

**НАУЧНО – НАСТАВНОМ ВЕЋУ  
ГРАЂЕВИНСКОГ ФАКУЛТЕТА  
УНИВЕРЗИТЕТА У БЕОГРАДУ**

Одлуком Наставно-научног већа Грађевинског факултета Универзитета у Београду од 26.2.2016. године одређени смо за чланове Комисије за оцену и одбрану докторске дисертације Зорана Перовића, дипл. грађ. инж. под насловом

**ЕЛАСТОПЛАСТИЧНА АНАЛИЗА РЕШЕТКАСТИХ НОСАЧА СА ОШТЕЋЕЊЕМ  
ПРИ ЦИКЛИЧНОМ ОПТЕРЕЂЕЊУ**

Комисија у саставу

1. др Драгослав Шумарац, редовни професор, Грађевински факултет, Универзитет у Београду
2. др Александар Прокић, редовни професор, Грађевински факултет у Суботици, Универзитет у Новом Саду
3. др Растислав Мандић, ванредни професор, Грађевински факултет, Универзитет у Београду
4. др Ратко Салатић, ванредни професор, Грађевински факултет, Универзитет у Београду
5. др Саша Стошић, доцент, Грађевински факултет, Универзитет у Београду

после прегледа докторске дисертације подноси Наставно-научном већу Грађевинског факултета Универзитета у Београду следећи

**ИЗВЕШТАЈ**

**1. Подаци о процедури пријављивања и предаје дисертације**

Разматрана дисертација је пријављена Грађевинском факултету Универзитета у Београду 20.2.2015. године. На седници Наставно-научног већа 26.2.2015. одређена је комисија за пријем теме докторске дисертације у саставу:

1. др Драгослав Шумарац, редовни професор, Грађевински факултет, Универзитет у Београду

2. др Александар Прокић, редовни професор, Грађевински факултет у Суботици, Универзитет у Новом Саду
3. др Ратко Салатић, ванредни професор, Грађевински факултет, Универзитет у Београду

Извештај Комисије за пријем теме докторске дисертације је прихваћен на седници Наставно-научног већа Грађевинског факултета Универзитета у Београду од 23.4.2015. године. На основу добијене сагласности Већа научних области грађевинско-урбанистичких наука од 26.5.2015. године, Наставно-научно веће Грађевинског факултета Универзитета у Београду је 18.6.2015. године одобрило рад на дисертацији и за ментора одредило проф. др Драгослава Шумарца. Кандидат Зоран Перовић је предао урађену докторску дисертацију Студентској служби Грађевинског факултета 18.2.2016. године у потребном броју примерака.

Тема разматране докторске дисертације припада научној области Грађевинарство, а ужој научној области Техничка механика и теорија конструкција.

## **2. Биографски подаци**

Зоран Перовић је рођен је 13.10.1984. године у Ваљеву, где је завршио основну и школу и гимназију природно-математичког смера. Грађевински факултет Универзитета у Београду уписао је школске 2003/04. године, а дипломирао је 2009. године на конструктивном смеру, са просечном оценом 8,67, и са одбрањеним дипломским радом под називом "Главни пројекат надоградње и ојачања стамбене зграде". За изузетне резултате на предметима Катедре за техничку механику и теорију конструкција, 2009. године је добио награду Грађевинског факултета у Београду, из фонда професора Душана Крајчиновића.

По завршетку основних студија уписао се на докторске студије на Грађевинском факултету у Београду. На докторским студијама положио је све испите са просечном оценом 10. У звање асистента - студента докторских студија на катедри за техничку механику и теорију конструкција изабран је у мају 2010. године, где је ангажован на предметима Техничка механика 1 и 2, Механика у геодезији и Енергетска Ефикасност и сертификација зграда. Поред наставне активности, учествовао је и у реализацији два научна пројекта под покровитељством Министарства за науку Републике Србије. Коаутор је једног рада објављеног у међународном часопису са СЦИ листе, једног рада објављеног у домаћем научном часопису, као и дванаест радова објављених у зборницима међународних научних скупова. Говори и пише енглески језик. Ожењен је и отац је једног детета.

