

Факултет Машински

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ

Веће научних области техничких наука
(Назив стручног већа коме се захтев упућује, сагласно

члану 6. и чл. 7 став 1. овог правилника)

118/3

(Број захтева)

22.02.2016. године

(Датум)

ЗАХТЕВ**за давање сагласности на реферат о урађеној докторској дисертацији**

Молимо да, сходно члану 46. ст. 5 тач. 4. Статута Универзитета у Београду („Гласник Универзитета“, број 131/06), дате сагласност на реферат о урађеној докторској дисертацији кандидата:

БОЈАНА (ДАРКО) ШЕКУТКОВСКОГ

(име, име једног од родитеља и презиме)

КАНДИДАТ **БОЈАН (ДАРКО) ШЕКУТКОВСКИ****уписан на Докторске студије 2010 године.**

(име, име једног од родитеља и презиме)

Поднео је захтев за израду докторске дисертације:

**РАЗВОЈ НАПРЕДНЕ МЕТОДЕ ПРОРАЧУНА ИНТЕРАКЦИЈЕ ВАЗДУШНЕ СТРУЈЕ И СТРУКТУРЕ
ВАЗДУХОПЛОВА У ДОМЕНУ ТРАНСОНИЧНИХ БРЗИНА**

Универзитет је дана 20.10.2014. год. својим актом под бр. 61206-4337/2-14 дао сагласност на предлог теме докторске дисертације која је гласила:

**РАЗВОЈ НАПРЕДНЕ МЕТОДЕ ПРОРАЧУНА ИНТЕРАКЦИЈЕ ВАЗДУШНЕ СТРУЈЕ И СТРУКТУРЕ
ВАЗДУХОПЛОВА У ДОМЕНУ ТРАНСОНИЧНИХ БРЗИНА**Комисија за оцену и одбрану докторске дисертације кандидата: **БОЈАНА (ДАРКО) ШЕКУТКОВСКОГ**

(име, име једног од родитеља и презиме)

Образована је на седници одржаној 24.12.2015. године, одлуком факултета под бр. 2703/2, у саставу:

Име и презиме члана комисије	звање	научна област	установа у којој је запослен
1. <u>Др Иван Костић</u>	Ред.проф	Ваздухопловство	Машински факултет Београд
2. <u>Др Александар Симоновић</u>	Ванр.проф.	Ваздухопловство	Машински факултет Београд
3. <u>Др Зоран Стефановић</u>	Ред.проф. у пензији	Ваздухопловство	Машински факултет Београд
4. <u>Др Мирко Динуловић</u>	Ванр.проф.	Ваздухопловство	Машински факултет Београд
5. <u>Др Слободан Гвозденовић</u>	Ред.проф.	Ваздухопловство	Саобраћајни факултет Београд

Наставно-научно веће факултета прихватило је извештај Комисије за оцену и одбрану докторске дисертације на седници одржаној дана 21.01.2016. године.

**ДЕКАН
МАШИНСКОГ ФАКУЛТЕТА**проф.др Радивоје Митровић

Прилог: 1. Извештај комисије са предлогом.

2. Акт Наставно-научног већа факултета о усвајању извештаја.

3. Примедбе дате у току стављања извештаја на увид јавности,
уколико је таквих примедби било.

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ
- МАШИНСКИ ФАКУЛТЕТ –
Број: 118/2
Датум: 21.01.2016. године
Београд, Краљице Марије 16

На основу члана 30. Закона о високом образовању („Службени гласник РС“, број 76/2005, 100/2007 – аутентично тумачење, 97/2008, 93/2012 и 89/2013), члана 63. Статута Машинског факултета (број 1876/1 од 04.10.2013. године) и члана 37. Правилника о докторским студијама Машинског факултета и реферата Комисије у саставу: др Иван Костић, ред.проф., ментор, др Александар Симоновић, ванр.проф., ментор, др Зоран Стефановић, ред.проф. М.Ф. у пензији, др Мирко Динуловић, ванр.проф. и др Слободан Гвозденовић, ред.проф., Саобраћајни факултет Београд, о оцени докторске дисертације „Развој напредне методе прорачуна интеракције ваздушне струје и структуре ваздухоплова у домену трансоничних брзина“ студента докторских студија **Бојана Шекутковског**, дипл. инж. маш. - мастер, Наставно-научно веће Машинског факултета на седници одржаној 21.01.2016. године, донело је следећу

ОДЛУКУ

Усваја се реферат Комисије о урађеној докторској дисертацији **„РАЗВОЈ НАПРЕДНЕ МЕТОДЕ ПРОРАЧУНА ИНТЕРАКЦИЈЕ ВАЗДУШНЕ СТРУЈЕ И СТРУКТУРЕ ВАЗДУХОПЛОВА У ДОМЕНУ ТРАНСОНИЧНИХ БРЗИНА“** студента **БОЈАНА ШЕКУТКОВСКОГ**, дипл. инж. маш. - мастер.

