

УНИВЕРЗИТЕТ У БАЊОЈ ЛУЦИ
АРХИТЕКТОНСКО-ГРАЂЕВИНСКО-ГЕОДЕТСКИ ФАКУЛТЕТ



ИЗВЈЕШТАЈ

о оцјени урађене докторске тезе

На основу члана 149. Закона о високом образовању ("Службени гласник Републике Српске" број 73/10, 104/11, 84/12 и 108/13) и члана 54. Статута Универзитета у Бањој Луци, Наставно-научно вијеће Архитектонско-грађевинско-геодетског факултета Универзитета у Бањој Луци, на сједници одржаној дана 12.6.2014, донијело је одлуку о именовану комисије за оцјену и одбрану урађене докторске тезе мр Александра Борковића под насловом "Геометријски нелинеарна анализа призматичних љуски примјеном метода коначних трака" у саставу:

1. др Глигор Раденковић, ванредни професор, ужа научна област Техничке механике у грађевинарству, Грађевински факултет Универзитета у Београду, предсједник
2. др Драган Милашиновић, редовни професор, ужа научна област Техничке механике у грађевинарству, Архитектонско-грађевинско-геодетски факултет Универзитета у Бањој Луци, ментор и члан
3. др Валентина Голубовић-Бугарски, доцент, ужа научна област Техничке механике машинству, Машински факултет Универзитета у Бањој Луци, члан

1. УВОДНИ ДИО ОЦЈЕНЕ ДОКТОРСKE ТЕЗЕ

Докторска теза има укупно 124 странице, 137 слика, 104 нумерисане формуле и 1 табелу, док је укупан број референци коришћене литературе 126. Теза се састоји од 8 поглавља. Након општих напомена у уводу, у другом поглављу се даје сажет преглед литературе из области МКТ са акцентом на нелинеарну анализу. У задњем одјелу је извршена анализа тренутних домета МКТ, описани су доприноси тезе те је указано на њено мјесто у оквиру литературе.

У трећем поглављу су усвојене интерполационе функције за три типа коначних трака равне љуске. Приказане су основе метода сложених трака те је дефинисано кинематичко поље подужних и попречних укрућења. На крају је појашњен приступ подјеле траке на подужне сегменте.

У четвртном поглављу су изведене инкременталне једначине равнотеже коначне траке у складу са приступом тоталног Лангранжијана. Дефинисани су и доприноси укрућења виртуелном раду унутрашњих сила. Представљен је поступак за увођење утицаја почетних геометријских несавршености у модел, те је појашњена и дискутована структура матрице крутости.

У петом поглављу је укратко описан метод дужине лука (*arc-length method*) као поступак за рјешавање система нелинеарних једначина у случају комплексних равнотежних путања које достижу граничне тачке по оптерећењу и/или помјерању.

На крају је дискутован и усвојен критериј за избор знака предикторског рјешења.

Имплементација је представљена у шестом поглављу које се бави структуром формираног програмског пакета. Појашњени су улазни и излазни подаци те је укратко представљен алгоритам прорачуна. Описан је модул за визуелизацију, те су дата два илустративна примјера. Задњи одјељак се бави паралелизацијом представљеног кода.

Седмо поглавље је посвећено нумеричким експериментима и дискусији добијених резултата. Извршен је прорачун низа примјера познатих из литературе као и неких карактеристичних за представљени поступак. Поређењем резултата са теоријским и нумеричким, добијеним другим поступцима, верификован је усвојени математички и прорачунски модел.

У посљедњем поглављу су изнесени закључци и дате препоруке за даље истраживање. На крају је дат преглед кориштене литературе те додатак везан за интеграле који се појављују у прорачуну и њихово рјешавање.

2.УВОД И ПРЕГЛЕД ЛИТЕРАТУРЕ

Нумеричка анализа конструкција је актуелно подручје савремене науке. Нагли развој различитих нумеричких техника у инжењерским анализама се догодио у посљедње три деценије као посљедица доступности брзих рачунара са великом количином радне мерије. Нашироко је познато да метод коначних елемената доминира у примјени на овом подручју, али и многе друге нумеричке методе, међу којима су метод коначних трака (МКТ) и метод граничних елемената, имају своје улоге у више специјализованих области анализе конструкција. Поред знатних остварених домета, и даље се интензивно ради на развоју нових, тачнијих процедура и модела који ће боље описати посматрани физички проблем у циљу ефикаснијег и економичнијег пројектовања. У тези су обрађене само грађевинске конструкције, али се многи резултати могу примијенити и на друге области инжењерства. Постављени циљ рада је формирање математичког и прорачунског модела за описивање геометријски нелинеарног понашања призматичних љуски. Кроз поређење са доступним резултатима из литературе и комерцијалних софтверских пакета, потребно је донијети суд о примјенљивости модела.

