

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)

208/5

(Број захтева)

21.05.2014. 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:

НИКОЛЕ (СВЕТОЗАР) МИРКОВА

(име, име једног од родитеља и презиме)

КАНДИДАТ **НИКОЛА (СВЕТОЗАР) МИРКОВ** уписан на Докторске студије 2007. године.

(име, име једног од родитеља и презиме)

Подноео је захтев за израду докторске дисертације:

НУМЕРИЧКА СИМУЛАЦИЈА ТУРБУЛЕНТНИХ СТРУЈАЊА НАД РЕАЛНИМ КОМПЛЕКСНИМ ТЕРЕНИМА

Универзитет је дана 31.03.2014. год. својим актом под бр. 61206-1062/2-14 дао сагласност на предлог теме докторске дисертације која је гласила:

НУМЕРИЧКА СИМУЛАЦИЈА ТУРБУЛЕНТНИХ СТРУЈАЊА НАД РЕАЛНИМ КОМПЛЕКСНИМ ТЕРЕНИМАКомисија за оцену и одбрану докторске дисертације кандидата: **НИКОЛА (СВЕТОЗАР) МИРКОВ**

(име, име једног од родитеља и презиме)

Образована је на седници одржаној 19.02.2015. године, одлуком факултета под бр. 208/2, у саставу:

Име и презиме члана комисије	звање	научна област	установа у којој је запослен
1. Др Бошко Рашуо	Ред. проф.	Ваздухопловство	Машински факултет Београд
2. Др Александар Бенгин	Ванр. проф.	Ваздухопловство	Машински факултет Београд
3. Др Мирко Динуловић	Ванр. проф.	Ваздухопловство	Машински факултет Београд
4. Др Жарко Стевановић	Научни саветник	Енергетика и енергетска ефикасност	ИНН Винча Београд
5. Др Вукман Бакић	Виши научни сарад.	Машинство, енергетика, обновљиви извори енергије	ИНН Винча Београд

Наставно-научно веће факултета прихватило је извештај Комисије за оцену и одбрану докторске дисертације на седници одржаној дана 02.04.2015. године.

ДЕКАН
МАШИНСКОГ ФАКУЛТЕТА

Проф. др Милорад Милованчевић

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: 208/4

Датум: 02.04.2015. године

Београд, Краљице Марије 16

На основу чл. 30. Закона о високом образовању (Сл.гласник 76/05, 100/07 и 44/10) и чл. 37. Правилника о докторским студијама Машинског факултета Универзитета у Београду и извештаја Комисије у саставу: проф.др Бошко Рашуо, ментор, проф.др Александар Бенгин, проф.др Мирко Динуловић, др Жарко Стевановић, научни саветник, ИНН Винча Београд и др Вукман Бакић, виши научни сарадник, ИНН Винча Београд, о оцени докторске дисертације „Нумеричка симулација турбулентних струјања над реалним комплексним теренима“ докторанта Николе Миркова, дипл.инж.маш., Наставно-научно веће Машинског факултета на седници одржаној 02.04.2015. године, донело је следећу

ОДЛУКУ

Усваја се извештај за оцenu и одбрану докторске дисертације **„НУМЕРИЧКА СИМУЛАЦИЈА ТУРБУЛЕНТНИХ СТРУЈАЊА НАД РЕАЛНИМ КОМПЛЕКСНИМ ТЕРЕНИМА“** докторанта **НИКОЛЕ МИРКОВА**, дипл.инж.маш.

Извештај о оцени и одбрани докторске дисертације, по истеку рока од 30 дана увида јавности, доставља се на сагласност Већу научних области техничких наука Универзитета у Београду.

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

ДЕКАН
МАШИНСКОГ ФАКУЛТЕТА

Проф.др Милорад Милованчевић

НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ

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

Одлуком 208/2 бр. од 19.02.2015. године, именовани смо за чланове Комисије за преглед, оцелу и одбрану докторске дисертације кандидата Николе Миркова, дипл. инж. маш. под насловом

НУМЕРИЧКА СИМУЛАЦИЈА ТУРБУЛЕНТНИХ СТРУЈАЊА НАД РЕАЛНИМ КОМПЛЕКСНИМ ТЕРЕНИМА

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 Никола Мирков, 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).

Кандидат Никола Мирков, дипл. инж. маш. пријавио је израду докторске дисертације 20. јануара. 2014. године, бр. 118/1, 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 6. фебруара 2014. године, бр. 118/3, именована је Комисија за оцелу 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 Жарко Стевановић, научни саветник, Институт за Нуклеарне Науке Винча и Др Вукман Бакић, виши научни сарадник, Институт за Нуклеарне Науке Винча.

