

Факултет МАШИНСКИ

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ

717/6
(Број захтева)
29.08.2024.
(Датум)

Већу научних области техничких наука
(Назив већа научне области коме се захтев упућује)

ЗАХТЕВ

за давање сагласности на одлуке о усвајању извештаја Комисије за оцену докторске дисертације и о именовању комисије за одбрану

Молимо да, сходно члану 47. ст. 5. тач. 4. Статута Универзитета у Београду ("Гласник Универзитета", број 186/15-пречишћени текст и 189/16), дате сагласност на одлуку о усвајању извештаја Комисије за оцену докторске дисертације:

КАНДИДАТ МИЛИЦА (ПРЕДРАГ) МИЛИЋ
(име, име једног од родитеља и презиме)

студент докторских студија на студијском програму МАШИНСКО ИНЖЕЊЕРСТВО

пријавио је докторску дисертацију под називом:

**МУЛТИДИСЦИПЛИНАРНИ ПРИСТУП ОПТИМИЗАЦИЈИ И ПРЕДИКЦИЈИ ОТКАЗА СЛОЖЕНО ОПТЕРЕЋЕНИХ
ВАЗДУХОПЛОВНИХ КОМПОЗИТНИХ СТРУКТУРА**
из научне области: Машинство

Универзитет је 16.10.2023. својим актом под бр. 61206-3301/2-23 дао сагласност на предлог теме докторске дисертације
која је гласила:

**МУЛТИДИСЦИПЛИНАРНИ ПРИСТУП ОПТИМИЗАЦИЈИ И
ПРЕДИКЦИЈИ ОТКАЗА СЛОЖЕНО ОПТЕРЕЋЕНИХ
ВАЗДУХОПЛОВНИХ КОМПОЗИТНИХ СТРУКТУРА**

**Име и презиме ментора др Јелена Сворцан, ванр. проф. и др
Тони Иванов, ванр. проф.**

Комисија за оцену докторске дисертације именована је на седници одржаној од 16.05.2024.
одлуком факултета под бр. 717/2, у саставу:

	Име и презиме члана комисије	звање	научна област	Установа у којој је запослен
1.	др Мирко Динуловић	ред. проф.	Ваздухопловство	Машински факултет БУ
2.	др Александар Симоновић	ред. проф.	Ваздухопловство	Машински факултет БУ
3.	др Немања Зорић	ред. проф.	Механика	ИНН Винча, Београд
4.	др Огњен Пековић	ванр. проф.	Ваздухопловство	Машински факултет БУ
5.	др Ивана Атанасовска	научни саветник	Техничко-технолошке науке - Машинство	Математички институт САНУ

Напомена: уколико је члан Комисије у пензији навести датум пензионисања.

Датум стављања извештаја Комисије и докторске дисертације на увид јавности 12.07.2024.

Наставно-научно веће факултета усвојило је извештај Комисије за оцену докторске дисертације на седници одржаној дана 29.08.2024.

Комисија за одбрану докторске дисертације именована је на седници одржаној 16.05.2024.

одлуком факултета под бр. 717/2

, у саставу:

	Име и презиме члана комисије	звање	научна област	Установа у којој је запослен
1.	др Мирко Динуловић	ред. проф.	Ваздухопловство	Машински факултет БУ
2.	др Александар Симоновић	ред. проф.	Ваздухопловство	Машински факултет БУ
3.	др Немања Зорић	ред. проф.	Механика	ИНН Винча, Београд
4.	др Огњен Пековић	ванр. проф.	Ваздухопловство	Машински факултет БУ
5.	др Ивана Атанасовска	научни саветник	Техничко-технолошке науке - Машинство	Математички институт САНУ

Напомена: уколико је члан Комисије у пензији навести датум пензионисања.

ДЕКАН ФАКУЛТЕТА

Проф. др Владимир Поповић

- Прилози:**
1. Одлука Наставно-научног већа о усвајању извештаја Комисије за оцену докторске дисертације и одлука о именовању Комисије за одбрану докторске дисертације
 2. Извештај Комисије о оцени докторске дисертације
 3. Примедбе на извештај Комисије о оцени докторске дисертације (уколико их је било) и мишљење Комисије о примедбама

Напомена: Факултет доставља Универзитету захтев са прилозима у електронској форми и у једном писаном примерку за архиву Универзитета

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ
- МАШИНСКИ ФАКУЛТЕТ –
Број: 717/5
Датум: 29.08.2024. године
Београд, Краљице Марије бр. 16

На основу члана 40. Закона о високом образовању образовању („Службени гласник РС“, број 88/2017, 73/2018, 27/2018 – др. закон 67/2019, 6/2020 – др. закони, 11/2021 – аутентично тумачење, 67/2021, 67/2021 – др. закон и 76/2023), члана 64. Статута Машинског факултета - пречишћен текст (број 1136/4 од 28.06.2021. године), Одлуке о изменама и допунама Статута број 239/6 од 17.02.2023. године, чланова 46. и 47. Правилника о докторским студијама на Универзитету у Београду - Машинском факултету, Наставно-научно веће Машинског факултета на седници одржаној 29.08.2024. године, донело је:

ОДЛУКУ

Усваја се Извештај о урађеној докторској дисертацији Комисије за оцену и одбрану докторске дисертације **„МУЛТИДИСЦИПЛИНАРНИ ПРИСТУП ОПТИМИЗАЦИЈИ И ПРЕДИКЦИЈИ ОТКАЗА СЛОЖЕНО ОПТЕРЕЂЕНИХ ВАЗДУХОПЛОВНИХ КОМПОЗИТНИХ СТРУКТУРА“** студента **МИЛИЦЕ МИЛИЋ**, маг. инж. маш.

