

Факултет Машински

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ

831/6

(Број захтева)

07.09.2023.

(Датум)

Веће научних области техничких наука(Назив већа научне области коме се захтев  
упућује)**ЗАХТЕВ****за давање сагласности на одлуку о прихватању теме докторске дисертације и  
о одређивању ментора**

Молимо да, сходно члану 47. ст. 5. тач. 3. Статута Универзитета у Београду ("Гласник Универзитета", број 186/15-пречишћени текст и 189/16), дате сагласност на одлуку о прихватању теме докторске дисертације:

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

(пун назив предложене теме докторске дисертације)

НАУЧНА ОБЛАСТ

Ваздухопловство

ПОДАЦИ О КАНДИДАТУ:

- Име, име једног од родитеља и презиме кандидата:  
МИЛИЦА (ПРЕДРАГ) МИЛИЋ
- Претходно образовање (назив и седиште факултета, студијски програм):  
Машински факултет Београд
- Година завршетка претходног нивоа студија: 2018.
- Година уписа на докторске студије: 2018.
- Назив студијског програма докторских студија: Машинско инжењерство

## ПОДАЦИ О МЕНТОРУ:

Име и презиме ментора: Јелена Сворцан

Звање: ванредни професор

Списак радова који квалификују ментора за вођење докторске дисертације:

1. Najafi Khaboshan, H., Yousefi, E., Svorcan, J. Analysis of the turbulent boundary layer and skin-friction drag reduction of a flat plate by using the micro-blowing technique. (2022) Journal of Applied Mechanics and Technical Physics (ISSN 0021-8944, IF2022 = 0.6), 63 (3), pp. 425-436. doi: 10.1134/S0021894422030075
2. Hasan, M.S., Svorcan, J.M., Simonović, A.M., Mirkov, N.S., Kostić, O.P. Optimal airfoil design and wing analysis for solar-powered high altitude platform station. (2022) Thermal Science (ISSN 0354-9836, IF2022 = 1.7), 26 (3), pp. 2163-2175. doi: 10.2298/TSCI210419241S
3. Svorcan, J., Peković, O., Simonović, A., Tanović, D., Hasan, M.S. Design of optimal flow concentrator for vertical-axis wind turbines using computational fluid dynamics, artificial neural networks and genetic algorithm. (2021) Advances in Mechanical Engineering (ISSN 1687-8132, IF2021 = 1.566), 13 (3). doi: 10.1177/16878140211009009
4. Kovačević, A., Svorcan, J., Hasan, M.S., Ivanov, T., Jovanović, M. Optimal propeller blade design, computation, manufacturing and experimental testing. (2021) Aircraft Engineering and Aerospace Technology (ISSN 1748-8842, IF2021 = 1.478), 93 (8), pp. 1323-1332. doi: 10.1108/AEAT-03-2021-0091
5. Baltić, M., Svorcan, J., Perić, B., Vorkapić, M., Ivanov, T., Peković, O. Comparative numerical and experimental investigation of static and dynamic characteristics of composite plates. (2019) Journal of Mechanical Science and Technology (ISSN 1738-494X, IF2019 = 1.345), 33 (6), pp. 2597-2603. doi: 10.1007/s12206-019-0507-7

## ПОДАЦИ О МЕНТОРУ:

Име и презиме ментора: Тони Иванов

Звање: доцент

Списак радова који квалификују ментора за вођење докторске дисертације:

