

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)

1070/4

(Број захтева)

04.07.2019. 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:

ЂОРЂА (МИЛИЋ) НОВКОВИЋА

(име, име једног од родитеља и презиме)

КАНДИДАТ **ЂОРЂЕ (МИЛИЋ) НОВКОВИЋ** уписан на Докторске студије 2010. год.

(име, име једног од родитеља и презиме)

Поднео је захтев за израду докторске дисертације:

МОДЕЛИРАЊЕ И НУМЕРИЧКИ ПРОРАЧУНИ СТРУЈАЊА НЕСТИШЉИВОГ ФЛУИДА У ПРАВИМ КОНУСНИМ ДИФУЗОРИМА

Универзитет је дана 30.10.2017. год. својим актом под бр. 61206-3934/2-17 дао сагласност на предлог теме докторске дисертације која је гласила:

МОДЕЛИРАЊЕ И НУМЕРИЧКИ ПРОРАЧУНИ СТРУЈАЊА НЕСТИШЉИВОГ ФЛУИДА У ПРАВИМ КОНУСНИМ ДИФУЗОРИМАКомисија за оцену и одбрану докторске дисертације кандидата: **ЂОРЂА (МИЛИЋ) НОВКОВИЋА**

(име, име једног од родитеља и презиме)

Образована је на седници одржаној 13.06.2019. године, одлуком факултета под бр. 1070/2, у саставу:

Име и презиме члана комисије	звање	научна област	установа у којој је запослен
1. Др Милан Лечић	Ред. проф.	Механика флуида	Машински факултет Београд
2. Др Александар Ћоћић	Ванр. проф.	Механика флуида	Машински факултет Београд
3. Др Ђорђе Чантрак	Ванр. проф.	Хидрауличне машине и енергетски системи	Машински факултет Београд
4. Др Маша Букуров	Ред. проф.	Механика флуида	ФТН Нови Сад
5. Др Никола Маричић	Ред. проф. у пензији	Механика флуида	Универзитет у Приштини са привременим седиштем у Косовској Митровици, ФТН у Косовској Митровици

Наставно-научно веће факултета прихватило је извештај Комисије за оцену и одбрану докторске дисертације на седници одржаној дана 04.07.2019. 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: 1070/4
Датум: 04.07.2019. 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 64. Статута Машинског факултета (број 1450/4 од 14.06.2018. године) и члана 37. Правилника о докторским студијама Машинског факултета и реферата Комисије у саставу: др Милан Лечић, ред. проф., ментор, др Александар Ћоћић, ванр. проф., ментор, др Ђорђе Чантрак, ванр. проф., др Маша Букуров, ред. проф., Универзитет у Новом Саду, ФТН и др Никола Маричић, ред. проф. у пензији, Универзитет у Приштини са привременим седиштем у Косовској Митровици, Факултет техничких наука у Косовској Митровици о оцени докторске дисертације **„Моделирање и нумерички прорачуни струјања нестишљивог флуида у правим конусним дифузорима“** студента докторских студија **Ђорђа Новковића**, дипл. инж. маш., Наставно-научно веће Машинског факултета на седници одржаној 04.07.2019. године, донело је следећу

ОДЛУКУ

Усваја се реферат Комисије о урађеној докторској дисертацији **„МОДЕЛИРАЊЕ И НУМЕРИЧКИ ПРОРАЧУНИ СТРУЈАЊА НЕСТИШЉИВОГ ФЛУИДА У ПРАВИМ КОНУСНИМ ДИФУЗОРИМА“** студента **ЂОРЂА НОВКОВИЋА**, дипл. инж. маш.

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 И ВЕЋУ ЗА ДОКТОРСКЕ СТУДИЈЕ

Предмет: Реферат о урађеној докторској дисертацији кандидата
Ђорђа М. Новковића, дипл. инж. маш, студента докторских студија.

