

**НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ**

**Предмет:** Реферат о урађеној докторској дисертацији кандидата Мирослава Марјановића

Одлуком Наставно-научног већа Грађевинског факултета Универзитета у Београду бр. 329/9-14 од 24.03.2016. године, именовани смо за чланове Комисије за преглед, оцену и одбрану докторске дисертације кандидата Мирослава Марјановића под насловом:

**НЕЛИНЕАРНА АНАЛИЗА ЛАМИНАТНИХ КОМПОЗИТНИХ ПЛОЧА И ЉУСКИ СА ДЕЛАМИНАЦИЈАМА ПРИМЕНОМ МЕТОДЕ КОНАЧНИХ ЕЛЕМЕНАТА**

Докторска дисертација је написана на енглеском језику у складу са условима међународног пројекта SEEFORM у оквиру кога је дисертација урађена. Наслов дисертације на енглеском језику гласи:

**NONLINEAR ANALYSIS OF LAMINATED COMPOSITE PLATES AND SHELLS WITH DELAMINATIONS USING FINITE ELEMENT METHOD**

После прегледа достављене дисертације и других пратећих материјала и разговора са кандидатом, комисија је сачинила следећи

**РЕФЕРАТ**

**1. УВОД**

1.1. Хронологија одобравања и израде дисертације

- 13.12.2010. године кандидат је уписао Докторске академске студије на Грађевинском факултету у Београду, на студијском програму Грађевинарство.
- 02.09.2014. на седници Катедре за техничку механику и теорију конструкција кандидат је изложио предложену тему докторске дисертације под насловом "Нелинеарна анализа ламинатних композитних плоча и љуски са деламинацијама применом методе коначних елемената". Комисија коју је образовало Веће Катедре прихватила тему докторске дисертације и предложила кандидату да тему пријави Наставно-научном већу Грађевинског факултета.
- 03.09.2014. кандидат је пријавио тему докторске дисертације Наставно-научном већу Грађевинског факултета у Београду.
- 11.09.2014. Наставно-научно веће Грађевинског факултета у Београду именовало је Комисију за оцену подобности теме и кандидата докторске дисертације у саставу: проф. др Ђорђе Вуксановић, проф. др Бранислав Пујевић, Prof. Dr.techn. Günther Meschke (Одлука бр. 329/4 од 12.09.2014.).
- 18.12.2014. Наставно-научно веће Грађевинског факултета у Београду прихватило је извештај Комисије за оцену подобности теме и кандидата докторске дисертације и своју одлуку доставило Већу грађевинско-урбанистичких наука Универзитета у Београду на давање сагласности (Одлука бр. 329/6 од 18.12.2014.).

- 25.12.2014. Веће грађевинско-урбанистичких наука Универзитета у Београду дало је сагласност на предлог теме докторске дисертације под насловом "Нелинеарна анализа ламинатних композитних плоча и љуски са деламинацијама применом методе коначних елемената" (Одлука бр. 61206-5922/2-14 од 25.12.2014.).
- 14.03.2016. докторска дисертација је предата на преглед и оцену.
- На седници бр. 6, одржаној 24.03.2016. године (Одлука бр. 329/9 од 25.03.2016.) Наставно-научно веће Грађевинског факултета у Београду именовало је Комисију за оцену и одбрану докторске дисертације у следећем саставу:
  - o Dr.techn. Günther Meschke, редовни професор, Ruhr Universität Bochum, Institute for Structural Mechanics,
  - o др Бранислав Пујевић, редовни професор, Грађевински факултет Универзитета у Београду,
  - o др Мира Петронијевић, редовни професор, Грађевински факултет Универзитета у Београду,
  - o др Ђорђе Лађиновић, редовни професор, Факултет техничких наука Универзитета у Новом Саду,
  - o др Марија Нефовска-Даниловић, доцент, Грађевински факултет Универзитета у Београду.

## 1.2. Научна област дисертације

Дисертација кандидата Мирослава Марјановића припада научној области Грађевинарство, ужа научна област Техничка механика и теорија конструкција. За ментора дисертације одређен је др Ђорђе Вуксановић, редовни професор Грађевинског факултета Универзитета у Београду. За коментора дисертације именован је Prof. Dr.techn. Günther Meschke, редовни професор Рурског универзитета у Бохуму.

