

НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ

Предмет: Реферат о урађеној докторској дисертацији кандидата **Ненада Видановића**,
дипл. инж. маш., студента докторских студија.

Одлуком 884/2 бр. од 14.05.2015. године, именовани смо за чланове Комисије за преглед,
оцену и одбрану докторске дисертације кандидата Ненада Видановића, дипл. инж. маш. под
насловом

**АЕРОДИНАМИЧКО-СТРУКТУРАЛНА ОПТИМИЗАЦИЈА УЗГОНСКИХ
ПОВРШИНА ЛЕТЕЛИЦА**

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 Ненад Видановић, дипл. инж. маш. прву годину докторских студија уписао је школске 2007./2008. године на Машинском факултету Универзитета у Београду. У циљу реализације програма усавршавања кандидат је положио све испите предвиђене планом и програмом докторских студија са просечном оценом 10 (десет). Због здравствених проблема са којима се у међувремену суочио, кандидату је у два наврата одобрен статус мировања у трајању од по годину дана, и то за школску 2010/11 и 2014/15 годину. Такође, статус студента докторских студија је продужен за један семестар у складу са одлуком Сената.

Кандидат Ненад Видановић, дипл. инж. маш. пријавио је израду докторске дисертације 02. септембра. 2013. године, бр. 1588/1, Катедри за ваздухопловство Машинског факултета Универзитета у Београду и за ментора предложио редовног професора др Бошка Рашуо.

На основу пријаве кандидата и предлога Катедре, одлуком Наставно-научног већа Машинског факултета Универзитета у Београду од 19. септембра. 2013. године, бр. 1588/3, именована је Комисија за оцену подобности теме и кандидата за израду докторске дисертације и научне заснованости теме у саставу: ментор, др Бошко Рашуо редовни професор Машинског факултета Универзитета у Београду, др Александар Бенгин, ванредни професор Машинског факултета Универзитета у Београду, др Мирко Динуловић, ванредни

професор Машинског факултета Универзитета у Београду, др Александар Грбовић, доцент Машинског факултета Универзитета у Београду и др Гордана Кастратовић, ванредни професор Саобраћајног факултета Универзитета у Београду.

Комисија је 30. септембра. 2013. године, бр. 1588/4, известила Наставно-научно веће Машинског факултета Универзитета у Београду да кандидат испуњава све услове предвиђене законом и Статутом Машинског факултета Универзитета у Београду за израду докторске дисертације и да предложена тема радног назива „Аеродинамичко-структурална оптимизација узгонских површина летелица“ може бити предмет докторске дисертације.

На захтев Ненада Видановића, дипл. инж. маш. и извештаја Комисије у саставу: Проф. др Бошко Рашуо, ментор, Проф. др Александар Бенгин, Проф. др Мирко Динуловић, Доцент др Александар Грбовић и Проф. др Гордана Кастратовић, бр. 1588/4 од 30. септембра. 2013. године, а на основу чл. 128. Закона о високом образовању, Наставно-научно веће Машинског факултета у Београду на седници од 03. октобра 2013. године, донело је одлуку бр. 1588/5 да се прихвата предлог о испуњености услова и о научној заснованости теме докторске дисертације „Аеродинамичко-структурална оптимизација узгонских површина летелица“ кандидата Ненада Видановића, дипл. инж. маш. и да се за ментора именује проф. др Бошко Рашуо. Одлука је достављена Већу Научних области техничких наука Универзитета у Београду на сагласност.

Веће научних области техничких наука Универзитета у Београду је дало сагласност на предлог теме докторске дисертације „Аеродинамичко-структурална оптимизација узгонских површина летелица“ кандидата Ненада Видановића, дипл. инж. маш., под менторством редовног професора др Бошка Рашуо, 14. октобра 2013. године, одлука бр. 61206-4662/2-13.

На основу одлуке Наставно-научног већа Машинског факултета о испуњености услова кандидата за израду докторске дисертације и именовању ментора и сагласности Већа научних области техничких наука Универзитета у Београду, декан Машинског факултета у Београду је 15. октобра 2013. год. донео закључак бр. 2107/1 да се одобри рад на теми докторске дисертације „Аеродинамичко-структурална оптимизација узгонских површина летелица“ кандидату Ненаду Видановићу, дипл. инж. маш.

О завршетку докторске дисертације ментор проф. др Бошко Рашуо обавестио је Катедру за ваздухопловство и Наставно-научно веће Машинског факултета у Београду, дописом број 884/1 од 11. маја 2015. године. Предложена је Комисија за оцену и одбрану докторске дисертације у саставу: ментор Проф. др Бошко Рашуо, Проф. др Александар Бенгин, Проф. др Мирко Динуловић, Доцент др Александар Грбовић и Проф. др Гордана Кастратовић Саобраћајни факултет Универзитета у Београду. На седници Наставно-научног већа 14. маја 2015. године је једногласно усвојено обавештење о завршетку дисертације кандидата Ненада Видановића, дипл. инж. маш. и предлог састава Комисије за оцену и одбрану докторске дисертације (бр. 884/2 од 14. маја 2015).

1.2. Научна област дисертације

Докторска дисертација припада области Техничких наука, научна област Машинство. За ментора је одређен др Бошко Рашуо, редовни професор на катедри за Ваздухопловство Машинског факултета у Београду.

1.3. Биографски подаци о кандидату

Ненад Видановић је рођен 30.07.1979. у Београду. У Београду је завршио основну, као и средњу техничку школу „Петар Драпшин“ са звањем Машински техничар за компјутерско конструисање. Матурски практичан рад је одбранио на изборном предмету Моделирање машинских елемената и конструкција, а који је имао за тему конструисање ручне дизалице са

паром конусних зупчаника. Сви цртежи обухваћени матурким радом су израђени у AutoCAD LT-у.