## **3. Технички опис докторске дисертације**

### **3.1. Обим дисертације и спецификација елемената**

Докторска дисертација Зорана Перовића под називом “Еластопластична анализа решеткастих носача са оштећењем при цикличном оптерећењу” садржи укупно 141 страну, од којих је основни текст дат на 115 страна. У оквиру основног текста дисертације приказано је укупно 67 слика и 7 табела. Списак цитиране литературе садржи 89 навода међународних и домаћих аутора. Техничка обрада дисертације је на високом нивоу, текст је писан јасно, математичке формуле и релације су дате прегледно. Такође, слике и табеле су прегледне и илустративне.

Разматрана дисертација се састоји из следећих делова и поглавља:

- Насловна страна на српском језику
- Насловна страна на енглеском језику
- Списак ментора и чланова Комисије за одбрану
- Захвалност
- Апстракт на српском језику
- Апстракт на енглеском језику
- Садржај:
  1. Поглавље – Увод 18 стр
  2. Поглавље – Хистерезисни оператори 20 стр
  3. Поглавље – Моделирање еластопластичног понашања материјала применом Прајзаковог модела хистерезиса 18 стр
  4. Поглавље – Еластопластична анализа решеткастих носача са оштећењем при цикличном оптерећењу 17 стр
  5. Поглавље – Прорачун хистерезисног губитка енергије применом Прајзаковог модела хистерезиса 3 стр
  6. Поглавље – Особине алгорита за еластопластичну анализу решеткастих носача при цикличном оптерећењу 5 стр
  7. Поглавље – Еластопластична анализа гредног елемента применом Прајзаковог модела хистерезиса 6 стр
  8. Поглавље – Нумерички примери 25 стр
  9. Поглавље – Закључак 3 стр
  10. Литература 10 стр
- Биографија аутора

- Изјава о ауторству
- Изјава о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада
- Изјава о коришћењу

Дисертација је у потпуности обликована у складу са упутством Сената Универзитета у Београду од 14.12.2011. године (Упутство за формирање репозиторијума докторских дисертација) и посебним упутствима за обликовање штампане и електронске верзије докторске дисертације, формирање образаца изјаве и ауторских лиценци.

### **3.2. Структура докторске дисертације**

Разматрана докторска дисертација састоји се из десет поглавља. У уводу су наведене неке од основних теорија класичне цикличне пластичности, као и других модела који се могу користити у еластопластичној анализи носача при цикличном оптерећењу, а представљене су и карактеристике тих модела које су од значаја за предметно истраживање. Посебно су истакнути модели који се користе у таквој анализи при једнооксијалном напонском стању, међу којима је и Прајзаков модел хистерезиса чија је и имплементација била предмет ове дисертације. У другом поглављу су приказане основне карактеристике хистерезисних оператора, које су значајне за дефинисање модела који се могу користити у моделирању пластичног понашања материјала. Представљена је математичка дефиниција Прајзаковог модела хистерезиса, као и основне карактеристике Воус-Веп-овог модела који је коришћен за упоредну анализу. У трећем поглављу је приказан концепт еластопластичне анализе решеткастих носача при цикличном оптерећењу. Прво је представљен постојећи модел једнооксијалног понашања материјала дефинисан применом Прајзаковог модела, а затим је на основу тог модела осмишљен алгоритам за анализу решеткастих носача, у методи коначних елемената, при цикличном оптерећењу. Такође је уведен је и ефекат геометријске нелинеарности. У овом поглављу је приказана и предност предметног модела у моделирању понашања материјала кроз дефинисање параметера модела на основу експерименталних резултата. У четвртом поглављу је представљена анализа аналогна анализи у претходном поглављу, али са уведеним ефектом оштећења у материјалу. Оштећење у хомогеном изотропном материјалу је формулисано као локално, а уведено, у претходно одређен алгоритам за еластопластичну анализу решеткастих носача, преко два приступа. У првом приступу је елемент који симулира потпуни лом имплементиран у постојећи приступ еластопластичне анализе, и на основу материјалног модела таквог комбинованог елемента је дефинисана одговарајућа анализа решеткастих носача. Други приступ за моделирање оштећења у овој дисертацији се односи на увођење принципа механике континуума са оштећењем у алгоритам прорачуна дефинисаног у трећем поглављу, као што су принципи ефективног напона и мере оштећења,. Наведене су и одређене потешкоће и препоруке у вези