## 1.3. Биографски подаци о кандидату

Мирослав Марјановић рођен је 8. јануара 1986. године у Ужицу, где је завршио основну школу и гимназију природно-математичког смера као носилац дипломе "Вук Караџић" за ученике основних, као и за ученике средњих школа. Основне академске студије на Грађевинском факултету у Београду уписао је школске 2005/06. године, а дипломирао је 2009. године на Модулу Конструкције, са просечном оценом 9.56. Дипломске академске студије на Грађевинском факултету у Београду уписао је школске 2009/2010. године, а дипломирао је 2010. године на Модулу Конструкције, са просечном оценом 9.71. 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. Добитник је Награде Регионалне привредне коморе Ужице за најбоље студенте – таленте са подручја коморе за 2008. годину. Добитник је више стипендија за постигнут успех на студијама. Више пута је похваљиван од стране Грађевинског факултета Универзитета у Београду за изузетан успех током студирања. Током Основних академских студија на Грађевинском факултету Мирослав Марјановић је био ангажован као студент-демонстратор на предметима Информатика 1 и Статика конструкција.

Докторске академске студије на Грађевинском факултету у Београду уписао је школске 2010/2011. године. Положио је све испите предвиђене наставним планом са просечном оценом 10, а 2014. године одобрена му је израда докторске дисертације под називом "Нелинеарна анализа ламинатних композитних плоча и љуски са деламинацијама применом методе коначних елемената", под менторством проф. др Ђорђа Вуксановића и Prof. Dr.techn. Günther Meschke-a, са Рурског универзитета у Бохуму.

Током редовних студија, у 2 наврата је учествовао на летњим школама "Vibrations of Structures due to Rail-Road Traffic" у организацији Грађевинског факултета Универзитета у Београду и Техничког Универзитета у Минхену. У склопу израде мастер рада током 2010. године, учествовао је на међународној летњој школи "Model Validation and Simulation" на Bauhaus Universität Weimar. У децембру 2011. године похађао је радионицу "Scientific Presentation", на Ruhr-Universität Bochum.

Од децембра 2010. године запослен је на Грађевинском факултету Универзитета у Београду у звању асистента - студента докторских студија за ужу научну област Техничка механика и теорија конструкција. Од избора у звање асистента – студента докторских студија одржава вежбања из предмета Статика конструкција, Матрична анализа конструкција и Примена рачунара у пројектовању конструкција, на модулу Конструкције. Такође је ангажован у настави и на другим предметима Катедре за техничку механику и теорију конструкција.

Од 2011. године је стипендиста у међународног програма SEEFORM (South Eastern European Graduate School for Master and Ph.D. Formation in Engineering), који финансира DAAD, Немачка. У оквиру пројекта SEEFORM је у току претходне четири године провео укупно 7 месеци на студијском усавршавању на Ruhr-Universität Bochum (Institute for Structural Mechanics), код коментора Prof. Dr.techn. Günther Meschke-a. Поред тога учествовао је на Lecture seminar-има за студенте докторских студија у земљи и иностранству и семинарима за студенте докторских студија у организацији RUB Research School на Ruhr-Universität Bochum.

Кандидат је истраживач на Пројекту Министарства просвете, науке и технолошког развоја Републике Србије TP 36048 - Истраживање стања и метода унапређења грађевинских конструкција са аспекта употребљивости, носивости, економичности и одржавања. Кандидат је 2014. године положио стручни испит за грађевинску струку – област грађевинске конструкције. Члан је Друштва грађевинских конструктера Србије, Српског друштва за механику и рецензент за: International Journal of Mechanical Sciences и Science and Engineering of Composite Materials.

## **2. ОПИС ДИСЕРТАЦИЈЕ**

### 2.1. Садржај дисертације

Докторска дисертација "Нелинеарна анализа ламинатних композитних плоча и љуски са деламинацијама применом методе коначних елемената" написана је на енглеском језику, на 251 страни, садржи 80 слика и 27 табела. Подељена је на дванаест поглавља: 1) Увод; 2) Преглед претходних истраживања; 3) Општа ламинатна теорија плоча; 4) Аналитичко решење у линеарној динамичкој анализи неоштећених плоча; 5) Нумерички (МКЕ) модел; 6) Контактни алгоритам; 7) Пропагација деламинације; 8) Анализа ламинатних композитних љуски; 9) Објектно-орјентисан рачунарски програм; 10) Нумерички примери; 11) Закључци; 12) Будући рад. У списку коришћене литературе налази се 157 референци које детаљно приказују тренутно стање у нумеричкој анализи ламинатних композитних плоча и љуски са деламинацијама.

