу).

- 26.01.2017. године Наставно-научно веће Грађевинског факултета у Београду је прихватило захтев за промену ментора
- У фебруару 2017. године Веће грађевинско-урбанистичких наука Универзитета у Београду дало је сагласност на захтев за промену ментора.
- 26.05.2017. године кандидаткиња је предала завршену докторску дисертацију.
- 01.06.2017. године Наставно-научно веће Грађевинског факултета у Београду именовало је Комисију за оцену и одбрану докторске дисертације у следећем саставу:
 1. др Мирјана Вукићевић, ванредни професор, Универзитет у Београду, Грађевински факултет
 2. др Мирослав Живковић, редовни професор, Универзитет у Крагујевцу, Факултет инжењерских наука
 3. др Селимир Леловић, доцент, Универзитет у Београду, Грађевински факултет
 4. др Борис Јеремић, редовни професор, Department of Civil and Environmental Engineering, University of California, Davis

1.2. Научна област дисертације

Дисертација кандидаткиње Сање Јоцковић припада научној области Грађевинарство, а ужа научна област је Грађевинска геотехника. За коменторе дисертације именовани су др Мирјана Вукићевић, ванредни професор Грађевинског факултета Универзитета у Београду и др Мирослав Живковић, редовни професор Факултета инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу.

1.3. Биографски подаци о кандидату

Сања Јоцковић рођена је 1978. године у Краљеву. Основну школу и гимназију (природно-математички смер) завршила је у Смедеревској Паланци. Носилац је Вукове дипломе у основној школи и гимназији. Дипломирала је на Грађевинском факултету Универзитета у Београду на смеру за конструкције 2003. године. Током редовних студија постигла је просечну оцену 8.80, а дипломски рад из Фундирања одбранила је оценом 10. Добитник је стипендије амбасаде Краљевине Норвешке. Докторске студије на Грађевинском факултету у Београду је уписала 2007. године и положила све испите са просечном оценом 10.00. Ради на Грађевинском факултету у Београду као асистент – студент докторских студија на предметима Механика тла и Геотехника саобраћајница.

Бави се грађевинском геотехником. Уже подручје научно истраживачког рада је теоријска и инжењерска механика тла, испитивање геомеханичких карактеристика тла, као и конститутивно моделирање тла. Учествовала је у изради великог броја геотехничких елабората, пројеката темељних конструкција и пројеката санације темељних конструкција, као и у изради научних студија из области стабилизације тла применом индустријских нуспродуката. Учествовала је у технолошком пројекту

“Конститутивно моделирање комплекса београдских глина са имплементацијом у инжењерској пракси“ као истраживач. Члан је Српског и Међународног друштва (ISSMGE) за механику тла и геотехничко инжењерство.

На Катедри за грађевинску геотехнику обавља функцију секретара Катедре, а у акредитованој Лабораторији за механику тла обавља функцију Лица одговорног за квалитет. Удата је и мајка двоје деце.

2. ОПИС ДИСЕРТАЦИЈЕ

2.1. Садржај дисертације

Докторска дисертација *Формулација и имплементација конститутивног модела за преконсолидоване глине* има 197 страна, садржи 91 слику, 10 табела и један прилог. 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. Уводна разматрања
2. Теоријске основе
3. Формулација конститутивног модела за преконсолидоване глине
4. Нумеричка интеграција HASP модела
5. Валидација и имплементација HASP модела
6. Закључци и препоруке за даља истраживања

Након закључка, дат је списак литературе који садржи 113 библиографских јединица које су коришћене у изради дисертације. У наставку, дат је један прилог који садржи Фортран код за имплементацију конститутивног модела у софтверски пакет Abaqus.

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** су дата уводна разматрања, задаци и циљеви истраживања и приказан је садржај сваког поглавља.