У року од 30 дана од дана стављања докторске дисертације на увид јавности није било примедби на Извештај и докторску дисертацију.

Докторску дисертацију и Извештај о урађеној докторској дисертацији доставити на давање сагласности Већу научних области техничких наука Универзитета у Београду.

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

Универзитет у Београду је својом Одлуком број 61206-3301/2-23 од 16.10.2023. године, дао сагласност на предлог теме докторске дисертације.

Објављени радови студента у часописима међународног значаја:

1. **Milic, M.**, Svorcan, J., Zoric, N., Atanasovska, I., Momcilovic, D.: Mathematical modeling and experimental investigation of a composite beam failure - Case study, – *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, vol. 238, no. 3, pp. 654-665, 2023 (**IF2022 = 2.0**) (ISSN 0954-4062) (<https://doi.org/10.1177/09544062231179078>)

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

ДЕКАН
МАШИНСКОГ ФАКУЛТЕТА

проф. др Владимир Поповић

НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ

Предмет: Извештај о урађеној докторској дисертацији кандидаткиње **Милице Милић, маг.инж.маш.**

Одлуком Наставно-научног већа Универзитета у Београду – Машинског факултета бр. **717/2** од **16.05.2024.** године, именовани смо за чланове Комисије за оцену и одбрану докторске дисертације кандидаткиње **Милице Милић, маг.инж.маш.** под насловом

„Мултидисциплинарни приступ оптимизацији и предикцији отказа сложено оптерећених ваздухопловних композитних структура”.

После прегледа достављене Дисертације и других пратећих материјала и разговора са Кандидаткињом, Комисија је сачинила следећи

ИЗВЕШТАЈ

1. УВОД

1.1. Хронологија одобравања и израде дисертације

Милица Милић уписала је школске 2018/2019. године Докторске академске студије на Универзитету у Београду – Машинском факултету. Све испите предвиђене планом докторских студија положила је са просечном оценом 9,86 и успешно је одбранила Пројекат идеје докторске дисертације.

Кандидаткиња је 26.05.2023. године поднела захтев за пријаву теме докторске дисертације на Универзитету у Београду – Машинском факултету бр. 831/1 под менторством ванредних професора Универзитета у Београду – Машинског факултета др Јелене Сворцан и др Тонија Иванова на који је сагласност дала Катедра за ваздухопловство (831/2 од 16.06.2023. године).

Одлуком Наставно-научног већа Машинског факултета бр. 831/3 од 22.06.2023. године за менторе докторске дисертације именовани су ванредни професори др Јелена Сворцан и др Тони Иванов.

Одлуком Наставно-научног већа Машинског факултета Београду бр. **831/4** од **22.06.2023.** године, именована је Комисија за оцену научне заснованости теме докторске дисертације **„Мултидисциплинарни приступ оптимизацији и предикцији отказа сложено оптерећених ваздухопловних композитних структура”** кандидаткиње **Милице Милић, маг.инж.маш.** у саставу:

- др Мирко Динуловић, ред. проф,
- др Александар Симоновић, ред. проф,
- др Немања Зорић, ред. проф,
- др Огњен Пековић, ванр. проф,
- др Ивана Атанасовска, научни сарадник, Математички институт САНУ.

На основу Извештаја наведене Комисије бр. **831/5** од 31.08.2023. године, Наставно-научно веће Машинског факултета у Београду доноси одлуку бр. **831/6** од 07.09.2023. године којом је прихваћена научна заснованост теме докторске дисертације и констатовано да студент испуњава услове за израду дисертације. Веће научних области техничких наука Универзитета у Београду донело је Одлуку бр. **61206-3301/2-23** на седници одржаној **16.10.2023.** године којом се даје сагласност на Одлуку Наставно-научног већа Машинског факултета о прихватању теме докторске дисертације **Милице Милић**, под називом **„Мултидисциплинарни приступ оптимизацији и предикцији отказа сложено оптерећених ваздухопловних композитних структура”** и одређивању проф. др Јелене Сворцан и др Тонија Иванова за менторе.

На основу обавештења ментора ванредних професора др Јелене Сворцан и др Тонија Иванова да је кандидаткиња Милица Милић завршила докторску дисертацију, као и предлога Колегијума наставника Катедре за ваздухопловство, Наставно-научно веће Машинског факултета Универзитета у Београду је на седници одржаној **16.05.2024.** године донело Одлуку бр. **717/2** којом се именују чланови Комисије за оцену и одбрану докторске дисертације у саставу:

- др Мирко Динуловић, ред. проф,
- др Александар Симоновић, ред. проф,
- др Немања Зорић, ред. проф,
- др Огњен Пековић, ванр. проф,
- др Ивана Атанасовска, научни сарадник, Математички институт САНУ.