са конвергенцијом поступка с обзиром на могућу појаву негативне крутости у прорачуну. У петом поглављу је коришћењем познатог концепта за одређивање хистерезисног губитка енергије дефинисан поступак за његову примену у прорачуну решеткастих носача. Такође је приказан значај разлике пластичног рада и ослобођене (хистерезисне) енергије која утиче на пластично понашање материјала, односно формирање облика хистерезисних петљи током циклуса оптерећења. У шестом поглављу је детаљније приказан концепт алгоритма који је представљен у трећем и четвртом поглављу. Наглашене су и најзначајније одлике овог алгоритма од којих су најбитнији поступци за дефинисање нелинеарности у једначинама методе коначних елемената. У седмом поглављу је представљена и анализирана основа приступа који омогућава еластопластичну анализу гредних носача при цикличном оптерећењу, на основу концепта анализе решеткастих носача и нумеричке интеграције напона по површини попречног пресека, при чему је примењена метода концентрисане пластичности. У осмом поглављу су приказани нумерички примери анализе решеткастих и гредних носача која је представљена у претходим поглављима. При томе је извршено поређење резултата у статичкој и динамичкој анализи представљеног модела прорачуна решеткастих носача са резултатима добијених Воус-Вен-овим моделом хистерезиса и са резултатима добијених коришћењем модела генералисане пластичности. Поред резултата, анализирана је и нумеричка ефективност и захтевност одговарајућих поступака, на основу којих је истакнута предност коришћења Прајзаковог модела хистерезиса у односу на друге моделе. У нумеричким примерима са оштећењем је приказано поређење резултата и могућности за моделирање два представљена приступа као и однос њихове нумеричке ефективности. У примерима са гредним елементима разматран је једноставан рам чија је анализа показала да је могуће користити примењени концепт и за моделирање произвољног линијског носача са Прајзаковим моделом хистерезиса. У деветом, закључном поглављу је истакнут допринос истраживања у овој дисертацији, цикличној пластичности линијских носача. Поред тога су још напоменуте основне карактеристике и предности предметног модела генерално, као и у поређењу са моделима који се могу користити у овој анализи.

## **4. Анализа докторске дисертације**

### **4.1. Предмет и циљ истраживања**

Предмет истраживања разматране докторске дисертације је ефикасна еластопластична анализа решеткастих носача, али и проширивање разматрања на произвољне линијске носаче. С обзиром на актуелне трендове у нумеричкој анализи конструкција, као и могућности које произилазе из усавршавања одговарајућих софтвера, нелинеарна анализа конструкција се све више примењује у инжењерској пракси, па и значај овакве анализе расте.