У **Поглављу 2** су дате теоријске основе на којима се заснива истраживање у докторској дисертацији. Приказане су основне једначине механике континуума које се користе за описивање напонско-деформацијског стања тла и формулацију конститутивног модела. Наведени су основни елементи које конститутивни модел мора да садржи и којима се описује еласто-пластично понашање тла. Дат је осврт на принцип ефективних напона. С обзиром да се истраживање у дисертацији заснива на концепту критичног стања, следи општи приказ тродимензионалног p - q - e простора у оквиру ког је формулисан нови конститутивни модел. Затим су приказане карактеристике напонско-деформацијског понашања преконсолидованих глина у

дренираним и недренираним условима. На крају поглавља дат је историјски преглед постојећих конститутивних модела за преконсолидоване глине.

У **Поглављу 3** је формулисан нови конститутивни модел за преконсолидоване глине. Изведене су генералне пластичне напонско-деформацијске релације за моделе критичног стања, као и напонско-деформацијске релације Модификованог Cam Clay (MCC) модела, које представљају полазну тачку ка формулисању новог модела. Приказани су недостаци MCC модела приликом предвиђања механичког понашања преконсолидованих глина. Користећи концепт граничне површи формулисан је нови HASP (*HARdening State Parameter*) конститутивни модел, са циљем да се превазиђу наведени недостаци, без увођења нових материјалних параметара. Дати су основни принципи на којима се заснива HASP конститутивни модел. Коришћен је комбиновани закон ојачања, који зависи од прираштаја пластичне запреминске и пластичне смичуће деформације. У релације модела уведен је параметар стања који комбинује утицај нормалних напона и збијености тла. Након приказа концепта параметра стања, изведени су изрази за параметар стања тренутне напонске тачке и имагинарне напонске тачке на граничној површи. Такође, изведен је израз за степен преконсолидације у функцији параметра стања. Користећи изведене изразе, као и резултате експерименталних испитивања преконсолидованих глина дате у литератури, у оквиру закона ојачања формулисан је коефицијент ојачања који представља кључни елемент у релацијама HASP модела и који контролише све елементе механичког понашања преконсолидованих глина. Коефицијент ојачања је уједно и коефицијент редукције пластичних запреминских и смичућих деформација и има највеће вредности на почетку оптерећивања. На тај начин је омогућено да се претпостави да се тло деформише пластично од самог почетка процеса оптерећивања, с тим што су у почетној фази пластичне деформације веома мале и зависе од степена преконсолидације. Карактеристике HASP модела у дренираним и недренираним условима оптерећивања су приказане кроз неколико фаза деформисања, које су експериментално идентификоване. У дренираним условима, модел описује ојачање све док се не достигне вршна смичућа чврстоћа, а затим следи омекшање (без додатног математичког описивања), што је у складу са понашањем преконсолидованих глина. Механизам промене запремене је такође адекватно описан. У недренираним условима изведен је израз за путању ефективних напона. Израз описује генералну форму путање ефективних напона која се у великој мери слаже са експерименталним резултатима. На крају поглавља, дат је осврт на одређивање материјалних параметара HASP модела.

У **Поглављу 4** је приказан алгоритам за нумеричку интеграцију конститутивних релација HASP модела. Алгоритам представља неопходан услов за имплементацију модела у софтверски пакет за анализу геотехничких проблема методом коначних елемената. У поступку имплементације коришћена је имплицитна Метода водећег параметра (GPM). У дисертацији је усвојен средњи ефективни напон p' као водећи параметар, јер су границе могућих напонских стања увек познате и све релевантне величине HASP модела се могу изразити у функцији средњег ефективног напона. Након приказа основних елемената наведене методе за интеграцију напона, изведене су релације HASP модела у функцији водећег параметра и формирана је водећа једначина (услов течења) чије решење представља вредност средњег ефективног напона у конфигурацији $t+\Delta t$. Затим је дат комплетан поступак нумеричке интеграције

HASP модела. Такође, приказан је и поступак нумеричке интеграције MCC модела са циљем да се провери ефикасност предложене методе интеграције.

