

НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ

Предмет: Реферат о урађеној докторској дисертацији кандидата Мохамеда Абдулјавада Хигаега (Mohamed Abduljawad Higaeg), маг. инж. маш.

Одлуком Наставно-научног већа Машинског факултета Универзитета у Београду бр. 73/2 од 23.01.2020. године именовани смо за чланове Комисије за преглед, оцену и одбрану докторске дисертације кандидата **Мохамеда Абдулјавада Хигаега** (Mohamed Abduljawad Higaeg), маг. инж. маш., под насловом „**Оптимизација композитне лопатице ветротурбине са хоризонталном осовином на основу анализе интеракције флуида и структуре**“ (*OPTIMIZATION OF COMPOSITE HORIZONTAL AXIS WIND TURBINE BLADE ON THE BASIS OF FLUID-STRUCTURE INTERACTION ANALYSIS*).

На основу увида у завршену дисертацију, Комисија подноси следећи

РЕФЕРАТ

1. УВОД

1.1. Хронологија одобравања и израде дисертације

Кандидат Мохамед Абдулјавад Хигаег (Mohamed Abduljawad Higaeg) маг. инж. маш. уписао је прву годину докторских студија на Машинском факултету Универзитета у Београду школске 2016/17. године, да би наредне школске године уписао другу годину студија. По положеним испитима докторских студија кандидат је поднео захтев за одобрење теме докторске дисертације број 1212/1 дана 28.06.2019. на Катедри за ваздухопловство Машинског факултета Универзитета у Београду. Кандидат је за ментора предложио проф. др Александра Грбовића, ванредног професора Машинског факултета у Београду.

Одлуком Наставно-научног већа број 1212/2 од 19.09.2019. године прихваћена је тема докторске дисертације под насловом „Оптимизација композитне лопатице ветротурбине са хоризонталном осовином на основу анализе интеракције флуида и структуре“ (*OPTIMIZATION OF COMPOSITE HORIZONTAL AXIS WIND TURBINE BLADE ON THE BASIS OF FLUID-STRUCTURE INTERACTION ANALYSIS*) кандидата Мохамеда Абдулјавада Хигаега (Mohamed Abduljawad Higaeg) и за ментора је именован др Александар Грбовић, ванредни професор Машинског факултета у Београду.

На основу обавештења проф. др Александра Грбовића да је кандидат Мохамед Абдулјавад Хигаег завршио докторску дисертацију под насловом „Оптимизација композитне лопатице ветротурбине са хоризонталном осовином на основу анализе интеракције флуида и структуре“ (*OPTIMIZATION OF COMPOSITE HORIZONTAL AXIS WIND TURBINE BLADE*

ON THE BASIS OF FLUID-STRUCTURE INTERACTION ANALYSIS) Наставно-научно веће Машинског факултета у Београду донело је 23.01.2020. године Одлуку број 73/2 о именовану Комисије за преглед, оцену и одбрану докторске дисертације у саставу:

- др Александар Симоновић, редовни професор, Машински факултет, Универзитет у Београду
- др Игор Балаћ, редовни професор, Машински факултет, Универзитет у Београду
- др Петар Ускоковић, редовни професор, Технолошко-металуршки факултет, Универзитет у Београду.

1.2. Научна област дисертације

Докторска дисертација под насловом „Оптимизација композитне лопатице ветротурбине са хоризонталном осовином на основу анализе интеракције флуида и структуре“ (*OPTIMIZATION OF COMPOSITE HORIZONTAL AXIS WIND TURBINE BLADE ON THE BASIS OF FLUID-STRUCTURE INTERACTION ANALYSIS*) припада области техничких наука – машинство, тј. ужој научној области – ваздухопловство, за коју је Машински факултет Универзитета у Београду матичан. Ментор др Александар Грбовић је ванредни професор на Машинском факултету Универзитета у Београду. Као аутор или коаутор до сада је публиковао 25 радова на SCI листи.