По завршетку средње школе, 1998. године уписао је Машински факултет у Београду, тј. основне студије на истом, а дипломирао 2006. године на Катедри за ваздухопловство са просечном оценом 8.59, док је дипломски рад одбранио са оценом 10. Већ кроз израду дипломског рада био је ангажован на моделирању и прорачуну елемената структуре летелица методом коначних елемената, а са темом „Прелиминарна структурална анализа авионског крила”. Структура крила је остварена у CATIA V5 пакету, док је сам прорачун коначним елементима спроведен и у CATIA V5 и у MSC. Nastran пакету. Током студија је био активни члан Удружења студената ваздухопловства EUROAVIA Београд.

Последипломске студије уписао је 2007. године на Катедри за ваздухопловство на Машинском факултету у Београду, а запосливши се у Иновационом центру Машинског факултета д. о. о., засновао је радни однос као сарадник на пројектима (одн. студент докторских студија). У радни однос је ступио 01.10.2007. године, док је Уговор о раду споразумно отказан 14.03.2008. из разлога промене радног ангажовања. Дана 16.03.2008. је ангажован као сарадник у настави на Саобраћајном факултету у Београду, а за ужу научну област Механика и Механика флуида на Катедри за општетехничке науке и са пуним радним временом. Тачније, ангажован је на предметима Механика 1 (Кинематика и динамика), Механика 2 (Статика и отпорност) и Механика флуида, са максималним оптерећењем у настави. До 2010. је још једном ангажован као сарадник у настави, а у априлу 2010. је изабран у звање асистента. У априлу 2013. је реизабран на место асистента на раније поменути предметима и областима, а при истој, Катедри за општетехничке науке. Као асистент на предмету Механика 1, вежбе држи целој првој години (око 360 бруцоша) којима је поменути предмет обавезан у другом семестру. На предмету Механика 2, који је обавезан предмет на три модула и изборни на једном, у трећем семестру вежбе држи групи од око 100 студената друге године. На предмету Механика флуида, који је обавезан за студенте два модула у четвртном семестру, вежбе држи групи од 50 студената друге године. Педагошки рад кандидата и квалитет наставе коју демонстрира су на високом нивоу, што оправдава вишегодишња просечна оцена 4.40 добијена од стране анкетираних студената на свим предметима које кандидат предаје. Кандидат је коаутор штампане литературе за студенте основних студија на Саобраћајном факултету за предмете Механика 1 и Механика 2, док је литература за предмет Механика флуида у припреми. Литература је штампана латиничним писмом и тако ће бити реферисана:

1. *МЕХАНИКА I, Kinematika i Dinamika*: Dragoslav Kuzmanović, Gordana Kastratović, **Nenad Vidanović**, (Saobraćajni Fakultet), 2011,
2. *Zbirka zadataka iz MEHANIKE I*: Dragoslav Kuzmanović, Gordana Kastratović, **Nenad Vidanović**, (Saobraćajni Fakultet), 2012,
3. *МЕХАНИКА II, Statika i Otpornost*: Dragoslav Kuzmanović, Gordana Kastratović, **Nenad Vidanović**, (Saobraćajni Fakultet), 2012.

Кандидат је био учесник на научном пројекту, бр. EE18033-TP под именом „Оптимизација рада фарми ветрогенератора - контрола граничног слоја и турбуленције у вртложном трагу, активна контрола облика и струјања”, а у периоду од 2008. до 2010. године.

Кандидат је експерименталну и лабораторијску наставу похађао на Машинском факултету, као учесник при експерименталној анализи замора рамењаче и као сарадник Војнотехничког института на пројектима експерименталне и нумеричке анализе при аеродинамичкој лабораторији и лабораторији за експерименталну чврстоћу.

Кандидат је утрошио више хиљада сати на овладавање и усавршавање нумеричким методама и алатима. За параметарско моделирање система, креирање прорачунских мрежа коначних запренина и коначних елемената, аеродинамичке и структуралне симулације и њихово нумеричко спрезање, као и за оптимизационе поставке, коришћени су различити модули комерцијалног мултимодуларног кода ANSYS. Спроведене су симулације над различитим 2д и 3д системима из области биомеханике, транспортних система, обновљивих извора енергије и ваздухопловства. Посебна пажња је посвећена нумеричкој аеродинамичко-структуралној анализи и оптимизацији (*CFD/CSD/FSI/MDO*), а што је кандидату представљало основну смерницу и циљ научно-истраживачког рада.

Кандидат Ненад Видановић је, из горе наведених области, аутор више радова објављених на међународним конференцијама и међународним часописима.

2. ОПИС ДИСЕРТАЦИЈЕ

2.1. Садржај дисертације

Докторска дисертација „Аеродинамичко-структурална оптимизација узгонских површина летелица”, кандидата Ненада Д. Видановића дипл. инж. маш. изложена је на 210 страна без референци и прилога.

Дисертација садржи следеће главе:

1. Увод,
2. Преглед литературе, мотивација, циљеви тезе,
3. Еволуциона мултикритеријумска оптимизација,
4. Аеродинамичко-структурална анализа,
5. Верификација, валидација и оптимизација нумеричких прорачуна,
6. Формулација аеродинамичко-структуралне оптимизације крила,
7. Закључак и препоруке,
8. Прилози

Дисертација садржи списак од 135 коришћених референци и цитиране литературе.

