

## НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ ФАКУЛТЕТА ИНЖЕЊЕРСКИХ НАУКА

**Предмет:** Извештај Комисије за оцену и одбрану докторске дисертације кандидата Александра Николића, дипломираног машинског инжењера.

Одлуком Већа за техничко-технолошке науке Универзитета у Крагујевцу, број IV-04-772/7 од 10.10.2018. године, именовани смо за чланове Комисије за оцену и одбрану докторске дисертације кандидата Александра Николића, дипломираног машинског инжењера под насловом:

### "Симулација ламинарног и турбулентног струјања на реалном моделу артеријске бифуркације са стенозама"

На основу увида у приложену докторску дисертацију и Извештаја комисије за оцену подобности кандидата и теме докторске дисертације, која је одобрена за израду одлуком Факултета инжењерских наука у Крагујевцу бр. 01-1/885-10 од 20.03.2014. године, а на основу Правилника о пријави, изради и одбрани докторске дисертације Универзитета у Крагујевцу, Комисија подноси Наставно-научном већу следећи

### ИЗВЕШТАЈ

#### 1. Значај и допринос докторске дисертације са становишта актуелног стања у одређеној области

Докторска дисертација кандидата Александра Николића, дипломираног машинског инжењера, под насловом "Симулација ламинарног и турбулентног струјања на реалном моделу артеријске бифуркације са стенозама", представља резултат мулти-дисциплинарног научно-истраживачког рада кандидата у актуелној научној области која се односи на ламинарно и турбулентно струјање у артеријским бифуркацијама са стенозама. Са аспекта предмета истраживања и добијених резултата, ова дисертација представља јединствен научни рад.

Кандидат је извршио критичку анализу и систематизацију постојећих знања, искустава и научних резултата компетентних истраживача из области истраживања ове докторске дисертације, који су објављени у водећим међународним часописима. На основу спроведене анализе предности и недостатака до сада коришћених приступа у овој области, метода и модела, кандидат је дефинисао предмет и циљ сопствених истраживања.

Суштински допринос ове дисертације су развијени турбулентни модели  $k-\omega$  и ЛЕС и применом методе коначних елемената додати у програм *PAK-F*. За оба приступа коришћен је инкрементално-итеративни приступ за прорачун основних физичких величина као што су брзина, притисак, смицајни напон на зиду, струјнице. Прво су имплементиране Рејнолдсове једначине путем методе коначних елемената, а након тога и турбулентни модели  $k-\varepsilon$ ,  $k-\omega$  и ЛЕС. Описан је детаљно инкрементално-итеративни поступак за турбулентне моделе  $k-\varepsilon$  и  $k-\omega$  након чега су моделске једначине директно програмиране у софтверски код.

Резултати су упоређени са основним бенчмарк примерима за турбулентно струјање. Класичан бенчмарк пример, струјање флуида преко степеника (*Backward facing step*), је креиран за 2Д и 3Д симулацију струјања флуида. Оба случаја су симулирана коришћењем  $k-\omega$  и ЛЕС турбулентног модела. У зависности од густине мреже коначних елемената добијени су и различити резултати. Резултати симулације струјања преко степеника се добро поклапају са експерименталним подацима преузетим из литературе као и са софтвером *Ansys Fluent R15.0*.

Приказана је укратко и развијена методологија за брзо генерисање мреже коначних елемената артеријских бифуркација. У ту сврху коришћен је домаћи софтвер *STL2FEM*, развијен у Лабораторији за инжењерски софтвер на Факултету инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу. Ова методологија је такође публикована и као техничко решење.

На основу добијених резултата може се закључити да је оваква методологија користан алат који може дати значајне почетне информације кардиолозима. Захваљујући јасној представи о феноменима који се појављују при струјању крви кроз артеријске бифуркације, они доносе одлуку да ли је и у ком тренутку потребна интервенција.

