

НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ

Предмет: Реферат о урађеној докторској дисертацији кандидата Предрага Несторовића, дипл. инж. арх.

Одлуком бр.01-636/2-5.25 од 13. јуна 2016. године, именовани смо за чланове Комисије за преглед, оцену и одбрану докторске дисертације кандидата Предрага Несторовића, дипл. инж. арх. под насловом

3D ОПТИЧКА ДЕФОРМАЦИЈСКО-НАПОНСКА АНАЛИЗА МОДЕЛСКИХ NURBS СТРУКТУРА КОНСТРУИСАНИХ БРЗОМ ИЗРАДОМ ПРОТОТИПА

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

Кандидат је на Универзитету у Београду-Архитектонском факултету уписао Докторске академске студије научног карактера (области истраживања *Архитектура и урбанизам* ужа научна област истраживања *Конструктивни системи*) школске 2009/2010 године.

Пријаву теме докторске дисертације кандидат предаје у новембру 2012. године.

На основу члана 32 (С2) Закона о високом образовању („Сл. гласник РС“, бр. 76/05, 100/2007, аутентично тумачење 97/2008. и 44/2010.), а у складу са чланом 98. Статута Архитектонског факултета („Сл. Билтен Факултета“, бр. 80/08, 84/10) и предлогом Већа последипломских студија Архитектонског факултета Универзитета у Београду, донета је одлука бр. 01-2000/1-5.11 од 26. новембра 2012. године, којом је образована Комисија за оцену испуњености услова кандидата и предложене теме докторске дисертације под насловом „3D оптичка деформацијско-напонска анализа моделских NURBS структура конструисаних Rapid Prototyping-ом“ кандидата Предрага Несторовића, дипл. инж. арх. у саставу:

Др Миодраг Несторовић, редовни професор Архитектонског факултета у Београду, ментор,

Др Ташко Манести, редовни професор Машинског факултета у Београду и

Др Глигор Раденковић, ванредни професор Грађевинског факултета у Београду.

На основу члана 16. став 2. и 3. Правилника о већима научних области на Универзитету у Београду („Гласник Универзитета у Београду“ број 134/07) и захтева Архитектонског факултета, број: 03-299/1-2. од 01.03. 2013. године, Веће научних области грађевинско-

урбанистичких наука, на седници одржаној 09.04.2013. године, донело је следећи закључак: Одлаже се разматрање докторске дисертације кандидата Предрага Несторовића, под називом :“ 3D оптичка деформацијско-напонска анализа моделских NURBS структура конструисаних Rapid Prototyping-ом“. Сугерише се факултету да у примереном року предложи новог ментора.

На основу члана 27. Пословника Сената Универзитета у Београду („Гласник Универзитета у Београду“, број 134/07 и 157/10) а поводом приговора Архитектонског факултета број: 02-881/1 од 10.07.2013. године, на одлуку Већа научних области грађевинско-урбанистичких наука, број: 61206-3190/2-13 од 25.06. 2013. године, Сенат Универзитета на седници одржаној 11.09.2013. године, донео је закључак да се одложи доношење одлуке о приговору Архитектонског факултета број 02-881/1 од 10.07.2013. године на одлуку Већа научних области грађевинско-урбанистичких наука, број 61206-3190/2-13 од 25.06.2013. године којом се не даје сагласност на предлог теме докторске дисертације Предрага Несторовића, под називом:“3D оптичка деформацијско-напонска анализа моделских NURBS структура конструисаних Rapid Prototyping-ом“. Налаже се Већу научних области грађевинско-урбанистичких наука да у примереном року размотри приговор Архитектонског факултета број: 02-881/1 од 10.07.2013. године на одлуку Већа научних области грађевинско-урбанистичких наука, број: 61206-3190/2-13 од 25.06.2013. године и да своје мишљење о приговору достави Сенату Универзитета. Након прибављања мишљења, Сенат ће донети одлуку о приговору.

На основу члана 18. Правилника о већима научних области на Универзитету у Београду (“Гласник Универзитета у Београду“, број 134/07, 150/09, 164/11 и 165/11), а поводом приговора Архитектонског факултета, број: 02-881/1 од 10.5.2013 године на одлуку Већа научних области грађевинско урбанистичких наука, број: 61206-3190/2-13 од 25.6.2013 године, Сенат Универзитета, на седници одржаној 10.12.2014. године, донео је следећу одлуку. Утврђује се да је Архитектонски факултет отклонио битан недостатак због кога је Веће научних области грађевинско-урбанистичких наука донело негативну одлуку, јер је предложио новог ментора, па се поништава одлука Већа научних области грађевинско-урбанистичких наука, број: 61206-3190/2-13 од 25.6.2013. године. **ДАЈЕ СЕ САГЛАСНОСТ** на предлог теме докторске дисертације Предрага Несторовића, под називом: „3D оптичка деформацијско-напонска анализа моделских NURBS структура конструисаних Rapid Prototyping-ом“.