Одлуком Наставно-научног већа Машинског факултета у Београду бр. 1070/2 од 13.06. 2019. године, именовани смо за чланове Комисије за преглед, оцену и одбрану докторске дисертације кандидата **Ђорђа М. Новковића**, дипл. инж. маш, под насловом

**„Моделирање и нумерички прорачуни струјања нестишљивог флуида у
правим конусним дифузорима“**

На основу прегледа достављене дисертације и других пратећих материјала и разговора са кандидатом, Комисија је сачинила следећи

РЕФЕРАТ

1 УВОД

1.1 Хронологија одобравања и израда дисертације

Ђорђе М. Новковић, дипл. инж. маш. је уписао докторске студије на Машинском факултету Универзитета у Београду школске 2010/11. године. Положио је испите из свих предмета предвиђених наставним планом и програмом за ниво докторских студија са просечном оценом 9,93 (девет и 93/100).

Докторску дисертацију под насловом називом „Моделирање и нумерички прорачуни струјања нестишљивог флуида у правим конусним дифузорима“ пријавио је на Машинском факултету Универзитета у Београду дана 16.06.2017. године под евиденционим бројем 1387/1. На основу пријаве кандидата, Наставно-научно веће Машинског факултета је на седници ННВ-12/1617 (ев. број 1396/2) дана 22.06.2017. године, формирало Комисију за оцену подобности теме и кандидата за израду докторске дисертације у саставу: др Милан Лечић, ред. проф, потенцијални ментор, др Александар Тоћић, доцент, потенцијални коментор, др Ђорђе Чантрак, доцент, др Маша Букуров, ванр. проф. Факултета техничких наука Универзитета у Новом Саду и др Никола Маричић, ред. проф. у пензији Факултета техничких наука Универзитета у Приштини са привременим седиштем у Косовској Митровици. На основу Извештаја Комисије за оцену подобности теме и кандидата за израду докторске дисертације, Наставно-научно веће Машинског факултета у Београду је прихватило тему докторске дисертације Одлуком

бр. 1680/2 од 13.07.2017. године. Веће научних области техничких наука Универзитета у Београду је Одлуком бр. 61206-3934/2-17 од 30.10.2017. године, одобрило израду докторске дисертације под насловом „*Моделирање и нумерички прорачуни струјања нестишљивог флуида у правим конусним дифузорима*“. За менторе су именовани др Милан Лечић, ред. проф. Машинског факултета у Београду и др Александар Тоћић, доцент Машинског факултета у Београду.

Кандидату је одобрен статус мировања обавеза на докторским студијама, на Молбу заведену под бројем 9/9924 од 10.09.2013. године. На Молбу кандидата, Комисија за докторске студије је одобрила продужетак рока за завршетак студија за два семестра Решењем бр. 1933/1 од 12.09.2017. године. Машински факултет је решењем под бројем 2008/1 од 13.09.2018. године, одобрио кандидату продужење рока за завршетак докторских студија за два семестра. На тај начин, кандидат је у обавези да одбрани докторску дисертацију до краја школске 2018/2019. године.

Ментори, проф. др Милан Лечић и др Александар Тоћић, ван. проф., су на седници Катедре одржаној 10.06.2019. године обавестили Катедру да је докторска дисертација завршена. Сходно томе, Катедра за механику флуида је дописом о завршетку докторске дисертације кандидата Ђорђе М. Новковића, бр. 1070/1 од 10.06.2019. године, обавестила Наставно-научно веће Машинског факултета у Београду и предложила састав Комисије за преглед, оцену и одбрану предметне докторске дисертације. Наставно-научно веће је на седници ННВ бр. 13/1819 одржаној дана 13.06.2019. године, донело Одлуку бр. 1070/2 о именовању Комисије за преглед, оцену и одбрану докторске дисертације у следећем саставу:

1. др Милан Лечић, ред. проф., ментор
2. др Александар Тоћић, ванр. проф., ментор
3. др Ђорђе Чантрак, ванр. проф.,
4. др Маша Букуров, ред. проф., Универзитет у Новом Саду, Факултет техничких наука
5. др Никола Маричић, ред. проф. у пензији, Универзитет у Приштини са привременим седиштем у Косовској Митровици, Факултет техничких наука у Косовској Митровици

1.2 Научна област дисертације

Докторска дисертација под насловом називом „*Моделирање и нумерички прорачуни струјања нестишљивог флуида у правим конусним дифузорима*“ припада области техничких наука – машинство, односно ужој научној области Механика флуида за коју је матичан Машински факултет Универзитета у Београду. За менторе су именовани др Милан Лечић, ред. проф. Машинског факултета у Београду и др Александар Тоћић, ванр. проф. Машинског факултета у Београду.