Докторску дисертацију и реферат Комисије о урађеној докторској дисертацији доставити на давање сагласности Већу научних области техничких наука Универзитета у Београду, по истеку рока од 30 дана у коме су били на увиду јавности.

Одлуку доставити: Већу научних области техничких наука Универзитета у Београду, студенту, ментору и архиви Факултета.

ДЕКАН
МАШИНСКОГ ФАКУЛТЕТА

проф. др Радивоје Митровић

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ

Машински факултет

НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ

Предмет: Реферат о урађеној докторској дисертацији кандидата **Бојана Шекутковског**, дипл. инж. маш. – мастера, студента докторских студија.

Одлуком бр. 2703/2 од 24.12.2015. године, именовани смо за чланове Комисије за преглед, оцену и одбрану докторске дисертације Бојана Шекутковског, дипл. инж. маш. – мастера под насловом

РАЗВОЈ НАПРЕДНЕ МЕТОДЕ ПРОРАЧУНА ИНТЕРАКЦИЈЕ ВАЗДУШНЕ СТРУЈЕ И СТРУКТУРЕ ВАЗДУХОПЛОВА У ДОМЕНУ ТРАНСОНИЧНИХ БРЗИНА

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 Бојан Шекутковски, дипл. инж. маш. – мастер прву годину докторских студија уписао је школске 2010./2011 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 9,92 (девет, 92/100).

Кандидат Бојан Шекутковски, дипл. инж. маш. – мастер пријавио је израду докторске дисертације 10.07.2014., бр. 25.12.2015., Катедри за ваздухопловство Машинског факултета Универзитета у Београду и за ментора предложио редовног професора др Ивана Костића.

На основу пријаве кандидата и предлога Катедре, одлуком Наставно-научног већа Машинског факултета Универзитета у Београду од 04.09.2014. године, бр. 1477/3, именована је Комисија за оцену подобности теме и кандидата за израду докторске дисертације и научне заснованости теме у саставу: ментор, др Иван Костић, редовни професор Машинског факултета Универзитета у Београду, коментор, др Александар Симоновић, ванредни професор Машинског факултета Универзитета у Београду, др Зоран Стефановић, редовни професор Машинског факултета Универзитета у Београду, др Мирко Динуловић, ванредни професор Машинског факултета Универзитета у Београду и др Слободан Гвозденовић, редовни професор Саобраћајног факултета Универзитета у Београду.

Комисија је 17.09.2014. године, бр. 1477/4, 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 „Развој напредне методе прорачуна интеракције ваздушне струје и структуре ваздухоплова у домену трансоничних брзина“ кандидата Бојана Шекутковског, дипл. инж. маш. – мастера, под менторством редовног професора др Ивана Костића и подменторством ванредног професора др Александра Симоновића., 18.09.2015. године, одлука бр. 1477/5.

На основу одлуке Наставно-научног већа Машинског факултета о испуњености услова кандидата за израду докторске дисертације и именовању ментора, коментора и сагласности Већа научних области техничких наука Универзитета у Београду, декан Машинског факултета у Београду је 04.11.2015. год. донео закључак бр. 2162/1 да се одобри рад на теми докторске дисертације „Развој напредне методе прорачуна интеракције ваздушне струје и структуре ваздухоплова у домену трансоничних брзина“ кандидату Бојана Шекутковском, дипл. инж. маш. – мастер.

О завршетку докторске дисертације ментор проф. др Иван Костић обавестио је Катедру за ваздухопловство и Наставно-научно веће Машинског факултета у Београду, дописом бр. 2703/1 од 08.12.2015 године. Предложена је Комисија за оцену и одбрану докторске дисертације у саставу: ментор, др Иван Костић, редовни професор Машинског факултета Универзитета у Београду, коментор, др Александар Симоновић, ванредни професор Машинског факултета Универзитета у Београду, др Зоран Стефановић, редовни професор Машинског факултета Универзитета у Београду, др Мирко Динуловић, ванредни професор Машинског факултета Универзитета у Београду и др Слободан Гвозденовић, редовни професор Саобраћајног факултета Универзитета у Београду. На седници Наставно-научног већа 24.12. 2015. године је једногласно усвојено обавештење о завршетку дисертације кандидата Бојана Шекутковског, дипл. инж. маш. – мастер и предлог састава Комисије за оцену и одбрану докторске дисертације (бр. 2703/2 од 24.12.2015).