2.2. Кратак приказ појединачних поглавља

У уводној глави јасно је истакнуто да је предмет истраживања тезе изразито мултидисциплинарног карактера. Уводом је изложена основа проблематике мултидисциплинарног моделирања, савременост и све већа потребе за његовим проучавањем и применом у науци и привреди. Објашњен је и механизам којим ће се моделирати феномен од интереса, а над којим ће се спровести оптимизациони поступак дефинисан мултикритеријумским захтевима. Уводним делом је презентован комплетан приступ проблему, као и алати, методи, технике, механизми и аналогije на којима се ово истраживање базира.

Другом главом је, на самом почетку, кроз презентоване активности, описан поступак моделирања алгоритама за мултидисциплинарну оптимизацију над феноменом аероеластичности. У наставку, изложеним прегледом литературе обухваћени су радови из области аеродинамичке оптимизације, радови којима су публиковане технике спрезања аеродинамичких и структуралних прорачуна, радови којима је обрађен проблем мултидисциплинарне оптимизације, као и радови којима је обрађен проблем мултидисциплинарне оптимизације базиране на апроксимативним методима, и коначно, радови којима је обрађен проблем мултидисциплинарне оптимизације пројектила, а која, из разлога сложености, представља веома оскудно публиковану материју, поготово са аспекта аеродинамичко-структуралних анализа нумеричким методима. Радови су презентовани као

угледни и мотивacioni, којима су изложени различити приступи, те презентовани различити алати, методи, технике и механизми за решавање обрађених аеродинамичких и мултидисциплинарних проблема из ваздухопловства. Друга глава је закључена критичким мишљењем наспрам цитиране литературе, освртом на предности и мане, и са јасно наглашеним циљевима и доприносима који ће бити остварени овом дисертацијом, а којима ће се остварити научни допринос у аеродинамичко-структуралној анализи узгонских површина и носеће структуре, њиховој оптимизацији, те и унапређивање инжењерске праксе и верификација предложених смерница и оквира у развојним и производним процесима савремених летелица.

Трећом главом су обрађени теоријски аспекти еволуционе мултикритеријумске оптимизације. Истакнуте су потребе и предности вишециљне оптимизације и глобалне претраге генетским алгоритмима. Детаљно су обрађени термини и појмови оптималности, Парето оптималности, концепт доминације и сортирања, допуштима и недопуштима решења, ограничења примењена на улазне и излазне параметре, простор претраге решења и критеријумски простор претраге. Посебна пажња посвећена је генетском алгоритму NSGA-II, базираним на реалном кодирању (континуални параметри). Описан је поступак процене квалитета функцијом прилагођености, а описани су и генетски оператори селекције, укрштања зарад репродукције, као и мутације. Такође, обрађени су и појмови потомака и репродуктивног фонда. Након што су извршени преглед и дефинисање појединих општих и основних појмова, као и опис самог тока оптимизације генетским алгоритмом, изложен је поступак еволуције NSGA-II алгоритма, од почетног NSGA, преко строго елитистичког NSGA-II, до садашњег, NSGA-II алгоритма са контролисаним елитизмом, а који је коришћен у овој дисертацији и чије су предности верификоване истом. Касније је обрађен појам вишециљних оптимизационих алгоритама над којима се примењују ограничења, што је током овог истраживања било од виталног значаја и интензивно је примењивано, као и процес одлучивања којим су рангирана решења. У наставку треће главе пажња је посвећена апроксимативном моделирању одзива и нумеричким експериментима на којима се заснивају, односно посебним поглављем су обрђене одзивне површи и концепти којима се могу калибрисати, а посебна пажња је посвећена стандардном полиномском мета-моделу другог реда и композитном факторијел попуњавању простора хипер-коцке. Обзиром да се истраживање базира на мета-моделирању, на крају ове главе је изложен преглед коефицијената којима се утврђује квалитет фитованог регресионог модела.

Четвртом главом је остварен теоријски осврт на алате, методе, технике и механизме којима је извршено моделирање нумеричке аеродинамичко-структуралне анализе. Наиме, кроз поглавља обухваћена главом четири остварен је преглед, као и детаљан опис солвера за аеродинамичке и структуралне прорачуне, нумеричке методе на којима су засновани (методи коначних запремина и коначних елемената), опис модула и, у оквиру њега, техника којима је остварена интеракција и комуникација (мапирање и пренос података) између прорачунских домена, као и механизам којим је остварена промена облика флуидног домена, односно успостављање померања/деформације прорачунске мреже флуидног домена. Поглављем којим је обрађена аеродинамичка анализа изложен је теоријски осврт на метод коначних запремина, а на ком се базирају аеродинамички прорачуни. Описана је FRANS (*Favre-Reynolds-Averaged Navier-Stokes*) декомпозицију основних једначина струјног тока, моделирање турбулентног струјања у близини чврсте границе, као и детаљан опис двоједначинског SST $k-\omega$ турбулентног модела, а којим је овом тезом извршено моделирање турбуленције у оквиру аеродинамичких симулација. У наставку је извршен детаљан преглед и опис коришћених доступних солвера (један базиран на притиску, други базиран на густини), потом је обрађен метод вишеструких мрежа, као и хибридни метод коришћен за иницијализацију симулација. Поглављем којим је обрађена структурална анализа изложен је теоријски осврт на метод коначних елемената, а на ком се базирају структурални прорачуни. Овим поглављем су изложене конститутивне једначине линеарно еластичног изотропног тела, затим основни концепт, базиран на варијационој формулацији, односно на принципу

минимума потенцијалне енергије еластичног тела, а на основу ког је формулисана статичка анализа коначним елементима. Такође, овим поглављем је представљен директан солвер (*sparse direct solver*) којим су спроведени структурални прорачуни, а изложена је и кратка теорија о тродимензионалном елементу тетраедра SOLID187, а којим је извршена дискретизација структуралног домена. Наредним поглављем је извршен преглед техника спрезања аеродинамичких и структуралних прорачуна, а извршена је и презентација модула којим је спрезање два прорачунска домена остварено. Кроз презентацију овог модула извршен је преглед основних поставки, а описана је и контрола и синхронизација прорачуна. Прецизније, описана је комуникација између солвера, њихова синхронизација, ток анализе и контрола конвергенције. Мапирање и пренос података је изложено описом PP (*profile preserving*) алгоритма и CPP (*conservative profile preserving*) алгоритма, односно *Bucket Surface* алгоритма и *General Grid Interface* алгоритма, редоследно. У наставку овог поглавља изложена је теорија о механизму динамичких мрежа, којим је остварена промена облика флуидног домена.