Комисија је 19. фебруара 2014. године, бр. 118/4, 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 „Нумеричка симулација турбулентних струјања над реалним комплексним теренима“ може бити предмет докторске дисертације.

На захтев Николе Миркова, дипл. инж. маш. и извештаја Комисије у саставу: Проф. др Бошко Рашуо, ментор, Проф. др Александар Бенгин, Проф. др Мирко Динуловић, др Жарко Стевановић, научни саветник, Институт за Нуклеарне Науке Винча и др Вукман Бакић, виши научни сарадник, Институт за Нуклеарне Науке Винча, бр. 118/4 од 19. фебруара 2014. године, а на основу чл. 128. Закона о високом образовању, Наставно-научно веће Машинског факултета у Београду на седници од 20. фебруара 2014. године, донело је одлуку бр. 118/5 да се прихвата предлог о испуњености услова и о научној заснованости теме докторске дисертације „Нумеричка симулација турбулентних струјања над реалним комплексним теренима“ кандидата Николе Миркова, 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 „Нумеричка симулација турбулентних струјања над реалним комплексним теренима“ кандидата Николе Миркова, дипл. инж. маш., под менторством редовног професора др Бошка Рашуо, 31. марта 2014. године, одлука бр. 61206-1062/2-14.

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 3. априла 2014. год. донео закључак бр. 792/1 да се одобри рад на теми докторске дисертације „Нумеричка симулација турбулентних струјања над реалним комплексним теренима“ кандидату Николи Миркову, 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 208/1 од 9. фебруара 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, др Жарко Стевановић, научни саветник, Институт за Нуклеарне Науке Винча и др Вукман Бакић, виши научни сарадник, Институт за Нуклеарне Науке Винча. На седници Наставно-научног већа 19. фебруара 2015. године је једногласно усвојено обавештење о завршетку дисертације кандидата Николе Миркова, дипл. инж. маш. и предлог састава Комисије за оцену и одбрану докторске дисертације (бр. 208/2 од 19. фебруара 2014. године).

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

Никола Мирков је рођен 13.09.1982. године у Београду. Основну школу и гимназију је завршио у Београду. Основне студије на Машинском факултету Универзитета у Београду уписао је школске 2001./2002. године, где је и дипломирао на катедри за Ваздухопловство са просечном оценом 8.06/10. Дипломски рад са темом „Моделирање ламинарно-турбулентног

прелазног региона и утицај на перформансе летелица“ одбранио је у децембру 2007. године са оценом 10. Од априла 2008. године запослен у Лабораторији за Термотехнику и Енергетику Института за Нуклеарне Науке Винча, где носи звање истраживач-сарадник.

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).

У току рада у Лабораторији за Термотехнику и Енергетику Института за Нуклеарне Науке Винча кандидат Никола Мирков је био ангажован на следећим истраживачким пројектима Министарства науке и технолошког развоја:

- „Развој, моделирање струјно-термичких процеса и оптимизација рада акумулатора топлоте у грејним системима са топловодним котлом на биомасу”. Евиденциони број TR 18035 (2008.-2010.).
- „Развој и примена комплементарних метода за процену енергетске ефикасности и индикатора квалитета унутрашњег простора стамбених објеката на подручју Београда”. Евиденциони број TR 18004 (2008.-2010.).

Као и на пројекту Европске Комисије (7th Framework Programme):

- „*Public health impacts in Urban environments of Greenhouse gas Emissions reduction strategies*”. GA No. 265325.

Тренутно је као истраживач сарадник ангажован на следећим пројектима Министарства науке и технолошког развоја:

- „Унапређење енергетских карактеристика и квалитета унутрашњег простора у зградама образовних установа у Србији са утицајем на здравље”. Евиденциони број III42008 (2010.-2014.).
- „Развој новог метеоролошког мерног стуба за карактеризацију турбулентних параметара ветра”. Евиденциони број TR 33036 (2010.-2014.).

Кандидат Никола Мирков је аутор више радова објављених на међународним конференцијама и међународним часописима. Радови кандидата до сада имају четрнаест цитата (извор *Google Scholar Citation*).

Основни правац рада кандидата током докторских студија и великим делом током рада на пројектима Технолошког развоја је био нумеричко испитивање турбулентних струјања у атмосферском окружењу за потребе ветроенергетике и студија утицаја на животну средину.

Кандидат је у оквиру међународне сарадње учествовао у пројекту “*HPC-Europa 2 - Pan-European Research Infrastructure on High-Performance Computing*”. GA No. 228398.