1.3. Биографски подаци о кандидату

Мохамед Абдулјавад Хигаег (Mohamed Abduljawad Higaeg) је рођен 10.01.1966. у Мисурати (Misurata) у Либији, где је завршио основну и средњу школу у периоду 1972-1985. Школске 1985/86 уписао је, а 1990. године завршио мастер студије на Машинском факултету у Бенгазију, Либија (Benghazi University, Faculty of Engineering, Mechanical Dept. Libya), да би магистарске студије уписао 2002. и исте завршио 2005. на Tabbin Institute for Metallurgical Studies, Cairo – Египт.

Мохамед Абдулјавад Хигаег поседује вишегодишње радно искуство. У периоду од 1990. године до 1993. године био је запослен као машински инжењер у Министарству индустрије са седиштем у Мисурати, потом је од 1993. до 2006. радио у Organization of Development Administrative Center (ODAC) у Сирту (Либија), да би потом прешао на Колеџ техничких наука у Мисурати (Technical Sciences College, Misurata-Libya) где и данас ради као предавач.

Докторске студије на енглеском језику Машинског факултета Универзитета у Београду уписује школске 2016. године.

2. ОПИС ДИСЕРТАЦИЈЕ

2.1. Садржај дисертације

Докторска дисертација кандидата Мохамеда Абдулјавада Хигаега, маст. инж. маш. под насловом „Оптимизација композитне лопатице ветротурбине са хоризонталном осовином на основу анализе интеракције флуида и структуре“ (*OPTIMIZATION OF COMPOSITE HORIZONTAL AXIS WIND TURBINE BLADE ON THE BASIS OF FLUID-STRUCTURE INTERACTION ANALYSIS*) је формата А4, има 108 страна штампаних двострано и написана је **на енглеском језику**. Илустрована је са 124 слике, садржи 69 нумерисаних израза и 25 табела и литературу са 113 референци.

Докторска дисертација се састоји од следећих поглавља:

1. Увод и преглед литературе;
 2. Теоријске основе пројектовања композитних лопатица ветротурбина;
 3. Дефинисање облика и композитног материјала лопатице ветротурбине са хоризонталном осовином;
 4. Спрегнута флуид-структура анализа пројектоване композитне лопатице;
 5. Анализа нумерички добијених резултата и дискусија;
 6. Закључна разматрања;
- Литература

Осим наведеног, докторска дисертација садржи резиме на српском и енглеском језику, садржај, биографију аутора, Изјаву о ауторству, Изјаву о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада и Изјаву о коришћењу.

2.2. Кратак приказ појединачних поглавља

У **првом поглављу** дисертације приказане су опште карактеристике и класификација ветрогенератора, њихова кратак развој у протеклих неколико деценија као и методологије развоја лопатица ветротурбина. Описан је начин избора аеропрофила и материјала лопатица, најчешће коришћене методе оптимизације геометрије лопатица, као и типични аероеластични проблеми с којима се пројектанти лопатица у пракси срећу. Кроз велики број референци (63) које су наведене и кратко анализирани у првом поглављу, дат је и приказ тренутног стања у овој области истраживања са јасно дефинисаним главним правцима истраживања као и могућим правцима истраживања који још нису довољно проучени. На основу овакве анализе стања, на самом крају првог поглавља представљени су циљеви дисертације и методе научно-истраживачког рада коришћене у њој, заједно са структуром тезе у виду кратког описа садржаја сваког поглавља понаособ.