## **2. Оцена да је урађена докторска дисертација резултат оригиналног научног рада кандидата у одређеној научној области**

Комисија сматра да докторска дисертација кандидата Александра Николића, дипломираног машинског инжењера, под насловом "**Симулација ламинарног и турбулентног струјања на реалном моделу артеријске бифуркације са стенозама**", представља резултат оригиналног научног рада. Обрађена тема је веома актуелна и садржајно квалитетна и даје конкретне научне резултате у области симулације ламинарног и турбулентног струјања у артеријским бифуркацијама. Кандидат је тему обрадио студиозно и детаљно, користећи при томе теоријске основе научних дисциплина релевантних за ову проблематику. Критички је анализирао и вредновао бројне научне радове који се односе на проблематику разматрану у оквиру ове дисертације.

Оригиналност научног рада, истраживања и резултата остварених у оквиру докторске дисертације се огледају у следећим елементима:

- Развијени турбулентни модели  $k-\omega$  и ЛЕС и применом методе коначних елемената додати у програм *PAK-F*.
- Анализирајући постојеће експерименталне резултате и доступну литературу која је непосредно повезана са разматраном облашћу ове



дисертације, кандидат је развио неопходни програмски код за турбулентно струјање.

- Струјање крви у артеријским бифуркацијама је спроведено на реалним моделима артеријских бифуркација од случајно изабраних пацијената.
- Развијени турбулентни модели могу значајно да се експлоатишу у даљем коришћењу софтвера *PAK-F*, како за симулације у биоинжењерингу тако и за различите инжењерске симулације.

### 3. Преглед остварених резултата рада кандидата у одговарајућој научној области

Александар Николић рођен је 16.08.1983. године у Крагујевцу, Република Србија, СФРЈ. Основну школу “Станислав Сремчевић” завршио је са одличним успехом. Прву крагујевачку гимназију, смер природно-математички, завршио је школске 2001/2002 са врло добрим успехом.

Машински факултет у Крагујевцу уписао је 2002. године. Дипломирао је 12.11.2007. године, на смеру Информатика у инжењерству, са оценом 10 (десет) на дипломском раду и средњом оценом 9,30 (девет и 30/100) у току студија. Добитник је награде "Студент генерације 2002".

Након дипломирања уписао је постдипломске студије школске 2007/2008 године на Машинском факултету у Крагујевцу, смер Примењена механика. Школске 2011/2012 прешао је на нови акредитовани програм докторских студија и положио све испите предвиђене планом и програмом са просечном оценом 10.

Од 24.01.2008. године до 27.01.2011 био је стипендиста и истраживач на пројекту Министарства науке и технолошког развоја Републике Србије TP12005.

Од заснивања радног односа на Факултету инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу 2011. године ангажован је на пројектима Министарства просвете, науке и технолошког развоја Републике Србије. Активно је изводио или изводи аудиторне вежбе на матичном факултету, из више предмета: Механика 2, Техничко цртање са компјутерском графиком, Рачунарски алати, Отпорност материјала, Метод коначних елемената 1 и Моделирање и симулације.

Кандидат је учествовао у реализацији 4 научно-истраживачка пројекта:

1. Технолошки пројекат Министарство науке и заштите животне средине Републике Србије: *Развој софтвера за анализу чврстоће и процену радног века конструкција*, TP6204, 2006-2007. Руководилац пројекта др Мирослав Живковић, ред. проф.
2. Технолошки пројекат Министарство за науку и технолошки развој Републике Србије: *Развој софтвера за експлицитну нелинеарну динамичку анализу*, TP12005, 2008-2011. Руководилац пројекта др Мирослав Живковић, ред. проф.
3. Технолошки пројекат Министарства просвете, науке и технолошког развоја Републике Србије: *Развој софтвера за решавање спрегнутих мултифизичких проблема*, TP32036, 2011-. Руководилац пројекта др Мирослав Живковић, ред. проф.