На основу члана 30. Закона о високом образовању („Сл. Гласник РС“, бр. 76/05, 100/07 – аутентично тумачење, 97/08, 44/10, 93/12, 89/13 и 99/14), а у вези са чланом 100. Статута Архитектонског факултета у Београду („Сл. билтен АФ“, бр. 80/08, 84/10, 89/12 – пречишћен текст и 98/14), чланом 31. Правилника о докторским студијама Архитектонског факултета у Београду („Сл. билтен АФ, бр. 102/14) и сагласности Сената Универзитета у Београду од 10. 12. 2014. године, Наставно-научно веће Факултета је, на седници одржаној 22.12.2015. године, донело одлуку о промени наслова теме докторске дисертације под насловом :“3D оптичка деформацијско-напонска анализа моделских NURBS структура конструисаних Rapid Prototyping-ом“, тако да гласи:„3D оптичка деформацијско-напонска анализа моделских NURBS структура конструисаних брзом израдом прототипа“, а 26. јануара 2015. године, веће Факултета је донело одлуку, да се Предрагу Несторовићу, дипл. инж. арх., одобрава рад на теми докторске дисертације, под насловом:„3D оптичка деформацијско-напонска анализа моделских NURBS структура конструисаних брзом израдом прототипа“. За ментора се именује академик Ђорђе Злоковић, редовни члан САНУ.

На основу члана 92. став 4. Статута Универзитета у Београду („Сл. Гласник УБ“, бр. 162/11, 167/12, 172/13 и 178/14), члана 38. Статута Архитектонског факултета у Београду („Сл. Билтен АФ“, бр. 80/08, 84/10, 88/12, 89/12- пречишћен текст и 98/14), и Одлуке Већа докторских студија Факултета од 16. јануара 2015. године, Наставно-научно веће Факултета је, на седници одржаној дана 23. марта 2015. године, донело Одлуку бр. 01-397/2-6.11, којом

се одобрава Предрагу Несторовићу, дипл. инж. арх., студенту докторских академских студија, продужење рока за завршетак започетих студија, односно одбрану докторске дисертације, за годину дана, односно до 30. септембра 2016. године.

Докторску дисертацију кандидат, уз сагласност ментора, предаје Већу докторских студија у јуну 2016. године.

На основу члана 101. и члана 102. Статута Архитектонског факултета у Београду ("Сл. билтен АФ", бр. 89/12-пречишћен текст и 98/14), члана 37. Правилника о докторским академским студијама ("Сл. билтен АФ", бр. 102/14) и Одлуке Већа докторских студија Факултета од 06. јуна 2016. године, Наставно-научно веће Факултета је на седници одржаној дана 13. јуна 2016. године, донело Одлуку број 01-636/2-5.25 да се образује Комисија за оцену и одбрану докторске дисертације кандидата Предрага Несторовића, дипл. инж. арх., под насловом: „3D оптичка деформацијско-напонска анализа моделских NURBS структура конструисаних брзом израдом прототипа“. у саставу:

- др Ташко Манески, редовни професор Машинског факултета у Београду, председник Комисије,
- Академик Ђорђе Злоковић, редовни члан САНУ-а, ментор,
- др Глигор Раденковић, ванредни професор Грађевинског факултета у Београду, члан Комисије.

1.2. Научна област дисертације

Дисертација припада научној области *Архитектура и урбанизам* и ужој научној области *Конструктивни системи*.

Ментор Академик Ђорђе Злоковић, је у научно-истраживачком раду оријентисан на области конструктивних система, просторних структура, геометријског моделовања и нумеричке анализе применом МКЕ и GSP чему иду у прилог бројни радови објављени у научним часописима и публикацијама, монографијама и сл.

1.3. Биографски подаци о кандидату

Предраг Несторовић, дипл. инж. арх. рођена је 1980. године у Београду, где је завршио Основну школу "Франце Прешерн" и „III београдску гимназију“, природно-математички смер. Звање дипломирани инжењер архитектуре стекао је 2006. године на Архитектонском факултету Универзитета у Београду, са просечном оценом 7.77 и оценом 10 на дипломском раду. Школске 2009/10. године је на Архитектонском факултету у Београду уписао Докторске академске студије. У периоду од 2009-2012. године положио је све испите предвиђене наставним планом са просечном оценом 9.53 и оценом 10 на тематском истраживању. 2015. године му је одобрен рад на докторској дисертацији, под насловом „3D оптичка деформацијско-напонска анализа моделских NURBS структура конструисаних брзом израдом прототипа“. Стручни испит је положио новембра 2008. године. Кандидат поседује знање енглеског и руског језика.