1.3 Биографски подаци о кандидату

Ђорђе М. Новковић је рођен 17.06.1976. године у Карловцу, Р. Хрватска, СФРЈ. Основну школу је завршио 1990. године у Крстињи, Р. Хрватска, СФРЈ. Средњу техничку школу је завршио 1994. године у Војнићу у Републици српској крајини. Машински

факултет у Бања Луци у Републици Српској уписао је 1994. године. Због присилног исељења из Републике српске крајине, студије је 1995. године наставио на Машинском факултету у Приштини, АП Косово и Метохија, Р. Србија. Током студија на Машинском факултету у Приштини био је студент генерације, тако да је 1997. године добио диплому „истакнути студент“. Због исељења Машинског факултета из Приштине, студије је 1999. године наставио на Факултету техничких наука у Косовској Митровици. Због отежаних услова студирања, студије је завршио 2004. године на Одсеку за термо-технику и термоенергетику Факултета техничких наука у Косовској Митровици са просечном оценом 8,68 (осам и 68/100). Дипломски рад под насловом „Проблем струјања уља у цилиндричном клизном лежају“ одбранио је из предмета Механика флуида са оценом 10 (десет).

Од 2005. до 2016. године је био запослен као асистент на Факултету техничких наука у Косовској Митровици. Држао је аудиторне и лабораторијске вежбе из предмета: Механика флуида; Хидрауличне и пнеуматске машине; Пумпе, вентилатори и компресори; Хидропнеуматска техника и Механика. Од 2016. до 2018. године је био запослен као стручни сарадник-лаборант за материјале, механику и саобраћај на Факултету техничких наука у Косовској Митровици.

Од 01.11.2018. године је запослен на Машинском факултету у Београду, при Катедри за Механику флуида, као истраживач на пројекту ТР-35046 под називом *Примена савремених мерних и прорачунских техника за изучавање струјних параметара вентилационих система на моделу енергетски изузетно ефикасног (пасивног) објекта*. Изабран је у истраживачко звање истраживач сарадник дана 01.06.2018. године.

Аутор је или коаутор четири рада у часописима међународног и домаћег значаја (од тога један у часописима са импакт фактором - SCI листа), шеснаест саопштења на међународним скуповима и домаћим скуповима са међународним учешћем штампаних у целини или у изводу. Учествовао је као истраживач у четири пројекта при Министарству просвете, науке и технолошког развоја Републике Србије.

Активно се служи рачунаром. Користи програме MS Office, SolidWorks, Wolfram Mathematica, AutoCAD под оперативним системом Windows и програме LibreOffice, Texmaker, Gnuplot, Inkscape под оперативним системом Linux. Служи се C++ програмским језиком. Напредно користи CFD пакете ANSYS CFX, ICEM CFD, BladeGen, TurboGrid, DesignModeler, Meshing, WorkBench, под оперативним системом Windows. Напредно користи и CFD пакет OpenFOAM под оперативним системом Linux.

Кандидат говори енглески језик.

2 ОПИС ДИСЕРТАЦИЈЕ

2.1 Садржај дисертације

Докторска дисертација називом „*Моделирање и нумерички прорачуни струјања нестишљивог флуида у правим конусним дифузорима*“ је документ формата А4, штампан једнострано, написан на српском језику, ћириличним писмом. Дисертација је написана на укупно 156 нумерисаних страна укључујући и Референце (укупно 117 референци је наведено на 10 страна), илустрована са 56 слика и дијаграма, 159 нумерисаних израза и 10 табела.

Материја предметне дисертације је изложена у оквиру 7 поглавља:

1. Увод
2. Основне једначине изотермског струјања нестишљивог флуида
3. Моделирање турбулентних напона
4. Развој модела „ k - ϵ diffuser“ и имплементација у OpenFOAM
5. Резултати нумеричких прорачуна
6. Закључак
7. Литература

и у оквиру додатка са прилозима. На почетку рада је дат *Списак ознака*, као и продужени резиме на српском и енглеском језику, док су на крају дати биографски подаци кандидата.