4. Пројекат основних истраживања Министарства просвете, науке и технолошког развоја Републике Србије: *Неинвазивна и инвазивна дијагностика и перкутано лечење сужења на рачвама крвних судова*, ОИ175082, 2011-2017. Руководилац пројекта др Горан Станковић, ванр. проф.

Израда докторске дисертације под називом "**Симулација ламинарног и турбулентног струјања на реалном моделу артеријске бифуркације са стенозама**" му је одобрена 20.03.2014. године.

Као аутор или коаутор објавио је **25** научних радова (1 рад у истакнутом међународном часопису, 3 рада у међународним часописима, 2 рада у часописима националног значаја, 2 рада у научном часопису, 1 поглавље у књизи М42 или рад у тематском зборнику националног значаја, 11 саопштења на међународним скуповима штампаних у целини, 4 саопштења на скупу националног значаја штампаног у целини), учествовао је у реализацији једног техничког решења, и то:

#### **Рад у истакнутом међународном часопису [M<sub>22</sub>]:**

1. Radovan H. Nikolić, Miroslav R. Radovanović, Miroslav M. Živković, , **Aleksandar V. Nikolić** Dragan M. Rakić And Milan R. Blagojević, *Modeling Of Thermoelectric Module Operation In Inhomogeneous Transient Temperature Field Using Finite Element Method*, Thermal Science, Vol.18, No.Suppl. 1, Pp. S239-S250, Issn 0354-9836, Doi 10.2298/TSCI130112185N, 2014.

#### **Рад у међународном часопису [M<sub>23</sub>]:**

2. Živković Miroslav, **Nikolić Aleksandar**, Slavković Radovan, Živić Fatima, *Non-linear transient heat conduction analysis of insulation wall of tank for transportation of liquid aluminum*, Thermal Science, Vol.14, No. Suppl., pp. S299-S312, ISSN 0354-9836, Doi 10.2298/TSCI100506029Z, 2010.
3. Milan Blagojević, **Aleksandar Nikolić**, Milorad Živković, Miroslav Živković, Goran Stanković, *Influence of blocks' topologies on endothelial shear stress observed in CFD analysis of artery bifurcation*, Acta of Bioengineering and Biomechanics, Vol.15, No.1, pp. 97-104, ISSN 1509-409x, Doi 10.5277/abb130112, 2013.
4. Milan Blagojević, **Aleksandar Nikolić**, Miroslav Živković, Milorad Živković, Goran Stanković, *A Novel Framework for Fluid/Structure Interaction in Rapid Subject-Specific Simulations of Blood Flow in Coronary Artery Bifurcations*, Vojnosanitetski preglad: Military Medical and Pharmaceutical Journal of Serbia, Vol.71, No.3, pp. 285-292, ISSN 0042-8450, Doi 10.2298/VSP1403285B, 2014.

#### **Рад у часопису националног значаја [M<sub>52</sub>]:**

5. Milan Blagojević, **Aleksandar Nikolić**, Miroslav Živković, Slobodan Savić, *Fluid Structure Interaction On The Example Of Real Artery Bifurcation Of Random Selected Patient*, Technics – Mechanical Engineering, Vol.68, No. Special edition, pp. 59-66, ISSN 0040-2176, UDC 616.154:532.54, 2013.
6. Milan Blagojević, **Aleksandar Nikolić**, Miroslav Živković, Slobodan Savić, *Interakcija solida i fluida na primeru realne geometrije arterijske bifrukacije slučajno izabranog pacijenta*, Tehnika, Vol.68, No.3, pp. 459-465, ISSN 0040-2176, Doi UDC: 62 (062. 2) (497.1), 2013.