Петом главом су спроведени поступци верификације, валидације и оптимизације нумеричких прорачуна, како у оквиру појединачних модула, тако и предложеног аеродинамичко-структуралног окружења за нумеричко предвиђање феномена статичке аероеластичности. Под верификацијом се подразумевало утврђивање доброту нумеричког предвиђања аеродинамичких поставки на релацији два солвера, испитивање осетљивости резултата наспрам различитих резолуција прорачунских мрежа флуидног и структуралног домена, испитивање конвергенције, као и утврђивање доброту нумеричког предвиђања спрегнутих, аеродинамичко-структуралних прорачуна наспрам *benchmark* модела. Под валидацијом се подразумевало утврђивање доброту нумеричког предвиђања SST $k-\omega$ турбулентног модела наспрам доступних експерименталних и аналитичких резултата, као и доброту нумеричког предвиђања понашања структуре наспрам експерименталних резултата. Прво поглавље у оквиру ове главе се бави детаљним описом проблема у одређеним фазама развоја балистичког пројектила, а који би се предложеном нумеричком оптимизационом поставком (алгоритмом) успешно превазишли, те и генерално сам развој једног оваквог система, односно летелице, битно унапредио. Након дефинисања карактеристичних оквира од интереса, а у којима ће се извршити нумеричко моделирање феномена статичке аероеластичности над пројектилом реалних димензија, наредним поглављима је спроведена исцрпна верификација, валидација и оптимизација нумеричких прорачуна. Описане су и инсталације за експерименталну аеродинамику и чврстоћу, а у оквиру којих су извршени експерименти у односу на чије резултате су спроведени поступци валидације нумеричких модела. Спроведеним поступцима верификације, валидације и оптимизације нумеричких прорачуна, успостављено је окружење високе поузданости, а којим се са високом тачношћу може моделирати феномен статичке аероеластичности.

Након успостављања окружења високе поузданости у шестом поглављу је извршена формулација аеродинамичко-структуралне оптимизације крила пројектила, дефинисање домена и оптимизационих поставки, подешавања оптимизационих поставки и процена квалитета предвиђања мета-модела, као и представљање резултата аеродинамичке и аеродинамичко-структуралне оптимизације. На основу компарације релевантних *multipoint* резултата, извршена је процена најбоље оптимизационе поставке, а којом се остварило најквалитетније аеродинамичко-структурално унапређивање балистичког пројектила и са испоштованим строгим критеријумима ограничења са аспекта безбедности летелице. Такође, изнето је критичко мишљење наспрам сваке од поставки и са конкретним предлозима за могуће унапређивање појединих поставки.

У завршном, седмом поглављу дисертације сумирани су доприноси, а изведени су и детаљни закључци са критичком анализом наспрам остварених резултата. Истакнут је низ научних и практичних доприноса, који се односе на појединачне и спрегнуте нумеричке анализе, као и саму мултидисциплинарну оптимизацију базирану на мета-моделирању. Такође, изложен је низ могућих смерница за даља истраживања из области дисертације, како

за примену у области вазухопловства, тако и за примену у неким другим научним областима из поља машинства, као и техничких наука уопште.

3. ОЦЕНА ДИСЕРТАЦИЈЕ

3.1. Савременост и оригиналност

Докторска дисертација под називом „Аеродинамичко-структурална оптимизација узгонских површина летелица“ даје савремен и оригиналан приступ истраживању интеракције на релацији флуид-структура, као и мултидисциплинарне анализе уопште, а што се првенствено огледа кроз предложено оптимизационо окружење. Научни допринос ове дисертације представља значајан искорак и пре свега се огледа у развоју монолитичког мултидисциплинарног/оптимизационог окружења, које је у путности аутоматизовано и базирано на само једном мултимодуларном коду, у оквиру ког је демонстрирано спрезање модула за геометријско, нумеричко, статистичко и оптимизационо моделирање система, а у циљу подизања нивоа целокупног процеса пројектовања. Креирани алгоритам је допринео унапређивању нумеричке ефикасности и тачности при моделирању феномена статичке аероеластичности. Област у којој је остварен научни допринос је веома актуелна, а посебан квалитет истраживању даје и могућност примене постигнутих резултата на шире подручје машинства, као и техничких наука уопште, посебно оних области које су изразито дефинисане мултидисциплинарним поставкама и критеријумима.