Кандидат је у оквиру овог пројекта, у два наврата 2009. и 2010. (у укупном трајању од четири месеца) године боравио на Техничком Универзитету Делфт-Холандија (*Delft University of Technology*). Том приликом се усавршавао и радио је на развоју савремених нумеричких алгоритама и софтверских алатки за паралелне прорачуне струјања у атмосферском граничном слоју. Добијени резултати прорачуна су верификовани подацима из мерења на реалним теренима у атмосферском окружењу.

2. ОПИС ДИСЕРТАЦИЈЕ

2.1. Садржај дисертације

Докторска дисертација „Нумеричка симулација турбулентних струјања над реалним комплексним теренима“, кандидата Николе С. Миркова дипл. инж. маш. изложена је на 108 страна.

Дисертација садржи следећа поглавља:

1. Увод,
2. Теоријске основе математичког модела,
3. Нумерички метод за симулацију ваздушних струјања над комплексним теренима,
4. Верификација нумеричког алгорита - прорачунске грешке и прецизност нумеричке апроксимације,
5. Валидација математичког модела при турбулентним струјањима над идеализованим конфигурацијама,
6. Валидација математичког модела при турбулентним струјањима над реалним комплексним конфигурацијама,
7. Закључак и препоруке,
8. Прилози

Дисертација садржи списак од 126 коришћених референци и цитиране литературе.

2.2. Кратак приказ појединачних поглавља

У првом поглављу дисертације јасно је изложена основа проблематике и мотивација за њено проучавање. Истакнуто је да је предмет истраживања тезе интердисциплинарног карактера између опште и прорачунске аеродинамике, ветро-енергетике и микрометеорологије. Истакнуто је да свака од тих области у контактном подручју и оставља траг сопствене праксе, и да је пожељан приступ, који се базира на њиховим основним принципима.

У наставку уводног поглавља приказани су главни циљеви истраживања који су постављени у тези. Изнесене су основне претпоставке и наглашене одлуке мотивисане проблемима приказаним у уводном делу. У овом делу су на основу изнетог прегледа релевантне научне литературе формиране основне хипотезе које овом дисертацијом треба потврдити.

У закључку уводног поглавља представљена је структура тезе. Основни циљ дисертације је унапређење нумеричког алгорита са више аспеката, па је у складу са тим, део тезе посвећен нумеричким резултатима подељен на део где је извршена верификација нумеричког алгорита и поглавља која приказују валидацију турбулентних модела струјања.

У другом поглављу дисертације су изнесене основне теоријске поставке предложеног математичког модела за турбулентна ваздушна струјања. Као математички модел коришћене су једначине Навије-Стокса, а затварање скупа једначина за турбулентно струјно поље усвојен је приступ моделирању турбуленције коришћењем претпоставке о турбулентној вискозности. Предмет симулације је струјање типа граничног слоја, тзв. атмосферски гранични слој, што је предодредило склоп тема које су обухваћене у овом поглављу. Оно што је описано су карактеристични проблеми моделирања турбуленције повезани са захтевима које поставља сложена неравномерна топографија терена. Као посебно отежавајући фактори су наведени закривљеност струјница, сепарација граничног слоја и проблеми до којих долази у стагнационој тачки на истуреним деловима топографије. Ти фактори су доведени у везу са познатим проблемима прорачунске аеродинамике турбулентних струјања и дат је опис савремених приступа за њихово адекватно третирање. У овом поглављу су детаљно обрађен феномен физичке остваривости, и математички критеријуми ограничења у турбулентним моделима који доводе до њиховог испуњења.

Дискутоване су конститутивне релације вишег реда, појам анизотропије тензора турбулентних напона, нелинеарних модела базираних на концепту турбулентне вискозности и експлицитни алгебарски модели Рејнолдсових напона. Због актуелности приступа посебно, детаљно је обрађен нестационарни приступ симулацији турбулентних струјања. Изнесена је мотивација за таквим приступом као адекватном алатком за представљање турбулентног транспорта. Дискутоване су URANS (*Unsteady Reynolds Averaged Navier-Stokes*), SAS (*Scale Adaptive Simulation*), и хибридна RANS/LES (*Reynolds Averaged Navier-Stokes/Large-Eddy Simulation*) методологија. Посебно је разматрана хибридна методологија због њене актуелности и она заузима значајно место у излагању у овом поглављу.

Нумеричка симулација струјања је базирана на дискретизацији Навије-Стоксових једначина помоћу методе коначних запремина и тој проблематици је посвећено комплетно треће поглавље. Да би се постојећи алгоритми прорачуна унапредили и прилагодили примени за изразито неортогоналне прорачунске мреже предложен је низ унапређења у бројним аспектима алгоритма. Ово поглавље садржи опис најзначајнијег дела научних доприноса ове дисертације.