#### Рад у научном часопису [M53]:

7. Milan Blagojević, **Aleksandar Nikolić**, Miroslav Živković, Milorad Živković, Goran Stanković, Ana Pavlović, *Role of Oscillatory Shear Index in Predicting the Occurrence and Development of Plaque*, Journal of the Serbian Society for Computational Mechanics, Vol.7, No.2, pp. 29-37, ISSN 1820-6530, 2013.
8. **Aleksandar Nikolić**, Milan Blagojević, Miroslav Živković, Aleksandar Aleksić, Slobodan Savić, *Software technologies for the analysis of blood flow in the human body*, International Journal of Industrial Engineering and Management (IJIEM), Vol.3, No.2, pp. 99-104, ISSN 2217-2661, Doi UDK 616.1:004, 2012.

#### Поглавље у књизи M42 или рад у тематском зборнику националног значаја [M45]:

9. Nikola Tonić, Dragan Rajković, **Aleksandar Nikolić**, Sonja Grubor, Snezana Nestić, *Primena QMS-a u poslovanju prometno servisne organizacije*, Bezbednost prehrambenih proizvoda i kvalitet usluga: uslov za ostvarivanje konkurentnosti, Monografija, Urednik prof. Slavko Arsovski, Mašinski fakultet u Kragujevcu, Centar za kvalitet, ISBN 978 - 86 -86663 - 53 -5, Kragujevac, 2010.

#### Саопштење са међународног скупа штампано у целини [M33]:

10. Dragan Rakić, **Aleksandar Nikolić**, Miroslav Živković, Radovan Slavković, *Gid-Pak Interface*, 4th Conference on Advances and Applications of GiD, Ibiza, Spain, 2008, 8 – 9 May.
11. **Aleksandar Nikolić**, Vladimir Dunić, Miroslav Živković, Radovan Slavković, *Neutral file generation for GID post-processing using PAK subroutines implemented in FEAP*, 5th Conference On Advances And Applications Of GiD & 1st Kratos Workshop, Barcelona, Spain, 2010, 26 – 27 May, pp. 17-20, ISBN 978-84-96736-90-0.
12. **Aleksandar Nikolić**, Milan Blagojević, Miroslav Živković, Milorad Živković, Goran Stanković, *PAK-FS – multiphysics software modul for fluid-structure interaction simulations*, 12th International Conference Research and Development in Mechanical Industry, RaDMI 2012, Vrnjacka Banja, Serbia, 2012, 13- 17. September, pp. 804-809, ISBN 978-86-6075-037-4.
13. **Aleksandar Nikolić**, Milan Blagojević, Miroslav Živković, Aleksandar Aleksić, Radovan Petrović, *Influence of mesh quality on fluid flow calculated with software PAK-f explicit*, 6th International Quality Conference, Center for Quality, Faculty of Engineering, University of Kragujevac, Kragujevac, 2012, June 8th 2012., pp. 561-568, ISBN 978 - 86 - 86663 - 82 – 5.
14. **Aleksandar Nikolić**, Milan Blagojević, Vladimir Milovanović, Miroslav Živković, Miroslav Milutinović, *Analysis of heat transfer through the beam support of the wagon structure calculated by software pak multyphysics*, "Conference on Mechanical Engineering Technologies and Applications" COMETA 2012, East Sarajevo - Jahorina 2012, Jahorina, B&H, 2012, 28-30.11, pp. 251-254, ISBN 978-99938-655-5-1.
15. M. Blagojević, **A. Nikolić**, M. Živković, M. Živković and G. Stanković, *Remote visualization of finite element calculation results in vascular interventions decision making*, International Conference on Applied Internet and Information Technologies ICAIIT 2012, Zrenjanin, 2012, October 26, 2012, ISBN 978-86-7672-173-3.
16. Milan Blagojević, Miroslav Živković, **Aleksandar Nikolić**, *The influence of the DSLR camera shutter count on the accuracy of the photogrammetric measurements*,



"Conference on Mechanical Engineering Technologies and Applications" COMETA 2012, East Sarajevo - Jahorina 2012, Jahorina, B&H, 2012, 28-30.11, pp. 601-606, ISBN 978-99938-655-5-1.