1.2. Научна област дисертације

Докторска дисертација **Милице Милић** под називом **„Мултидисциплинарни приступ оптимизацији и предикцији отказа сложено оптерећених ваздухопловних композитних структура”** припада научној области Машинско инжењерство, ужа научна област Ваздухопловство, за коју је Машински факултет Универзитета у Београду матичан. Дисертација је рађена под менторством ванредних професора др Јелене Сворцан која у протеклих 10 година има 16 објављених радова категорије M21-M23, и др Тонија Иванова који у протеклих 10 година има објављених 12 радова категорије M21-M23, а из уже научне области Ваздухопловство.

1.3. Биографски подаци о кандидату

Милица Милић рођена је 27. јануара 1994. године у Смедеревској Паланци. По завршетку Ваздухопловне академије у Београду са одличним успехом (носилац је Вукове дипломе), уписала је Машински факултет у Београду 2013. године. Основне академске студије завршила је са просечном оценом 8,50 2016. године. Мастер академске студије завршава 2018. године при Катедри за ваздухопловство са просечном оценом 9,36 одбравивши мастер рад под називом *Компаративна анализа структуралних и аероеластичних појава алуминијумског и композитног крила са „Split“ винглетима*. Исте године уписује и Докторске студије. Све време студија показује склоност ка научно-истраживачком раду као и велику самосталност у истраживању.

Своју прву праксу обавља у ЈАТ Техници, где након завршене праксе своје прво радно искуство стиче у истој компанији у сектору за анализу кварова. Тренутно је запослена у компанији „EDePro” као руководилац сектора за развој, производњу беспилотних летелица и управљање подсистемима. Током Докторских студија активно учествује на међународном пројекту COST ACTION - CA18203 у радној групи за дизајн, оптимизацију и интеграцију. Резултат учешћа на овом пројекту су радови излагани на међународним конференцијама и учешће у летњој школи на националном институту INSA у Француској.

Течно говори енглески језик, а споразумева се и на шпанском и француском. Успешно се служи следећим инжењерским софтвером и алатима: CATIA, ANSYS, MATLAB, FEMAP NX NASTRAN, FTOOL, ADOBE Photoshop, AUTOCAD, итд. као и програмским језицима C/C++, Fortran.

2. ОПИС ДИСЕРТАЦИЈЕ

2.1. Садржај дисертације

Докторска дисертација **Милице Милић** под називом **„Мултидисциплинарни приступ оптимизацији и предикцији отказа сложено оптерећених ваздухопловних композитних структура”** написана је на српском језику и садржи: 156 страна А4 формата (серифни фонт Times New Roman величине 12pt са једноструким проредом), 90 слика, 28 табела, 165 једначина, 52 библиографске референце и подељена је на следеће главе:

1. Увод
2. Преглед литературе и досадашњих релевантних истраживања
3. Композитни материјали
4. Опис летелице чији елементи структуре се детаљније проучавају
5. Преглед могућих случајева оптерећења и отказа подсистема беспилотне летелице
6. Еволуција ударног оптерећења
7. Преглед, одабир и употреба одговарајућих нумеричких метода
8. Преглед, одабир и употреба одговарајућих оптимизационих метода
9. Експериментална валидација оптималне структуре слагања слојева епрувета
10. Експериментална валидација оптималне структуре слагања слојева греде
11. Развој алата за предикцију отказа
12. Закључак

Докторска дисертација садржи насловну страну на српском и енглеском језику, страну са подацима о менторима и члановима комисије, захвалницу, кратак резиме докторске дисертације на српском и енглеском језику, садржај, списак слика, списак табела, номенклатуру, дванаест тематских глава, списак коришћене литературе, прилоге, биографију аутора, Изјаву о ауторству, Изјаву о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада и Изјаву о коришћењу.

2.2. Кратак приказ појединачних поглавља

Прва глава представља увод у тему истраживања – оптимизацију и предикцију могућег отказа сложено оптерећених ваздухопловних композитних структура које су данас присутне на беспилотним летелицама, а чији се процес пројектовања значајно разликује од пилотираних летелица услед различитих полазних захтева и радних режима. Објашњава се мотив истраживања, сврхе, циљеви и важност научног (али и стручног) доприноса тезе.

Друга глава пружа детаљан преглед релевантне литературе и савремених истраживања. Наведени су различити радови који се баве аутоматизованим пројектовањем, концептуалним дизајном, структуралном анализом, испитивањем композитних материјала, упоређивањем математичких модела ударних оптерећења, анализом отказа композитних делова и оптимизацијом структуре. Такође, разматрају се могућности примене вештачке интелигенције, пре свега вештачких неуронских мрежа, у процесу пројектовања композитних структура беспилотних летелица.

У трећој глави детаљно су разматрани композитни материјали, њихови основни елементи, као и механичка својства и критеријуми отказа за различите услове експлоатације. Поред навођења механичких карактеристика композита и метода њиховог израчунавања, представљене су могућности примене критеријума максималних напона (енг. *maximal stress*) и Цаи-Ву (енг. *Tsai-Wu*) критеријума отказа који се данас најчешће користе за процену стања напона и поузданости ламинираних композитних структура. Оваква анализа омогућава унапређење процеса пројектовања ваздухопловних композитних структура и неизоставна је при развијању методологије анализе могућег отказа.