На самом почетку поглавља се приступило апстракцији концепта неортогоналне ћелије која ће бити објекат посматрања и контекст у коме се врши дискретизација парцијалних диференцијалних једначина струјног поља. Објашњено је порекло неортогоналности и она је доведена у везу са начином на који се дигитална мапа елевације терена третира приликом стварања прорачунске мреже. Као квантитативни показатељ уведен је оригинални параметар тзв. отклон тачке пресека. Изнесено је како неправилна интерполација променљивих у контексту неортогоналних мрежа, проузрокује грешку у нумеричкој интеграцији која је све израженија што су неправилности на мрежи веће.

У наставку поглавља систематски се приступило излагању свих саставних делова алгоритма апроксимације методом коначних запремина на примеру генералисане транспортне диференцијалне једначине као прототип једначине. Посебно је изложена идеја о реконструкцији градијената зависно од променљивих величина у центру ћелије, дискретизацији нестационарног, затим конвективног и дифузионог члана генералисане транспортне диференцијалне једначине, описан је третман изворних чланова, дат је опис итеративних метода које су коришћене за решавање линеарних система проистеклих из дискретизације и метода побољшања условљености система (*preconditioning*). Посебно је детаљно описан тзв. секвенцијални приступ решавању система спрегнутих диференцијалних једначина струјања и турбуленције. Метод је заснован на решавању једначине корекције притиска и полу-имплицитно спрежање поља притисака и брзина и приказан је као основа коришћеног алгоритма.

Представљен је оригинални приступ реконструкцији ћелијски центрираних градијената базиран на методи најмањих квадрата чије је решавање спроведено захваљујући тзв. *QR* декомпозицији и која има за циљ минимизацију броја аритметичких операција током обнављања вредности поља градијената. Ово је посебно значајан аспект алгоритма прорачуна јер како је показано, неколико других компоненти алгоритма зависи од њега.

Дат је преглед метода ограничавања флуксева за апроксимацију конвективног члана ради избегавања појаве локалних екстрема и контроле тоталне варијације вредности интерполиране променљиве. Дат је приказ флексибилног алгоритма који је прилагођен деформисаним мрежама над топографијом.

У делу посвећеном дискретизацији дифузног члана приказана је генерализација више приступа корекције неортогоналности за интерполацију поља градијената, на основу које су изведене две нове генералне формулације.

Веома значајан за питање нумеричке ефикасности је приступ решавању линеарног система једначина насталих дискретизацијом и овоме је посвећен наредни сегмент поглавља. Изложен је итеративни приступ решавању разређених линеарних система, на основу групе метода Крилова и предложени су нови начини побољшања условљености система помоћу

тзв. *SIP (Strongly Implicit Procedure)* алгоритма. Прилози који су дати на крају дисертације дају комплетан изворни код итеративних алгоритама изложених у овом поглављу.

Као најзначајнији сегмент итеративног секвенцијалног решавања Навије-Стоксових једначина, у даљем тексту је описан начин спрезања поља брзине и поља притиска. Представљена је процедура која је базирана на једначини корекције притиска и варијацији *SIMPLE (Semi Implicit method for Pressure Linked Equations)* алгоритма који обухвата и корекције неортогоналности ради ефикасније конвергенције итеративног прорачунског процеса на јако неортогоналним мрежама.

У четвртм, петом и шестом поглављу приказани су резултати нумеричких прорачуна са циљем верификације имплементације алгоритма и валидације математичког модела.

У четвртм поглављу је приказана верификација нумеричког алгоритма представљеног у дисертацији на низу проблема који су уведени градицијом од једноставнијих нумеричких експеримената са аналитичким решењем и контролисаним синтетичким деформацијама прорачунске геометрије тј. оних тест случајева који се односе на испитивање само појединих аспеката алгоритма до, на послетку, сложених тест случајева са реалном применом.

У петом поглављу приказани су резултати који се односе на симулацију ваздушних струјања над идеализованим конфигурацијама. Карактеристично за те случајеве је да су топографске неправилности задате аналитички, а експериментални подаци за проверу нумеричких симулација су добијени испитивањем у аеротунелу, при контролисаним условима да би се остварио ефекат атмосферског граничног слоја.