Досадашњи професионални рад кандидата карактерише разноврсно искуство у различитим сегментима струке. Може се рећи да се у највећој мери бавио пословима архитектонског и урбанистичког пројектовања, посебно од 2006-2009. г. док је радио у фирми за инжењеринг, пројектовање и извођење радова "Fering Group" д.о.о., и "Default" д.о.о. у периоду од 2009-2012. г. а од 2010-2013.г. ангажован је на Архитектонском факултету у Београду на реализацији Модула - Апликативна перманентна едукација у дигиталним технологијама.

Као део тима у периоду од 2006-2012. г. учествовао је у изради 2 конкурсних решења, 6 идејних и 3 главна архитектонска пројекта, а има и 3 реализована објекта. Поред рада у пракси кандидат је учествовао као студент докторских студија у настави на Архитектонском факултету на следећим предметима: Конструктивни системи ш.г. 2010/2011 и 2011/2012; и Студио пројекат М5.1. Метаморфоза простора - објекти великог распона, којим руководи проф. др Миодрага Несторовића - ш.г. 2011/2012. Тренутно је запослен у фирми Energy Net d.o.o. у Београду.

Фокус истраживачког рада кандидата су области конструктивних система и просторних структура. Публиковао је 9 научних радова у часописима и зборницима међународних конференција.

Учествовао је у организацији серије догађаја и изложби *У корак с временом - 50 година предмета Конструктивни системи и Просторне структуре*, Музеј Примењене Уметности у Београду (2013).

Члан је ИКС, са лиценцама бр.300 1091 09 за одговорног пројектанта из новембра 2009 год. и бр. 400 F 0 98 10 за одговорног извођача радова, из септембра 2010 год.

2. ОПИС ДИСЕРТАЦИЈЕ

2.1. Садржај дисертације

Докторска дисертација кандидата Предрага Несторовића, дипл. инж. арх. под насловом „3D оптичка деформацијско-напонска анализа моделских NURBS структура конструисаних брзом израдом прототипа“ написана је на укупно 290 страна. Првих 11 страна Дисертације чине: *Насловна страна* на српском и енглеском језику, страна са информацијама о *Ментору и члановима комисије*, *Изјава захвалности*, стране са *Подацима о докторској дисертацији* на српском и енглеском језику које садрже наслов дисертације, резиме, кључне речи, научну област, ужу научну област, УДК број и *Садржај*. *Текст рада по поглављима са напоменама* дат је на 290 страна. Основни текст укључује 90 напомена, 83 слике и 2 табеле. Испред текста рада следе *Преглед коришћених ознака и акронима*, *Преглед табела* и *Преглед илустрација* који је дат на 7 страна и *Преглед коришћених Референци* на крају рада који садржи 100 библиографских јединица (на 9 страна) и 9 публикација аутора (на 2 стране). Прегледом референци обухваћени су само радови чији су делови у докторском раду експлицитно неведени, као и они на које се аутор позива. Затим следе *Прилози 1 и 2*, *Биографија аутора*, *Изјава о ауторству*, *Изјава о истоветности штампане и електронске верзије* и *Изјава о коришћењу*.

Садржај дисертације је следећи:

САДРЖАЈ:

I Списак коришћених ознака и акронима

II Списак табела

III Списак илустрација

1.0 Уводни део - општа разматрања

1.1 Проблеми и предмет истраживања

1.2 Циљ истраживања

1.3 Задаци истраживања

1.4 Хипотезе

1.5 Методе истраживања

1.6 Структура рада

2.0 Примена дигиталних технологија у процесу пројектовања NURBS структура

2.1 Примена дигиталних технологија у процесу генерисања форме

2.2 Дигиталне технологије производње физичких модела комплексних форми

2.2.1 Производња

2.2.1.1 Субтрактивна производња

2.2.1.2 Адитивна производња

2.2.1.3 Формативна производња

2.3 Технологија брзе израде прототипа- *Rapid Prototyping* (RP)

2.3.1 Приказ уређаја типа 1 - *MakerBot® Replicator™ 2*

2.3.2 Функција/Улога *RP* у процесу пројектовања

2.4 Примена у архитектури

3.0 Експериментални приступ пројектовању система љуски и греда

3.1 Материјал прототипа (PLA)