Поглавље број два доноси теоријске основе пројектовања композитних лопатица ветротурбина, односно детаљни приказ математичких алата и теорија на којима су засновани нумерички прорачуни чији резултати у овој дисертацији чине основу за оцену чврстоће и аероеластичног понашања пројектоване композитне лопатице. Полазну основу за дефинисање облика лопатице чини тзв. теорија импулса елемента лопатице (енг. *Blade Element Momentum (BEM) Theory*) која је у другом поглављу детаљно изложена, а на основу које се дужина тетиве одређеног пресека лопатице рачуна помоћу Бецове (*Betz*) границе. Кораци у нумеричкој анализи интеракције флуида и структуре на одређеном, унапред дефинисаном временском домену, као и теоријске основе ове анализе такође су дате у другом поглављу. Оваква анализа подразумева коришћење тзв. *спрегнутих прорачуна* (енг. *coupled analysis*) где се аеродинамичке вредности (притисци, силе узгона и отпора, итд.) добијене коришћењем прорачунске динамике флуида (ПДФ) спрежу са резултатима структурних анализа применом методе коначних елемената (МКЕ) на целом усвојеном временском домену. Тако се расподела притиска по лопатици добијена за почетне услове (дефинисана брзина ветра и нападни угао лопатице) користи за одређивање деформационо-напонског стања лопатице, да би се затим еластично деформисана лопатица „вратила“ у ПДФ анализу са циљем одређивања нове расподеле притисака по њој (која је резултат промене облика и положаја струјница), и тако изнова на целом временском домену. На овај начин је могуће добити слику понашања лопатице под оптерећењем током времена и анализирати прорачунско напонско и деформационо стање које далеко више одговара стању стварне лопатице него оно које је резултат класичне статичке структурне анализе. У другом поглављу је јасно назначено да се једино оваквом нумеричком симулацијом може анализирати интеракција реалног флуида и структуре током времена и открити напони и деформације „невидљиви“ у случају статичке анализе када се, де факто, посматра један „замрзнут“ временски тренутак. Поред тога наглашено је и да приступ спрегнутих анализа није често коришћен у истраживањима (мали је број радова публикован на ову тему) највише

због високих захтева по питању времена за припрему нумеричког модела и потребног хардвера, али и да се он чини једино исправним, па је због тога и коришћен у дисертацији. Значајан део другог поглавља је посвећен и основама микромеханике композитних материјала, као и моделу турбуленције (стандардни $k-\varepsilon$ модел) коришћеном у ПДФ симулацијама.

У **трећем поглављу** представљен је процес пројектовања лопатице ветротурбине са хоризонталном осовином уз приказ пројектовања самог композитног материјала, тј. одређивања (и поређења) механичких карактеристика дефинисаног композита у случају постојања значајног порозитета у њему (услед несавршености процеса производње) и у случају када је порозитет занемарљив (што је теоретски могуће). Геометрија лопатице је пројектована коришћењем ВЕМ теорије (представљене у другом поглављу) са дужинама тетива одређених пресека рачунатих помоћу Бецове границе, а на бази идеје да се дуж распона софтверским путем инкорпорирају три типа аеропрофила (S821, S819 и S820) и тако добије жељени аеродинамички облик. За потребе одређивања утицаја несавршености израде на механичке особине материјала а на основу података из литературе о најчешће коришћеним материјалима за израду лопатица ветротурбина, дефинисана су два нумеричка модела: модел епрувете за одређивање затезне крутости ламината направљених од усвојених материјала (према ASTM стандарду број D638-14) и модел микро структуре порозног материјала. Овде је анализиран утицај порозитета ниског нивоа на чврстоћу структуралних материјала применом тродимензионалног *unit cell* нумеричког модела - UCNM. Извршено је поређење резултата за фактор концентрације напона SCF добијених применом UCNM нумеричког модела за различите величине и облике порозитета са резултатима добијеним на основу података из раније публикованих радова добијених експерименталним путем.

Након утврђивања прелиминарног облика лопатице униформне дебљине, заједно са карактеристикама ламината који су коришћени у иницијалним прорачунима, у **поглављу број четири** су применом нумеричких метода прво процењене њена чврстоћа и стабилност, а потом и осетљивост на аероеластичне ефекте. С обзиром да је основни циљ дисертације био проналажење оптималне геометрије и масе лопатице, у наставку поглавља четири дефинисана је методологија пројектовања која је довела до смањења количине материјала потребног за израду лопатице, при чему је показано да при том није дошло до угрожавања њеног интегритета, нити је дошло до губитка стабилности при дејству граничних оптерећења. Ова методологија укључује материјал лопатице која садржи одређени проценат порозитета. Да би се то реализовало било је потребно: 1) познавати расподелу притисака по лопатици услед опструјавања флуида током времена за различите вредности брзина флуида и 2) правилно дефинисати оријентацију носећих влакана у слојевима композита и број потребних слојева у ламинатима да би лопатица ефикасно носила оптерећење без ризика од појаве оштећења. Оптимизацији се приступило са аспекта анализе једносмерне и двосмерне интеракције флуида и структуре (ИФИС) лопатице током реалног времена што је метод који се у литератури ретко појављује, понајвише због комплексности мултидисциплинарних нумеричких симулација које се морају спровести, а које за успешно спровођење траже познавање аеродинамике, структуралне анализе, аероеластичности и микромеханике композита, као и вештине пројектовања сложених тродимензионалних облика. Анализа ИФИС је спроведена коришћењем спрегнутих прорачуна за шта је било потребно прецизно „мапирати“ површине у контакту флуида и структуре, тј. обезбедити поуздан пренос оптерећења из чворова мреже флуида на чворове мреже коначних елемената структуре у контакту са флуидом.