У четвртој глави дат је преглед општих карактеристика беспилотне летелице чији је елемент структуре оштећен, а потом моделиран и оптимизован у овој докторској дисертацији. Детаљно је приказан спољашњи изглед летелице, њене основне димензије и компоненте, описан је начин функционисања, и излистане њене најзначајније карактеристике и перформансе.

Пета глава обухвата преглед могућих случајева оптерећења летелице у експлоатационим условима стандардно очекиваним код пилотираних летелица. Са друге стране, описани су и (чести) могући откази подсистема и анализирани потенцијални негативни утицаји на сигурност и функционалност беспилотне летелице. Поред тога, урађен је математички модел кретања летелице за два могућа радна режима: хеликоптерски и авионски. Извршена је комплетна аеродинамичка анализа, у циљу дефинисања свих сила и момената који у номиналним условима лета делују на летелицу. У хеликоптерском режиму кретања, проучене су једначине вертикалног лета и установљени основни параметри који утичу на летелицу при оваквом кретању. Изведен је закључак да оптерећење летелице у номиналним условима њене експлоатације није адекватно за димензионисање елемената њене структуре јер су нестандартни случајеви оптерећења (као што су удари различитог интензитета) много присутнији него код пилотираних летелица.

У шестој глави изведена је детаљна анализа ударног оптерећења које је довело до оштећења елемената структуре летелице, на основу телеметријских података и реконструкције удесног слетања. Развијен је механички модел непосредно пре и после удара летелице и апроксимирана су сва оптерећења која су у тим тренуцима дејствовала на греду летелице. За потребе успостављања ове методологије, непоходно је било свести сложено просторно оптерећење на равански случај оптерећења (што је описано и у раду [1] публикованом у научном часопису *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science* категорије M23). Упореджено је неколико приступа у извођењу израза за израчунавање силе и момента, и то: израчунавање силе и момента преко максималног угиба и нагиба, као и од јединичне силе и момента, затим упоређивање релативних одступања и одабир најпогоднијег приступа за израчунавање коначне силе погодне за даље анализе (димензионисање и оптимизацију). Овакав приступ у решавању механичког модела греде омогућио је апроксимацију очекиваног сложеног просторног оптерећења на резултујућу статичку ударну силу чиме је проширен скуп оптерећења од значаја и знатно поједностављена пратећа структурална анализа.

Седма глава описује развој параметризованог модела греде и истражује могућност примене одговарајућих нумеричких метода, посебно методе коначних елемента. Ова глава обухвата и упоредну нумеричку анализу композитних епрувета са експериментално тестираним вредностима у циљу валидације механичких карактеристика првобитне греде. Затим следи развој параметризованог модела греде у комерцијалном софтверу *ANSYS APDL* и разматрање два различита случаја граничних услова и уведеног оптерећења. Дефинисањем контурних услова за целу греду, а потом и за оштећени сегмент, омогућено је добијање напонског стања и механичких карактеристика ламината у сегменту од значаја применом нумеричког прорачуна. У овој глави приказана је јединствена методологија задавања одговарајуће комбинације контурних услова посебно прилагођена анализи носећих елемената структуре беспилотних летелица (што је такође објављено у [1]).

У осмој глави дат је кратак преглед коришћених оптимизационих метода. Детаљно је објашњена интеграција генетског алгорита и структуралних анализа у *ANSYS APDL*-у. За предмет (улаз) оптимизације, односно 2 геометријска (пречника отвора) и 12 структуралних (дебљина и оријентација 6 слојева ламината) параметара, тестиране су различите циљне функције и наметнута ограничења (као што су укупна дебљина и маса ламината, максимални напони, померања, деформације, критеријуми лома, и сл) не би ли се дошло до новог, оптималног решења. Коначни резултат је оптимално слагање слојева композитне греде, на основу случаја оптерећења од значаја, а дефинисаног кроз контурне услове описане у седмој глави. Приказана су и упоређена решења добијена кроз различите оптимизационе поступке (једно- и вишекритеријумске са свођењем на један излаз помоћу дефинисаних тежинских фактора). Извршена је интеграција јединствено формираних кодова за циљне функције и ограничења као и параметарско постављање комплетне статичке анализе у позадинском процесу.

Девета глава приказује експерименталну валидацију нове структуре добијене успостављеним оптимизационим поступком. У циљу смањења трошкова, урађена је упоредна експериментално-нумеричка анализа истезања епрувета на кидалици *SHIMADZU AGX-V*. Ова анализа омогућила је увид у тачне механичке особине оптимизованог ламината. Детаљном квалитативном анализом добијених кривих напон-деформација, установљено је да оптимално слагање има већу жилавост од претходног и да је са аспекта ударних оптерећења, такав ламинат повољнији за примену на овом типу ваздухопловних структура. Поред особине веће жилавости, овај ламинат има смањену масу и укупну дебљину, чиме је достигнуто жељено оптимално решење.