3.2. Осврт на референтну и коришћену литературу

У докторској дисертацији је коришћена обимна литература из области нумеричке мултидисциплинарне оптимизације над разним феноменима аероеластичности. Највећи број библиографских јединица представљају радови из врхунских међународних часописа, мањим делом монографија и зборника радова. Литература је кандидату послужила као полазна основа за формирање увида у досадашње приступе у теорији и пракси, а који се односе на нумеричке мултидисциплинарне и мултикритеријумске оптимизационе поступке базиране углавном на еволуционим оптимизационим, затим нумеричког моделирања спреге аеродинамичких и структуралних анализа на различитим нивоима и различитим техникама, као и нумеричке аспекте моделирања појединачних аеродинамичких и структуралних прорачуна методима коначних запремина и елмената, редоследно. Укупан закључак је да је дат релевантан приказ тренутног стања у области којој припадају проблеми разматрани у овој докторској дисертацији. Коришћена научна литература је послужила као почетна основа за конципирање смерница и формулација, а што је показано у деловима тезе у којима су изложени оригинални доприноси.

3.3. Опис и адекватност примењених научних метода

Истраживање представљено у дисертацији је у потпуности посвећено нумеричком моделирању интеракције на релацији флуид-структура, изведено у виду нумеричке мултидисциплинарне оптимизације, при чему је већина научних резултата реализована управо методом нумеричких симулација.

Интеракција прорачунских домена је базирана на методу блиског (*closely*) спрезања, а који представља компромис између неvezаног (*loosely*), које грубо симулира феномен аероеластичности, или интеракцију уопште, и потпуног (*fully*) спрезања, веома комплексног, које је изводљиво и са значајним апроксимацијама. Међутим, сва три нивоа спрезања представљају метод двосмерног спрезања (*2-way*), али са различитом сложености свеукупне реализације.

Саме нумеричке симулације су базиране на две методе - метод коначних запремина и метод коначних елемената. Ове нумеричке апроксимације су високо заступљени у аеродинамичким и структуралним прорачунима, а представљају нумерички ефикасне прорачуне, као и апроксимације које верно симулирају реално стање. Широка заступљеност ових метода обезбеђује ширу примену резултата дисертације и већи значај за практичне примене у ваздухопловству и другим областима.

Метод математичког моделирања турбулентних струјања засновано је на FRANS (*Favre-Reynolds-Averaged Navier-Stokes*) декомпозицији и концепту турбулентне вискозности, при чему је за затварање система једначина искоришћен двоједначински SST $k-\omega$ турбулентни модел.

Методом верификације су се спроводили поступци утврђивање доброту нумеричког предвиђања аеродинамичких поставки на релацији два солвера, испитивање осетљивости резултата наспрам различитих резолуција прорачунских мрежа флуидног и структуралног домена, испитивање конвергенције, утврђивање доброту нумеричког предвиђања спрегнутих, аеродинамичко-структуралних прорачуна наспрам *benchmark* модела, као и процена доброту предвиђања апроксимативног модела (мета-модела) методом нумеричких симулација.

Методом валидације су се спроводили поступци утврђивања доброту нумеричког предвиђања SST $k-\omega$ турбулентног модела наспрам доступних експерименталних (аеротунелских) и аналитичких резултата, као и доброту нумеричког предвиђања понашања структуре наспрам експерименталних резултата.

Поступак оптимизације је коришћен као метод трагања за најбољим обликом, који је са аспекта аеродинамичко-структуралне ефикасности понудио глобално најбоље решење, а са испоштованим строгим критеријумима ограничења, чиме је подигнут ниво безбедности летелице.

Поступак оптимизације је базиран на коришћењу еволутивног - генетског алгорита. Генетски алгоритам је метахеуристички метод оптимизације који симулира природну селекцију и еволуцију, односно процес базиран на Дарвиновој теорији еволуције. Метод дефинишу генетски оператори селекција, укрштање и мутација над генерисаном иницијалном популацијом. Коришћењем оптимизационог метода MOGA (*multi-objective genetic algorithm*) који је доступан и за континуалне и за дискретне проблеме, може се руководити са више циљева и представља глобални оптимизатор те је и подеснији за случајеве трагања за глобалним оптимумом, а што је у овом истраживању за поступак оптимизације од примарног значаја. MOGA представља хибридно варијанту NSGA-II (*fast non-dominated sorted genetic algorithm-II*) метода базираног на методу Парето рангирања (Парето оптималности) и контролисаном елитизму. Сам метод MOGA је доступан у оквиру GDO (*goal driven optimization*) модула који представља интегрисано окружење, односно скуп метода за дефинисање оптималног производа на основу сета узорака и флексибилних и нефлексибилних ограничења и циљева, тј. поступак којим је могуће анализирати и пратити понашање улазних параметара на основу одговарајућих критеријума и ограничења примењених на излазне параметре. Методи (математички, статистички и апроксимативни) који опслужују GDO, чине DOE (*design of experiments*), RS (*response surface*) и селектовани оптимизатор MOGA базиран на селегованом методу NSGA-II.

У оквиру оптимизационог поступка, за моделирање простора претраге, коришћен је апроксимативни метод одзивних површи (*response surface method* - RSM), а који се одликује ефикасним и прецизним предвиђањем нелинеарних одзива, или одзива уопште, а који је врло популаран у научним и практичним студијама. Дакле, оправдање за честу примену коришћеног полиномског регресионог модела лежи у чињеници да нуди једноставност, практичност, флексибилност и стабилност у свеукупној примени, експлицитну везу између улазних променљивих и одзива излазних величина, као и једноставност метода најмањег квадрата којим се израчунавају регресиони коефицијенти.

3.4. Применљивост остварених резултата

Кандидат Ненад Д. Видановић је радом на докторској дисертацији остварио значајне научно-истраживачке резултате са трајном научном вредношћу и практичном применљивошћу у области нумеричких симулација интеракције на ралацији флуид-структура, као и нумеричке мултидисциплинарне оптимизације са мултикритеријумским поставкама, са посебном применом на нумеричко моделирање феномена аероеластичности у области ваздухопловства.