1.2. Научна област дисертације

Докторска дисертација припада области Техничких наука, научна област Машинство. За ментора је одређен др Иван Костић, редовни професор на Катедри за Ваздухопловство Машинског факултета у Београду и коментор, др Александар Симоновић, вандредни професор на Катедри за Ваздухопловство Машинског факултета у Београду.

1.3. Биографски подаци о кандидату

Бојан Д. Шекутковски рођен је 4.2.1986. године у Земуну. Техничку школу "Петар Драпшин", смер "Ваздухопловни машински техничар", у Београду, завршио је школске 2004/2005. године где је предложен за ђака генерације. Школске 2005/2006. године уписао је Машински факултет Универзитета у Београду. На Основним академским студијама дипломирао је 2008. године, на смеру за Ваздухопловство, са називом теме дипломског рада: "Идејни пројекат возила на људски погон", оцена 10 (десет), код професора др Зорана Стефановића. Просечна оцена током Основних академских студија износила је 9.56 (девет, 56/100). Школске 2008/2009. године уписао је Мастер академске студије на Машинском факултету Универзитета у Београду на смеру за Ваздухопловство. Одбраном мастер рада на тему "Кабински део трупа лаког авиона", са оценом 10 (десет), код професора др Златка Петровића, стиче академско звање дипломирани инжењер машинства – мастер (19. Март 2010. година), уједно постаје и први дипломирани мастер на Машинском факултету Универзитета у Београду од увођења Болоњског система. Просечна оцена током мастер академских студија износила је 9,91 (девет, 91/100).

Током студија, почевши од прве године, био је активан члан удружења студената Ваздухопловства EUROAVIA Београд, да би на крају био и председник тог удружења у трајању од две године.

Течно говори и пише Енглески језик и поседује ниво В2 (Задужбина Илије М. Коларца – Центар за наставу страних језика), и говори и пише Немачки језик и поседује ниво А2.2 (Задужбина Илије М. Коларца – Центар за наставу страних језика). Познавање рачунара је на високом нивоу, а неки од програмских пакета су: CATIA V5, OpenFOAM, ANSYS, ICEM CFD, MSC.PATRAN и MSC.NASTRAN, FEMAP, Microsoft Office, LaTeX, Microsoft Visual Studio. Оперативни системи: Microsoft Windows, Linux. Програмски језици: C/C++, Matlab, Visual Basic, Fortran.

У Мају 2010. године званично постаје стручни сарадник, као запослен у Иновационом центру Машинског факултета у Београду, на пројекту лаког тренажног авиона: "BS-03".

Школске 2010/2011. године уписао је Докторске академске студије на Машинском факултету Универзитета у Београду, смер за Ваздухопловство, под руководством потенцијалних ментора проф. др Ивана Костића и проф. др Александра Симоновића. Од новембра 2010. године постаје сарадник - истраживач на поменутом пројекту лаког авиона.

Као сарадник у настави ангажован је на предметима на Основним и Мастер академским студијама Машинског факултета Универзитета у Београду, на Ваздухопловном смеру: "Конструкција и технологија производње летелица" и "Пројектовање летелица", респективно.

На поменутом пројекту лаког авиона до данас је остварио висок допринос, и као дипломирани машински инжењер својим потписом оверио је већи број извештаја. Директно је учествовао у изради конструкције комплетног авиона и непосредно учествовао у лабораторијским статичким испитивањима конструкције.

Од Јануара 2014. године запослен је у фирми EDePro као развојни инжењер.

2. ОПИС ДИСЕРТАЦИЈЕ

2.1. Садржај дисертације

Докторска дисертација „Развој напредне методе прорачуна интеракције ваздушне струје и структуре ваздухоплова у домену трансоничних брзина“, кандидата Бојана Шекутковског, дипл. инж. маш. – мастер, написана је на 249 страна (не рачунајући референце и прилоге, укупно 280 страна).

Дисертација садржи следећа поглавља:

1. Увод
2. Основне једначине
3. Интеракција ваздушне струје и структуре ваздухоплова
4. Валидација RANS-LES турбулентних модела
5. Валидација методе прорачуна интеракције ваздушне струје и структуре ваздухоплова
6. Закључци и правци даљег истраживања

Дисертација садржи списак од 119 коришћених референци и цитиране литературе.

2.2. Кратак приказ појединачних поглавља

Поглавље Увод посвећено је проблему истраживања. Садржи уводни део, преглед и критичку анализу предходних истраживања. Описује основе методе коришћене у оквиру ове дисертације и пружа опис проблема истраживања, као и кратак садржај тезе.