У десетој глави описана је експериментална валидација оптималног слагања слојева на греди. Поред упоредне анализе резултата, приказан је кратак процес израде саме греде, као и припрема и стварна поставка експерименталног испитивања. Детаљно су описана места уношења оптерећења и мерења деформација мерним тракама. Експериментално испитивање греде је урађено за мале силе, које одговарају вредностима вучне силе од два електрична мотора везана за елисе, као и утицају стабилизатора током номиналне експлоатације. Ова врста оптерећења је изабрана због недостатка опреме за уношења ударних сила. Примећена је добра кореспонденција између резултата и потврђени су закључци о разликама у нумеричком и стварном моделу било које структуре која се на тај начин валидира.

Једанаеста глава представља развој алата за брзу предикцију одговора структуре (дефинисане преко 14 геометријских и структуралних улазних параметара) који се даље може користити за предикцију могућег отказа, изналажење оптималног решења за различите циљне функције, итд. У овој глави детаљно је описана примена машинског учења на композитне материјале и структуре, као и формирање предиктивног модела заснованог на вештачким неуронским мрежама. Овакав алат успешно врши предвиђање жељених излазних

параметара (дебљине ламината, укупне масе, максималних напона, померања, деформације као и критеријума лома) за задате улазне податке (којима је у потпуности дефинисано вишеслојно ређање ламината као и одређене геометријске карактеристике структуре) и може се користити за брзу карактеризацију структуре, а нарочито њене структуралне поузданости. Потом је формиран алат за предикцију интегрисан са генетским алгоритмом ради добијања оптималних решења (за нпр. дефинисану циљну функцију минималне масе уз ограничење максималне деформације). Модел је поново валидиран кроз МКЕ анализу за оптимално слагање слојева које је добијено. Релативне разлике у прорачунатим и предвиђеним излазним вредностима остају испод 12%, што је веома задовољавајући резултат, и доказује изванредну уштеду у прорачунском времену која је остварена овим помоћним алатом.

У дванаестој глави поновљени су најзначајнији закључци и сумирана искуства стечена током спровођења мултидисциплинарног истраживања у оквиру реализације ове докторске дисертације.

3. ОЦЕНА ДИСЕРТАЦИЈЕ

3.1. Савременост и оригиналност

Докторска дисертација **Милице Милић** под насловом „**Мултидисциплинарни приступ оптимизацији и предикцији отказа сложено оптерећених ваздухопловних композитних структура**” представља значајан и оригинални допринос у области примене нумеричких метода и оптимизације композитних структура у ваздухопловству. Кроз примену напредних нумеричких техника, попут методе коначних елемената и интеграције генетског алгоритма са нумеричком симулацијом, успостављена је јединствена методологија за детаљну анализу и оптимизацију механичких карактеристика сложено оптерећених структура беспилотних летелица. У поређењу са тренутним научним истраживањима, ова докторска дисертација истиче се кроз јединствен приступ развоју методологије дефинисања и задавања одговарајућих граничних услова, за прецизније анализе и боље разумевање понашања материјала под различитим карактерима оптерећења. Осим тога експериментална валидација резултата пружа додатну потврду квалитета добијених резултата новоуспостављеном методологијом и успешности примењених метода у реалним условима. Посебно се истиче развој алата за предикцију отказа структуре и материјала, где се примењују напредне технике машинског учења за решавање комплексних инжењерских проблема. Овај мултидисциплинарни приступ представља иновативни корак у решавању оптимизације и предикције понашања материјала и његових механичких карактеристика.

3.2. Осврт на референтну и коришћену литературу

Током рада на својој докторској дисертацији, кандидаткиња се детаљно упознала са релевантним и актуелним истраживањима из области прорачуна, експерименталног испитивања, оптимизације и предикције одзива одговорних ваздухопловних композитних структура, што је резултовало одабраним списком од 52 библиографске референце. Посебно су размотрени литературни извори који се односе на могућности примене вештачких неуронских мрежа за развитак брзих предиктивних алата у области структуралне анализе ламинираних композитних структура. Наведени научни радови, књиге, докторати и саопштења са научних скупова углавном су публиковани у току последње деценије што указује на актуелност, сложеност и мултидисциплинарност истраживане теме. Резултати доступних истраживања коришћени су за упоредну анализу и верификацију развијених модела, као и унапређење предложене методологије за оптимизацију и процену могућег отказа композитних структура. Приложени списак коришћене литературе такође укључује и

публикације из међународних часописа и зборника научних скупова које су директно проистекле из израде ове докторске дисертације, а на којима је кандидаткиња главни аутор или коаутор.

На основу Правилника о поступку провере докторских дисертација које се бране на Универзитету у Београду извршена је провера оригиналности докторске дисертације **Милице Милић** под насловом „**Мултидисциплинарни приступ оптимизацији и предикцији отказа сложено оптерећених ваздухопловних композитних структура**” коришћењем програма *iThenticate*. Утврђен је индекс сличности од 8% уз свако појединачно преклапање мање од 1%. Приказана преклапања односе се на опште фразе које се употребљавају у публикацијама овог типа (назив институције, наслови уводних поглавља, нумерација страна...), синтагме од неколико речи које су у широкој употреби и слично. Све наведено је у складу са чланом 9. Правилника о поступку провере докторских дисертација које се бране на Универзитету у Београду.