1. Vorkapić, M., Mladenović, I., Ivanov, T., Kovačević, A., Hasan, M.S., Simonović, A., Trajković, I. Enhancing mechanical properties of 3D printed thermoplastic polymers by annealing in moulds. (2022) Advances in Mechanical Engineering (ISSN 1687-8132, IF2022 = 2.1), 14 (8). doi: 10.1177/16878132221120737
2. Milošević, M., Trajković, I., Golubović, Z., Ivanov, T., Mladenović, G., Milovanović, A., Mitrović, N. Development of methodologies for experimental analysis of neck deformations caused by impact forces in martial arts. (2022) Advances in Mechanical Engineering (ISSN 1687-8132, IF2022 = 2.1), 14 (8). doi: 10.1177/16878132221121515
3. Hasan, M.S., Ivanov, T., Vorkapic, M., Simonovic, A., Daou, D., Kovacevic, A., Milovanovic, A. Impact of aging effect and heat treatment on the tensile properties of PLA (poly lactic acid) printed parts. (2020) Materiale Plastice (ISSN 2668-8220, IF2020 = 0.593), 57 (3), pp. 147-159. doi: 10.37358/MP.20.3.5389
4. Baltić, M., Svorcan, J., Perić, B., Vorkapić, M., Ivanov, T., Peković, O. Comparative numerical and experimental investigation of static and dynamic characteristics of composite plates. (2019) Journal of Mechanical Science and Technology (ISSN 1738-494X, IF2019 = 1.345), 33 (6), pp. 2597-2603. doi: 10.1007/s12206-019-0507-7
5. Ivanov, T.D., Simonović, A.M., Petrović, N.B., Fotev, V.G., Kostić, I.A. Influence of selected turbulence model on the optimization of a class-shape transformation parameterized airfoil. (2017) Thermal Science (ISSN 0354-9836, IF2017 = 1.433), 21, pp. S737-S744. doi: 10.2298/TSCI160209194I

Обавештавамо вас да је Наставно – научно веће на седници одржаној 07.09.2023. године размотрило предложену тему и закључило да је тема подобна за израду докторске дисертације јер садржи оригиналну идеју и да је од значаја за развој науке, примену њених резултата, односно развој научне мисли уопште.

**ДЕКАН ФАКУЛТЕТА**

Прилог:

1. Одлука Наставно-научног већа о прихватању теме и одређивању ментора
2. Извештај Комисије о оцени научне заснованости теме докторске дисертације

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

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ  
- МАШИНСКИ ФАКУЛТЕТ -  
Број: 831/6  
Датум: 07.09.2023. године  
Београд, Краљице Марије 16

На основу члана 40. Закона о високом образовању („Службени гласник РС“, број 88/2017, 27/2018 – др. закон 73/2018, 67/2019, 11/2021 – аутентично тумачење, 67/2021 – др. Закон, 67/2021), члана 64. Статута Машинског факултета – пречишћени текст (број 1136/4 од 28.06.2021. године), Одлуке о изменама и допунама Статута број 239/6 од 17.02.2023. године и члана 38. Правилника о докторским студијама Машинског факултета и захтева студента **Милице Милић**, маг. инж. маш., бр. 831/1 од 26.05.2023. године да јој се одобри израда докторске дисертације, извештаја Комисије у саставу: 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, Наставно-научно веће Машинског факултета на седници од 07.09.2023. године, донело је следећу

### ОДЛУКУ

Прихвата се научна заснованост теме докторске дисертације и констатује да студент **МИЛИЦА МИЛИЋ**, маг. инж. маш. испуњава услове за израду докторске дисертације **«МУЛТИДИСЦИПЛИНАРНИ ПРИСТУП ОПТИМИЗАЦИЈИ И ПРЕДИКЦИЈИ ОТКАЗА СЛОЖЕНО ОПТЕРЕЋЕНИХ ВАЗДУХОПЛОВНИХ КОМПОЗИТНИХ СТРУКТУРА»**.

Одлуком ННВ број 831/3, од 22.06.2023. године за менторе докторске дисертације Милице Милић, маг. инж. маш. именовани су др Јелена Сворцан, ванр. проф. и др Тони Иванов, доц.