### 2.2. Кратак приказ појединачних поглавља

У уводном поглављу, дефинисани су основни појмови теорије композитних носача и истакнута је неопходност формирања прецизног нумеричког модела за анализу ламинатних композитних и сендвич плоча са појавом деламинације, тј. међусобног одвајања појединих слојева. Дискутован је утицај деламинације на смањење крутости при статичком оптерећењу и промену фреквентних карактеристика конструктивног елемента ламинатне или сендвич плоче при динамичком оптерећењу. Негативни ефекти деламинације представљали су главни мотив за развој нумеричког

модела који ће имати способност да анализира оштећене ламинатне композитне или сендвич плоче услед динамичког оптерећења.

У наставку првог поглавља је кратко наведено да ће се нумерички модел заснивати на решењу Опште ламинатне теорије плоча коју је предложио Reddy, применом методе коначних елемената (МКЕ), са узимањем у обзир геометријске нелинеарности према von Karman-овим претпоставкама. Нумерички модел који је предложио Reddy (*J. N. Reddy. Mechanics of laminated composite plates: theory and analysis. CRC Press, 1997.*), а који је унапређен од стране Barbero-a (*E. J. Barbero, J. N. Reddy. Modeling of Delamination in Composite Laminates using a Layer-Wise Plate Theory. International Journal of Solids and Structures 1991, 28(3), 373-388.*) послужио је као основа за развој нумеричког модела приказаног у дисертацији.

Предложени нумерички модел реалистично представља кинематику плоче са деламинацијом и узима у обзир пропагацију деламинације у својој равни услед динамичког оптерећења, истовремено спречавајући међусобно преклапање суседних слојева у зони деламинације.

У другом поглављу дат је преглед претходних истраживања у области теорије композитних носача, која су релевантна за докторску дисертацију. На почетку поглавља су приказани недостаци теорија плоча које се заснивају на једном еквивалентном слоју (енг. *equivalent single layer theories*), и истакнута је потреба примене слојевите (енг. *layerwise*) теорије плоча за коректан опис кинематике слојевитих плоча са деламинацијом. Дат је хронолошки приказ развоја теорија плоча са најважнијим референцама. Приказана су одговарајућа нумеричка решења базирана на методи коначних елемената заснована на одговарајућим теоријама плоча.

Анализом литературе, кандидат је дошао до закључка да постоји велики простор за унапређење нумеричких модела ламинатних композитних љуски применом слојевитих теорија плоча. Наиме, до сада приказани нумерички модели углавном третирају неоштећене љуске, што је навело кандидата на идеју да нумерички модел ламинатне композитне плоче прошири на анализу ламинатних композитних љуски са присуством деламинације. У последњем делу другог поглавља кандидат је истакао одговарајуће предности примене објектно-орјентисаног рачунарског програма у нумеричкој анализи конструкције применом методе коначних елемената, нарочито у случају јако сложених модела који захтевају значајно време прорачуна условљено великим бројем степени слободне система. Дат је хронолошки приказ најважнијих објектно-орјентисаних софтвера и њихове структуре, који су послужили као основа за програм који је кандидат развио у склопу израде дисертације.

У трећем поглављу дат је приказ Reddy-еве Опште ламинатне теорије плоча: претпоставке и ограничења, везе између поља померања и деформације, конститутивне релације за појединачан слој и читаву ламинатну плочу. Детаљно је приказано извођење једначина кретања применом принципа виртуалних померања. Изведена је "strong" формулација нелинеарног динамичког проблема и приказана редукција општег проблема на одговарајуће проблеме теорије конструкција: геометријски нелинеарно и линеарно савијање, линеарно избочавање, слободне вибрације, геометријски нелинеарна и линеарна динамичка анализа.