У **Поглављу 5** је извршена валидација HASP модела, поређењем резултата симулације лабораторијских опита са експерименталним резултатима из литературе са различитим путањама тоталних напона. У поступку валидације изабрани су резултати за шест глина са различитим степенима преконсолидације, за које у литератури постоје добро документована испитивања у триаксијалном апарату и за које су већ одређени параметри конститутивног MCC модела. Могућности HASP модела су демонстриране кроз способност модела да адекватно опише напонско-деформацијско понашање, промену запремине у дренираним условима и порног притиска у недренираним условима. Приказана су поређења са експерименталним резултатима и то:

- 1) 13 недренираних опита триаксијалне компресије и екстензије
- 2) 8 дренираних опита триаксијалне компресије
- 3) 8 дренираних опита триаксијалне компресије и екстензије са константним средњим ефективним напоном $p' = const$

Такође су за различите степене преконсолидације приказана предвиђања напонско – деформацијског понашања глине у току изотропне консолидације. У свакој валидацији, извршено је и поређење са предвиђањем Модификованог Cam Clay модела. HASP модел је имплементиран у софтвер ABAQUS/Standard користећи кориснички потпрограм UMAT и нумеричку процедуру за интеграцију напона која је приказана у Поглављу 4. Затим је извршена верификација развијеног алгорита нумеричке интеграције методом водећег параметра на два начина:

- 1) Поређењем резултата симулације триаксијалног опита методом коначних елемената, и то користећи MCC модел већ уграђен у ABAQUS и MCC модел имплементиран кроз UMAT користећи развијену GPM методу
- 2) Поређењем резултата симулације триаксијалног опита методом коначних елемената користећи нумеричку интеграцију напона (GPM метода имплементирана у ABAQUS) и резултата симулације триаксијалног опита користећи Еулер-ову интеграцију деформација дуж познате путање напона (поступак програмиран у Excel-у), према HASP моделу.

У наставку је приказана примена конститутивног HASP модела у анализи граничног (контурног) проблема методом коначних елемената. Разматран је проблем слегања тла услед фазне изградње насипа на површини преконсолидоване глине и извршено је и поређење са предвиђањем Модификованог Cam Clay модела.

У завршном **Поглављу 6** је дат резиме истраживања са проистеклим 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. Развој конститутивних модела који ће адекватно описати математички сложено напонско деформацијско понашање тла је важан услов за рационално пројектовање геотехничких конструкција. С друге стране, за примену конститутивних модела у инжењерској пракси је исто тако важно да механичке карактеристике (константе) модела имају јасно физичко значење и да се могу добити из стандардних лабораторијских опита. Уважавајући претходна два услова формулисан је оригинални конститутивни модел који успешно описује многе елементе механичког понашања преконсолидованих глина. Модел се може једноставно имплементирати у различите програмске пакете за нумеричку анализу конструкција. Материјални параметри који се користе за опис конститутивне везе се могу одредити из конвенционалних лабораторијских опита, што повећава атрактивност модела за коришћење у инжењерској пракси. Узимајући у обзир наведено, докторска дисертација под насловом "Формулација и имплементација конститутивног модела за преконсолидоване глине" представља оригинални и савремен научни рад у области конститутивног моделирања тла.

3.2. Осврт на референтну и коришћену литературу

Наведено је 113 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: *Géotechnique*, *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 четрнаест књига из области конститутивног моделирања тла и нумеричке интеграције конститутивних модела. Списак литературе укључује и један рад у међународном часопису категорије M21 у којем је кандидаткиња Сања Јоцковић први коаутор.

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 формулисања новог 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 уводе стање тла као битну одредницу његовог механичког понашања, а не кроз повећање материјалних параметара. У том смислу, концепт критичног стања и концепт граничне

површи представљају добар оквир за дефинисање параметра стања и укључивање тог параметра у релације конститутивног модела.

Метода водећег параметра се показала као врло ефектна метода за нумеричку интеграцију различитих конститутивних модела. Прву примену је имала у теорији пластичности за метале, али је касније успешно проширена и на конститутивне моделе за тло. Метода је нумерички стабилна, задовољен је услов конзистентности конститутивних релација и услов течења на крају корака, што је чини методом високе тачности. У дисертацији је показано да је имплицитна Метода водећег параметра довољно тачна и ефикасна метода за нумеричку интеграцију конститутивних релација HASP модела.