Поглавље Основне једначине садржи основне једначине интеракције ваздушне струје и структуре ваздухоплова. У оквиру овог поглавља детаљно су представљене базне једначине динамике флуида користећи Ојлеров приступ, и приказане су једначине динамике структуре користећи Лагранжев приступ, и на крају једначине које представљају

улазно-излазне податке на интерфејсу. У овом поглављу су поред базних једначина динамике флуида детаљно изведени одговарајући турбулентни модели који се односе на део који описује струјно поље. Такође, у оквиру дела који се односи на структуру ваздухоплова, изведени су чланови који се односе на структурално пригушење и додатне запремиске силе и извршена је њихова имплементација.

Поглавље Основне једначине такође се односи на нумеричко решавање једначина динамике флуида као и дискретизацију ових једначина коришћењем коначних запремина на померајућим (динамичким) мрежама. Ово поглавље садржи и под-поглавља која се односе на дискретизацију флуидног домена и нумеричко третирање одговарајућих чланова једначина динамике флуида. Описани су основни закони коришћени при дискретизацији коначним запреминама, временске шеме, а укључен је и део који се односи на граничне услове.

Ово поглавље приказује дискретизацију једначина динамике структуре, као и специфичности везане за њихову дискретизацију коначним запреминама. Такође, овде се наводе и нумеричке шеме примењене на решавање система једначина са граничним условима.

Посебан део овог поглавља посвећен је померајућим прорачунским мрежама као и методама за нумеричко решавање система једначина, како флуидног, тако и структуралног домена.

Поглавље Интеракција ваздушне струје и структуре ваздухоплова садржи алгоритам интеракције ваздушне струје и структуре ваздухоплова, као и појединости специфичне за просторну и временску дискретизацију, и силе које се појављују на интерфејсу. Ово поглавље описује и имплицитну шему спрезања флуидног и структуралног домена. Описане су коришћене методе под-релаксације које помажу у редукцији времена спрезања система и убрзања FSI (Fluid-Structure Interaction) симулација. Такође, описан је и алгоритам и начин померања прорачунске мреже флуидног домена.

Поглавље Валидација RANS-LES турбулентних модела садржи нумеричке резултате тест случајева прорачунске динамике флуида у трансоничној области брзина. Ово поглавље везано је за верификацију нумерички добијених резултата са постојећим експерименталним резултатима и приказ појединости и специфичности везаних за претходно описане турбулентне моделе. Описане су и приказане све предности RANS-LES хибридних модела у односу на досада највише коришћене RANS моделе, чиме се показује научни допринос по питању дела који се односи на струјање флуида.

Поглавље Валидација методе прорачуна интеракције ваздушне струје и структуре ваздухоплова садржи нумеричке резултате тест случајева интеракције ваздушне струје и структуре ваздухоплова који припадају трансоничној области брзина. Ово поглавље везано је за верификацију нумерички добијених резултата са постојећим експерименталним резултатима који се односе на појаве интеракције ваздушне струје и структуре ваздухоплова у оквиру овог домена брзина. Поред дискусије и међусобног поређења нумерички добијених резултата са експерименталним, приказане су и разлике које настају када се у једначине динамике структуре укључе чланови који се односе на пригушење,

што се огледа у разлици величине амплитуда и фреквенција осциловања једне исте структуре при идентичним режимима струјања.

Поглавље Закључци и правци даљег истраживања је завршно поглавље и даје осврт на резултате постигнуте у оквиру дисертације. Разматрани су и могући правци даљег истраживања.

3. ОЦЕНА ДИСЕРТАЦИЈЕ

3.1. Савременост и оригиналност

Докторска дисертација под називом „Развој напредне методе прорачуна интеракције ваздушне струје и структуре ваздухоплова у домену трансоничних брзина“ пружа савремен и оригиналан приступ истраживању интеракције флуида и структуре у домену трансоничних брзина. Научни допринос ове дисертације представља значајан корак и огледа се у развоју два RANS-LES турбулентна модела намењена великим Рејнолдсовим бројевима и изражено турбулентним струјањима. Ови турбулентни модели омогућавају симулацију турбулентног струјног поља узимајући у обзир велики спектар турбулентних размера, што пре свега зависи од прорачунске мреже, односно доступних компјутерских ресурса. Ови турбулентни модели један су од кључних сегмената када је у питању интеракција ваздушне струје и структуре ваздухоплова у домену трансоничних брзина, јер омогућавају пренос енергије у смеру струјно поље – структура практично на егзактан начин. Иновирана Лагранжева формулација, којом је описано динамичко понашање структуре, омогућава симулацију кретања еластичних изотропних и ортотропних структура и када су померања и деформације изван области геометријске и линеарности деформација материјала. Придодато структурално пригушење и запреминске силе у оквиру ове дисертације омогућавају веома реалистичну симулацију реалних физичких процеса када је у питању интеракција ваздушне струје и структуре ваздухоплова у домену трансоничних брзина. 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 областима код којих не може да се занемари међусобни утицај флуид-структура.