У четвртом поглављу приказано је аналитичко решење Опште ламинатне теорије плоча при динамичком напрезању неоштећене, правоугаоне, слободно ослоњене ламинатне композитне плоче са влакнима укрштеним под углом од  $90^\circ$  (енг. *cross-ply*). Разматран је линеарни одговор конструкције, а систем парцијалних диференцијалних једначина кретања је редукован на систем обичних диференцијалних једначина по времену применом Newmark-овог поступка. Одговор конструкције (померања, брзине и убрзања) добијен је применом Navier-овог решења, а након тога срачунати су напони по дебљини ламинатне плоче и њихова промена у времену.

У петом поглављу приказано је нумеричко решење Опште ламинатне теорије плоча применом методе коначних елемената. Изведена је "weak" формулација нелинеарног проблема. Приказан је поступак добијања матрице крутости, геометријске матрице крутости, конзистентне матрице маса и вектора сила слојевитог коначног елемента са могућношћу описивања кинематике деламинације увођењем

додатних степени слободе у чворовима коначног елемента, за приказ релативног померања слојева у оштећеној зони плоче. Затим је описан поступак добијања изопараметарског четвороугаоног слојевитог коначног елемента са 4 или 9 чворова, и описан је проблем *shear locking*-а који се може јавити при моделирању веома танких плоча. Описани су нивои нумеричке интеграције који се морају применити како би се овај проблем елиминисао. Након тога укратко је описана *assembly* процедура и дате су матричне једначине којима се у МКЕ описују различити проблеми у теорији конструкција. Описан је поступак задавања граничних услова по померањима, а затим је описан поступак решавања система једначина за статичке (*time independent*) и динамичке (*time dependent*) проблеме. Нарочита пажња посвећена је описивању решавања геометријски нелинеарног динамичког проблема напрезања ламинатне композитне плоче и дата је процедура решавања.

У шестом поглављу, детаљно је илустрован итеративни контактни алгоритам који је имплементиран у нумерички модел, са циљем елиминације међусобног преклапања суседних слојева у зони деламинације. На једноставном примеру, са формализмом познатим из матричне анализе конструкција, описан је поступак елиминисања компонената померања  $W^I$  (енг. *crack opening displacement*). Ради бољег разумевања, дат је графички приказ алгоритма потпрограма који је коришћен у објектно-орјентисаном рачунарском програму за елиминацију контакта између слојева.

У седмом поглављу описана је главна тема дисертације: метод за праћење фронта деламинације који се мења под дејством статичког или динамичког оптерећења. Приказан алгоритам представља унапређење алгоритма који су предложили Xie и Biggers (*D.Xie, S.B.Biggers. Strain energy release rate calculation for a moving delamination front of arbitrary shape based on the virtual crack closure technique. Part I: Formulation and validation. Engineering Fracture Mechanics 2006, 73, 771-785.*), а који је био ограничен само на структуриране мреже коначних елемената. Алгоритам је заснован на техници виртуалног затварања прслине (енг. *virtual crack closing technique*). Приказани поступак захтева срачунавање величине отварања деламинације иза фронта деламинације, чворних сила дуж фронта деламинације и виртуалне затворене површине деламинације испред постојеће деламинације.

Изузетно важан аспект приказаног алгоритма представља срачунавање вектора правца ширења деламинације. Компоненте овог вектора срачунате су на основу статуса суседних чворова у мрежи коначних елемената, за разлику од већине модела доступних у литератури, где се правац вектора правца ширења деламинације претпоставља, што има за последицу да се модели приказани у литератури ограничавају на структуриране мреже коначних елемената. Виртуално затворена површина деламинације одређена је срачунавањем координата шест контролних тачака, за сваки чвор у мрежи коначних елемената дуж фронта деламинације. Након срачунавања свих раније наведених потребних величина, примењен је критеријум за пропацију деламинације.