2.2 Кратак приказ појединачних поглавља

У првом поглављу је изложен концизан преглед историјско-техничког развоја дифузора, почев од примитивних дувачких инструмената, па све до примене дифузорског ефекта у савременим техничким уређајима. Указано је на значај истраживања физике струјања у правом конусном дифузору, као неизоставном делу савремених цевних хидрауличних турбина. Сходно томе, у другом делу овог поглавља, детаљно је приказан преглед релевантне литературе и досадашњих истраживања проблематике струјања у дифузорима.

Акценат истраживања у дисертацији је на примени правих конусних дифузора у хидропостројењима, због чега су за математичко-физичку анализу струјања меродавне једначине одржања које описују изотермска струјања нестишљивог флуида. Стога су у првом делу другог поглавља изложене основне једначине којима се описује овај тип струјања. Ефекти турбуленције у овим струјањима су анализирани временским осредњавањем основних једначина, тј. решавањем Рејнолдсових једначина - тзв. RANS (Reynold Averaged Navier-Stokes) приступ. У другом делу овог поглавља је укратко изложен начин затварања Рејнолдсових једначина применом Бусинескове хипотезе. При томе су укратко образложени и основни недостаци Бусинескове хипотезе у случајевима анизотропних и ротирајућих струјања, након чега је делимично размотрен начин превазилажења тих недостатака апроксимативним моделирањем турбулентне вискозности у виду тензора другог реда.

У оквиру трећег поглавља је изложена детаљна анализа стандардног, линеарног k - ϵ модела турбуленције, у коме се турбулентна вискозност моделира као скалар, тј. као изотропна физичка величина. У складу са тим је детаљно изложено двоједначинско моделирање турбулентне вискозности као скаларне величине применом моделских једначина преноса кинетичке енергије турбуленције и њене дисипације. Затим су анализирани и нелинеарни модели турбуленције код којих се турбулентна вискозност третира као скаларна величина, али који имају нелинеарну зависност између тензора турбулентних напона и тензора осредњене брзине деформисања и вртложности. Након тога су изложени главни недостаци третирања турбулентне вискозности као скаларне величине, при чему су изложени савременији трендови у начину моделирања ове физичке величине. С тим у вези је изложен приступ моделирања турбулентне

вискозности као анизотропне физичке величине обухватањем утицаја просторне и временске нелокалности. Након тога је изложен и најсавременији тренд у моделирању Рејнолдсових напона заснован на нелокалном турбулентном преносу, који је проистекао из Крајхнанове теорије апроксимације директне интеракције турбулентних структура. Из ових савремених трендова су проистекле Хамбине једначине за турбулентне напоне при вихорном турбулентном струјању, које чине окосницу израде ове дисертације. Ове једначине су написане у поларно-цилиндричним координатама, стога је пред аутором дисертације стајао изазов у виду имплементације ових једначина у програмски код софтвера OpenFOAM.

У складу са овим истраживачким изазовом у четвртом поглављу је детаљно образложен математички апарат трансформације тензора другог реда из Декартових у поларно-цилиндричне координате и обрнуто. Применом овог математичког апарата аутор дисертације је у овом поглављу развио оригинални математичко-програмерски поступак формирања Хамбиног тензора турбулентних напона. Овај поступак је поред имплементације Хамбиног модела турбуленције у програмски код софтвера OpenFOAM омогућио и његове додатне модификације за струјања у дифузорима. Тако је формиран нови турбулентни модел назван „ $k-\epsilon$ diffuser“ са циљем да се физички принципи нелокалног турбулентног транспорта искористе за моделирање турбулентног вихорног струјања у правим конусним дифузорима.