У **петом поглављу** је дат приказ резултата спрегнутих анализа коришћених у сврху испитивања разних комбинација оријентације влакана у композиту који чини ламинате, као и детаљан опис – праћен одговарајућим коментарима – оптималне комбинације која је задовољила постављене услове, пре свих да еластична деформација у случају екстремно брзог ветра буде блиска максимално дозвољеној уз минимално могућу масу лопатице. Представљене су и максималне вредности затезних и смичућих напона, као и њихове

флукуације током посматраног временског интервала. Идентификоване су и аероеластичне појаве и процењен је њихов утицај на ефикасност лопатица. У сврху верификације предложене методологије засноване на анализи интеракције флуида и структуре током времена, на тродимензионалном штампачу је израђен модел лопатице од ABS пластике у погодној размери који је у аеро-тунелу коришћен за потврду струјне слике добијене у ANSYS-овом модулу за ПДФ Fluent, док је композитна лопатица упрошћене геометрије коришћена за верификацију резултата структурне анализе. На крају поглавља дата је и дискусија представљених резултата.

У **шестом поглављу** дисертације су представљени закључци изведени на основу целокупног истраживања, као и остварени допринос.

У поглављу **Литература** дат је списак свих извора коришћених при писању дисертације.

3. ОЦЕНА ДИСЕРТАЦИЈЕ

3.1. Савременост и оригиналност

Докторска дисертација „Оптимизација композитне лопатице ветротурбине са хоризонталном осовином на основу анализе интеракције флуида и структуре“ (*OPTIMIZATION OF COMPOSITE HORIZONTAL AXIS WIND TURBINE BLADE ON THE BASIS OF FLUID-STRUCTURE INTERACTION ANALYSIS*) кандидата Мохамеда Абдулјавада Хигаега (Mohamed Abduljawad Higaeg), маг. инж. маш., даје савремен и оригиналан приступ дефинисању методологије оптимизације носећих композитних структура базиране на нумеричкој анализи интеракције структуре и флуида који је опструјава.

Савременост дисертације се огледа у афирмацији коришћења једносмерних и двосмерних спрегнутих нумеричких прорачуна (заснованих на комбиновању резултата ПДФ-а и структурних анализа) који са развојем компјутерских технологија и појефтињењем хардвера постају могући и на рачунарима који нису класе „супер компјутера“. Овакви прорачуни који укључују и утицај несавршености израде структуралних елемената дају јаснију слику понашања носећих структура у реалним условима у односу на класичан приступ који не узима у обзир утицај еластичности на расподелу оптерећења током експлоатације као ни утицај несавршености израде.

Оригиналност се огледа првенствено у приступу оптимизацији облика и материјала композитне лопатице који је у литератури забележен али не и често коришћен, као и развоју нове методологије оптимизације базиране на процени понашања структуре која садржи одређени проценат порозитета током одређеног периода времена. Предложена методологија, обзиром на захтеве савременог света који је окренут смањењу материјалних трошкова и повећању ефикасности и заштити животне средине, убрзава процесе пројектовања и производње лопатица и доприноси смањењу трошкова, као и продужењу времена експлоатације ветротурбина.

3.2. Осврт на референтну и коришћену литературу

У изради дисертације коришћена је литература чији је списак дат после последњег, шестог поглавља. Литература обухвата укупно 113 референци које се махом баве проблемима пројектовања, оптимизације и понашања лопатица ветротурбина под радним оптерећењем, али и њиховим отказима, као и проналажењем „идеалних“ комбинација оријентације влакана у композиту које ће спречити (или одложити) настанак оштећења. Такође, референце доносе и осврте на предности, али и проблеме који се могу појавити када се примењују спрегнуте анализе, при чему већина њих фаворизује овакав приступ у пројектовању носећих структура.