У шестом поглављу изведена је компарација са реалним мерењима урађеним у атмосферској размери, која има за циљ да изложи испитивању целокупну спрегу система: математички модел-нумеричка дискретизација-програмска имплементација. За поређење резултата одабран је случај брда Болунд у Данској, на коме су извршена детаљна мерења, које данас представља најзначајнији тест случај за нумеричке прорачуне. Дати су вертикални профили усредњених брзина и турбулентних параметара где је остварено врло добро поклапање са експерименталним мерењима.

У завршном поглављу дисертације изнети су детаљни закључци са критичком анализом остварених резултата спроведених нумеричких експеримената. Такође су дате могуће смернице даљих истраживања из области дисертације. Истакнут је научни допринос дисертације као и могућност примене добијених резултата у реалним условима као и приликом анализе реалних струјања у атмосферском окружењу са применом у ветроенетргетици, очувању животне средине, као и у свим другим ситуацијама где аеродинамика под утицајем реалне топографије игра значајну улогу.

3. ОЦЕНА ДИСЕРТАЦИЈЕ

3.1. Савременост и оригиналност

Докторска дисертација под називом „Нумеричка симулација турбулентних струјања над реалним комплексним теренима“ даје савремен и оригиналан приступ истраживању нумеричке апроксимације у домену методе коначних запремина. Научни допринос ове дисертације представља значајан искорак и пре свега се огледа у развоју нових дискретизационих процедура које значајно побољшавају апроксимацију у ситуацијама изразито неортогоналних прорачунских мрежа формираних над комплексним реалним топографијама. Иновативне методе значајно утичу на унапређење нумеричке ефикасности и тачност апроксимације како је евидентирано кроз низ нумеричких експеримената како на идеализованим тако и на реалним конфигурацијама. Област у коме је остварен научни допринос је веома актуелан, а посебан квалитет истраживању даје и могућност примене постигнутих резултата на шире подручје прорачунске аеродинамике.

3.2. Осврт на референтну и коришћену литературу

У докторској дисертацији је коришћена обимна литература из области нумеричке апроксимације парцијалних диференцијалних једначина пре свега методом коначних запремина, затим из области прорачунске аеродинамике, моделирања турбулентних струјања, микроклиматологије и енергије ветра. 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 нумеричке апроксимације, и изворима грешака које настају у моделирању и симулацији турбулентних струјања, уопште, а посебно са освртом на симулацију дејства ветра над комплексним тереном због примене у енергетици. 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 генералисаних и унапређених формулација 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 приступу решавања парцијалних једначина које описују турбулентно струјање нестишљивог флуида и сви научни резултати су реализовани кроз нумеричке симулације тј. уз помоћ нумеричких експеримената.

Математичко моделирање турбулентних струјања засновано је на Рејнолдсовим усредњеним Навије-Стоксовим једначинама и концепту турбулентне вискозности. За затварање система једначина искоришћени су познати диференцијални двоједначински модели и њихове варијације. Позната ограничења над прорачунским ресурсима, која су потврђена у научној и стручној литератури, а која су потребна да би се директно симулирало турбулентно кретање на свим сачињавајућим размерама и пресудно су утицале на актуелност оваквог приступа. Дисертација разматра одређена побољшања која имају за циљ умањење грешака моделирања у условима наметнутим типом проучавних конфигурација.

Као основа нумеричке апроксимације је одабран метод коначних запремина због његове велике заступљености у пољу прорачунске аеродинамике и из разлога нумеричке ефикасности прорачуна и тачности апроксимације које одговарају циљаним областима примене. Широка заступљеност ове метода обезбеђује ширу примењивост резултата дисертације и већи значај за практичне примене. Посебна предност методе коначних запремина састоји се у интерпретацији величина које се појављују током процеса дискретизације, а које имају интуитивно и јасно дефинисано физичко значење и утемељење у општим законима одржања.

За верификацију нумеричке процедуре одабрано је испитивање помоћу тзв. произведених решења (*manufactured solution*) која представљају адекватан приступ када постоји потреба да се извесни аспекти алгорита издвоје и подвргну засебној процени. Поред произведених решења за испитивање грешке дискретизације искоришћена су позната аналитичка решења Навије-Стоксових једначина. За потврђивање теоретски предвиђеног реда апроксимације употребљен је метод конвергенције мрежа при коме је посматрана брзина опадања укупне грешке апроксимације, која садржи грешку приликом дискретизације парцијалних једначина и грешке заокруживања бројева, са повећавањем просторне резолуције.