3.2 Поставка 3D оптичке методе мерења деформацијско-напонског стања

3.2.1 Систем за оптичко 3D мерење померања и деформација

3.2.2 Дефинисање мерне запремине

3.2.3 Припрема мерне површине

3.2.4 Калибрација система

3.2.5 Дефинисање величине "малих површина"

3.2.6 Прорачун деформација малих површина

3.2.7 Дефинисање почетне тачке

3.2.8 Прорачун деформације

3.2.8.1 Методе линеарне деформације

3.2.8.2 Параметарска метода за оптичко мерење деформација

3.2.9 Резултати система за оптичко мерење деформација

3.3 Дефинисање оптерећења и његовог прираштаја

3.4 Оптичко мерење тродимензионалних деформација за изабране моделе и њиховог оптерећења

3.5 Анализа резултата мерења

- 3.5.1 Графички приказ изведених експеримената
- 3.5.2 Опис понашања модела на основу експеримента
- 3.5.3 Дефинисање просторне крутости модела на основу експеримента

4.0 Нумерички приступ пројектовању система љуски и греда произвољног облика

4.1 Аналитика геометрије

- 4.1.1 Криве и површи произвољног облика
- 4.1.2 B-Spline линија
- 4.1.3 B-Spline површ
- 4.1.4 Инсертовање чворова
- 4.1.5 Елевација B-Spline кривих
- 4.1.6 Неуниформни рационални B-Spline
- 4.1.7 Инсертовање чворова и елевација NURBS-a
- 4.1.8 Рационални Spline површи

4.2 Основи Кирховљеве теорије танких еластичних љуски у *Spline* параметарским координатама

- 4.2.1 Геометрија љуске
- 4.2.2 Метрика средње површи љуске
 - 4.2.2.1 Кристофелови коефицијенти повезаности друге врсте
- 4.2.3 Метрика еквиливантне површи љуске
- 4.2.4 Тензор деформације средње површи љуске
- 4.2.5 Тензор деформације еквиливантне површи љуске – тензор промене кривина

4.3 Формулација изогеометријског коначног елемента љуске

- 4.3.1 Напонско - деформацијске релације
- 4.3.2 Пресечне силе
- 4.3.3 Принцип виртуалних померања – Матрица крутости изогеометријског коначног елемента Кирховљеве љуске
- 4.3.4 Оператори трансформације деформација
- 4.3.5 Еквиливантне контролне силе

4.4 Нумерички примери са изогеометријским Кирховљевим елементом љуске

4.4.1 Бирационални Кирховљеви елементи љуске

4.5 Основи Бернули-Ојлерове гредне теорије у *Spline* параметарској координати

4.5.1 Геометрија осе штапа у NURBS параметарској координати

4.5.2 Метрика осе штапа

4.5.2.1 Вектор кривине осе штапа

4.5.3 Метрика произвољне тачке попречног пресека штапа

4.5.4 Деформација осе штапа

4.5.5 Деформација у произвољној тачки попречног пресека – промена кривине осе штапа

4.5.6 Деформација промене кривина

4.5.7 Торзиона промена кривине

4.6 Формулација изогеометријског Бернулиј-Ојлеровог гредног коначног елемента

4.6.1 Напонско деформацијске релације

4.6.1.1 Пресечне силе

4.6.2 Принцип виртуалних померања

4.6.3 Матрица крутости изогеометријског гредног елемента

4.6.4 Вектор еквивалентних контролних сила

4.7 Нумерички пример са изогеометријским Бернули - Ојлерувим гредним коначним елементом

4.8 Прорачун љуски и греда NURBS површи класичном методом коначних елемената

4.8.1 Двоструко симетрична купола типа љуске

4.8.2 Двоструко симетрична купола типа гредног роштиља

4.8.3 Двоструко закривљена слободна форма куполе типа гредног роштиља и љуске

4.8.4 Двоструко закривљена једноосно симетрична купола типа гредног роштиља

4.9 Анализа резултата пројектовања

5.0 Закључна разматрања и правци даљег истраживања

6.0 Литература

7.0 Прилози (Прилог 1. и Прилог 2.)

2.2. Кратак приказ појединачних поглавља

Рад се састоји из седам поглавља.

Прво поглавље је уводно. Овим поглављем су приказани предмет, циљеви, задаци, хипотезе и методологија истраживања.