3.2. Осврт на референтну и коришћену литературу

У докторској дисертацији коришћена је обимна литература из области стишљивог турбулентног струјања, динамичког кретања структуре, као и међусобне интеракције флуида и структуре у трансоничном домену брзина. Највећи број библиографских јединица представљају радови из врхунских међународних часописа, мањим делом из зборника радова и књига. Литература је кандидату послужила као полазна основа за формирање увида у досадашње приступе у теорији и пракси, а који се односе на нумеричко моделирање и симулацију интеракције флуида и структуре у трансоничном домену брзина, који се базирају на коначним запеминама. Укупан закључак је да је пружен релевантни 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 приказано у деловима дисертације у којима су изложени оригинални доприноси.

3.3. Опис и адекватност примењених научних метода

Истраживање представљено у дисертацији је посвећено моделирању стишљивог - тродимензионалног турбулентног струјања у трансоничном домену брзина и његова интеракција са ваздухопловном структуром.

Турбулентно стишљиво/компресибилно струјање моделира се коришћењем два турбулентна модела $k-\omega$ SSTSAS ($k-\omega$ Shear Stress Transport Scale Adaptive Simulation) и $k-\omega$ SSTSAIDDES ($k-\omega$ Shear Stress Transport Scale Adaptive Improved Delayed Detached Eddy Simulation). Оба турбулентна модела припадају RANS-LES (Reynolds-Averaged Navier-Stokes – Large Eddy Simulation) категорији и њихова употреба у оквиру ове дисертације оправдана је након представљања доказа њихове робусности у односу на до сада највише коришћене RANS моделе. Циљ коришћења овако робусних турбулентних модела је реалистична симулација изражених турбулентних струјања при великим Рејнолдсовим бројевима. Турбулентни модел $k-\omega$ SSTSAIDDES поседује могућност симулације понашања турбулентних структура чак и у великој зони граничног слоја, чиме се овај модел разликује од $k-\omega$ SSTSAS. Турбулентни струјни ток у себи садржи енергију различитих турбулентних размера/вртлога, а употреба управо ових турбулентних модела омогућава пренос енергије постојећих вртлога на структуру ваздухоплова, чиме се постиже висока тачност када је у питању динамички одзив исте. Предност RANS-LES методе у односу на саму LES методу јесте избегавање потребе за великим компјутерским ресурсима, али и могућност приближавању LES приступу уколико се прорачунска мрежа флуидног домена довољно уситни. Предност RANS-LES у односу на RANS је такође и начин на који се променљиве главног струјног поља израчунавају у односу на флукутирајуће променљиве. Турбулентни модели настали у оквиру дисертације показали су се успешним када је у питању моделирање струјних појава трансонике, односно ударних таласа и њихова интеракција са турбулентним граничним слојем, кретање ударних таласа по површини структуре, као и одвајање струјања. Поред овога, постигнуто је и одређивање аеродинамичких коефицијената са задовољавајућом тачношћу.

Главни циљ истраживања био је развој напредне методе прорачуна интеракције ваздушне струје и структуре ваздухоплова у домену трансоничних брзина, у смислу развоја монолитичког солвера интеракције флуида и структуре, у виду апликације у OpenFOAM-у (foam-extended-3.0). OpenFOAM је отворен и базиран на програмском језику C++ чиме је омогућена модуларност на високом нивоу, и потпуна слобода када је у питању развој и истраживање.

Коришћењем описане методе, која се између осталог базира на иновираној Лагранжевој формулацији, уколико дође до великих померања структуре, на пример крила, за дату конфигурацију у сваком кораку могу да се одреде вредности аеродинамичких сила, односно аеродинамички коефицијенти. На основу ових података, као и комплетног динамичког одзива структуре и увида у слику струјног поља у временском домену, могу да

се донесу релевантни закључци још у фази развоја неког ваздухопловног система и тиме предупредити потенцијални проблеми.

3.4. Применљивост остварених резултата

Кандидат Бојан Д. Шекутковски је радом на докторској дисертацији остварио значајне научно-истраживачке резултате са трајном научном вредношћу и практичном применљивошћу у области нумеричке симулације стишљивих турбулентних струјања, као и њихове интеракције са ваздухопловном структуром. На основу увида у ефекте међусобне интеракције, могу да се изврше бројне измене и тиме летелица усаврши још у почетној фази развоја.