17. Milan Blagojević, **Aleksandar Nikolić**, Miroslav Živković, Milorad Živković, Goran Stanković, *Role of oscillatory shear index in predicting the occurrence and development of plaque*, Fourth Serbian (29th Yu) Congress on Theoretical and Applied Mechanics, Vrnjačka Banja, Serbia, 2013, 4-7 June, pp. 821-824, ISBN 978-86-909973-5-0.
18. Miroslav Živković, Marko Topalović, Milan Blagojević, **Aleksandar Nikolić**, Vladimir Milovanović, Siniša Mesarović, Jagan Padbidri, *Boundary Identification And Weak Periodic Condition Application In Dem Method*, 2nd International Scientific Conference COMETA, Jahorina, B&H, Republic of Srpska, 2014, 2nd-5th December, pp. 365-370, ISBN 978-99976-623-1-6.
19. Marko D. Topalović, Milan R. Blagojević, **Aleksandar V. Nikolić**, Miroslav M. Živković and Nenad D. Filipović, *Application of Smoothed Particle Hydrodynamics in biomechanics: advanced procedure for discretization of complex biological shapes into pseudo-particles*, 15th International Conference on Bioinformatics & Bioengineering (BIBE 2015), Belgrade, 2015, 02-04.11, pp. 45, ISBN 978-1-4673-7982-3.
20. **Aleksandar Nikolic**, Nenad Filipovic, Marko Topalovic, Miroslav Zivkovic, *Finite Element Simulation of Turbulent Flow Using k omega Model and Rans Equations*, 4th South-East European Conference on Computational Mechanics Proceedings, Kragujevac, Serbia, 2017, 3-5.07.2017, ISBN 978-86-921243-0-3.

**Саопштење са скупа националног значаја штампано у целини [M63]:**

21. Dragan Rakić, **Aleksandar Nikolić**, Dragan Čukanović, *PAK-T interface for software GID*, YU INFO 2008, 14th Conference on information and technology communications, Kopaonik, Serbia, 2008, 09th - 12th March 2008, pp. 91, ISBN 978-86-85525-03-2.
22. **Aleksandar Nikolić**, Snežana Vulović, *Development of interface in GID for analysis of contact problems in program PAK/explicit*, YU INFO 2010, 16th Conference on information and technology communications, Kopaonik, Serbia, 2010, March, pp. 03 - 06 March, ISBN 978-86-85525-05-6.
23. Nikola Tonić, Dragan Rajković, **Aleksandar Nikolić**, *Implementation of QMS in business of service – sales organization*, 4. International Quality Conference, Kragujevac, Serbia, 2010, 19-21. May, pp. 90, ISBN 978-86-86663-52-8.
24. Blagojević Milan, **Nikolić Aleksandar**, Živković Miroslav, *Prikaz polja strujanja izračunatog mke programom PAK-F u programu za post-procesiranje Paraview*, Yu Info 2012, konferencija o računarskim naukama i informacionim tehnologijama, Kopaonik, 2012, 29. 2. - 3. 3. 2012., pp. 76.

**Прототип, нова метода, софтвер, стандардизован или атестиран инструмент, нова генска проба, микроорганизми (уз доказ) [M85]:**

25. Miroslav Živković, Milan Blagojević, Goran Stanković, **Aleksandar Nikolić**, Milorad Živković, *Softver za brzo generisanje modela konačnih elemenata krvnih sudova - STL2FEM*, TR-71/2012, Klinički centar Srbije, Beograd, Kragujevac, 2012.  
<http://www.mpn.gov.rs/wp-content/uploads/2016/04/TEHNICKA-RESENJA-2011-2015-10-april.xls>



#### 4. Оцена испуњености обима и квалитета у односу на пријављену тему

Докторска дисертација кандидата Александра Николића, дипломираног машинског инжењера под насловом "**Симулација ламинарног и турбулентног струјања на реалном моделу артеријске бифуркације са стенозама**", усклађена је по обиму и садржају одобреној теми од стране Наставно-научног већа Факултета инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу и Већа за техничко-технолошке науке Универзитета у Крагујевцу.