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

ДЕКАН  
МАШИНСКОГ ФАКУЛТЕТА

проф. др Владимир Поповић

## ВЕЋУ ДОКТОРСКИХ СТУДИЈА

**Предмет:** Извештај о научној заснованости теме докторске дисертације кандидаткиње **Милице Милић, маг.инж.маш.**

Одлуком Наставно-научног већа Машинског факултета бр. **831/4** од **22.06.2023.** године, именовани смо за чланове Комисије за оцену научне заснованости теме докторске дисертације **„Мултидисциплинарни приступ оптимизацији и предикцији отказа сложено оптерећених ваздухопловних композитних структура”** кандидаткиње **Милице Милић, маг.инж.маш.**

На основу материјала приложеног уз Захтев кандидаткиње, Комисија подноси следећи

## РЕФЕРАТ

### 1. Подаци о кандидаткињи

#### 1.1. Биографски подаци

Кандидаткиња 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 руководица 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.

## 1.2. Стечено научно-истраживачко искуство

Милица Милић је на Докторским студијама Машинског факултета у Београду положила следеће испите: Виши курс математике (оцена 10), Нумеричке методе (оцена 9), ОМНИР и комуникација (оцена 9), Одабрана поглавља из композитних конструкција ваздухоплова (оцена 10), Истраживање и публиковање I (оцена 10), Одабрана поглавља из механике (оцена 10), Одабрана поглавља из структуралне анализе ваздухоплова (оцена 10), Оптимизација ваздухопловних конструкција (оцена 10), Истраживање и публиковање II (оцена 10), Изогеометријска анализа (оцена 10), Нумеричке анализе структура (оцена 10), Истраживање и публиковање III (оцена 10), Истраживање и публиковање IV (оцена 10), са просечном оценом 9.86, и успешно је одбранила Пројекат идеје докторске дисертације.

Поред редовног запослења, све време Докторских студија успешно се бави научно-истраживачким (нумеричким и експерименталним) радом, учествује у реализацији научно-истраживачких пројеката као што је COST ACTION - CA18203 у радној групи за дизајн, интеграцију и оптимизацију, и показује велики афинитет ка најсавременијим темама из области ваздухопловства (као што су пројектовање беспилотних летелица, симулације опструјавања, композитни материјали, инжењерске симулације, оптимизација ваздухопловних структура, и сл), што се може закључити и по списку публикованих радова приказаном у наставку.

Научни рад публикован у међународном часопису – **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, 2023. ISSN 0954-4062, IF2022 = 2.0. <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, 2022, pp. 100264. ISSN 2666-6820, IF2022 = 4.2 (ESCI). <https://doi.org/10.1016/j.jcomc.2022.100264>

Саопштење са међународног скупа штампано у целини – **M33**

3. **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.
4. 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 2020, pp. 315-323.
5. **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

6. **Milić M.**, Svorcan J., Jazarević V.: *Numerical structural analysis of a composite wind turbine blade*, – Proceedings of the XXXV International Conference ENERGETIKA 2020, Zlatibor 2020, pp. 262-266.
7. 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 2019, pp. 1-10.

Саопштење са међународног скупа штампано у изводу – **M34**

8. **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.
9. 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.
10. **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.

Милица Милић је учесник на међународном пројекту COST (European COoperation in Science and Technology) ACTION - CA18203 под називом „Optimising Design for Inspection (ODIN)“ у оквиру радне групе 1.

### 1.3. Оцена подобности кандидаткиње за рад на предложеној теми

Комисија сматра да је Милица Милић испунила све потребне услове за пријаву теме докторске дисертације и да је способна за самостални рад на предложеној теми. Поред одслушаних предавања, положених испита и одбрањеног Пројекта идеје докторске дисертације, у протеклом периоду вршила је различита нумеричка и експериментална истраживања, учествовала у реализацији научно-истраживачких и стручних пројеката и публиковала значајан број научних радова из области којој припада предложена тема што је квалификује за пријаву докторске дисертације под наведеним насловом.