Проблематика која је обухваћена овом дисертацијом је актуелна и значајна у следећим областима примене:

Ваздухопловство - симулирање или нумеричко моделирање стационарних и нестационарних феномена аероеластичности узгонских површина и носеће структуре летелица, симулирање или нумеричко моделирање стационарне и нестационарне аеродинамике летелица, симулирање или нумеричко моделирање статичких и динамичких одзива структуре летелица, аеродинамичка и мултидисциплинарна оптимизација узгонских површина и носеће структуре летелица, процена и унапређивање домета балистичких пројектила, или пројектила уопште;

Енергија ветра - симулирање или нумеричко моделирање стационарних и нестационарних феномена аероеластичности лопатица ветрогенератора, симулирање или нумеричко моделирање стационарне и нестационарне аеродинамике лопатица ветрогенератора или целог система, симулирање или нумеричко моделирање статичких и динамичких одзива структуре лопатица ветрогенератора или целог система, аеродинамичка и мултидисциплинарна оптимизација лопатица ветрогенератора, нумеричко моделирање и предвиђање структуралних одзива мерних стубова за карактеризацију ветра услед стационарног и нестационарног утицаја ветра, као и оптимизација компоненти поменутог система „челична ужад/решеткаста конструкција”;

Експериментална аеродинамика, експериментална чврстоћа, експериментална аероеластичност - верификација и валидација експерименталних и нумеричких поставки; као и све горе детаљно наведене студије, уз одређена прилагођавања, примењене у областима бродоградње (хидродинамика, интеракција флуид-структура), аутомобилске индустрије (аеродинамика), мостоградње (аероеластичност), високоградње (аеродинамика) и др.

Оригинални резултати остварених експерименталних и нумеричких истраживања примењени су за развој, валидацију и верификацију предложеног нумеричког алгорита.

Развијено нумеричко окружење за моделирање феномена статичке аероеластичности, верификовано у односу на реални аеротунелски *benchmark* модел AGARD 445.6 крила, примењено је за унапређивање аеродинамичко-структуралних карактеристика реалног балистичког пројектила, као и подизања нивоа сигурности поменуте летелице при критичним фазама експлоатације у фази пењања.

3.5. Оцена достигнутих способности кандидата за самостални научни рад

Кандидат је током израде дисертације показао изузетну способност организације и самосталног извођења научно-истраживачких пројеката, као и способност решавања сложених техничких мултидисциплинарних проблема применом савремених научно-истраживачких метода. Велико искуство и хиљаде посвећених сати кандидата за овладавање областима нумеричке аеродинамике, чврстоће и оптимизације, као и одлична теоријска знања из ових области, пружају основу за квалитетан самосталан научно-истраживачки рад.

4. ОСТВАРЕНИ НАУЧНИ ДОПРИНОС

4.1. Приказ остварених научних доприноса

Научни допринос ове дисертације се огледа у следећем:

- Активности спроведене израдом ове дисертације примарно су резултирале моделирањем монолитичког мултидисциплинарног/оптимизационог окружења, које је у потпуности аутоматизовано и базирано на само једном мултимодуларном софтверском пакету, у оквиру ког је демонстрирано спрезање модула за геометријско, нумеричко, статистичко и оптимизационо (метахеуристичко) моделирање система, а у циљу подизања нивоа целокупног процеса пројектовања, како за научно-истраживачку, тако и за практичну примену у привреди, односно инжењерску праксу уопште.
- Развијен је и предложен оригинални, поуздан, флексибилан и прецизан оптимизациони алгоритам, којим је постигнута оптимална структура балистичког пројектила, над којим је спроведена студија аероеластичности, док би сама структура са аспекта сигурности током *multipoint* критичних режима експлоатације била веома поуздана и унапређених аеродинамичко-структуралних карактеристика.
- Мултикритеријумска оптимизација крила, којом се тежило унапређивању глобалних аеродинамичких и структуралних карактеристика пројектила, спроведена је сукцесивно, кроз четири фазе оптимизације, чиме је спроведен поступак трагања за оптимизационом поставком којом су се постигле најбоље перформансе лета балистичког пројектила, а при испоштованим строгим критеријумима ограничења. Предложена поставка представља значајан допринос побољшању домета (финесе) балистичког пројектила за анализиране *multipoint* режиме експлоатације, чиме су критични структурални одзиви сведени на допуштене, а пројектилу обезбеђена висока поузданост експлоатације кроз критичне режиме у фази пењања.
- Предложеним поступком се допринело значајном смањењу броја експерименталних испитивања, као и аналитичких студија. Предложеним методом мета-моделирања простора претраге значајно се подигао број могућих оптималних геометрија које задовољавају и циљеве и ограничења, а са друге стране су се, као посебан допринос, трошкови развојног програма значајно умањили.
- Оствареним резултатима над балистичким пројектилом постигнути су реални услови за потенцијални развој једног таквог система, а сам развојни програм се битно унапредио, јер сама експериментална инсталација није опремљена уређајима за мониторинг аероеластичног понашања структуре, нити је у том смислу интегрисана, ни за такав вид испитивања предвиђена, те креирање нумеричког окружења које би омогућило овакав вид анализе представља значајан научни и практични допринос при спрегнутом моделирању понашања структуре изложене дејству флуида.
- Успешно је спроведен поступак рационализације хардверских/софтверских и временских ресурса, односно успостављена је свеукупна нумеричка

ефикасност са високим квалитетом предвиђања моделираних одзива, као и са веома прихватљивим временом предвиђања моделираних одзива.