Анализом списка коришћене литературе може се закључити и да је кандидат располагао већином доступне референтне литературе и да је исту проучио у току израде дисертације и адекватно наводио. Она је послужила као полазна основа за формирање прегледа досадашњих истраживања и релевантан приказ тренутног стања у предметној области.

3.3. Опис и адекватност примењених научних метода

У докторској дисертацији су примењене савремене научноистраживачке методе у теоријском и експерименталном истраживању и то у домену анализе понашања композитне структуре лопатице ветротурбине изложене оптерећењима која произилазе из њене интеракције са флуидом (ваздухом). Током реализације циљева истраживања коришћене су следеће методе и технике истраживања:

1. Преглед литературе и анализа постојећих метода оптимизације композитних конструкција, као и остварених резултата из предметне области дисертације.
2. Опис и поставка разматраног проблема (метод дескрипције).
3. Формирање меродавних нумеричких модела композитних лопатица ветротурбине и флуида коришћењем методе коначних елемената и прорачунске динамике флуида.
4. Валидација и верификација нумеричких модела и потврђивање резултата добијених спрегнутим прорачунима поређењем са вредностима из доступне литературе и резултатима добијеним експериментално (метод компарације).
5. Оптимизација нумеричких модела композитних лопатица (метод оптимизације).
6. Анализа података и давање предлога модификације развијених модела на основу претходно добијених вредности, коришћењем метода анализе и обраде резултата.

Изабране методе су адекватне за проблематику истраживања и правилно су коришћене за темељно представљање и анализирање проблема процене понашања композитних лопатица под оптерећењем, а у циљу оптимизације геометрије и материјала истих.

3.4. Примењивост остварених резултата

Резултати докторске дисертације примењиви су у научном смислу, али имају и широку практичну примену. Резултати и спроведене анализе оригиналних нумеричких модела омогућавају, на основу дефинисаних радних услова (брзина ветра, нападни угао лопатице), добијање реалне процене расподеле оптерећења током времена и оптимизацију геометрије и материјала лопатице који ће бити коришћен у њеној изради. Кандидат је у склопу дисертације на једном конкретном примеру композитне лопатице демонстрирао методологију оптимизације базиране на анализи интеракције флуида и структуре. С обзиром да је у приказаном случају постигнуто значајно унапређење (у погледу масе) у односу на иницијалну конфигурацију, развијена методологија оптимизације би се могла применити и на друге композитне структуре које су у контакту са флуидом и у другим научно-истраживачким областима, чиме се истиче њена практична примена и могућност имплементације у процесе развоја и производње.

3.5. Оцена достигнутих способности кандидата за самостални научни рад

Чланови Комисије сматрају да је кандидат током израде докторске дисертације показао да је у стању да самостално решава научне проблеме и да влада научним и истраживачким методама, те да поседује стручна, теоријска и практична знања потребна за

самостални научни рад, што је показао реализацијом планираног истраживања од иницијалне идеје до завршетка докторске дисертације.

4. ОСТВАРЕНИ НАУЧНИ ДОПРИНОС

4.1 Приказ остварених научних доприноса

Научни допринос ове дисертације је остварен кроз нумеричку анализу утицаја несавршености израде структуралних елемената на њихову чврстоћу, а представљен је у поглављу 3.4. на страни 45 дисертације и објављен у раду [1] часописа *Science of Sintering* категорије M23 (видети ставку 4.3).

Поред овог научног доприноса у дисертацији остварени су и следећи инжењерски доприноси:

- Предлог методологије оптимизације базиране на анализи интеракције флуида и структуре композитне лопатице, приказане која укључује и коришћењем нумеричких метода (МКЕ и ПДФ) путем спрегнутих прорачуна.
- Унапређење конструктивног решења, тј. развој композитне лопатице ветрогенератора са хоризонталном осовином на којој је тестирана методологија оптимизације заснована на анализи интеракције флуида и структуре;
- Унапређење процеса пројектовања кроз верификацију једносмерних и двосмерних спрегнутих прорачуна у тродимензионалним симулацијама понашања структура при интеракцији са флуидом, са акцентом на понашање композитних лопатица, али и могућношћу адекватне примене на друге композитне структуре које током експлоатације трпе оптерећења услед дејства флуида.