3.4 Применљивост остварених резултата

Конститутивни модел развијен у оквиру докторске дисертације се може користити у анализи геотехничких проблема који укључују нормално консолидоване и преконосолидоване глине, при монотонном оптерећењу. Развијени поступак нумеричке интеграције напона омогућава да се модел имплементира у различите програме за нумеричку анализу конструкција. У прилогу 1 је дат комплетан код написан Фортран програмским језиком за имплементацију конститутивног модела у ABAQUS.

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 кандидаткиња објавила, од којих је један у врхунском међународном часопису са SCI листе, Комисија сматра да је кандидаткиња несумњиво доказала способност за самостални научноистраживачки рад.

4. ОСТВАРЕНИ НАУЧНИ ДОПРИНОС

4.1 Приказ остварених научних доприноса

Основни научни доприноси у дисертацији су:

- 1) Развој новог облика закона ојачања у конститутивном моделирању тла
- 2) Примена параметра стања у конститутивном моделирању преконосолидованих глина
- 3) Развој оригиналног конститутивног модела за преконосолидоване глине са материјалним параметрима са јасним физичким значењем
- 4) Развој алгоритма за нумеричку интеграцију напона
- 5) Имплементација новог конститутивног модела за тло у програм Abaqus

4.2 Критичка анализа резултата истраживања

HASP модел формулисан у оквиру предметне докторске дисертације представља оригинални конститутивни модел за описивање механичког понашања преконсолидованих глина. Задржана је једноставност МСС модела и сви материјални параметри модела се могу одредити из конвенционалних лабораторијских опита. Показано је да је параметар стања, који комбинује утицај нормалних напона и збијености и који је пре свега развијен за описивање механичког понашања песка, ефикасан параметар у конститутивним релацијама ситнозрног тла. Користећи комбиновани закон ојачања и параметар стања формулисан је коефицијент ојачања који контролише све елементе понашања преконсолидоване глине:

1) У моделу не постоји област са чисто еластичним деформацијама, јер је коефицијент ојачања истовремено и коефицијент редукције пластичних деформација. На тај начин је омогућено еласто-пластично понашање од самог почетка деформисања. Предност оваквог концепта је што не мора да се дефинише величина иницијалне површи течења у моделу. Што је већи степен преконсолидације и напонска тачка удаљенија од линије критичног стања, то је и почетни коефицијент ојачања већи. У почетној фази оптерећивања су тако еластичне деформације веће од пластичних. Како се у процесу деформисања полако губи и степен преконсолидације тла, тако се и коефицијент смањује и пластичне деформације постају доминантне.

2) У дренираним условима, модел предвиђа постепен прелаз из контракције у експанзију пре него што је достигнута вршна смичућа чврстоћа захваљујући великој вредности коефицијента ојачања. Такође, када је достигнута вршна смичућа чврстоћа, коефицијент ојачања је једнак нули и долази постепеног прелаз из ојачања у омекшање и то без додатног математичког описивања. Неведена особина модела има велики значај, узимајући у обзир да се омекшање може уочити код већине тврдих преконсолидованих глина при већим деформацијама.

3) У недренираним условима, захваљујући коефицијенту ојачања, постоји добро предвиђање генералне форме путање ефективних напона у зависности од степена преконсолидације, а самим тим и добро предвиђање порног притиска.

Модел је имплементиран у комерцијални софтвер Abaqus/Standard користећи Методу водећег параметра као нумеричку процедуру за интеграцију напона и извршена је верификација имплементације.

Могућности модела су приказане кроз поређење са публикованим резултатима дренираних и недренираних опита триаксијалне компресије и екстензије на широком спектру преконсолидованих глина. Напонско-деформацијске релације, промена запремине и промена порног притиска показују добру сагласност са експерименталним резултатима, за разлику од предвиђања МСС модела.