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

Турбулентна стишљива струјања, како спољашња, тако и унутрашња. У оквиру ове области примене, са високом поузданошћу може да се прикаже природа ових струјања у специфичним ситуацијама, на основу чега могу да се изведу одређени закључци и да се над посматраним системом још у фази развоја отклоне неправилности и изврши оптимизација.

Посебно је потребно истаћи да се коришћењем приказаног солвера интеракције флуида и структуре могу предвидети различити феномени струјања, а самим тим и феномени динамичког одзива структуре карактеристични за летелице у различитим режимима лета (маневри, полетања, слетања).

Једна од веома важних примена јесте и она која се односи на одређивање аеродинамичких коефицијената. Ово је битно, јер солвер интеракције флуида и структуре у временском домену врши симулацију струјног поља, као и динамичког одзива структуре, тако да су у сваком временском кораку познате вредности аеродинамичких коефицијената, при чему структура геометријски може бити веома различита од оне почетне.

Потенцијална област примене може укључити и струјања у оквиру субсоничних брзина струјања, што може подразумевати опструјавање грађевинских објеката подложних утицају интеракције флуида и структуре, али уз додатне модификације солвера и придруживања одговарајућих модула, област примене може се проширити и на струјања у турбомлазним моторима, у циљу оптимизације лопатица и побољшања укупних ротодинамичких својстава система.

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 проблема применом савремених научно-истраживачких метода. Велико искуство и рад кандидата на овладавању областима прорачунске динамике флуида, прорачунске динамике структуре, програмирања, као и обимнија теориска знања из ових области, пружају основу за квалитетан самостални научно-истраживачки рад.

4. ОСТВАРЕНИ НАУЧНИ ДОПРИНОС

4.1. Приказ остварених научних доприноса

Научни допринос ове дисертације се огледа у следећем:

- Формиран је и успешно верификован алгоритам и метода прорачуна интеракције ваздушне струје и структуре ваздухоплова у OpenFOAM-у.
- Формирани су и вишеструко верификовани компресибилни $k-\omega$ SSTSAS RANS-LES турбулентни модел и компресибилни $k-\omega$ SSTSAIDDES RANS-LES турбулентни модел.
- Формиран је и успешно примењен компресибилни солвер базиран на густини.
- У једначине иновирание Лагранжеве формулације за изотропне структуре додати чланови структуралног пригушења и запреминских сила.
- Једначине иновирание Лагранжеве формулације за ортотропне структуре су модификоване и додати су чланови структуралног пригушења и запреминских сила.

Циљ ове дисертације је развој напредне методе прорачуна интеракције ваздушне струје и структуре ваздухоплова у домену трансоничних брзина. Сагледавајући све приложене резултате проистекле из верификације поменуте методе, може се закључити да је овај циљ у потпуности остварен.

Верификована метода има за циљ одређивање величина струјног поља око опструјаване ваздухопловне конфигурације, при чему се у посматраном временском домену истовремено прати понашање структуре, односно њен одговор на аеродинамичке силе, при чему настаје сложена спрега интеракције флуида и структуре.

У оквиру приказане методе коришћене су једначине динамике флуида за компресибилно струјање, при чему су узети у обзир сви пропратни физички ефекти посматраног кретања флуида. Да би једначине динамике флуида могле нумерички да се реше, односно систем једначина затвори, коришћен је хибридни приступ моделирања турбуленције. Како је турбуленција нестационарне природе, коришћен је RANS-LES приступ моделирања. Овакав приступ има за циљ што реалнију симулацију струјања, тако што се у веома уској зони граничног слоја струјање посматра као стационарно, без истакнутих ефеката турбулентних флуктуација, те се овде користи RANS приступ моделирању. Применом одговарајуће функције као “окидача”, прелазак из RANS у LES режим врши се у осталом делу флуидног домена, где се, користећи LES приступ, може правилно симулирати широк спектар турбулентних структура и на тај начин узети у обзир њихов утицај на ваздухопловну структуру која се налази, на пример, у зони вртложног трага. Држећи се овакве методе, настале су и одговарајуће мреже које имају улогу да омогуће правилну симулацију струјања.

Кретање прорачунске мреже флуидног домена значајно је утицално на факторе који одређују њене параметре. При томе треба истаћи да, у циљу постизања што краћег

времена симулације, како би приказана метода могла да се примењује у свакодневној инжењерској пракси, прорачунска мрежа за потребе симулације интеракције флуида и структуре има мању густину од мреже која би била подразумевана за приказану RANS-LES методу. Ређа мрежа донекле умањује тачност у случају одређивања аеродинамичког коефицијента отпора, али када је у питању одређивање свих осталих аеродинамичких коефицијената, као и коефицијента притиска, који је кључан у анализи интеракције флуид-структура, ова метода је оправдала своја очекивања, што је у дисертацији јасно приказано.