МКТ, који редукује систем парцијалних диференцијалних једначина на систем обичних алгебарских једначина, данас је најактуелнији метод у анализи различитих феномена дугачких конструкција. Ту спадају мостови и високи објекти различите намјене чија дискретизација по дужини није потребна па је уштеда рачунарског времена у прорачунима уз повећану тачност главна предност метода. Посебно су интересантне танкозидне конструкције за које се метод показао готово идеалан с обзиром да обухвата све феномене који су посљедица њихове стабилности односно нестабилности изазване деформабилношћу попречног пресека.

Предходна истраживања су углавном била усмјерена на раздвојену формулацију, гдје се занемарује међудјеловање чланова реда. Углавном се посматрају слободно ослоњене конструкције једноставне геометрије, најчешће обичне равне плоче. Изузетак је примјена сплајн функција, али њиховом примјеном се губи континуитет који оригинални МКТ има, те се значајно повећава број степени слободе.

Детаљни преглед литературе је омогућио кандидату дефинисање тренутног стања у области нелинеарне МКТ анализе, на основу чега је уочио простор за унапређење метода. Наиме, поред обимне литературе посвећене овој теми, аутори се углавном концентришу на слободно ослоњене конструкције једноставне

геометрије и оптерећења. Кандидат је поставио за циљ формирање опште формулације хармонијски спојеног МКТ која ће укључити скоро све идеализоване граничне услове, подужна и попречна укрућења као и траке негомogene по дужини. Очекиван резултат је значајно проширење класа конструкција на које је МКТ примјенљив.

Кандидат на једноставан начин дефинише циљ и хипотезе овог, веома сложеног, истраживања. Избором подужних функција на основу основних принципа механике континуума на ефикасан начин долази да рјешења веома сложених проблема у теорији конструкција који су по свом феноменолошком аспекту данас тема у анализама многих истраживача.

3. МАТЕРИЈАЛ И МЕТОД РАДА

Призматичне љуске представљају широку класу, не само грађевинских, конструкција. Типични представници су плоче, зидови, ортотропне плоче, плитке и дубоке цилиндричне љуске, кровне љуске, танкозидни носачи итд. Због својих повољних карактеристика у аспектима носивости, употребљивости, стабилности и трајности, ове конструкције су веома популарне у савременом инжењерству. Њихова основна геометријска карактеристика јесте да им је кривина у једном правцу нула, што их чини погодним за извођење.

МКТ је полуаналитички поступак идеалан за прорачун дугих, призматичних љуски. Основну поставку метода чини апроксимација поља помјерања редовима производа полинома и тригонометријских функција. Ако се тригонометријске функције усвоје тако да ред брзо конвергира, МКТ је у значајној предности у односу на друге нумеричке поступке. Чак и у случају сложених оптерећења и геометрија, гдје је потребан већи број чланова реда, МКТ даје квалитетнија рјешења јер су тригонометријске функције бесконачно диференцијабилне, тј. имају C^∞ континуитет. На квалитет значајно утичу и усвојени полиноми за савијање који имају бар C^1 континуитет.

У свјетским оквирима, МКТ је актуелно подручје истраживања, те се сваке године публикује знатан број радова. Нелинеарна анализа конструкција је веома широко поље истраживања. У циљу добијања квалитетнијих резултата, првобитно постављени циљ опште нелинеарне анализе је усмјерен ка геометријски нелинеарном понашању танких призматичних љуски у складу са класичном теоријом танких плоча. Размотрене су коначне мале деформације, које укључују велика помјерања и инфинитезималне ротације. Оптерећење је независно од геометрије конструкције а материјал је линеарно еластичан и хомоген по дебљини љуске.

У раду су испитани сви најзначајнији аспекти нелинеарног понашања љуски: ефекти ојачања и омекшања те предкритично и посткритично понашање уз могућу појаву пролома унапријед и уназад.

У складу са постављеним циљем истраживања, кандидат је у раду примијенио многе методе теорије конструкција од којих су најзначајније:

- метод коначних трака
- метод коначних елемената
- принцип виртуелних помјерања у инкременталном облику
- метод дужине лука
- Њутн-Рапсонов метод

Добијени резултати су представљени на јасан и разумљив начин. Модул за визуелизацију који је уграђен у програмски код је омогућио најсавременији начин приказивања резултата нумеричких симулација.

Истраживање је указало да је примјеном полуаналитичког МКТ могуће описати неке од најсложенијих проблема призматичних љуски. По први пут су, примјеном МКТ, успјешно разматране конструкције са подужним и попречним укрућењима које могу имати отворе и скоковите промјене дебљине, различитих граничних услова.

Основни допринос истраживања јесте општа теоријска поставка хармонијски спојеног МКТ као и њена имплементација у програмски код отвореног типа. Кроз обимну нумеричку анализу, кандидат је дошао до низа закључака уско везаних за примјену МКТ и МКЕ у анализи призматичних љуски.