Резултати нумеричких прорачуна су приказани у петом поглављу. Најпре је спроведен поступак провере тачности имплементације Хамбиног модела његовим тестирањем на вихорном струјању у правој кружној цеви. У оквиру овог поступка је изложен детаљан приказ структуре поља аксијалне и обимске брзине, структура поља турбулентних напона, као и расподела важних параметара Хамбиног модела и коефицијената турбулентне вискозности. Добијена су одлична слагања са ескперименталним резултатима, чиме је потврђена исправност имплементације модела. Даља тестирања модела на струјањима у дифузорима нису дала задовољавајуће резултате, па је извршена модификација оригиналног Хамбиног модела и формиран је модел „ $k-\epsilon$ diffuser“. Најпре је извршено тестирање овог модела на вихорном струјању типа принудно-потенцијалног вртлога у правом конусном дифузору. Нумерички прорачини су показали да развијени модел стабилно конвергира и да остварује боље резултате како у односу на стандардни, тако и односу на Хамбин $k-\epsilon$ модел. С обзиром да коефицијенти турбулентне вискозности развијеног модела „ $k-\epsilon$ diffuser“ зависе од бездимензијских геометријских параметра дифузора и јачине вихора, тестирање овог модела је настављено на дифузорима различите геометрије и услова струјања. Тако су извршени нумерички прорачуни вихорног струјања типа принудног вртлога у Клаусеновом дифузору и безвихорног струјања у Азадовом дифузору. Сви прорачуни су изведени под претпоставком стационарног струјања и показали су да развијени модел „ $k-\epsilon$ diffuser“ стабилно конвергира на дифузорима различите геометрије, на нумеричким мрежама са великом разликом у бројевима ћелија и у струјним пољима различите физичке комплексности. При томе је тестирањем овог модела на Азадовом дифузору потврђено остваривање циљева постављених при развоју модела, а који се односе на универзалност примене на вихорно и безвихорно струјање и инваријантност резултата у односу на стандардни модел при безвихорном струјању.

Шесто поглавље представља закључна разматрања у вези са резултатима оствареним у оквиру истраживања током рада на предметној докторској дисертацији, као и разматрања о правцима будућих истраживања.

У последњем, седмом поглављу, дат је списак литература која је коришћена током израде докторске дисертације.

3 ОЦЕНА ДИСЕРТАЦИЈЕ

3.1 Савременост и оригиналност

Докторска дисертација називом „*Моделирање и нумерички прорачуни струјања нести-шљивог флуида у правим конусним дифузорима*“ докторанда Ђорђа М. Новковића, урађена је применом савремених метода нумеричке механике флуида. Нумерички прорачуни струјања у оквиру предметне дисертације су реализовани применом CFD софтвера отвореног кода OpenFOAM. Овај софтвер се користи на водећим светским Универзитетима који се баве истраживањима у овој области. Реч је софтверу заснованом на програмерским техникама објектно оријентисаног програмирања, који је написан у C++ програмском језику. С обзиром на отвореност кода, програмски код овог софтвера се може прилагодити специфичним захтевима, тј. могуће је његово даље развијање коришћењем постојећих класа и програмских модула. За разлику од комерцијалних софтвера чија је превасходна намена за инжењерске нумеричке прорачуне, OpenFOAM је превасходно намењен истраживачком раду.

У оквиру ове дисертације је извршено моделирање поларно-цилиндричних компоненти тензора турбулентног напона, као и његова имплементација у програмски код софтвера OpenFOAM. То је омогућено применом оригиналног и савременог математичко-програмерског поступка. Даљом применом овог поступка у извршено је и имплементирање једног од најсавременијих RANS модела турбуленције, који је Фуџихиро Хамба (Fujihira Hamba) развио 2017. године.¹

3.2 Осврт на референтну и коришћену литературу

У списку литературе је наведено 117 референци које су релевантне за истраживање које је кандидат спровео у оквиру предметне дисертације. Кандидат је обавио систематско претраживање литературе, пажљиво бирајући референце које за тему имају истраживање физичких феномена струјања у правим конусним дифузорима. При томе су обухваћене различите методе истраживања, али је посебна пажња посвећена савременим методама моделирања и нумеричких прорачуна турбулентних струјања. Ове методе су систематски анализиране, што је резултирало формирањем обједињеног прегледа доступних RANS модела турбуленције. На основу тога кандидат је издвојио најсавременије трендове у моделирању турбуленције RANS приступом, који чине окосницу предметне дисертације. Све ове референце представљају значајан извор информација, знања и идеја за методологију прорачуна турбулентних струјања, као и за анализу добијених резултата.