У случају појаве пластичних деформација и оштећења у материјалу, током цикличног оптерећења, облик напонско-деформацијске криве се јавља у облику хистерезиса, па је формулација приступа који може са великом тачношћу и нумеричком ефективношћу да дефинише овакав карактеристичан облик, значајан за еластопластичну анализу конструкција. Дефинисање одговарајућег нумеричког модела, за физичке проблеме у којима се јавља феномен хистерезиса, је могуће остварити преко примене хистерезисних оператора. Прајзаков модел је један од модела који пружа највише могућности за примену због својих добрих особина које су дефинисане од стране истраживача који су се бавили анализом хистерезисних оператора. Примена Прајзаковог модела у еластопластичној анализи решеткастих носача са оштећењем је главни предмет истраживања у овој докторској дисертацији. Предметни приступ се може користити у еластопластичној анализи иако не захтева постојање услова течења, површи течења, као ни закона течења и ојачања и има могућност да дефинише напонско стање у материјалу на основу претходне историје (меморије) деформације.

Иако је еластопластична анализа линијских носача проблем који је доста присутан у истраживањима и литератури, а и усавршаван кроз различите моделе, при цикличном оптерећењу, овај проблем добија нову димензију у погледу тачности резултата након одређеног броја циклуса, као и у погледу нумеричке захтевности одговарајућег модела. Користећи предметни модел, у приказаној докторској дисертацији, дефинисан је софтвер у `c++` програмском језику којим су представљене предности и конкурентност поменутог модела, са становишта тачности решавања и нумеричке оптимизације, у поређењу са класичним приступом, као и у поређењу са другим хистерезисним оператором.

Конкретно, помоћу Прајзаковог модела хистерезиса могуће је добити решење проблема у затвореном облику на нивоу напон-деформација. Односно ако се као улаз или унос користи деформација, за дефинисани материјал, као резултат се добија напон у аналитичкој форми у затвореном облику.

За моделирање материјала који показују Масинг понашање, односно затворене хистерезисне петље, одређивање параметара овог модела је једноставно, што омогућава лаку практичну примену у инжењерској пракси.

Аналитички облик решења је могуће геометријски интерпретирати (као прорачун површина у Прајзаковом троуглу које мењају облик за различите нивое деформацијског стања) и добити једноставнију алтернативу за прорачун. Ова чињеница је коришћена као основ за примену овог модела у методи коначних елемената. Могуће је дефинисати и решење у затвореном облику и у случају савијања, и то дефинисано аналитичко решење геометријски интерпретирати као запремину Прајзакове призме, међутим тада се проблем компликује јер је

у питању запремина сложене фигуре која мења облик, што за последицу има одлуку да се примени приступ нумеричке интеграције која је приказана у докторској дисертацији.

Теорије које уведе ефекат оштећења у материјал су развијане од 50-их година прошлог века увођењем појмова променљиве оштећења и ефективног напона у оштећеном материјалу. Дефинисање оштећења у материјалу је веома битно јер је на тај начин, поред појаве пластичних деформација, могуће додатно описати сложене феномене који се могу јавити при цикличном оптерећењу. Као и код класичних теорија пластичности, могуће је анализирати и вишеаксијална напонска стања, анизотропан материјал, нелокални приступ и друге комплексне аспекте механике оштећења. С обзиром на приступ коришћен у овој дисертацији, третирање материјала као хомогеног и изотропног омогућава довољно тачну анализу за инжењерке приступе у прорачуну конструкција. Увођењем два практична приступа у дефинисању оштећења, омогућава да се у предметној анализи додатно представе ефекти као што су деградација крутости и омекшање у материјалу, чиме се приказана анализа значајно побољшава у погледу феномена које може да обухвати.

Једначине методе коначних елемената за статичку и динамичку анализу решеткастих носача при цикличном оптерећењу са оштећењем су дефинисане у алгоритму прорачуна који због својих особина, може једноставно бити имплементиран у рачунарски софтвер. Наиме, могуће је суштину проблема нелинеарности свести на (динамичку) манипулацију низом бројева односно динамичко стварање и брисања објеката без унапред одређеног броја елемената објекта. Низ координата тачака у Прајзаковој граничној површини, који представља меморију претходних пластичних деформисања, може да се динамички мења на овај начин, па је самим тим погодно дефинисати одговарајући алгоритам.