За валидацију модела турбуленције изведено је поређење са резултатима мерења над идеализованим и реалним конфигурацијама. Резултати прорачуна над идеализованим конфигурацијама су валидирани кроз поређења са резултатима мерења у аеротунелу. Посебно значајан аспект представља поређење резултата прорачуна са мерењима учињеним на атмосферској размери. Изазов постављен у овом истраживању се огледа у захтеву да се

формулише адекватни нумерички модел способан да опише ефекте турбуленције у предметном струјном пољу и да се резултати изведених симулација пореде са мерењима изведеним над реалним комплексним тереном у атмосферској размери и окружењу. Таква мерења су сама изизетно комплексна и ретка.

3.4. Применљивост остварених резултата

Кандидат Никола С. Мирков је радом на докторској дисертацији остварио значајне научно-истраживачке резултате са трајном научном вредношћу и практичном применљивошћу у области прорачунске аеродинамике са посебном применом на струјања у атмосферском граничном слоју над комплексном орографијом.

Проблематика која је обухваћена овом дисертацијом је актуелна и значајна у следећим областима примене: енергија ветра – испитивање потенцијала локације за искоришћење енергије ветра, такође, у оквиру исте области, одређивање нестационарних ефеката турбуленције на замор ветротурбине – одређивање класе ветротурбине, турбулентни транспорт пасивних примеса – испитивање ширења загађивача у оквиру студија о утицају на животну средину, као и бројне примене у аеродинамици лоше-опструјаваних тела.

Оригинални резултати остварених нумеричких истраживања примењени су за развој и верификацију предложеног нумеричког алгорита. У случају појединих аспеката нумеричког алгорита дати оригинални изворни кодови (у прилогу тезе) омогућавају примењивост и поновљивост у другим нумеричким истраживањима и олакшавају дисеминацију резултата.

Развијени и верификовани нумерички модел је примењен при испитивању аеродинамичких карактеристика опструјавања реалних конфигурација у студијама испитивања микроклиматолошких услова на актуелним локацијама за изградњу фарми ветротурбина.

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 радно искуство кандидата у области прорачунске аеродинамике и одлична теоријска знања 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:

- Развијен је и имплементиран нови, значајно унапређени, алгоритам за симулацију струјања нестишљивог флуида базираних на методи коначних запремина, предвиђених за изразито неортогоналне прорачунске мреже, са посебним нагласком на мреже настале алгебарском екструзијом над реалним комплексним теренима задатим реалним топографским подацима елевације терена, а намењених за симулацију тубулентних струјања у атмосферском граничном слоју.
- Предложен је оригинални критеријум квантификације неортогоналности која настаје код предметних прорачунских мрежа над комплексном

орографијом, помоћу тзв. отклоне тачке пресека (*Intersection point offset*), који се разликује од досадашње праксе где је као главни показатељ заступљена искошеност ћелије (*cell skewness*). Такав приступ омогућио је класификацију и генерализацију постојећих процедура за корекцију неортогоналности при методи коначних запремина и формулисање нових корекција које су дале значајна побољшања у тачности апроксимације једначина струјања нестишљивог флуида помоћу методе коначних запремина.

- Дата је оригинална и генерализована формулација за нумеричку апроксимацију дифузионог члана у генералној транспортној диференцијалној једначини као прототипу за дискретизацију основних једначина струјања флуида. Из генерализоване формулације су затим изведене две потпуно нове методе апроксимације дифузионог члана. У прорачунским тестовима нове формулације су показале унапређена нумеричка својства у односу на конвенционалне приступе који су заступљени у широко распрострањеним комерцијалним програмима за прорачунску механику флуида.
- Приказан је оригинални и систематизовани приступ деформације мреже који омогућава појаву низа неповољних и за нумерички алгоритам отежавајућих карактеристика. Овај приступ је коришћен приликом верификације нумеричког алгоритма где је одређен утицај ових фактора на тачност нумеричке апроксимације код поређења са произведеним решењима, аналитичким решењима и код упоредно тестираних нумеричких алгоритама.
- Испитана је по први пут метода унапређења кондиционираности линеарних система на бази SIP итеративног метода који је примењен на нестационарне итеративне алгоритме на бази подпростора Крилова. У прорачунским тестовима датим у тези је приказана супериорна конвергенција предложеног алгоритма у односу на претходно испитане итеративне методе за линеарне системе настале дискретизацијом диференцијалних једначина које описују струјање нестишљивог флуида на структурираним неортогоналним прорачунским мрежама и анализирана је прорачунска ефикасност датог алгоритма. У прилогу тезе су дати комплетни изворни кодови ради омогућења поновљивости предложених резултата.
- Представљена је нова метода реконструкције градијената на основу методе најмањих квадрата која минимизира број аритметичких операција приликом реконструкције поља градијената и даје побољшане резултате у комплексним прорачунским конфигурацијама.
- Унапређене су интерполационе процедуре у условима неортогоналних мрежа ради остваривања теоретски предвиђеног реда тачности апроксимације.
- По први пут је Анализа главних компоненти (*Principal Component Analysis - PCA*) примењена за вођење избора конвективних шема на основу већег броја резултата нумеричких експеримената.