3.3. Опис и адекватност примењених научних метода

У овој докторској дисертацији примењене су бројне научне методе како би се истражили различити аспекти ваздухопловног инжењерства и науке о материјалима. Описани методи одговарају комплексности и захтевима теме и обухватају како експерименталне тако и теоријске приступе. Експерименталне методе су коришћене за испитивање механичких својстава композитних материјала, као и за валидацију нумеричких модела. У том контексту, формиран је математички модел кретања летелице, како би се установила оптерећења у номиналним условима експлоатације. Теоријске методе обухватају математичко моделирање и симулације, као и примену компјутерских метода за анализу и оптимизацију. Метод коначних елемената коришћен је за предвиђање понашања материјала и структура под различитим условима, као и за пројектовање нових структура. Применом теоријских метода формиран је и механички модел апроксимације просторног оптерећења на равански. Овај модел је значајан јер омогућава боље разумевање интеракције између структуре и оптерећења у различитим условима летења и поред тога смањује комплексност понављања симулација. Приступи засновани на машинском учењу и вештачкој интелигенцији коришћени су за анализу и обраду великих скупова података, као и за примену алгоритама оптимизације за пројектовање структура (овде је коришћен генетски алгоритам). Интеграцијом различитих метода, ова дисертација остварује синергију између различитих приступа (аналитичког, нумеричког, експерименталног) и пружа комплексан увид у области примене композитних материјала у ваздухопловству. Истраживачки рад у оквиру ове докторске дисертације задовољава највише научне стандарде и доприноси у развоју ових области, успостављајући иновативну методологију и интеграцију више различитих приступа.

3.4. Применљивост остварених резултата

Остварени резултати ове докторске дисертације имају значајну применљивост у области ваздухопловства и науке о композитним материјалима што се првенствено односи на математичке моделе кретања и упрошћене механичке моделе оптерећења који су формиран и валидирани кроз ово истраживање. Они омогућавају поједностављени приступ комплексном просторном оптерећењу, што је од суштинског значаја за дизајн и развој ваздухопловних композитних структура. Ови модели могу бити коришћени у процесу дизајнирања нових структура, као и у предвиђању њихових перформанси у различитим условима оптерећења (неочекиваним код пилотираних летелица). Поред тога, резултати истраживања применљиви су и у областима обраде података и алгоритама оптимизације. Примена метода машинског учења и вештачке интелигенције за анализу и обраду великих

скупова података отвара нове могућности за истраживање и развој савремених структура. Додатно, алгоритми оптимизације могу се користити за дизајн и оптимизацију одговорних ваздухопловних елемената, што може довести до побољшања њихових перформанси и ефикасности, највише у смислу смањења трошкова тестирања, израде и одржавања, као и времену потребном за спровођење комплексних анализа.

Исходи овог истраживања имају потенцијал да допринесу унапређењу технологије и иновација у области ваздухопловства. Прилично је вероватно да ће резултати ове дисертације бити коришћени у будућим пројектима развоја беспилотних летелица и њихових компоненти.

3.5. Оцена достигнутих способности кандидата за самостални научни рад

Током израде своје докторске дисертације, кандидаткиња **Милица Милић** је показала несумњиву способност да самостално препозна и решава научне и инжењерске проблеме коришћењем савремених научноистраживачких метода. Поред систематичног прегледа и критичке оцене савремених истраживања, дефинисања сопствених математичких и нумеричких модела као и методологије оптимизације и предикције, спровођења нумеричких испитивања, кандидаткиња је реализовала и бројна експериментална истраживања и спровела упоредне анализе између два типа резултата чиме је верификовала своје нумеричке моделе. Све наведено потврђено је публикацијама у часописима од међународног значаја, као и саопштењима на научним скуповима и представља добру основу за успешан самосталан научноистраживачки рад у будућности.

4. ОСТВАРЕНИ НАУЧНИ ДОПРИНОС

4.1. Приказ остварених научних доприноса

У оквиру докторске дисертације **Милице Милић** под насловом „**Мултидисциплинарни приступ оптимизацији и предикцији отказа сложено оптерећених ваздухопловних композитних структура**” остварени су следећи оригинални научни доприноси:

1. Идентификација и (експериментално валидирано) моделирање (до сада недовољно препознатих и разматраних) критичних случајева оптерећења од значаја за димензионисање носећих структура савремених беспилотних летелица, а потом и пратећа
2. Оптимизације предметне композитне ламинатне структуре беспилотне летелице.

На основу стеченог искуства, и генерисаних база нумеричких података потом је формиран и брз предиктивни алат (заснован на вештачким неуронским мрежама) за процену понашања различитих ламинатних структура при дејству критичних оптерећења чиме је омогућена и брза предикција одговарајућих одзива структуре, као и могућих отказа. Ово је само један од додатних доприноса спроведеног истраживања.

4.2. Критичка анализа резултата истраживања

На основу детаљног прегледа референтне научне литературе у области ваздухопловства, а нарочито беспилотних летелица и композитних структура, Комисија констатује да су приказани резултати истраживања значајни, нови и научно утемељени. Сагледавањем постављених циљева истраживања, полазних претпоставки и остварених нумеричких и

експерименталних резултата приказаних у докторској дисертацији, констатујемо да је кандидаткиња **Милица Милић** успешно понудила своја оригинална и оптимална решења носеће ламиниране структуре.