Другим поглављем даје се преглед примене дигиталних технологија у процесу пројектовања NURBS структура. Овим поглављем је дат преглед информација и радова о поступцима генерисања комплексних форми. Такође, дат је и преглед информација и радова о дигиталним технологијама производње физичких модела са посебним освртом на технологије брзе израде прототипова (*Rapid prototyping - RP*) и њихове примене у архитектури.

Трећим поглављем је приказан експериментални приступ пројектовању система љуски и греда произвољног облика. Овим поглављем је дат приказ експерименталног утврђивања карактеристика материјала прототипа - PLA. Затим, приказ експерименталног поступка испитивања (одређивање деформације и напона) физичких модела NURBS структура система љуски и греда применом методе 3D оптичког бесконтактног мерења и резултата.

Четврто поглавље приказује нумерички приступ пројектовању система љуски и града произвољног облика. Овим поглављем је дата нумеричка верификација експерименталних резултата применом изогеометријске анализе и класичне методе коначних елемената. У оквиру овог дела рада приказане су основне поставке Бернули-Ојлерове гредне теорије и Кирховљеве теорије танких еластичних љуски у *Spline* параметарској координати. Затим, Формулација изогеометријског Бернулиј-Ојлеровог гредног коначног елемента и изогеометријског Кирховљевог коначних елемената љуске. Нумерички примери са изогеометријским Бернули-Ојлерувим гредним коначним елементом и Кирховљевим елементом љуске. Прорачун љуски и греда NURBS површи класичном методом коначних елемената. И на крају анализа резултата.

Пето поглавље подразумева закључна разматрања. Ово поглавље обухвата анализу и вредновање резултата истраживања и постављање смерница за наставак истраживања.

Шесто и седмо поглавље подразумевају преглед литературе и прилоге.

3. ОЦЕНА ДИСЕРТАЦИЈЕ

3.1. Савременост и оригиналност

Предмет истраживања су актуелне теме развоја и примене савремених дигиталних технологија и научних метода у области пројектовања конструктивних система. Предности оваквог приступа и доступност напредних технологије отварају могућност реализације неконвенционалних слободних форми. Дисертацијом је предложен и тестиран приступ пројектовању NURBS структура заснован на савременом концепту пројектовања оријентисаног на перформансе и примени технологија брзе израде прототипова, 3D оптичко деформацијско-напонске анализе и нумеричке анализе. Моделовање перформанси засновано је на класичном изопараметарском концепту као и актуелном изогеометријском концепту који је у правцу интеграције пројектовања и анализе.

3.2. Осврт на референтну и коришћену литературу

У оквиру дисертације коришћена је обимна литература (библиографске јединице и *online* извори). Може се констатовати да је дисертација заснована на широком мултидисципли-

нарном оквиру референтне литературе, што је у складу са карактером истраживања. Литература се тематски може разврстати на следеће групе:

- дигиталне технологије у пројектовању структура,
- моделовање система.

Извори који се баве темом примене дигиталних технологија у пројектовању обухватају публикације које обрађују кључне концепте, методе, технике, алате и уређаје, њихов развој, примену и допринос значајних аутора овом дискурсу, са фокусом на типологијама слободне форме (NURBS структуре).

Изворе који се баве темом моделовања могуће је поделити на групе извора који обрађују геометријско моделовање и моделовање механичких перформанси конструктивних система. Прва група претежно обухвата кључне публикације на тему NURBS параметраских кривих и површи, док је фокус у оквиру друге групе извора на публикацијама из домена класичне изопараметарске анализе и новијег концепта изогеометријске анализе.

3.3. Опис и адекватност примењених научних метода

За проверу хипотеза и спровођење истраживања, у функцији остваривања прецизности, континуитета, конзистентности и везе свих сегмената истраживања, коришћене су следеће методе и у оквиру њих адекватне технике и технологије:

- симулација и моделовање и
- студија случаја.

Симулација као научна методологија омогућава да се на основу реплицирања реалности стичу сазнања о аспектима који представљају предмет истраживања. Предност ове методе искориштена је у оквиру рада у функцији емпиријске провере понашања реалних инжењерских конструкција, у погледу деформација и напона, њеном заменом адекватним физичким моделима. Понашање физичких модела израђених технологијом брзе израде прототипова (*rapid prototyping*), у одговарајућој размери и од одговарајућег материјала, ослободених и оптерећених дијагностификовано је применом технике 3D оптичког мерења. У контексту истраживања физички модели конструисани техником брзе израде прототипова представљају функционалне моделе на којима се спроводе анализе. За израду модела коришћена је техника 3D штампе. Радом се тестирају потенцијали и предности ове технике у смислу брзине конструкције модела, прецизности и економичности. За поступак 3D оптичко безконтактног мерења коришћена је опрема GOM и софтверска апликација ARAMIS (која је у власништву Машинског факултета у Београду). Нумеричка анализа модела извршена је применом класичне методе коначних елемената коришћењем софтверског пакета KOMPS, аутора проф. др Ташка Манеског, као и применом изогеометријске анализе коришћењем кода написаног у WolframMatemetica 10.