- Утврђене су високе перформансе РВ (*pressure-based*) солвера са *coupled* шемом и SST *k- ω* турбулентног модела (за случај аутоматски активираниог третмана у близини зида) за вредност бездимензионе координате $y^+ \gg 1$, а за симулиране суперсоничне услове експлоатације при малим нападним угловима. РВ солвер је демонстрирао вишеструку супериорност у времену извршавања симулација у односу на DB (*density-based*) солвер, при чему су РВ солвером понуђене вредности аеродинамичких коефицијената са приближно истом или мањом грешком него што је то остварено DB солвером, а у односу на експерименталне вредности, осим за квантитативно предвиђање коефицијента отпора за случај подзвучног струјања, мада уз одлично квалитативно предвиђање тренда криве отпора за исту соничну област.
- Аеродинамичко-структурална анализа крила пројектила је показала да се за симулиране услове јавила минимална разлика у резултатима у односу на резолуцију мреже на глобалном нивоу (за цело струјно поље око модела пројектила), односно да је за само крило демонстрирана веома слаба осетљивост резултата у односу на глобалну промену резолуције прорачунске мреже флуидног домена, а што је смерница од изузетног значаја за будуће аеродинамичко-структуралне симулације над пројектилом, а са аспекта нумеричке ефикасности и тачности.
- Предложен је својеврсни хибридни приступ, којим се студије базиране на емпиријским, семи-емпиријским и аналитичким мултидисциплинарним анализама пројектила у ракетно-индустрији могу локално унапредити и верификовати предложеним нумеричким анализама.

4.2. Критичка анализа резултата истраживања

На основу прегледа релевантне научне литературе и сагледавања постојећих решења из области докторске дисертације, констатујемо да су резултати истраживања у тези значајни и да су примењиви у пракси. Истовремено, на основу увида у задате циљеве истраживања и резултате представљене у докторској дисертацији, можемо закључити да су пружени одговори на сва релевантна питања и решени проблеми са којима се кандидат сусрео у току истраживања.

Развијени нумерички оптимизациони алгоритам представља значајан напредак у третирању циљаних проблема аероеластичности, као и аеродинамике летелица, а у погледу умањења грешака нумеричког предвиђања, као и са становишта побољшане укупне нумеричке ефикасности.

Изложени резултати демонстрирају примењивост алгоритма у комплексним и реалним случајевима. Приступ има вредност и са теоријске и са практичне стране, где је могућа његова реална примена у ваздухопловним пројектима базираним на нумеричком моделирању феномена аероеластичности, а у ширем контексту у свим проблемима дефинисаним аеродинамичким и мултидисциплинарним поставкама, са основном идејом глобалног унапређивања система у оквиру дефинисаних строгах критеријума ограничења.

4.3. Верификација научних доприноса

Резултати и научни допринос докторске дисертације, као и зрелост кандидата за мултидисциплинарни научно-истраживачки рад, верификовани су следећим научним радовима:

- **Радови у врхунском међународном часопису (M21):**
 1. Kastratović Gordana, **Vidanović Nenad**, Bakić Vukman, Rašuo Boško: *On finite element analysis of sling wire rope subjected to axial loading*, Ocean Engineering, 88, pp. 480-487, 2014, Elsevier Ltd., (ISSN 0029-8018), IF = 1.731, (za godinu prihvatanja rada 2014.)
- **Радови у истакнутом међународном часопису (M22):**
 1. Gordana Kastratović, **Nenad Vidanović**: *3D finite element modeling of sling wire rope in lifting and transport processes*, Transport, 30(2), pp. 129-134, 2015, Taylor & Francis Group, (ISSN 1648-4142), IF = 1.081 (za godinu prihvatanja rada 2012.),
 2. **Vidanović Nenad D.**, Rašuo Boško P., Damljanović Dijana B., Vuković Đorđe S., Čurčić Dušan S.: *Validation of the CFD code used for determination of aerodynamic characteristics of nonstandard AGARD-B calibration model*, Thermal Science, 18(4), pp. 1223-1233, 2014, (ISSN 0354-9836), IF = 0.962 (za godinu prihvatanja rada 2013.),
- **Радови у међународним часописима (M24):**
 1. Svetlana A. Dabić, Momčilo D. Miljuš, Nebojša J. Bojović, **Nenad D. Vidanović**: *Decision Support for The Choice of Tire Manufacturer*, FME Transactions, 41(1), pp. 72-76, 2013, (ISSN 1451-2092), Beograd,
 2. Erdinč Rakipovski, Aleksandar Grbović, Gordana Kastratović, **Nenad Vidanović**: *Application of Extended Finite Element Method for Fatigue Life Predictions of Multiple Site Damage in Aircraft Structure*, Structural Integrity and Life, (ISSN 1451-3749), 15(1), pp. 3-6, 2015,
- **Радови у домаћим часописима (M51):**
 1. Gordana M. Kastratović, **Nenad D. Vidanović**: *Some aspects of 3D finite element modeling of independent wire rope core*, FME Transactions, 39(1), pp. 37-40, 2011, (ISSN 1451-2092), Beograd,
 2. Aleksandar M. Grbović, Boško P. Rašuo, **Nenad D. Vidanović**, Mirjana M. Perić: *Simulation of Crack Propagation in Titanium Mini Dental Implants (MDI)*, FME Transactions, 39(4), pp. 165-170, 2011, (ISSN 1451-2092), Beograd,
- **Радови у часописима националног значаја (M52):**
 1. Gordana Kastratović, **Nenad Vidanović**: *The analysis of frictionless contact effects in wire rope strand using the finite element method*, Transport&Logistics, 19, pp. 33-40, 2010, Beograd,
- **Радови прикаани на међународним скуповима (M33):**
 1. Grbović A., Tanasković M., **Vidanović N.**: *Comparative analzsis of stress distribution on the toothless alveolar ridge at the bottom of the complete denture prosthesis and overdenture retained with mini implants*, Proceedings of the 2nd International Congress of Serbian Society of Mechanics, Palić 2009., D-14, 1-14, On CD,