Резултати истраживања су у писаном делу докторске дисертације изложени на укупно 206 страна. Дисертација садржи 236 графичких илустрација, 2 табеле, 73 библиографске јединице. Излагање је сврстано у 9 поглавља, којима претходе резиме рада на српском и енглеском језику, садржај, листа слика, листа табела и листа ознака. Наслови поглавља су:

1. Увод
2. Општа разматрања о турбуленцији
3. Математички модели турбулентног струјања
4. Нумеричка имплементација турбулентних модела у методи коначних елемената
5. Бенчмарк примери тестирања турбулентног кода
6. Увод у биоинжењеринг и струјање крви кроз артерије
7. Симулација ламинарног и турбулентног струјања крви на реалном моделу артеријске бифуркације са стенозама
8. Закључак
9. Додатак

У првом поглављу приказани су основни циљеви рада као и преглед почетне литературе.

У поглављу број 2 наведени су основни појмови о турбуленцији и статистичком приступу при моделирању турбуленције. Укратко је приказано извођење Рејнолдсових једначина, као и Бусинескова апроксимација која представља везу између Рејнолдсових напона и Навије-Стоксових једначина.

Поглавље број 3 базира се на математичким једначинама турбулентних модела. Приказани су једноједначински модели као што је Спаларт-Алмарас модел, док су од двоједначинских модела приказани  $k-\varepsilon$  турбулентни модел и  $k-\omega$  турбулентни модел. Оба двоједначинска модела имају опције да се користе при ниским Рејнолдсовим бројевима што је детаљније описано. ЛЕС симулација која се такође заснива на Бусинесковој апроксимацији је описана у поглављу 3.7. Обрађен је и концепт зидних функција које се користе при формулацији турбулентних модела.

У поглављу број 4 приказана је нумеричка имплементација турбулентних модела у методи коначних елемената. Прво су имплементирани Рејнолдсове једначине путем методе коначних елемената, а након тога и турбулентни модели  $k-\varepsilon$  и  $k-\omega$ . Описан је детаљно инкрементално-итеративни поступак за турбулентне моделе  $k-\varepsilon$  и  $k-\omega$  након чега су моделске једначине директно програмиране у софтверски код. У четвртном поглављу описан је поступак флуид-структура симулације који је коришћен за прорачун струјања крви на реалном моделу артеријске бифуркације.



Поглавље број 5 представља симулацију турбулентног струјања на бенчмарк примерима за турбуленцију и струјање флуида преко крилног профила. Класичан бенчмарк пример, струјање флуида преко степеника (*Backward facing step*), је креиран за 2Д и 3Д симулацију струјања флуида. Оба случаја су симулирана коришћењем  $k-\omega$  и ЛЕС турбулентног модела. У зависности од густине мреже коначних елемената добијени су и различити резултати. Резултати симулације струјања преко степеника се добро поклапају са експерименталним подацима преузетим из литературе као и са софтвером *Ansys Fluent R15.0*. Утицај густине мреже коначних елемената на резултат брзине струјања дат је за пример струјања преко степеника. За струјање флуида преко крилног профила поређени су резултати са софтвером *Comsol Multiphysics*.

Поглавље број 6 представља кратак увод у биоинжењеринг и струјање крви кроз артерије. Описани су основни појмови у вези кардиоваскуларног система и приказани неки од основних параметара у хемодинамици.