Студија случаја искоришћена је како би се адекватним примерима, урађеним за потребе овог истраживања, потврдила ефикасност предложеног приступа и извршила генерализација у смислу његове могуће примене у процесу пројектовања NURBS структура. Процес који ће се користити је итеративан и подразумева следеће фазе: (1) фаза конципирања идеје; (2) фаза продукције тродимензионалног компјутерског модела коришћењем одабраног CAD система, уз вођење рачуна о методологији моделовања; (3) фаза конверзије података тродимензионалног компјутерског модела - пребацивање тродимензионалног CAD модела у STL формат (скраћеница од STeroLitography) из ког се врши производња модела; (4) фаза производње физичког модела изабраном *rapid prototyping* технологијом (3DP); (5) фаза деформацијско-напонске анализе модела поступком 3D оптичког мерења - снимање деформација стерео камерама и обрада добијених резултата софтверском апликацијом ARAMIS; (6) фаза нумеричке верификације резултата применом класичне МКЕ и IGA; (7) фаза закључивања -

на основу добијених резултата усвајање предложеног решења и могућност даље разраде или повратак на фазу концепције због потреба модификација предложене геометрије.

3.4. Применљивост остварених резултата

Резултати истраживања имају три могућности непосредне примене:

- основа за даља истраживања,
- примена у процесу пројектовања,
- примена у едукацији.

Истраживањем је створен теоријски и практични оквир и основа за будућа истраживања о предметној или сродним темама. С обзиром на актуелност теме и закључке очекује се наставак истраживања, чије су смернице предложене дисертацијом. Искуства истраживања и могући правци даљих истраживања могу се применити у припреми нових научно-истраживачких пројеката.

Примена резултата у процесу пројектовања посебно је акцентована истраживањем. Истраживање је прилог примени дигиталних метода и алата у архитектонској пракси, чија заступљеност још увек није довољна и адекватна. Иако је истраживање фокусирано на област архитектонског инжењерства, искуства и предложени приступ могу наћи примену у различитим областима инжењерског пројектовања.

Примена резултата могућа је у високошколској настави архитектуре и урбанизма.

3.5. Оцена достигнутих способности кандидата за самостални научни рад

Својим досадашњим ангажовањем кандидат Предраг Несторовић, дипл. инж. арх. је показао да поседује способност за самосталан научно-истраживачки рад, минуциозност и савесност у прикупљању грађе, претраживању литературе и повезивању са претходно стеченим знањима из области истраживања, систематичност у обради релевантних података, информација и резултата, као и способност логичког и систематичног размишљања, закључивања и аргументовања. Докторска дисертација показује да кандидат влада употребом различитих научних метода, као и вештином њихове интеграције у циљу обезбеђења богатства информација, повећања јачине аргумената, уверљивости и валидности добијених резултата. Учешће на научним и стручним скуповима; већи број објављених радова у часописима и зборницима научних и стручних скупова, који представљају резултате досадашњих истраживања у предметној научној области, представљају доказ способности кандидата за успешно бављење самосталним научно-истраживачким радом.

4. ОСТВАРЕНИ НАУЧНИ ДОПРИНОС

4.1. Приказ остварених научних доприноса

Радом је предложен и тестиран унапређен приступ који омогућава пројектовање NURBS структура. Предложени приступ подразумева употребу дигиталних технологија и унапређује процес пројектовања кроз три аспекта:

- употребу технологије брзе израде прототипа,
- укључивање методе 3D оптичког мерења и
- нумеричку верификацију резултата употребом класичне МКЕ и изогеометријске анализе засноване на NURBS базама.

Употреба технологија брзе израде прототипа све је актуелнија тема у области архитектуре. Могућност визуализације комплексних форми као и несумљиве предности ових технологија у односу на традиционалне технике израде модела мотивише све већи број архитеката да користе штампане прототипове за комуникацију својих идеја. У оквиру овог рада дат је сажет преглед тренутно доступних технологија и тестиране су њихове предности. Тежиште рада било је на употреби метода 3D штампе у процесу конструисања функционалних модела. Ово истраживање представља континуитет експеримента са физичким моделима присутним у области инжењерства, посебно с почетка 20. века, тј. периода развоја лаких просторних структура. Овим радом се тема израде физичких модела реактуелизује у светлу могућности нових технологија које обезбеђују комфорнији рад, једноставнију производњу варијантних форми и израду прецизнијих модела.