Тако је поређењем неколико типова трака и нелинеарности указано који су степени слободе и виши степени градијената помјерања неопходни у циљу добијања тачних резултата, у зависности од типа конструкције и оптерећења.

Резултати дати у раду су исправно тумачени и дискутовани. Кроз поређење са познатим примјерима из литературе, кандидат је показао значајан степен критичности и самокритичности. Неки добијени резултати, који су значајно одступали од опште прихваћених, су сугерисали потребу за провјером математичког и прорачунског модела. Ово је често као резултат давало унапређење ових модела. Кандидат је оповргнуо неке резултате из литературе, указујући на потребу укључивања већег броја чланова реда и за проблеме за које је у литератури претпостављено да је довољан један или два члана реда.

Представљени приступ је у стању да са високом тачношћу опише веома комплексне равнотежне путање система који показују проломе унапријед и уназад.

Примијеђена је разлика у моделирању граничних услова са спријеченим обртањем управно на раван љуске, гдје метод коначних елемената и МКТ дају другачије резултате, при чему су добијени МКТ резултати у складу са реалним понашањем конструкција. Показано је и да стандардна грешка у примјени линеарно еластичног материјалног модела, успостављањем конститутивне везе на укупним деформацијама, не уноси значајну грешку при моделирању реалних грађевинских конструкција.

Као што је већ напоменуто, значајан допринос тезе представља програмски код који је отвореног типа. Његова доступност омогућава инжењерима и истраживачима да унапређују сопствена знања као и да самостално модификују алгоритам прорачуна, у складу са потребама, тј. типом проблема.

Представљени рад отвара могућност за многа нова истраживања, прије свега обимном параметарском анализом разних типова конструкција употребом формираног кода. Такође је могуће, уз одређене модификације, увести и анализу раздвајања чланова реда, материјалну нелинеарност, динамичку анализу као и траке сложеније геометрије. Резултати који се постижу предложеном програмском процедуром на оптималан начин уз веома велику тачност оправдавају његову примјену у пројектовању, ако се ово пореди са сличним могућностима примјене комерцијалних софтвера.

Кандидат је током израде тезе објавио низ радова из предметне области у часописима међународног и националног значаја те бројне радове на међународним конференцијама. Најзначајнија су два рада објављена у водећим међународним часописима са SCI листе:

А. Борковић, Н. Мрђа, С. Ковачевић, "Dynamical analysis of stiffened plates using the compound strip method", *Engineering Structures*, 50, 56-67, 2013.

Д. Д. Милашиновић, А. Борковић, Ж. Живанов, П. С. Ракић, М. Николић, Л. Стричевић, М. Хајдуковић, "Large displacement stability analysis of thin plate structures: Scope of MPI/OpenMP parallelization in harmonic coupled finite strip analysis", *Advances in Engineering Software*, 66, 40-51, 2013.

5. ЗАКЉУЧАК И ПРИЈЕДЛОГ


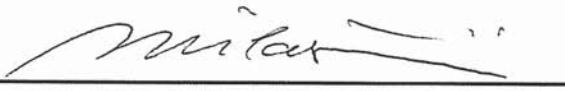

Докторска теза кандидата мр Александра Борковића, под називом "Геометријски нелинеарна анализа призматичних љуски примјеном метода коначних трака" урађена је у складу са пријављеним и прихваћеним образложењем теме. Научни допринос ове докторске тезе се заснива на чињеници да је први пут дата општа хармонијски спојена формулација коначних трака за проучавање грађевинских конструкција типа призматичних љуски. Ово подразумијева увођење утицаја различитих услова ослањања, подужних и попречних укрућења, те различитих геометријских и материјалних карактеристика по дужини љуски. Представљени приступ омогућава описивање геометријски нелинеарног одзива љуски под утицајем произвољних статичких оптерећења.

Као посебан допринос, формулација успјешно описује веома сложене математичко-механичке проблеме љуски као што су: ојачање и омекшање, пролом, те предкритично и посткритично понашање.

На основу укупног сагледавања тезе, која представља оригиналан научни рад, Комисија **позитивно оцјењује** докторску тезу и предлаже Наставно-научном вијећу Архитектонско-грађевинско-геодетског факултета Универзитета у Бањој Луци да прихвати **позитивну оцјену** и одобри јавну одбрану.

11.7.2014.

ПОТПИС ЧЛАНОВА КОМИСИЈЕ

1. 
др Улигор Раденковић
ванр. проф. Грађевинског факултета у Београду
2. 
др Драган Милашиновић
ред. проф. Архитектонско-грађевинско-геодетског факултета у Бањој Луци
3. 
др Валентина Голубовић-Бугарски
доцент Машинског факултета у Бањој Луци