У недренираним условима, постоји добро предвиђање генералне форме путање ефективних напона у зависности од степена преконсолидације, односно порног притиска при триаксијалној компресији и екстензији. Напонско-деформацијске релације се такође у великој мери поклапају са експерименталним резултатима. Максимална одступања у односу на експерименталне резултате се крећу у границама 10-15%. У дренираним условима, постоји одлично предвиђање понашања

преконсолидованих глина током ојачања. Без увођења површи Хворслева, HASP модел добро описује вршну чврстоћу у свим симулацијама, осим код $p'=\text{const}$ теста.

Недостатак HASP модела је уочен код пада чврстоће, тј. омекшања. Модел тада предвиђа велике инкременте пластичних запреминских и смичућих деформација, услед мале вредности коефицијента ојачања. Критично стање је тако достигнуто при већим вредностима смичућих деформација, него што је то експериментално утврђено. Ако се узме у обзир да је феномен омекшања последица реорганизације зрна и/или формирања локалних зона смицања у тлу, што доводи до нехомогеног поља деформација, може се сматрати да HASP модел даје довољно тачну апроксимацију напонско-деформацијско понашање у том домену.

HASP модел превазилази многе недостатке Модификованог Cam Clay модела приликом описивања механичког понашања преконсолидованих глина. Представља добар баланс између софистицираности и једноставности и добар теоретски и методолошки оквир за описивање механичког понашања преконсолидованих глина при монотонном оптерећењу.

Као што је у препорукама за даља истраживања наглашено, могуће је унапређење модела за монотонно оптерећење, као и за примену модела за различита напонска стања преконсолидованог тла и услове оптерећивања и то:

- 1) Формирањем еласто-пластичне матрице која би допринела знатном повећању брзине конвергенције у глобалном Newton-Raphson-овом итеративном поступку.
- 2) Проширењем релација модела на глобални напонски простор, укључивањем треће инваријанте (Lode-ов угао), што би омогућило адекватно дефинисање површи течења у девијаторској равни и значајно побољшало предвиђање модела у решавању раванских проблема.
- 3) Проширењем релација модела за предвиђање механичког понашања преконсолидованих глина при цикличном оптерећењу

4.3 Верификација научних доприноса

Током истраживања и рада на докторској дисертацији кандидаткиња Сања Јоцковић је објавила следеће радове из области конститутивног моделирања тла:

Категорија M21:

1. Jocković, S. & Vukićević, M. (2016). Bounding surface model for overconsolidated clays with new state parameter formulation of hardening rule. *Comput Geotech* 2017; 83:16–29. doi:10.1016/j.compgeo.2016.10.013.

Категорија M33:

1. Јоцковић С., Вукићевић М. (2016). Параметар стања за описивање напонско-деформацијског понашања тла. Зборник радова међународне конференције „Савремена достигнућа у грађевинарству 2016”, Суботица.
2. Јоцковић С., Вукићевић М. (2015). Конститутивни модел за преконсолидовано тло. Зборник радова шестог научно-стручног међународног саветовања „Геотехнички аспекти грађевинарства”, Вршац.

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 „Формулација и имплементација конститутивног модела за преконсолидоване глине“ представља оригиналан и вредан научни допринос, као и да је кандидаткиња Сања Јоцковић показала способност за бављење научно-истраживачким радом.

Докторска дисертација кандидаткиње Сање Јоцковић 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 Сање Јоцковић, дипл. грађ. инж., под називом „Формулација и имплементација конститутивног модела за преконсолидоване глине“ и да се одобри њена јавна одбрана.

ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ

В. проф. др Мирјана Вукићевић,
Универзитет у Београду, Грађевински факултет

Проф. др Мирослав Живковић,
Универзитет у Крагујевцу, Факултет инжењерских наука

Доц. др Селимир Леловић,
Универзитет у Београду, Грађевински факултет

Проф. др Борис Јеремић,
University of California, Department of Civil and
Environmental Engineering, Davis