Због свега наведеног, циљ истраживања је дефинисање нумеричког модела за примену хистерезисног оператора (Прајзаков модел хистерезиса) у еластопластичној анализи решеткастих носача узимајући у обзир и оштећење. Такође је потребно анализирати и могућности оваквог приступа за гредне носаче и извршити поређење са постојећим моделима са циљем усавршавања разматраног приступа, како би се прорачун линијских носача при цикличном оптерећењу у пластичном домену оптимизовао са становишта тачности решења, као и нумеричке и рачунске захтевности прорачуна.

## **4.2. Полазне хипотезе и научне методе**

С обзиром да се при цикличном оптерећењу линијских носача у пластичном домену, резултат понашања материјала, односно напонско-деформацијска крива добија у форми хистерезиса, примена приступа са хистерезисним операторима пружа предности у теоријском и нумеричком смислу. С обзиром на елементе конструкције који се разматрају, усвојена је

претпоставка о једнооксијалном напонском стању, као и хипотезе које се користе у теорији конструкција, посебно у техничкој теорији штапа. Геометријска нелинеарност се узима у обзир само у делу нумеричке анализе и нумеричких примера применом коротационе формулације. Због усвојене хипотезе о равним пресецима, нема утицаја смичућег напона на деформацију попречног пресека код гредних елемената. Основне научне методе су засноване на приступима и нумеричким методама које су у основи методе коначних елемената.

Примена хистерезисног оператора, подразумева да стање напона у материјалу не зависи од брзине промене деформације (rate-independent). За дефинисање оштећења, користе се основни принципи механике оштећења континуума за изотропан материјал.

### **4.3. Посебни и општи допринос дисертације**

Основни и општи допринос ове дисертације је дефинисање ефикасног модела за еластопластичну анализу решеткастих носача при цикличном оптерећењу.

Постојећи модел Прајзаковог хистерезисног оператора је примењен како би се дефинисале једначине у методи коначних елемената за прорачун решеткастих носача. Валидација и поређење модела коришћеног у дисертацији је извршена у нумеричким примерима, поређењем са другим хистерезисним оператором и моделом класичне пластичности. Поред тога, сам модел материјала је модификован како би могао да моделира и феномен оштећења у материјалу, па је додатно проширен прорачун решеткастих носача при цикличном оптерећењу у пластичном домену. С обзиром да овај модел омогућава и прорачун хистерезисног губитка енергије као дела пластичног рада, у представљени прорачун је имплементиран и алгоритам за одређивање ових компоненти енергије.

### **4.4. Најважнији резултати, закључци и смернице за даљи рад**

Најважнији резултати урађене докторске дисертације Зорана Перовића су садржани у самим доприносима дисертације, као и закључцима који су представљени на основу упоредне анализе са другим моделима.

У овој докторској дисертацији је први пут представљен модел за прорачун решеткастих носача при цикличном оптерећењу заснован на Прајзаковом моделу хистерезиса. Дефинисани нови приступ у еластопластичној анализи решеткастих носача са оштећењем омогућава оптимизацију прорачуна и решеткастих и гредних линијских носача са становишта нумеричке и рачунске захтевности, као и тачности решења.



Приказани закључци следе из нумеричких примера и очекивани су на основу претпоставки о карактеристикама модела који су коришћени у упоредној анализи. Показано је да је на основу аналитичке форме и геометријске интерпретације предметног модела могуће дефинисати нумерички ефикасан и практичан модел за примену у еластопластичној анализи решеткастих носача која је додатно проширена како би узимала у обзир појаву оштећења у материјалу.

С обзиром да је у дисертацији приказан концепт који би могао да прошири предметну анализу на гредне елементе, смернице за даљи рад, треба да се односе на формулисање комплетног софтвера за анализу линијских носача. Као што је наведено у дисертацији, оптимизација дефинисаног програма би могла да у потпуности доведе до изражаја предности предметног модела. Поред тога, потребно је додатно анализирати приказане моделе оштећења и могуће модификације које би додатно прошириле скуп феномена који би могли да се моделирају.