2. Mirkov N., **Vidanović N.**, Rašuo B.: *Numerical simulation of separated turbulent flow in asymmetric diffusers*, Proceedings of The 3rd International Congress of Serbian Society of Mechanics, Vlasina Lake 2011., pp. 312-320,
3. Grbović A., **Vidanović N.**, Čolić K., Jevremović D.: *The use of finite element method (FEM) for analyzing stress distribution in adhesive inlay bridges*, Proceedings of The 3rd International Congress of Serbian Society of Mechanics, Vlasina Lake 2011., pp. 481-489,
4. Grbović A., **Vidanović N.**, Kastratović G.: *The use of finite element method (FEM) for simulating crack growth in mini dental implants (MDI)*, Proceedings of The 3rd International Congress of Serbian Society of Mechanics, Vlasina Lake 2011., pp. 490-501,
5. **Vidanović N.**, Kastratović G., Grbović A.: *The analysis of contact effects in wire rope strand using the finite element method*, Proceedings of The 3rd International Congress of Serbian Society of Mechanics, Vlasina Lake 2011., pp. 836-845,
6. Kastratović G., Grbović A., **Vidanović N.**, Rašuo B.: *A finite element calculation of stress intensity factors in structures with multi-site damage (MSD)*, Proceedings of The First International Conference on Damage Mechanics, Belgrade 2012., pp. 161-164,
7. Kastratović G., **Vidanović N.**, Bakić V., Pezo M., Marković Z.: *Cross section optimization of a guyed mast under wind loading*, Proceedings of the International Conference Power Plants 2012, Zlatibor 2012., pp. 1039 - 1048,
8. Pezo M., Bakić V., Marković Z., Kastratović G., **Vidanović N.**: *Stability analysis of a guyed mast subjected to wind action by using finite element method*, Proceedings of the International Conference Power Plants 2012, Zlatibor 2012., pp. 1128 - 1137,
9. Grbović A., Kastratović G., **Vidanović N.**, Rašuo B.: *Review of modern numerical methods for stress intensity factor determination*, Proceedings of The 4th International Congress of Serbian Society of Mechanics, Vrnjačka Banja 2013., pp. 467 - 472,
10. Vukman Bakić, Milada Pezo, Gordana Kastratović, **Nenad Vidanović**: *Wind Load Modeling and Structural Response of Guyed Mast*, Proceedings of The 16th Symposium on Thermal Science and Engineering of Serbia, Sokobanja, Serbia, October 22–25, 2013,
11. Milada Pezo, Vukman Bakić, Gordana Kastratović, **Nenad Vidanović**: *Numerical Prediction of Drag Coefficient for Lattice Structures*, Proceedings of The 16th Symposium on Thermal Science and Engineering of Serbia, Sokobanja, Serbia, October 22–25, 2013,
12. Kastratović G., Grbović A., **Vidanović N.**: *Approximate determination of stress intensity factors for penny shaped cracks in three dimensional elastic solids*, Proceedings of The 5th International Congress of Serbian Society of Mechanics, Arandelovac 2015, USB.
13. E. Rakipovski, A. Grbović, G. Kastratović, **N. Vidanović**: *Application of Extended Finite Element Method for Fatigue Life Predictions of Multiple Site Damage in Aircraft*

5. ЗАКЉУЧАК И ПРЕДЛОГ

Докторска дисертација под називом „Аеродинамичко-структурална оптимизација узгонских површина летелица”, кандидата Ненада Видановића, дипл. инж. маш., садржи савремен и оригиналан научни допринос, који омогућава целовиту анализу разматраних проблема у вези са аеродинамичко-структуралном оптимизацијом узгонских површина летелица. На основу онога што је приказано у докторској дисертацији и чињенице да је анализирана проблематика изузетно актуелна, са задовољством се констатује да је кандидат Ненад Видановић, дипл. инж. маш., студент докторских студија успешно завршио докторску дисертацију у складу са предвиђеним предметом и постављеним циљевима. Кандидат је дошао до оригиналних научних резултата, који су и верификовани, што им обезбеђује широку примену у области опште прорачунске аеродинамике и структуралне анализе.

На основу прегледа докторске дисертације од стране Комисије за оцену и одбрану докторске тезе под називом „**АЕРОДИНАМИЧКО-СТРУКТУРАЛНА ОПТИМИЗАЦИЈА УЗГОНСКИХ ПОВРШИНА ЛЕТЕЛИЦА**”, кандидата Ненада Видановића, дипл. инж. маш., са задовољством се констатује да је урађена докторска дисертација написана према свим стандардима у научно-истраживачком раду, као и да испуњава све услове предвиђене Законом о високом образовању и Статутом Машинског факултета у Београду. Комисија предлаже Наставно-научном већу Машинског факултета у Београду да Извештај прихвати, дисертацију стави на увид јавности и упути извештај на коначно усвајање Већу научних области техничких наука Универзитета у Београду и да се након тога кандидат позове на јавну одбрану.

У Београду 10. 09. 2015. год.

ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ

.....
Проф. др Бошко Рашуо, Универзитет у Београду, Машински факултет

.....
Проф. др Александар Бенгин, Универзитет у Београду, Машински факултет

.....
Проф. др Мирко Динуловић, Универзитет у Београду, Машински факултет

.....
Доцент др Александар Грбовић, Универзитет у Београду, Машински факултет

.....
Проф. др Гордана Кастратовић, Универзитет у Београду, Саобраћајни факултет