## **2. Предмет и циљ истраживања**

Еволуцијом инжењерских приступа проблемима дошло је до унапређења технологија и производа. У складу са тим дошло је до значајног напретка у развоју нових и побољшању постојећих решења. Почетна идеја прође кроз низ модификација и итеративних процеса до коначног решења, а затим производа. Развојем технологије, дошло се до развоја хардвера и софтвера, који су постали главни инжењерски алати у процесу пројектовања [1-3]. Самим тим горе поменути итеративни процеси су знатно смањени, као и трошкови током трајања развоја и испитивања неког прототипског решења пре обликовања у производ [4]. Међутим, највећи допринос развоја хардвера и софтвера као и њихова учестала примена је у смањењу времена трајања целог процеса.

Данас, тржиште диктира темпо производног процеса који подразумева брзину, ефикасност а исто тако и лакоћу у експлоатацији. Веома конкурентно тржиште у области инжењерских услуга намеће захтеве не само везане за сам производ, већ и за развој и процес добијања тог производа. Критеријуми и захтеви утичу на инжењерску делатност у смислу да процес

развоја мора да пружи јасне и коначне резултате у реалном времену, што се остварује уз употребу бројних инжењерских алата. Посао истраживача-инжењера је да дефинише одговарајући/оптимални математички (нумерички) модел физичког процеса од интереса, и да правилно успостави релације/везе између улазних и излазних параметара. Притом, потребно је правилно ограничити прорачунски домен, формирати геометријски модел, препознати најзначајније физичке утицаје и увести минимална упрошћења [1], спровести (нумеричке) анализе и ефикасно искористити добијене резултате за усвајање коначног решења, све чешће кроз процес оптимизације [1-4]. Да би се избегла могућност јављања непредвиђених проблема у каснијим фазама развитка новог производа, и умањили укупни трошкови, потребно је што боље и тачније спровести почетне фазе пројектовања.

Када је реч о инжењерском приступу и актуелним проблемима у ваздухопловству и пројектовању ваздухопловних структура, побољшању и олакшању процеса развоја допринео је напредак технологије и примена рачунара [1-10]. Када се крене у један развојни процес у ваздухопловству, полазну тачку увек представља аеродинамика и дефинисање такозване аеродинамичке шеме [2], затим се приступа анализи аероеластичних и структуралних феномена [3,4]. Феноменолошки гледано у овој класи проблема, већ постоји велики број стандардизованих метода и приступа, међутим појавом нових материјала дошло се до много неразјашњених појава. Све чешћа употреба композитних материјала, који мењају металне материјале у ваздухопловству, као и савремени производни процеси, довели су до појаве нове класе проблема [1,3,4,6,7]. Услед неизотропности и неправилног облика, процена носивости/понашања танкозидих закривљених структура и даље представља научни изазов, нарочито у случајевима сложеног оптерећења (када се јављају све компоненте напона). Једначине постају комплексније и често се улази у прорачунски домен нелинеарности. Овакви прорачуни због своје комплексности изискују рачунаре који поседују веће и боље ресурсе. Композитни материјали због своје специфичности у самом димензионисању и формирању прорачунског модела, често у оптимизационом процесу захтевају успостављање сопствених алгоритама прилагођених одређеној класи проблема [1,7], као и употребу упрошћених линеаризованих модела за процену отказа (заснованих на различитим критеријумима лома који дефинишу услове при којима може доћи до настанка оштећења у ламини).

Беспилотне летелице су, широм света, доживеле експанзију у примени у разним индустријама, како цивилним тако и војним [1-3]. У војној индустрији се углавном користе за извиђање, подршку артиљерији или као борбене летелице. Класификација беспилотних летелица зависи од њихове аутономије лета, долета, максималне масе при полетању, итд. Све претходно наведено, што се односи на процес пројектовања, може се применити и на беспилотне летелице на чијем развоју се доста ради у последњој деценији. Постоји велики број изузетно различитих конфигурација, величина, материјала, намена, специфичних радних услова, где сваки од њих захтева индивидуални инжењерски приступ. То подразумева искуство и инжењерску праксу на таквим проблемима, јер не постоје јасно утврђене методе, стандарди, процедуре, за оптимално димензионисање структура и избор компоненти беспилотних летелица.