## **5. Оцена дисертације и способност кандидата за самосталан научни рад**

Анализом приказане докторске дисертације Зорана Перовића под називом “Еластопластична анализа решеткастих носача са оштећењем при цикличном оптерећењу” може се закључити да предметна дисертација представља резултат озбиљног и самосталног научно-истраживачког рада кандидата. Зоран Перовић је на основу приказаног резултата показао способност да практично решава сложене проблеме, анализирајући проблеме који су били предмет разматрања. С обзиром да се приказан предмет истраживања односи на различите области примењене механике и анализе конструкција, као и хистерезисне операторе, кандидат је показао да поседује широка знања и способност да успостави и пронађе везу између њих. Поред тога, Зоран Перовић је показао завидну примену техника програмирања приликом израде приказаног модела за прорачун.

Научни резултати који су релевантни за оцену квалитета дисертације односе се пре свега на чињеницу да је кандидат Зоран Перовић у оквиру нумеричког моделирања линијских носача формулисао нови модел прорачуна решеткастих носача у пластичном домену који има одређене предности у односи на постојеће моделе. Предности аналитичке форме и геометријске интерпретације Прајзаковог модела хистерезиса, за однос напон-деформација, у потпуности долазе до изражаја кроз направљени алгоритам чиме је постигнут одличан однос тачности резултата и комплексности, односно захтевности поступка.

Постојећи модел за еластопластично понашање материјала је први пут проширен како би могао да узме у обзир и оштећења у материјалу. Кандидат је тиме показао инвентивност и способност да прошири постојећа знања кроз усавршавање модела, што је омогућило и ширу примену овог приступа.

За потребе нумеричке анализе кандидат Зоран Перовић је развио сопствени компјутерски програм који представља основу за проширивање приказане анализе и на друге линијске носаче. Закључци које је изводио су прецизни и свеобухватни, а представљају резултат потпуног разумевања природе разматраног проблема и пажљиво осмишљених и спроведених свеобухватних нумеричких анализа. Евидентно је да је кандидат Зоран Перовић у потпуности способан за самостални научно-истраживачки рад.

## **6. Закључак и предлог**

У својој докторској дисертацији под називом “Еластопластична анализа решеткастих носача са оштећењем при цикличном оптерећењу”, Зоран Перовић, дипл.инж.грађ. је дао веома вредан научни допринос изучавању проблема који је данас врло актуелан, како са научно-истраживачког аспекта, тако и са аспекта практичне примене. На основу претходно изложеног, може се констатовати да разматрана докторска дисертација кандидата Зорана Перовића, дипл. грађ. инж. под насловом “Еластопластична анализа решеткастих носача са оштећењем при цикличном оптерећењу”, представља оригиналан и вредан научни допринос у области прорачуна решеткастих конструкција у пластичној области и да има све елементе који су неопходни за докторску дисертацију на Грађевинском факултету. Стога Комисија са задовољством предлаже Научно-наставном већу Грађевинског факултета Универзитета у Београду да прихвати Извештај Комисије и упути захтев Већу матичне научне области за давање сагласности за јавну одбрану докторске дисертације.

Београд, 14.3.2016. год.

Чланови Комисије за оцену и одбрану докторске дисертације:

1. др Драгослав Шумарац, редовни професор, Грађевински факултет,  
Универзитет у Београду
2. др Александар Прокић, редовни професор, Грађевински факултет у  
Суботици, Универзитет у Новом Саду
3. др Растислав Мандић, ванредни професор, Грађевински факултет,  
Универзитет у Београду
4. др Ратко Салатић, ванредни професор, Грађевински факултет,  
Универзитет у Београду
5. др Саша Стошић, доцент, Грађевински факултет, Универзитет у  
Београду