Осмо поглавље описује проширење приказаног слојевитог коначног елемента плоче на анализу ламинатних композитних љуски, са или без присуства деламинације. Приказани су изопараметарски троугаони слојевити коначни елементи са три или шест чворова. Приказана је трансформација компонената померања у чворовима коначног елемента плоче из локалног координатног система (раван појединачног коначног елемента) у глобални координатни систем (тродимензионални Декартов простор) базирана на основама векторске алгебре. Формулисане су одговарајуће матрице трансформације слојевитог троугаоног коначног елемента. Описана је нумеричка интеграција за одређивање матрице крутости и матрице маса наведених елемената. На крају су критички дискутована одговарајућа ограничења оваквог приступа и дате препоруке за превазилажење нумеричке нестабилности приказаног модела.

Девето поглавље описује објектно-орјентисан рачунарски програм у MATLAB-у, који је кандидат развио у склопу израде докторске дисертације. За унос података и визуелизацију резултата коришћен је програмски пакет GiD Pre/Post Processor који је развијен у Међународном центру за нумеричке методе у инжењерству CIMNE, Барселона. У оквиру овог поглавља описана је примена наведеног програма у моделу који је био предмет дисертације. Кандидат је описао процедуре и функције које је написао ради повезивања GiD програмског пакета са програмом у MATLAB-у. Након тога описан је

поступак креирања мреже за визуелизацију резултата, која се због специфичности нумеричког модела разликује од мреже коначних елемената примењених у нумеричким прорачунима. У другом делу овог поглавља описан је рачунарски програм у MATLAB-у. Класе које су развијене подељене су у четири групе: *modeling classes*, *finite element model classes*, *analysis classes* и *numerical classes and functions*, а на крају је дат дијаграм међусобних релација појединих класа.

Десето поглавље у дисертацији садржи нумеричке примере којима су илустроване теоретске поставке приказане у оквиру претходних поглавља. Редом су разматрани: линеарно и нелинеарно савијање плоча, слободне вибрације плоча, избочавање плоча, линеарна и геометријски нелинеарна динамичка анализа и слободне вибрације ламинатних композитних љуски. Највећа пажња у свим наведеним проблемима посвећена је утицају деламинације (њене величине и положаја у плочи) на статички или динамички одговор конструктивног елемента.

Описаним поступцима анализирани су следећи нумерички примери:

1. Слободне вибрације слободно ослоњене ламинатне плоче применом теорија вишег реда,
2. Слободне вибрације слободно ослоњене ламинатне плоче са почетном деламинацијом,
3. Одређивање критичног оптерећења извијања слободно ослоњене ламинатне плоче,
4. Одређивање критичног оптерећења извијања слободно ослоњене ламинатне плоче са деламинацијом,
5. Динамичка линеарна и геометријски нелинеарна анализа слободно ослоњене ламинатне плоче са утицајем различитих теорија и броја слојева,
6. Динамичка линеарна и геометријски нелинеарна анализа слободно ослоњене ламинатне плоче са почетном деламинацијом са различитим положајем деламинације,
7. Динамичка линеарна анализа ламинатне плоче са пропагацијом деламинације,
8. Слободне вибрације композитне слојевите цилиндричне љуске са различитим граничним условима,
9. Слободне вибрације композитне слојевите конусне љуске са различитим граничним условима,
10. Слободне вибрације композитног слојевитог цилиндричног и сферног панела са различитим граничним условима,
11. Слободне вибрације композитне слојевите цилиндричне љуске са деламинацијом.

У већини примера пажљиво је урађена параметарска анализа утицаја броја слојева, услова ослањања и величине коначних елемената на решење. Поређењем са постојећим аналитичким, нумеричким или експерименталним примерима из литературе и решењима добијеним применом комерцијалног програма ABAQUS урађена је верификација предложене методе и развијеног програма. Након сваког примера дати су кратки закључци.

На крају рада, у једанаестом поглављу, закључци који су проистекли из дисертације су детаљно дискутовани. У последњем поглављу дате су препоруке за будући рад у овој области како би се даље унапредили нумерички модели ламинатних композитних плоча и љуски са деламинацијама.