За одређивање аеродинамичких коефицијената постоје две опције. Прва подразумева преузимање прорачунске мреже флуида за неки временски тренутак од интереса, и њено накнадно побољшање, а друга се односи на преузимање геометрије за дати временски тренутак и генерисање оптималне RANS-LES мреже, међутим за ову врсту симулација, у највећем броју случајева, није могуће користити широко доступне персоналне рачунаре, већ радне станице или супер-рачунаре. Ово произилази из чињенице да трансоници одговарају изузетно велики Рејнолдсови бројеви, па је због тога потребно користити релативно мале временске кораке. При томе треба нагласити да је за поемрање прорачунске мреже флуида потребно додатно време како би се прорачунало кретање сваке ћелије у односу на задати померај интерфејса од стране структуре. Када је у питању одређивање аеродинамичких коефицијената коришћењем приложене методе, као што је показано, потребно је искључиво користити одређени тип RANS-LES мреже, која има изражен број ћелија у близини зида, постављених у слојеве. На овај начин, уколико се користи $k-\omega$ SSTSAIDDES турбулентни модел, правилно ће се искористити WMLES (Wall Modeling LES) у близини зида, тј. у спољашњој области граничног слоја, као и SAS/IDDES у осталом делу струјног поља.

Коришћење иновираних Лагранжевих метода за моделирање динамике структуре оправдала је своја очекивања. Уз укључивање додатних чланова који узимају у обзир структурално пригушење и убрзање Земљине теже, постигнуто је то да се динамички одзив врло добро поклапа са измереним експерименталним одзивом. Ово, с обзиром на чињеницу да за моделирање нису коришћене мреже са екстремно великим бројем ћелија, како за структуру тако и за флуид, сугерише да се приказана метода може користити и за категорије проблема које анализирају конфигурације сличне разматраним. Резултати који су приложени у раду, показују да се укључивањем структуралног пригушења у једначине динамике структуре, у значајној мери утиче на тачност резултата. У пракси је потребно бити врло опрезан када се бира структурални коефицијент пригушења, јер он искључиво зависи од процене, тј. од тачности израде саме структуре, као и њене комплексности, материјала и других својстава.

Свеобухватно сагледано, новонастала метода прорачуна и предвиђања физикалности понашања како струјног поља, тако и структуре ваздухоплова, коришћењем коначних запремина за дискретизацију комплетног домена, оправдала је очекивања уз оптималне услове за њено правилно коришћење. Оптимални услови коришћења захтевају знатно јаче компјутерске ресурсе у односу на класичне до сада широко коришћене методе, али зато, ова метода даје изузетно поуздане резултате, приказујући их у временском домену и у тродимензионалном простору.

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 применљиви у пракси. Истовремено, на основу увида у задате циљеве истраживања и резултате представљене у докторској дисертацији, констатујемо да су пружени одговори на сва релевантна питања и решени проблеми са којима се кандидат сусрео у току истраживања.

Развијена метода прорачуна интеракције ваздушне струје и структуре ваздухоплова у домену трансоничних брзина представља значајан корак у виду поузданости и тачности предвиђања како аеродинамичких, тако и аеро-структуралних појава.

Изложени резултати демонстрирају применљивост алгорита у комплексним случајевима трансонике, што је од кључног значаја када је у питању стабилност структуре у условима утицаја ударних таласа и турбулентног струјног поља.

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 врхунским међународним часописима (M21):**

Bojan Šekutkovski, Ivan Kostić, Aleksandar Simonović, Philip Cardif, Vladimir Jazarević: *Three-dimensional fluid-structure interaction simulation with a hybrid RANS-LES turbulence model for applications in transonic flow domain*, Aerospace Science and Technology, 46, pp. 1-16, 2016, Elsevier Ltd., ISSN 1270-9638, DOI: 10.1016/j.ast.2015.11.028 (IF=0.940 за 2014. godinu).

- **Радови у међународним часописима (M23)**

Bojan Šekutkovski, Ivan Kostić, Zoran Stefanović, Aleksandar Simonović, Olivera Kostić: *A Hybrid RANS-LES method with compressible k-omegaSSTAS turbulence model for high Reynolds number flow applications*, Technical Gazette 22, 5(2015), ISSN 1330-3651, DOI: 10.17559/TV-20140404130058, pp. 1237-1245 (IF=0.579 за 2014. godinu).