Предложена решења представљају следећа унапређења у поређењу са постојећим приступима:

- Развијени структурални модел, са адекватно задатим граничним условима, значајно упрошћава анализу сложених оптерећења које се срећу у реалним експлоатационим условима,
- Размотрени су различити излазни параметри и извршена је селекција најутицајних за правилно карактерисање одговорних композитних структура,
- Спрега поједностављеног структуралног модела са оптимизационим алгоритмом значајно олакшава и убрзава пројектовање одговорних композитних структура,
- Све приказане структуралне анализе су и експериментално валидиране,
- Предложени структурални модел искоришћен је за формирање базе података одговора структуре, која је потом искоришћена за дефинисање једноставног алата за предикцију заснованог на вештачким неуронским мрежама, чиме је остварена додатна уштеда времена и ресурса потребних за пројектовање композитних структура.

Комисија констатује да су научни доприноси остварени током израде докторске дисертације објављени у међународном научном часопису категорије M23, као и у зборницима међународних и националних научних скупова.

4.3. Верификација научних доприноса

Списак радова и излагања на научним скуповима који су резултат истраживања у оквиру докторске дисертације дат је у наставку. Научни доприноси наведени у Тачки 4.1. верификовани су радом категорије M23 чији је **Милица Милић** први аутор и једини аутор без доктората:

Категорија M23:

1. **Milic, M.**, Svorcan, J., Zoric, N., Atanasovska, I., Momcilovic, D.: Mathematical modeling and experimental investigation of a composite beam failure - Case study, – *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, vol. 238, no. 3, pp. 654-665, 2023 (**IF2022 = 2.0**) (ISSN 0954-4062) (<https://doi.org/10.1177/09544062231179078>)

Научни рад публикован у међународном часопису:

2. Bisagni, C., Raimondo, A., Atanasovska, I., **Milic, M.**, Troian, R., Frulla, G., Polla, A., Cora, Ö.N., Bekci, M.L., Henriques, B., de Moura, M.F.S.F., Almudaihesh, F., Grigg, S.: Comparison of numerical analyses of a composite wing component subjected to 4-point bending, – *Composites Part C: Open Access*, vol 8, pp. 100264, 2022 (**IF2022 = 4.2 (ESCI)**) (ISSN 2666-6820) (<https://doi.org/10.1016/j.jcomc.2022.100264>)

Категорија M33:

3. **Milić, M.**, Radulović, R.: „Development of a hybrid fixed-wing VTOL unmanned aerial vehicle,“ – *Proceedings of the 9th International Congress of Serbian Society of Mechanics*, Vrnjačka Banja, Serbia, 2023, pp. 109-118.

4. Fei, X., Radulović, R., **Milić, M.**: „Comparative structural analysis of aluminum and composite wing of passenger aircraft,” – *Proceedings of the 9th International Congress of Serbian Society of Mechanics*, Vrnjačka Banja, Serbia, 2023, pp. 182-190.
5. **Milić, M.**, Svorcan, J.: “Preliminary full configuration drag estimation of fixed wing UAV using analytical aerodynamics,” – *Proceedings of the International Symposium on Aircraft Technology, MRO & Operations (ISATECH)*, Belgrade, 2022, pp. 305-310.
6. Svorcan, J., **Milić, M.**, Vasić, V.: “Numerical analysis of aerodynamic performances of single vs. double wing (biplane) configuration,” – *Proceedings of the 5th International Scientific Conference on Mechanical Engineering Technologies and Applications COMETA 2020*, Jahorina, BIH, 2020, pp. 315-323.
7. **Milić, M.**, Svorcan, J., Zorić, N.: “Numerical Simulation of Aerodynamic Performance of Wing with Split Winglets,” – *Proceedings of the 9th International Scientific Conference on Defensive Technologies OTEH 2020*, Belgrade, 2020, pp. 1-6.
8. **Milić, M.**, Svorcan, J., Jazarević, V.: “Numerical structural analysis of a composite wind turbine blade,” – *Proceedings of the XXXV International Conference ENERGETIKA 2020*, Zlatibor, Serbia, 2020, pp. 262-266.
9. Svorcan, J., Baltić, M., Ivanov, T., Peković, O., Milić, M.: “Numerical evaluation of aerodynamic loads and performances of vertical-axis wind turbine rotor,” – *Proceedings of the 7th International Congress of Serbian Society of Mechanics*, Sremski Karlovci, Serbia, 2019, pp. 1-10.