Укључивање метода 3D оптичког мерења обезбедило је прецизно и поуздано снимање деформације NURBS структура узроковано дејством аплицираних утицаја. Ова технологија омогућила је спровођење процеса дијагностике у дигиталном окружењу.

Нумеричка верификација резултата реализована је применом класичне методе коначних елемената и изогеометријске анализе. У циљу реализације овог дела истраживања коришћени су изогеометријски елементи Бернули-Ојлерове греде као и Кирховљеве љуске. За разлику од класичног изопараметарског концепта, изогеометријски приступ, с обзиром на егзактан начин описивања гаметрије, омогућава формулацију Бернулијевих гредних и Кирховљевих елемената љуски произвољног облика и континуитета без увођења ротација као генералисаних координата.

У циљу провере и извођења закључака о могућности шире примене предложеног приступа у процесима пројектовања неконвенционалних форми спроведени су тестови на одабраним NURBS структурама. Резултати добијени изогеометријским елементима упоређени су са резултатима заснованим на класичним изопараметарским елементима греде и љуске, и показали су веома добро слагање. Нумеричке анализе спроведене како коришћењем изогеометријских тако и класичних коначних елемената сагласне су са експериментално добијеним резултатима чиме је потврђена заснованост и оправданост предложеног приступа. У том смислу радом је приказано да употреба нових технологија и алата, који иницијално нису развијени за област архитектуре отвара нове могућности у погледу провере (тестирања) предложених неконвенционалних решења у визуелном/обликовном, функционалном и структуралном погледу.

4.2. Критичка анализа резултата истраживања

Приступ пројектовању неконвенционалних NURBS структура предложена дисертацијом представља методу за тестирање слободних форми засновану на физичком моделовању и нумеричкој верификацији резултата, која користи предности савремених дигиталних технологија за моделовање, конструисање, снимање и анализу. Ова метода такође, користи и проширује предности израде физичких модела у дискурсу архитектонског конструкторства. Оригиналност предложеног и тестираног приступа огледа се у њеном унапређењу у светлу развоја нових концепата и технологија. У том смислу посебан квалитет овог истраживања представља коришћење техника 3D штампе за израду функционалних модела у области архитектуре, дијагностика понашања структура применом уређаја за оптичко 3D мерење, као и верификација резултата класичном методом коначних елемената и изогеометријском анализом, новијим поступком. За разлику од уобичајено коришћене класичне анализе методом коначних елемената, у којој се врши интерполација геометрије, изогеометријски концепт подразумева анализу на основу егзактно дефинисане почетне геометрије описане, у случају овог рада, NURBS технологијом. У овом нумеричком поступку геометрија и кинематика се описују истим функцијама, чиме је омогућено пројектовање, анализа и

подешавање модела употребом јединственог типа података. Резултати процеса симулација на конкретним примерима доказују ефикасност предложеног приступа и потврђује да унапређење пројектантских метода и креативних алата омогућава иновације у процесу пројектовања.

4.3. Верификација научних доприноса

Следећи радови кандидата, сврстани по категоријама М по Правилнику Министарства просвете, науке и технолошког развоја Републике Србије, резултат су истраживања у оквиру докторске дисертације:

Категорија М23:

1. Nestorović, B.; Grbac, I.; **Nestorović, P.**, Milošević, J.: "Application of reduced stiffness of complex laminate in finite elements for chair analysis", - *Drvna industrija (Wood industry)*, Šumarski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Vol. 66 (4), 2015. pp.339-346 (**IF= 0.52**) (DOI:10.5552/drind.2016.1445.) (UDK:630*8+674) (ISSN 0012-6772).

Категорија М24:

1. Miodrag Nestorović, Jelena Milošević, **Predrag Nestorović**, Miloš Maneski "Instrumentalization of origami in construction of folded plate structures – design, research and education". SPATIUM, Institute of Architecture and Urban & Spatial Planning of Serbia. Јуни 2016, Issue 35, pp. 22-29.