У поглављу број 7 које представља симулацију ламинарног и турбулентног струјања крви на реалним моделима артеријске бифуркације са стенозама, прво је описана методологија за брзо генерисање мреже коначних елемената артеријских бифуркација. У ту сврху коришћен је домаћи софтвер *STL2FEM*, развијен у Лабораторији за инжењерски софтвер на Факултету инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу. *STL2FEM* на основу волуметријског модела артерије добијеног радиолошким снимањем генерише топологију блокова из којих се генерише мрежа коначних елемената. Поглавље 7.2 представљају симулацију ламинарног струјања крви кроз каротидну бифуркацију за случајно одабраног пацијента. У поглављу 7.3 приказана је флуид-структура интеракција на примеру каротидне бифуркације случајно изабраног пацијента. У поглављу 7.4 обрађен је пример коронарне бифуркације случајно изабраног пацијента. Поглавље 7.5 представља струјање у десној коронарној артерији са великом стенозом. Поглавља 7.8 и 7.9 представљају симулацију турбулентног струјања флуида у артеријским бифуркацијама. Коришћени су модели артерија из поглавља 7.2 и 7.3. Поглавља 7.7 и 7.10 представљају поређење резултата турбулентног струјања између софтвера *PAK-F* и *Ansys Fluent R15.0*. Резултати су дати у пресеку у подужној равни артерије. Примећују се врло добра поклапања за вредност максималне брзине струјања. У поглављу 7.9 приказан је турбулентни прорачун за модел артеријске бифуркације са великом стенозом.

Поглавље број 8 садржи изведена закључна разматрања научног истраживања спроведеног у дисертацији. Такође, дефинисани су могући правци даљих истраживања.

Поглавље број 9 представља додатак у коме је приказано извођење стандардних једначина  $k-\epsilon$  турбулентног модела.

На самом крају дисертације дат је преглед библиографских јединица коришћених као основа за истраживање.

## 5. Научни резултати докторске дисертације

Кандидат Александар Николић, дипломирани машински инжењер, је у оквиру дисертације извршио систематизацију постојећих знања и искустава у области ламинарног и турбулентног струјања флуида у артеријским бифуркацијама. У оквиру рада на дисертацији кандидат је дошао до резултата и закључака који имају своје место и значај како у научно-теоријском, тако и у практичном смислу.



Најважнији научни резултати ове дисертације су:

- Развијени су турбулентни модели  $k-\omega$  и ЛЕС и применом методе коначних елемената додати у програм *PAK-F*.
- Турбуелнтни модели су тестирани и верификовани на више бенчмарк примера за ламинарно и турбулентно струјање.
- Коришћена је методологија за брзо генерисање мреже коначних елемената артеријских бифуркација. У ту сврху коришћен је домаћи софтвер *STL2FEM*, развијен у Лабораторији за инжењерски софтвер на Факултету инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу.
- Развијен је концепт зидних функција које се користе при формулацији турбулентних модела.
- На основу развијених турбулентних модела кардиолози могу да стекну јасну представу о феноменима и струјању унутар артеријских бифуркација без извођења интервенције.

## 6. Примењивост и корисност резултата у теорији и пракси

Резултати докторске дисертације кандидата Александра Николића, дипломираног машинског инжењера, под насловом "**Симулација ламинарног и турбулентног струјања на реалном моделу артеријске бифуркације са стенозама**", применљиви су и корисни, како у теоријском, тако и у практичном смислу.

Главни циљ дисертације био је развој модула за прорачун турбулентног струјања који се примењује за проучавање медицинских феномена који се јављају у артеријским бифуркацијама са стенозама. Такође, примена је фокусирана и на струјање преко аеродинамичких профила.

Развијени су турбулентни модели  $k-\omega$  и ЛЕС и применом методе коначних елемената додати у програм *PAK-F*.  $k-\omega$  турбулентни модел је изабран зато што се може интегралити у целом вискозном подслоју, док је ЛЕС турбулентни модел је изабран зато што има једноставан приступ за конфигурисање и моделирање применом методе коначних елемената. При израчунавању основних физичких величина које карактеришу струјање примењена је имплицитна интеграција једначина које описују проблем. Одређивање брзине струјања флуида, притиска, кинетичке енергије турбуленције и дисипације кинетичке енергије турбуленције у чворовима коначних елемената је одређено на крају сваког корака инкрементално-итеративног поступка.