4.2. Критичка анализа резултата истраживања

Сагледавањем постојећег стања из области докторске дисертације, као и циљева истраживања и добијених резултата, може се констатовати да су разрешена сва битна питања и дилеме које су се појавиле у току истраживања. Јасно су представљене све предности коришћења спрегнутих нумеричких анализа јер је спроведеним истраживањем установљена методологија оптимизације композитне лопатице ветротурбине са хоризонталном осовином, базирана на анализи интеракције структуре и флуида коришћењем управо спрегнутих прорачуна. На основу првобитног нумеричког модела композитне лопатице који укључује и утицај несавршености израде, у смислу постојања порозитета, постепено је добијен модел који се показао поузданим и који је био коришћен за проучавање понашања лопатице и симулирање аероеластичних ефеката који су нумерички „видљиви“ само ако се симулација спроводи на временском домену. Релативно мале вредности нормалних и смичућих напона добијене у првим нумеричким симулацијама биле су полазна тачка за оптимизацију структуре лопатице која је довела до минимално могуће масе уз дефинисану максималну еластичну деформацију. Коначно, кроз рад на тези дошло се до оптималног облика лопатице који би требало да обезбеди њен ефикасан рад током целокупног периода експлоатације. Такође, добијени резултати истраживања могу допринети даљем унапређењу пројектовања тродимензионалних композитних структура генерално, у смислу да могу бити добра полазна основа за оптимизације и других структура код којих је један од главних пројектних критеријума што мања маса, а што ефикаснији рад.

4.3. Верификација научних доприноса

Верификација добијених оригиналних резултата остварена је кроз рад објављен у међународном часопису категорије M23, а који је везан за истраживања спроведена у оквиру ове докторске дисертације:

[1] Higaeg M., Balać I., Grbović A., Milovančević M., Jelić M.: *Numerical Modeling of the Porosity Influence on Strength of Structural Materials*, Science of Sintering, Vol. 51, Issue 4, pp. 459-467, 2019. DOI 10.2298/SOS1904459H.

5. ЗАКЉУЧАК И ПРЕДЛОГ

На основу прегледа и детаљне анализе докторске дисертације под називом „Оптимизација композитне лопатице ветротурбине са хоризонталном осовином на основу анализе интеракције флуида и структуре“ (OPTIMIZATION OF COMPOSITE HORIZONTAL AXIS WIND TURBINE BLADE ON THE BASIS OF FLUID-STRUCTURE INTERACTION ANALYSIS) кандидата Мохамеда Абдулјавада Хигаега (Mohamed Abduljawad Higaeg), маг. инж. маш., Комисија за преглед, оцену и одбрану докторске дисертације 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, стандардима и Статутом Машинског факултета у Београду. Комисија такође сматра да дисертација представља оригиналан и успешан научно-истраживачки рад, са којим је научна и стручна јавност упозната кроз научни рад објављен у међународним часопису категорије M23.

Комисија за оцену и одбрану докторске дисертације закључила је да дисертација представља оригинални научни рад са научним доприносом у области техничких наука, ужа научна област ваздухопловство, па сагласно томе предлаже Наставно-научном већу Машинског факултета Универзитета у Београду да прихвати Реферат Комисије, да дисертацију под називом „Оптимизација композитне лопатице ветротурбине са хоризонталном осовином на основу анализе интеракције флуида и структуре“ (OPTIMIZATION OF COMPOSITE HORIZONTAL AXIS WIND TURBINE BLADE ON THE BASIS OF FLUID-STRUCTURE INTERACTION ANALYSIS) кандидата Мохамеда Абдулјавада Хигаега (Mohamed Abduljawad Higaeg), маг. инж. маш., стави на увид јавности и да Реферат упути на коначно усвајање Већу научних области техничких наука Универзитета у Београду.

Београд, 10.02.2020.

ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ

.....
Др Александар Симоновић, редовни професор,
Универзитет у Београду, Машински факултет

.....
Др Игор Балаћ, редовни професор,
Универзитет у Београду, Машински факултет

.....
др Петар Ускоковић, редовни професор,
Технолошко-металуршки факултет, Универзитет у
Београду.