3.3 Опис и адекватност примењених научних метода

Предметна докторска дисертација се заснива на примени егзактних математичких метода трансформације одговарајућих једначина различитог степена сложености, у циљу

¹Hamba, F., *History effects on the Reynolds stress in turbulent swirl flow*, Physics of Fluids, Vol. 29, Issue 2, 02513-1 - 025103-11, 2017.

њиховог прилагођавања техникама објектно оријентисаног програмирања. Модификације моделских физичких једначина се заснивају на утемељеним конститутивним релацијама механике континуума и на контроли добијених нумеричких резултата дискретизованог облика једначина применом методе коначних запремина. При томе се врши строга контрола емпиријски уведених зависности у смислу њихових физичких заснованости и остварљивости добијених резултата, те њиховим валидацијом упоређивањем са расположивим експерименталним резултатима.

3.4 Применљивост остварених резултата

Због широке заступљености цилиндричних струјних геометрија у машинству, како при унутрашњим струјањима флуида, тако и при опструјавању осно-симетричних објеката, математичко-програмерски поступак који је развијен у предметној докторској дисертацији има значајну примену при нумеричким прорачунима турбулентних струјања у цилиндричним геометријама. Сложеност моделирања турбулентних струјања условљава стварање специјализованих модела турбуленције намењених специфичним струјним геометријама, у циљу повећања тачности нумеричких прорачуна струјања. Резултати добијени применом специјализованог модела „ $k-\epsilon$ diffuser“, који је развијен у предметној дисертацији доприносе повећању тачности прорачуна турбулентних вихорних и безвихорних струјања у специфичној струјној геометрији правих конусних дифузора. Ово је значајно, с обзиром на широку заступљеност правих конусних дифузора у хидро-постројењима великих електро-енергетских система.

Повећање тачности нумеричких прорачуна турбулентних струјања је значајно за процес пројектовања правих конусних дифузора, који је у данашње време постао незамислив без примене рачунара. Резултати остварени у овој дисертацији доприносе универзалности развијеног поступка нумеричког предвиђања поља брзине у правим конусним дифузорима. Ова универзалност се огледа у високом нивоу тачности нумеричког прорачуна струјања, независно од тога да ли је струјање у правом конусном дифузору са присуством вихора или не. При томе је дефинисан и правац даљег истраживања у смислу повећања тачности прорачуна применом овог специјализованог модела турбуленције.

3.5 Оцена достигнутих способности кандидата за самостални научни рад

Чланови Комисије сматрају да је кандидат кроз рад на докторској дисертацији показао да поседује неопходно знање да самостално препозна и систематски решава инжењерске и научне проблеме, примењујући при томе савремене научно-истраживачке методе. Кандидат је са великим трудом и савесношћу пажљиво проучавао постојећу литературу у вези са предметом истраживања. Извршио је велики број нумеричких прорачуна веома комплексног струјања, као и напредне анализе добијених резултата. Показао је да је достигао пуну способност за научни рад, уз изражену дозу самосталности у раду.

4 ОСТВАРЕНИ НАУЧНИ ДОПРИНОС

4.1 Приказ остварених научних доприноса

У оквиру рада на дисертацији потврђена су и проширена постојећа знања и као таква ова докторска дисертација представља научни допринос у области механике флуида.

Научни доприноси остварени радом на овој докторској дисертацији су:

- Сprovedени су опсежни, упоредни нумерички прорачуни струјања у правом конусном дифузору применом софтвера отвореног кода OpenFOAM и комерцијалног софтвера Ansys CFX, како би се, независно од избора софтвера који се користи за прорачун изоловали недостаци линеарних модела турбуленције са изотропном турбулентном вискозношћу. Овај научни допринос је потврђен публикавањем у раду [1] из категорије M22 и у раду [3] (одељак 4.3 Верификација научних доприноса). Дефинисан је оригиналан поступак визуелизације структуре тензора турбулентних напона преко његовог елипсоида чиме је извршена и анализа утицаја односа изотропног и анизотропног дела тензора на тачност моделирања. Овај научни допринос је потврђен публикавањем у радовима [2], [5].
- Развијени су оригинални математичко-програмерски поступци за моделирање компоненти тензора турбулентних напона у поларно-цилиндричним координатама и извршена њихова имплементација у софтвер отвореног кода OpenFOAM. Имплементиран је и турбулентни модел који је развио Фуџихиро Хамба (Fujihira Hamba) 2017. године. Резултати и потврда тачности математичко-програмерског поступка имплементације модела су потврђени публикавањем рада [4]. Додатно је формиран и у програмски код имплементиран специјализовани турбулентни модел за прорачун струјања у конусним дифузорима базиран на Хамбином приступу моделирања нелокалних ефеката.