### **3. ОЦЕНА ДИСЕРТАЦИЈЕ**

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

Докторска дисертација под насловом "Нелинеарна анализа ламинатних композитних плоча и љуски са деламинацијама применом методе коначних елемената" представља оригинални научни рад у области рачинске механике ламинатних композитних плоча са почетном деламинацијом. Полазећи од Reddy-еве Опште ламинатне теорије плоча и технике виртуалног затварања прслине, успешно је унапређен нумерички модел за статичку и динамичку геометријски нелинеарну анализу композитних ламинатних плоча и љуски са почетном деламинацијом заснован на методи коначних елемената,

(МКЕ), на анализу пропагације деламинације између слојева у композитној плочи. Истакнуто је да су разматрани контактни услови између додирних површи у зони деламинације, поред примене реалне кинематике плоче са деламинацијом. Такође је развијен веома ефикасан алгоритам за унос података и одличну визуелизацију нумеричких резултата. Све потребне алгоритме развио је и имплементирао Мирослав Марјановић.

Дисертација спада у веома актуелну и комплексну област рачунске механике, и садржи елегантна и робусна решења статичких и динамичких проблема.

### 3.2. Осврт на референтну и коришћену литературу

Током израде докторске дисертације кандидат је проучио релевантну литературу. Навео је 157 референци које су релевантне за област дисертације. Преглед литературе обухвата широк опсег тема обрађених у дисертацији, и чини одличну основу за будући рад у области дисертације. Кандидат се адекватно позивао на постојећу литературу током израде рада.

### 3.3. Опис и адекватност примењених научних метода

У докторској дисертацији кандидат је користио адекватне научне методе, као и савремене нумеричке методе за решавање веома захтевног проблема теорије конструкција – геометријски нелинеарне нумеричке анализе пропагације деламинације у композитним плочама и љускама. Неке од примењених научних метода су:

- метода коначних елементата (МКЕ)
- геометријски нелинеарна анализа слојевитих композитних плоча у МКЕ
- општа ламинатна теорија плоча
- векторска алгебра
- методе решавања нелинеарних једначина
  - Newton-Raphson-ов поступак,
  - Picard-ова метода,
- Newmark-ов интеграциони поступак за решавање дискретизоване динамичке једначине система
- Механика лома, техника виртуалног затварања прслине и одређивање брзине ослобађања енергије деформације
- Методе објектно оријентисаног програмирања у MATLAB програмском језику

Кандидат је успешно показао варијациону формулацију и дискретизацију плоча и љуски, узимајући у обзир кинематику вишеслојне плоче, у оквиру Опште ламинатне теорије плоча. Највећи научни допринос дисертације представља унапређење наведеног модела на плоче са деламинацијом, а нарочито описивање пропагације деламинације применом неструктурираних мрежа коначних елемената. Проблем деламинације је решаван применом линеарно еластичне Механике лома (енг. LEFM – Linear Elastic Fracture Mechanics) и методе виртуалног затварања прслине, што се показало као робусно решење за овај тип проблема. Нарочит допринос дисертације представља и одговарајуће разматрање контактних услова у статичкој и динамичкој анализи. За решавање условних једначина проблема, кандидат је користио модерне нумеричке методе и објектно-оријентисано програмирање. Кандидат је адекватно комбиновао сложене теоријске и нумеричке up-to-date методе како би остварио циљеве дисертације.

### 3.4. Применљивост остварених резултата

Нумерички модел применом МКЕ који је од стране кандидата развијен за статичку и динамичку анализу деламинације у ламинатним композитним плочама и љускама, веома је значајан за практичну примену. Потенцијалне примене у инжењерству могу бити код керамичких материјала ојачаних влакнима и сендвич плоча, где постојање деламинације између језгра и спољних површи плоче може довести до прогресивног лома конструкције при динамичком оптерећењу. Разматрање динамичког оптерећења је од великог значаја за анализу трајности композитних носача у грађевинарству и машинству, где оптерећење од ветра или друга динамичка оптерећења могу значајно умањити носивост конструкције.

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

Кандидат је стекао изузетну самосталност у научном раду кроз припрему и израду докторске дисертације, полагањем испита на факултету, активним учешћем на SEEFORM семинарима, студијским боравцима на престижним европским универзитетима, а посебно објављивањем четири рада у часописима са SCI листе и великог броја радова у домаћим часописима и на међународним конференцијама. Библиографија кандидата сматра се одличном и далеко превазилази просечан ниво студената докторских студија на осталим универзитетима истог ранга. Кандидат је такође показао способност за критичку анализу научне литературе, развој и предлагање оригиналних решења која доводе до бољих резултата у односу на оне које карактеришу до сада публикована решења. Све заједно недвосмислено потврђује научну зрелост и изузетан истраживачки потенцијал кандидата.