Развијени турбулентни модели могу значајно да се експлоатишу у даљем коришћењу софтвера *PAK-F*, како за симулације у биоинжењерингу тако и за различите инжењерске симулације.

## 7. Начин презентирања резултата научној јавности

Део научних резултата који су произашли у оквиру разматране тематике ове докторске дисертације је презентован објављивањем научних радова у међународним научним часописима, као и на међународним и националним научним скуповима.



Практични аспекти реализованог научно-истраживачког рада представљени су домаћој научној и стручној јавности једним делом кроз реализацију пројеката Министарства просвете, науке и технолошког развоја Републике Србије под називом "Развој софтвера за решавање спрегнутих мултифизичких проблема" – ТР32036 и "Неинвазивна и инвазивна дијагностика и перкутано лечење сужења на рачвама крвних судова" - ОИ175082.

Комисија сматра да истраживања и још необјављени резултати ове докторске дисертације пружају обиман и користан материјал за даље објављивање у међународним и водећим националним часописима и скуповима, који се односе на област ламинарног и турбулентног струјања у артеријским бифуркацијама са стенозама.

На основу свега изложеног комисија доноси следећи:

## ЗАКЉУЧАК

Докторска дисертација кандидата Александра Николића, дипломираног машинског инжењера у потпуности, како по обиму тако и по квалитету, одговара одобреној теми дисертације, одлуком бр. 01-1/885-10 од 20.03.2014. године од стране Наставно-научног већа Факултета инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу.

Кандидат је у приказу истраживања користио уобичајену и стандардизовану стручну терминологију, а структура докторске дисертације и методологија излагања су у складу са универзитетским нормама.

У току израде докторске дисертације, кандидат Александар Николић је дошао до оригиналних научних истраживања, приказаних у дисертацији.

На основу добијених резултата може се закључити да је развијена методологија која може дати значајне почетне информације кардиолозима. Захваљујући јасној представи о феноменима који се појављују при струјању крви кроз артеријске бифуркације, они доносе одлуку да ли је и у ком тренутку потребна интервенција. Развијени турбулентни модели могу значајно да се експлоатишу у даљем коришћењу софтвера *PAK-F*, како за симулације у биоинжењерингу тако и за различите инжењерске симулације.



На основу свега изнетог, Комисија за оцену и одбрану докторске дисертације кандидата **Александра Николића, дипломираног машинског инжењера**, једногласно је закључила да докторска дисертација под насловом:

**"Симулација ламинарног и турбулентног струјања на реалном моделу артеријске бифуркације са стенозама"**

по квалитету, обиму и резултатима истраживања у потпуности испуњава све научне, стручне и законске критеријуме за израду докторске дисертације. Стога Комисија за задовољством предлаже Наставно-научном већу Факултета инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу, да овај Извештај у потпуности прихвати и закаже јавну усмену одбрану наведене дисертације.


Чланови комисије:



**Др Ненад Филиповић, редовни професор, председник Комисије,**

Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу.

Уже научне области: *Примењена механика, Примењена информатика и рачунарско инжењерство.*



**Др Небојша Јовић, редовни професор,**

Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу.

Ужа научна област: *Енергетика и процесна техника.*



**Др Лазар Велички, ванредни професор,**

Медицински факултет Универзитета у Новом Саду.

Ужа научна област: *Хирургија - кардиохирургија.*



**Др Велибор Исаиловић, доцент,**

Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу.

Ужа научна област: *Биоинжењеринг.*



**Др Владимир П. Миловановић, доцент,**

Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу.

Ужа научна област: *Експериментална механика.*

У Крагујевцу и Новом Саду,

11.10.2018. године