4.2 Критичка анализа резултата истраживања

У данашње време, значајан део истраживања у било којој области, па тако и у области струјања флуида, се обавља применом нумеричких прорачуна. За научна истраживања су најпогоднији софтвери отвореног кода, због могућности њихове надградње, будући да су комплетан програмски код и начини имплементације одговарајућих алгоритама у потпуности доступни.

За прорачуне у предметној дисертације је примењена RANS методологија, која представља најстабилнији метод прорачуна турбулентних струјања, а такође и најповољнија у смислу захтева рачунарских ресурса. Са друге стране, она представља грубу физичку апроксимацију динамике турбулентних струјања, поготово у нехомогеној турбуленцији са израженом разликом у размерима турбулентних структура. Прорачуни применом симулација великих вртлога (LES) или комбинованог RANS-LES приступа моделирања турбуленције дају дубљи увид у физику струјних процеса у овим струјним доменама, али су много захтевнији у смислу рачунарских ресурса. Зато се у модерним истраживањима и даље користе и развијају турбулентни модели базирани на RANS приступу. Кандидат је спровео велики број нумеричких прорачуна струјања са ново формираним и имплементираним моделима турбуленције. Ако се узму у обзир и нумерички експерименти у процесу имплементације Хамбиног модела турбуленције и нумерички експерименти при развијању турбулентног модела „ $k-\epsilon$ diffuser“, долази се огромног броја извршених нумеричких прорачуна струјања, и до такође великог броја часова коришћења рачунарских ресурса.

Развијени аутоматизовани поступак визуелизације структуре и стања тензора турбулентних напона примењен при анализи резултата принудно-потенцијалног вихорног струјања у правом конусном дифузору може да се примени и на било који дифузор, и

за било који турбулентни модел. На тај начин се може стећи одређени увид о значају утицаја степена анизотропности тензора турбулентних напона на тачност прорачуна струјања применом било ког RANS модела турбуленције.

4.3 Верификација научних доприноса

Резултати истраживања у оквиру предметне докторске дисертације су објављени у следећим референцама:

Категорија M22:

- [1] **Novković, Dj.M.**, Burazer J.M., Ćočić A.S. (2017): *Comparison of different CFD software performances in the case of an incompressible air flow through a straight conical diffuser*, Thermal Science, 21 (Suppl. 3), S863 - S874, <https://doi.org/10.2298/TSCI161020329N>

Категорија M24:

- [2] **Novković, Dj.M.**, Burazer J.M., Ćočić A.S., Lečić M.R. (2018): *On the influence of turbulent kinetic energy level on accuracy of and LRR turbulence models*, Theoretical and Applied Mechanics, 45(2)139-149, <https://doi.org/10.2298/TAM171201009N>

Категорија M33:

- [3] **Novković Đ.M.**, Burazer J.M., Ćočić A.S., Lečić M.R. (2017): *Numerical research of swirl-free flow in Azad diffuser*, Proceedings of The 6th International Congress of Serbian Society of Mechanics, Turbulence Minisymposium, Mountain Tara, Serbia, June 19-21, Editors: M. P. Lazarević, D. Madjarević, I. Grozdanović, N. Zorić, A. Tomović, paper No. M2g, pp. 1-6, ISBN: 978-86-909976-6-7, COBISS.SR-ID 237139468.
- [4] **Novković Đ.M.**, Burazer J. M, Ćočić A. S, Lečić M. R. (2019): *Implementation of Hamba k-ε turbulence model in OpenFOAM software*, Proceedings of The 7th International Congress of Serbian Society of Mechanics, Turbulence Minisymposium, Sremski Karlovci, Serbia, June 24-26, Editors: M. P. Lazarević, S. Simić, D. Madjarević, I. Atanasovska, A. Hedrih, B. Jeremić, paper No. M3b, pp. 1-8, ISBN: 978-86-909973-7-4, COBISS.SR-ID 277232652,