- **Саопштење са међународног скупа штампано у целини (M33)**

Bojan Šekutkovski, Ahmed Abubaker, Olivera Kostić, Ivan Kostić: *Determination of the Aerodynamic Characteristics of the NACA 652-415 Airfoil with Single Slotted Flap*, SRMA 2014, ISBN 978-86-82631-76-7, pp. 1-8.

5. ЗАКЉУЧАК И ПРЕДЛОГ

На основу прегледа докторске дисертације, Комисија констатује да је Докторска дисертација под називом „**РАЗВОЈ НАПРЕДНЕ МЕТОДЕ ПРОРАЧУНА ИНТЕРАКЦИЈЕ ВАЗДУШНЕ СТРУЈЕ И СТРУКТУРЕ ВАЗДУХОПЛОВА У ДОМЕНУ ТРАНСОНИЧНИХ БРЗИНА**“, кандидата Бојана Шекутковског, дипл. инж. маш. – мастер, урађена према свим стандардима у научно-истраживачком раду, као и да испуњава све услове предвиђене Законом о високом образовању и Статутом Машинског факултета у Београду. Дисертација садржи савремен и оригиналан научни допринос изузетно актуелној проблематици у ваздухопловству. Кандидат је дошао до оригиналних научних резултата, који су успешно верификовани, што обезбеђује могућност широке практичне примене.

Сходно свему претходно наведеном, Комисија предлаже Наставно-научном већу Машинског факултета у Београду да Реферат 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, 15. 01. 2016. год.

ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ

проф. др Иван Костић, редовни професор,
Универзитет у Београду, Машински факултет,
ментор

проф. др Александар Симоновић, ванредни
професор, Универзитет у Београду, Машински
факултет, ментор

проф. др Зоран Стефановић, редовни професор,
Универзитет у Београду, Машински факултет

проф. др Мирко Динуловић, ванредни професор,
Универзитет у Београду, Машински факултет

проф. др Слободан Гвозденовић, редовни професор,
Универзитет у Београду, Саобраћајни факултет

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ
- МАШИНСКИ ФАКУЛТЕТ –
Број:118/3
Датум: 21.01.2016. године
Београд, Краљице Марије бр. 16

На основу члана 30. Закона о високом образовању („Службени гласник РС“, број 76/2005, 100/2007 – аутентично тумачење, 97/2008, 93/2012 и 89/2013), члана 63. Статута Машинског факултета (број 1876/1 од 04.10.2013. године) и члана 37. Правилника о докторским студијама Машинског факултета, Наставно-научно веће на седници одржаној 21.01.2016. године, донело је

ОДЛУКУ

Усваја се реферат Комисије о урађеној докторској дисертацији **„РАЗВОЈ НАПРЕДНЕ МЕТОДЕ ПРОРАЧУНА ИНТЕРАКЦИЈЕ ВАЗДУШНЕ СТРУЈЕ И СТРУКТУРЕ ВАЗДУХОПЛОВА У ДОМЕНУ ТРАНСОНИЧНИХ БРЗИНА“** студента **БОЈАНА ШЕКУТКОВСКОГ**, дипл. инж. маш. - мастер.

Јавна одбрана докторске дисертације обавиће се по добијању сагласности Универзитета у Београду.

Универзитет у Београду је својом Одлуком број 61206-4337/2-14, од 20.10.2014. године, дао сагласност на предлог теме докторске дисертације.

Објављени радови студента у часописима међународног значаја:

1. **Bojan Šekutkovski**, Ivan Kostić, Aleksandar Simonović, Philip Cardif, Vladimir Jazarević: *Three-dimensional fluid-structure interaction simulation with a hybrid RANS-LES turbulence model for applications in transonic flow domain*, Aerospace Science and Technology, 46, pp. 1-16, 2016, Elsevier Ltd., ISSN 1270-9638, DOI: 10.1016/j.ast.2015.11.028 (IF=0.940 за 2014. godinu).
2. **Bojan Šekutkovski**, Ivan Kostić, Zoran Stefanović, Aleksandar Simonović, Olivera Kostić: *A Hybrid RANS-LES method with compressible k-omegaSSTAS turbulence model for high Reynolds number flow applications*, Technical Gazette 22, 5(2015), ISSN 1330-3651, DOI: 10.17559/TV-20140404130058, pp. 1237-1245 (IF=0.579 за 2014. godinu).

Одлуку доставити: студенту, ментору, Катедри за ваздухопловство и архиви Факултета.

ДЕКАН
МАШИНСКОГ ФАКУЛТЕТА

проф. др Радивоје Митровић