## **4. ОСТВАРЕНИ НАУЧНИ ДОПРИНОС**

### 4.1. Приказ остварених научних доприноса

Основни научни доприноси у дисертацији су:

1. Развој побољшаних изопараметарских слојевитих коначних елемената плоче (са 4 или 9 чворова) базираних на дисконтинуалном пољу померања, у геометријски нелинеарној статичкој и динамичкој анализи,
2. Развој изопараметарског троугаоног слојевитог коначног елемента љуске са деламинацијом и матрица трансформације за симулацију просторне конструкције љуске помоћу дводимензионалних коначних елемената,
3. Предлог нове методе праћења пропагације фронта деламинације од чвора до чвора неструктуриране мреже четвороугаоних коначних елемената (енг. *node-to-node propagation*)
4. Предлог контактнoг алгоритма без узимања у обзир трења (енг. *frictionless node-to-node contact*) за елиминацију међусобног преклапања суседних слојева у зони деламинације,
5. Спрезање претходно наведених алгоритама у нумерички модел слојевитог коначног елемента, ради симулације тродимензионалног проблема помоћу дводимензионалних коначних елемената,
6. Развој програма за нумеричку линеарну и геометријски нелинеарну, статичку и динамичку анализу композитних слојевитих (ламинатних) плоча и љуски применом Опште теорије ламинатних плоча са или без деламинације у МКЕ,
7. Развој графичког окружења за генерисање модела и визуелизацију резултата прорачуна који су предмет дисертације.

### 4.2. Критичка анализа резултата истраживања

Кандидат је развио нумерички модел за статичку и динамичку анализу ламинатних композитних плоча и љуски применом слојевитих коначних елемената, који не само да разматра деламинацију, већ има могућност праћења произвољне деламинације применом произвољне мреже коначних елемената.



Како модел такође узима у обзир и контакт при затварању прслине, овај рад представља унапређење у поређење са постојећим моделима из литературе. Резултати приказани у оквиру дисертације веома су добро прихваћени у међународној научној заједници, јер је 4 рада који садрже резултате дисертације већ објављено у врхунским међународним часописима са SCI листе. Применљивост у инжењерској пракси је такође велика, јер модел омогућава анализирање композитних плоча и љуски са произвољним распоредом анизотропних слојева, услед дејства сложених статичких и динамичких оптерећења. Главни допринос дисертације представља анализа утицаја деламинације на динамички одговор ламинатних композитних плоча. Треба нагласити да је развијени нумерички модел веома робустан, што је кључни фактор за практичну примену.

Резултати приказани у дисертацији представљају одличну полазну основу за будуће истраживање, где би се могло разматрати нелинеарно понашање материјала као и појава првог оштећења у конструкцији (*initiation of delamination*). Предмет будућег истраживања могли би да буду и термо-механичко, као и механичко-електрично спрезање (пиезоелектрични ефекат).

#### 4.3. Верификација научних доприноса

У току истраживачког рада у ужој области теме докторске дисертације, кандидат Мирослав Марјановић објавио је следеће радове:

##### Категорија M21:

1. Kolarevic N, **Marjanović M**, Nefovska-Danilovic M, Petronijevic M (2016): Free vibration analysis of plate assemblies using the dynamis stiffness method based on the higher order shear deformation theory. Journal of Sound and Vibration, Vol. 364, pp.110-132. (IF=1.813, ISSN 0022-460X)
2. **Marjanović M**, Vuksanović Dj (2016): Free vibrations of laminated composite shells using the rotation-free plate elements based on Reddy's layerwise discontinuous displacement model. Composite Structures, in press. doi: 10.1016/j.compstruct.2015.07.125 (IF=3.318, ISSN 0263-8223)
3. **Marjanović M**, Vuksanović Dj, Meschke G (2015): Geometrically nonlinear transient analysis of delaminated composite and sandwich plates using a layerwise displacement model with contact conditions. Composite Structures, Vol. 122, pp.67-81. (IF=3.318, ISSN 0263-8223)
4. **Marjanović M**, Vuksanović Dj (2014): Layerwise solution of free vibrations and buckling of laminated composite and sandwich plates with embedded delaminations. Composite Structures, Vol. 108, pp.9-20. (IF=2.231, ISSN 0263-8223)