Категорија M34:

- [5] **Novković Đ.M.**, Burazer J. M, Raković M. M, Lečić M. R. (2018): *Assessment of the turbulence modeling accuracy depending on the TKE level in swirl-free diffuser flow*, Proceedings of the 6th International Conference of Applied Science, ICAS2018, Faculty of Mechanical Engineering, University of Banja Luka, May 9-11.

5 ЗАКЉУЧАК

На основу прегледа и детаљне анализе докторске дисертације под називом „**Моделирање и нумерички прорачуни струјања нестишљивог флуида у правим конусним дифузорима**“ кандидата **Ђорђа М. Новковића**, дипл. инж. маш, Комисија за преглед, оцену и одбрану докторске дисертације констатује да урађена докторска дисертација представља оригиналан научни допринос у проучавању турбулентних струјања у правим конусним дифузорима, да је дисертација написана према свим стандардима научно-истраживачког рада и да испуњава све услове предвиђене Законом о високом образовању, стандардима и Статутом Машинског факултета Универзитета у Београду.

Комисија предлаже Наставно-научном већу Машинског факултета у Београду да овај Извештај прихвати, да дисертацију под насловом називом „Моделирање и нумерички прорачуни струјања нестишљивог флуида у правим конусним дифузорима“ кандидата **Ђорђа М. Новковића**, заједно са овим Извештајем, стави на увид јавности у складу са законским одредбама, и да потом целокупни материјал упути на коначно усвајање Већу научних области техничких наука Универзитета у Београду.

Београд, 27.06.2019. године

др Милан Лечић, редовни професор
Универзитет у Београду, Машински факултет

др Александар Тоћић, ванредни професор
Универзитет у Београду, Машински факултет

др Ђорђе Чантрак, ванредни професор
Универзитет у Београду, Машински факултет

др Маша Букуров, редовни професор
Универзитет у Новом Саду, Факултет техничких наука

др Никола Маричић, редовни професор у пензији
Универзитет у Приштини са привременим
седиштем у Косовској Митровици,
Факултет техничких наука у Косовској Митровици

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ
- МАШИНСКИ ФАКУЛТЕТ –
Број: 1070/4
Датум: 04.07.2019. године
Београд, Краљице Марије бр. 16

На основу члана 40. Закона о високом образовању („Службени гласник РС“, број 88/2017 и 27/2018-др. закон), члана 48. Правилника о докторским студијама, члана 64. Статута Машинског факултета (број 1450/4 од 14.06.2018. године) и члана 37. Правилника о докторским студијама Машинског факултета, Наставно-научно веће на седници одржаној 04.07.2019. године, донело је

ОДЛУКУ

Усваја се реферат Комисије о урађеној докторској дисертацији **„МОДЕЛИРАЊЕ И НУМЕРИЧКИ ПРОРАЧУНИ СТРУЈАЊА НЕСТИШЉИВОГ ФЛУИДА У ПРАВИМ КОНУСНИМ ДИФУЗОРИМА“** студента **ЂОРЂА НОВКОВИЋА**, дипл. инж. маш.

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

Универзитет у Београду је својом Одлуком број 61206-3934/2-17, од 30.10.2017. године, дао сагласност на предлог теме докторске дисертације.

Објављени радови студента у часописима међународног значаја:

Категорија M22:

[1] Novkovic, Dj.M., Burazer J.M., Cocic A.S. (2017): Comparison of different CFD software performances in the case of an incompressible air flow through a straight conical diffuser, Thermal Science, 21 (Suppl. 3), S863 - S874,
<https://doi.org/10.2298/TSCI161020329N>

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

ДЕКАН
МАШИНСКОГ ФАКУЛТЕТА

проф. др Радивоје Митровић