Категорија M34:

10. Gavrilović, M., Radulović, R., **Milić, M.**, Trišović, N.: “Optimal Number of Cells in a Numerical Grid for Fluid Flow around the Body,” – *Booklet of Abstracts of the 9th International Scientific Conference on Advances in Mechanical Engineering (ISCAME)*, Debrecen, Hungary 2023, pp. 27.
11. **Milić, M.**, Radulović, R., Trišović, N., Gavrilović, M.: “Fracture Analysis of Composite Beam Element: Case Study,” – *Booklet of Abstracts of the 9th International Scientific Conference on Advances in Mechanical Engineering (ISCAME)*, Debrecen, Hungary 2023, pp. 68.
12. Trišović, N., Li, W., Lazović-Kapor, T., Gavrilović, M., Radulović, R., **Milić, M.**, Baneasa Birtok, C.: “The Modern Approach to Optimizing Mechanical Systems,” – *Booklet of Abstracts of the 9th International Scientific Conference on Advances in Mechanical Engineering (ISCAME)*, Debrecen, Hungary 2023, pp. 114.
13. **Milić, M.**, Svorcan, J.: “Unmanned aerial vehicle trajectory visualization and reconstruction using the changes in significant variables over time,” – *Booklet of Abstracts of the 1st International Conference on Mathematical Modelling in Mechanics and Engineering (ICME 2022)*, Belgrade, 2022, pp. 112.
14. Atanasovska, I., **Milić, M.**, Trišović, N.: “Modelling optimization for a composite wing component,” – *Booklet of Abstracts of the 1st International Conference on Mathematical Modelling in Mechanics and Engineering (ICME 2022)*, Belgrade, 2022, pp. 147.
15. **Milić, M.**, Atanasovska, I., Risić, O., Momčilović, D.: “Failure analysis of beam of unmanned aerial vehicle,” – *Booklet of Abstracts of the 1st International Conference on Mathematical Modelling in Mechanics and Engineering (ICME 2022)*, Belgrade, 2022, pp. 156.

5. ЗАКЉУЧАК И ПРЕДЛОГ

На основу детаљног прегледа и анализе докторске дисертације **„Мултидисциплинарни приступ оптимизацији и предикцији отказа сложено оптерећених ваздухопловних композитних структура”** кандидаткиње **Милице Милић, маг.инж.маш.**, Комисија за оцену и одбрану докторске дисертације констатује да је дисертација успешно завршена у складу са предметом и постављеним циљевима истраживања и да представља оригинални научни рад са научним доприносом у научној области Машинско инжењерство и ужој научној области Ваздухопловство. Кандидаткиња је кроз спроведена истраживања дошла до оригиналних научних резултата који су успешно експериментално валидирани и који се могу применити у инжењерској пракси.

Комисија такође закључује да је докторска дисертација урађена сходно стандардима научно-истраживачког рада, да испуњава све услове и да је у складу је са Законом о високом образовању, Статутом и Правилником о Докторским студијама Универзитета у Београду – Машинског факултета.

Имајући у виду наведено, Комисија предлаже Научно-наставном већу Машинског факултета Универзитета у Београду да усвоји овај Извештај и да се докторска дисертација под називом **„Мултидисциплинарни приступ оптимизацији и предикцији отказа сложено оптерећених ваздухопловних композитних структура”** кандидаткиње **Милице Милић, маг.инж.маш.** прихвати, заједно са овим Извештајем стави на увид јавности и упуту на коначно усвајање Већу научних области техничких наука Универзитета у Београду.

У Београду, 28.06.2024. године

ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ

.....
Проф. др Мирко Динуловић,
Универзитет у Београду - Машински факултет

.....
Проф. др Александар Симоновић,
Универзитет у Београду - Машински факултет

.....
Проф. др Немања Зорић,
Универзитет у Београду - Машински факултет

.....
Ванр. проф. др Огњен Пековић,
Универзитет у Београду - Машински факултет

.....
Др Ивана Атанасовска, научни саветник,
Математички институт САНУ

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ
МАШИНСКИ ФАКУЛТЕТ
Бр. 717/2
Датум: 16.05.2024. године
БЕОГРАД, Ул. краљице Марије бр. 16

На основу обавештења др Јелене Сворцан, ванр. проф., ментора и др Тонија Иванова, ванр. проф., ментора да је студент Милица Милић, маст. инж. маш., завршила докторску дисертацију „Мултидисциплинарни приступ оптимизацији и предикцији отказа сложено оптерећених ваздухопловних композитних структура“, предлога Колегијума наставника Катедре за ваздухопловство, а сагласно члану 40. Закона о високом образовању („Службени гласник РС“, број 76/2005, 100/2007 – аутентично тумачење, 97/2008, 93/2012, 89/2013 и 76/2023) и члану 42 Правилника о докторским студијама Машинског факултета, Наставно – научно веће Машинског факултета на седници одржаној дана 16.05.2024. године, донело је следећу

ОДЛУКУ

- др Мирко Динуловић, ред. проф.,
- др Александар Симоновић, ред. проф.,
- др Немања Зорић, ред. проф.,
- др Огњен Пековић, ванр. проф. и
- др Ивана Атанасовска, научни саветник, Математички институт САНУ

именују се за чланове Комисије за оцену и одбрану докторске дисертације **„МУЛТИДИСЦИПЛИНАРНИ ПРИСТУП ОПТИМИЗАЦИЈИ И ПРЕДИКЦИЈИ ОТКАЗА СЛОЖЕНО ОПТЕРЕЋЕНИХ ВАЗДУХОПЛОВНИХ КОМПОЗИТНИХ СТРУКТУРА“** студента **МИЛИЦЕ МИЛИЋ**, маст. инж. маш.

Одлуку доставити: члановима Комисије, студенту и архиви Факултета.

ДЕКАН
МАШИНСКОГ ФАКУЛТЕТА

проф. др Владимир Поповић