##### Категорија M24:

1. Vuksanović Dj, **Marjanović M** (2015): Application of layered finite elements in the numerical analysis of laminated composite and sandwich structures with delaminations. Building Materials and Structures, Vol. 58, pp.59-76. (ISSN 0543-0798)

##### Категорија M33:

1. Vuksanović Dj, **Marjanović M**, Kovačević D: Finite element modeling of free vibration problem of delaminated composite plates using Abaqus CAE. 6th International Conference Civil Engineering – Science and Practice, Žabljak, 2016, Montenegro
2. **Marjanović M**, Vuksanović Dj: Transient analysis of laminated composite and sandwich plates with embedded delaminations using GLPT. 9th International Conference on Structural Dynamics EURODDYN 2014. Porto, Portugal, pp. 3373-3380

3. Vuksanović Dj, Marjanović M: Free vibrations of delaminated composite and sandwich plates. 5th International Conference Civil Engineering – Science and Practice, Žabljak, 2014, Montenegro, pp. 363-370
4. Marjanović M, Vuksanović Dj: Linear Analysis of Single Delamination in Laminated Composite Plate using Layerwise Plate Theory. 4th International Congress of Serbian Society of Mechanics. Vrnjačka Banja, 2013, Serbia, pp.443-448
5. Marjanović M, Vuksanović Dj: Linear Transient Analysis of Laminated Composite Plates using GLPT. First international conference for PhD students in Civil Engineering, Cluj-Napoca, 2012, Romania, pp.169-176
6. Marjanović M, Vuksanović Dj: Transient Response of Cross-Ply Laminated Composite Plates. International Symposium for Students of Doctoral Studies in the fields of Civil Engineering, Architecture and Environmental Protection, Niš, 2012, Serbia, pp.345-352

Категорија M52:

1. **Marjanović M**, Vuksanović Dj (2014): Geometrically nonlinear transient analysis of delaminated composite plates. Зборник радова Грађевинског факултета Суботица, Vol. 25 (Конференција "Савремена достигнућа у грађевинарству"), pp. 465-471

Међународни часописи који немају IF

1. **Marjanović M**, Vuksanović Dj (2013): Linear Transient Analysis of Laminated Composite Plates using GLPT. Acta Technica Napocensis: Civil Engineering & Architecture, Vol. 56, No. 2, pp.58-71

## 5. ЗАКЉУЧАК И ПРЕДЛОГ

На основу претходне анализе приложене докторске дисертације, испуњености задатака и циљева истраживања, примењене методологије, научног доприноса и добијених резултата, може се констатовати да докторска дисертација под насловом **Нелинеарна анализа ламинатних композитних плоча и љуски са деламинацијама применом методе коначних елемената** представља оригинални научни допринос и потврду да је кандидат Мирослав Марјановић способан за самостални научно-истраживачки рад. Изузетан квалитет рада потврђен је чињеницом да су резултати дисертације изузетно добро прихваћени у међународној научној јавности. Са четири рада у врхунским међународним часописима са SCI листе, као и са девет радова у међународним и домаћим часописима и зборницима међународних научних скупова, научни допринос Мирослава Марјановића може се сматрати изузетним.

На основу напред изнетог, Комисија предлаже Наставно-научном већу Грађевинског факултета Универзитета у Београду да се прихвати докторска дисертација Мирослава Марјановића, мастер.инж.грађ., под насловом **Нелинеарна анализа ламинатних композитних плоча и љуски са деламинацијама применом методе коначних елемената** и да се одобри њена јавна одбрана.

ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ

Prof. Dr.techn. Günther Meschke,  
Ruhr Universität Bochum, Institute for Structural Mechanics

Проф. др Бранислав Пујевић,  
Универзитет у Београду, Грађевински факултет

Проф. др Мира Петронијевић,  
Универзитет у Београду, Грађевински факултет

Проф. др Ђорђе Лађиновић,  
Универзитет у Новом Саду, Факултет техничких наука

Доц. др Марија Нефовска-Даниловић,  
Универзитет у Београду, Грађевински факултет