- Представљен је значајно побољшани приступ корекција неортогоналности у секвенцијалном алгоритму спрезања поља притиска и брзине. Унапређен је алгоритам за решавање једначине корекције притиска како би била омогућена несметана конвергенција итеративног метода спрезања поља притиска и брзине за изразито неортогоналне геометрије.
- На одабраним моделима турбуленције уведена су, по први пут, оригинална ограничења физичке остваривости и испитан њихов утицај на тачност представљања променљивих у струјном пољу на основу искуства и поређења са постојећим мерењима на реалном терену (случај *Bolund hill*, Данска).

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 комплексни нумерички алгоритам представља значајан напредак у третирању циљаних проблема турбулентних струјања над комплексним реалним топографијама у погледу умањења грешака нумеричке апроксимације математичких модела, грешака моделирања и са становишта побољшане нумеричке ефикасности.

Изложени резултати демонстрирају примењивост алгоритма у комплексним и реалним случајевима. Приступ је верификован и има вредност и са теоретске стране у погледу општости апроксимације тако и са практичне стране где је могућа његова реална примена у пројектима енергије ветра као основне практичне примене, а у ширем контексту у свим проблемима прорачунске аеродинамике који подразумевају проучавање лоше опстрјаваних тела сложене геометрије.

4.3. Верификација научних доприноса

Кључни резултати и научни допринос докторске дисертације су верификовани у научним часописима са SCI листе:

- Радови у врхунском међународном часопису (M21):

1. **N. Mirkov**, B. Rasuo, S. Kenjeres, On the improved finite volume procedure for simulation of turbulent flows over real complex terrains, *Journal of Computational Physics*, 287, pp. 18-45, 2015. Elsevier Ltd., (ISSN 0021-9991), IF = 2.485,

- Радови у међународном часопису (M23):

1. Z. Stevanovic, **N. Mirkov**, Z. Stevanovic, A. Stojanovic - Validation of atmospheric boundary layer turbulence model by on-site measurements, *Thermal Science* 14(1), pp. 199-207, 2010. ISSN 0354-9836; IF = 1.45,

- Радови у међународним часописима (M24):

- 1 **N. Mirkov** and B. Rašuo, Bernstein Polynomial Collocation Method for Elliptic Boundary Value Problems, *PAMM*, WILEY--VCH Verlag, ISSN: 1617-7061, Germany, Vol. 13, Issue 1, 2013, Pages: 421–422, DOI: 10.1002/pamm.201310206,

- 2 B. Rašuo and N. **Mirkov**, On the possibility of using Coanda Effect for Unmanned Aerial Vehicles – a numerical investigation, PAMM, Vol. 14, Issue 1, 2014, Pages: 627–628, DOI 10.1002/pamm.201410301, ISSN: 1617-7061, Wiley-VCH Verlag, Germany,
 - 3 **Mirkov**, N., Rasuo, B., A Bernstein Polynomial Collocation Method for the Solution of Elliptic Boundary Value Problems. Journal: CoRR Vol. reprint arXiv: 1211.3567, 11/2012, ARXIV, 21 page, Bibliographic Code: 2012arXiv1211.3567M, Cornell University Library, 2012,
- Радови у међународним тематским зборницима (M14):
 1. N.**Mirkov**, S. Kenjeres - Numerical simulation of atmospheric boundary layer flow over complex terrain - The Bolund hill case, Science and Supercomputing in Europe 2009 – Research highlights, CINECA – *Consorzio Interuniversitario*, 2009. p.43, ISBN 978-88-86037-23-5
 2. N. **Mirkov**, S. Kenjeres - Numerical Simulation of Turbulent Environmental Flows Using Hybrid RANS/LES Approach, Science and Supercomputing in Europe 2010 – Research highlights, CINECA– *Consorzio Interuniversitario*, 2010. p. 74, ISBN 978-88-86037-23-5
 - Радови у домаћим часописима (M51):
 1. Ж. Стевановић, Н. **Мирков**, Ж. Стевановић, Б. Грубор – Одржива изградња ветроелектрана у региону Источне Србије, Термотехника 38(1), стр. 47-61, 2012. ISSN 0350-218X,
 2. Н. **Мирков**, Ж. Стевановић, Б. Грубор, Ж. Стевановић – Утицај стабилности атмосфере на вертикалне профиле брзине ветра, Термотехника 36(1), стр. 55-69, 2010. ISSN 0350-218X,
 - Радови прикаани на међународним скуповима (M33):
 1. N. **Mirkov**, B. Rasuo – Numerical Simulation of Air Jet Attachment to Convex Walls and Applications, Proceedings of 27th International Congress of The Aeronautical Sciences, Nice, France, 2010., p.1-5, ICAS2010-P2-13, ISBN 978-9565333-0-2, CD-Rom,
 2. N. **Mirkov**, B. Rasuo – Maneuverability of an UAV with Coanda effect based lift production, Proceedings of 28th International Congress of The Aeronautical Sciences, Brisbane, Australia, 2012., p.1-6, ICAS2012-P2.18, ISBN 978-9565333-1-9, CD-Rom,
 3. N. **Mirkov**, B. Rašuo, Flow Patterns in Air Conditioned Room, 4th European Postgraduate Fluid Dynamics Conference, 3rd–7th July 2010, ESPCI-Paris Tech (École Supérieure de Physique et de Chimie Industrielles) and PMMH (Physique et Mécanique des Milieux Hétérogènes), Paris, France, (strana 8).
 4. Z. Stevanovic, N. **Mirkov**, Z. Stevanovic, B. Grubor, M.Djurovic-Petrovic - Referent wind speed and turbulence intensity estimation and on-site wind turbine classification, Proceedings of 16th Symposium on Thermal Science and Engineering of Serbia, Sokobanja, Serbia, October 22-25, 2013., ISBN 978-86-6055-044-8.