Категорија М33:

1. **Nestorović, P.**; Milošević, J.: "An Implementation of Isogeometric Analysis Concept in Free-form Architectural Roof Design," -*Applied Geometry and Graphics Issue No 88. The Interdepartmental Collection of Proceedings of SED-11*, Ukraine Association for Applied Geometry, Kyiv, Ukraine, 2011., pp. 229-233. (ISSN 0131-579X).
За излагање рада добијено је признање *SED-11 Award For The Report of The Youngest Participant*.
2. Nestorovic, M.; **Nestorovic, P.**; Milosevic, J.: "Instrumental Role of Geometry in Design Process of Folded Architectural Structures - Research and Education," -*Applied Geometry and Graphics Issue No 90. The Interdepartmental Collection of Proceedings of SED-12*, Ukraine Association for Applied Geometry, Kyiv, Ukraine, 2012., pp. 397-402.(ISSN 0131-579X).
3. Nestorović, M.; **Nestorović, P.**; Milošević, J.: "Rapid Prototyping: Constructing Physical Models of Architectural Geometry," - *Applied Geometry and Graphics Issue No 91. The Interdepartmental Collection of Proceedings of SED-13* Kyiv: Ukraine Association for Applied Geometry. Kyiv, Ukraine, 2013., pp. 187-192. (ISSN 0131-579X) (UDK 514.18).
4. Nestorovic, Biserka; Grbac, Ivica; **Nestorovic, Predrag.**, "Experimental Determination of Elastic Constants of Veneer Composite". *23th International Scientific Conference – Wood is Good – With Knowledge and Technology to a Competitive Forestry and Wood Technology Sector*. Zagreb, 12th October 2012. Ambienta, Proceedings, pp. 127-138. ISBN: 978-953-292-026-0,
5. Biserka Nestorovic¹, **Predrag Nestorovic²**, Jelena Milosevic², "Sitting Furniture of Wood Laminates: Material and Design Synthesis". *ALICE. (Architecture, Landscape, Interior, Culture, Emotion) Book of Abstracts of 2nd International Scientific Conference on the Importance of Design*. Academy of Design Associated Member of University of Primorska. Ljubljana, Slovenia. November, 13, 2012. pp.12. ISBN: 978-961-92619-5-8,
6. Nestorovic, Biserka; Grbac, Ivica; **Nestorovic, Predrag.** "Numerical Analysis of Laminated Wood Structures - Chairs by Application of FEA". *24th International Scientific Conference –*

Wood is Good – User Oriented Material, Technology and Design. Zagreb, 18th October 2013. Ambienta, Proceedings, pp.101-109. ISSN: 978-953-292-031-4,

7. **Несторовић, П.** (2013). Пројекат истраживања: "3D оптичка деформацијско-напонска анализа моделских NURBS структура конструисаних Rapid Prototyping-ом". У *корак са временом - 50 година предмета Конструктивни системи и Просторне структуре 1963-2013*. Каталог серије догађаја одржаних у Музеју примењене уметности у Београду, 10-14. Децембар 2013., у редакцији Ђ. Злоковића и М. Несторовића. Универзитет у Београду Архитектонски факултет. pp. 39-40. ISBN 978-86-7924-115-3.

5. ЗАКЉУЧАК И ПРЕДЛОГ

На основу анализе и оцене докторске дисертације кандидата Предрага Несторовића, дипл. инж. арх. Комисија закључује да је дисертација у целини урађена према прописаним критеријумима обима и квалитета научног рада и у складу са одобреном темом и пријавом на коју је Универзитет у Београду дао своју сагласност. Дисертација остварује низ научно аргументованих и утемељених резултата као основ њеног доприноса научној области *Архитектура и урбанизам*, односно ужој научној области *Конструктивни системи*, за коју је матичан Архитектонски факултет у Београду. Кандидат Предраг Несторовић, дипл. инж. арх. је показао способност за самостални научно-истраживачки рад што потврђују истраживања приказана докторском дисертацијом, учешћа у раду домаћих и међународних конференција и објављени научни радови у часописима и зборницима међународних конференција.

На основу претходног образложења и оцене докторске дисертације, Комисија предлаже Наставно-научном већу Архитектонског факултета Универзитета у Београду да се докторска дисертација под називом „3D оптичка деформацијско-напонска анализа моделских NURBS структура конструисаних брзом израдом прототипа“ кандидата Предрага Несторовића, дипл. инж. арх. прихвати, изложи на увид јавности и упути на коначно усвајање Већу научних области грађевинско-урбанистичких наука Универзитета у Београду.

У Београду, јули 2016. године

ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ

.....
Др Ташко Манески, редовни професор
Универзитет у Београду, Машински факултет

.....
Академик Ђорђе Злоковић,
Редовни члан, Српска академија наука и уметности

.....
Др Глигор Раденковић, ванредни професор
Универзитет у Београду, Грађевински факултет