5. ЗАКЉУЧАК И ПРЕДЛОГ

Докторска дисертација под називом „Нумеричка симулација турбулентних струјања над реалним комплексним теренима“, кандидата Николе Миркова, дипл. инж. маш., садржи савремен и оригиналан научни допринос, који омогућава целовиту анализу разматраних проблема у вези са нумеричком симулацијом турбулентних струјања при изразито неортогоналним геометријама, а са посебном наменом за струјања ветра над реалним теренима са неуниформној топографијом. На основу онога што је приказано у докторској дисертацији и чињенице да је анализирана проблематика изузетно актуелна, са задовољством се констатује да је кандидат Никола Мирков, 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, а посебно у истраживању струјања ветра над комплексним теренима приликом процене потенцијала локације за искоришћење енергије ветра.

На основу прегледа докторске дисертације од стране Комисије за оцену и одбрану докторске тезе под називом „НУМЕРИЧКА СИМУЛАЦИЈА ТУРБУЛЕНТНИХ СТРУЈАЊА НАД РЕАЛНИМ КОМПЛЕКСНИМ ТЕРЕНИМА“, кандидата Николе Миркова, 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 27. 03. 2015. год.

ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ

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

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

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

.....
Др Жарко Стевановић, научни саветник, Институт за Нуклеарне Науке Винча

.....
Др Вукман Бакић, виши научни сарадник, Институт за Нуклеарне Науке Винча

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ
- МАШИНСКИ ФАКУЛТЕТ –
Број:208/5
Датум: 02.04.2015. године
Београд, Краљице Марије бр. 16

На основу члана 63. Статута Машинског факултета Универзитета у Београду број 1876/1 од 04.10.2013. године и члана 37. Правилника о докторским студијама, Наставно-научно веће на седници одржаној 02.04.2015. године, донело је

ОДЛУКУ

I Прихвата се извештај о позитивној оцени урађене докторске дисертације коју је поднео **НИКОЛА МИРКОВ**, дипл.инж.маш. и одобрава јавна одбрана дисертације по добијању сагласности од Универзитета, под насловом: „**НУМЕРИЧКА СИМУЛАЦИЈА ТУРБУЛЕНТНИХ СТРУЈАЊА НАД РЕАЛНИМ КОМПЛЕКСНИМ ТЕРЕНИМА**“

II Универзитет је дана 31.03.2014. године, својим актом број 61206-1062/2-14 дао сагласност на предлог теме докторске дисертације кандидата.

III Радови кандидата у часопису међународног значаја:

1. **N. Mirkov**, B. Rasuo, S. Kenjeres, On the improved finite volume procedure for simulation of turbulent flows over real complex terrains, *Journal of Computational Physics*, 287, pp. 18-45, 2015. Elsevier Ltd., (ISSN 0021-9991), IF = 2.485

Одлуку доставити: кандидату, ментору, Катедри за ваздухопловство и архиви факултета.

ДЕКАН
МАШИНСКОГ ФАКУЛТЕТА

Проф.др Милорад Милованчевић