Предмет истраживања ове докторске дисертације је дефинисање упрошћеног (експериментално валидираног) структуралног модела композитног носећег елемента који се даље може успешно користити за оптимизацију (и предикцију отказа) сложене оптерећених ваздухопловних структура. Успостављена методологија рада биће примењена и тестирана на композитној греди која носи електричне моторе и део је структуре беспилотне летелице средњег долета која има могућност вертикалног полетања и слетања. Током лета, овакве летелице трпе различите врсте оптерећења, која директно утичу на то како ће поједини делови конструкције бити димензионисани. Иако се летелица пројектује за режим крстарења, често се у пракси може наћи и под утицајем сложених оптерећења услед здруженог дејства аеродинамичких, инерцијалних, погонских сила, итд. али и ударних оптерећења [5-7]. У

већини непредвиђених случајева лета, компоненте структуре требало би да очувају своју функционалност. Услед недостатка стандардизованих препорука за вредност степена сигурности, потребно је детаљније анализирати сваку појединачну летелицу и услове њене експлоатације. Захтеви за квалитет израђених делова структуре су недовољно дефинисани и могу се десити веома неочекивани откази у структури, као последица непостојања стандарда у технологији израде. Нека од ових питања се решавају, али већина њих остаје отворена и захтева додатни истраживачки рад. Заправо, ово истраживање ће започети дефинисањем задовољавајуће (експериментално валидиране) нумеричке поставке модела композитног носећег елемента, а потом се наставити у испитивање могућности примене различитих метода вештачке интелигенције (коришћењем нових оптимизационих метода и неуронских мрежа [8-10]) у његовом редизајну ради постизања бољих карактеристика или унапређења процеса пројектовања.

Мотивација за ово истраживање лежи у реалном случају лета, при коме је дошло до отказа електронских компоненти, престанка рада једног мотора, пада летелице и оштећења неких од њених најодговорнијих делова. Да би се предупредило понављање оваквих догађаја, потребно је унапредити процес пројектовања структуре беспилотних летелица, правилније и ригорозније дефинисати спектар могућих радних оптерећења (овде су много заступљенији несиметрични случајеви оптерећења него код већих, пилотираних летелица), извршити тачније процене аеродинамичких сила, спровести прецизније прорачуне структуре које ће бити валидиране кроз упоредна експериментална мерења, дефинисати поступак оптимизације композитних структура, квантификовати квалитет израде, и сл. За дефинисање структуре која ће на најбољи начин одговорити на (унеколико специфичне) полазне захтеве, потребно је формирати и интегрисати итеративни прорачунски процес, који ће бити реализован помоћу неколико различитих инжењерских алата. Улазни параметри (чија оптимизација се врши) описује геометрију модела (положаје и димензије потребних отвора), својства материјала и ређање ламината, док ће излазни параметри (функције циља и ограничења) одговарати глобалним карактеристикама (нпр. маси и сопственим фреквенцијама) или одзиву разматране структуре под дејством сложених оптерећења (нпр. максималном померању, напону или Цаи-Ву критеријуму лома). Уобичајено је вршити оптимизацију ваздухопловне структуре ради минимизирања масе (која је директно сразмерна потребној снази, па и трошковима), што ће бити пробано у првом тренутку, али ће бити дефинисане и тестиране и неке додатне циљне функције које можда боље одговарају полазним захтевима. Притом је такође потребно и правилно дефинисати ограничења/ослонце, као и размотрити остале компоненте летелице и њихов утицај на носећи елемент. Дефинисану (и експериментално валидирану) нумеричку поставку могуће је потом искористити и за развој методологије за предикцију отказа композитне ваздухопловне структуре [5-7] засноване на вештачкој интелигенцији. Стручни допринос у овом истраживању огледа се у интеграцији и развоју потребних нумеричких алата.

Научни циљ ове дисертације је развој валидне методологије прорачуна и оптимизације композитне структуре беспилотне летелице која је сложеног/неправилног облика и изложена сложеном оптерећењу. Дефинисање одговарајуће нумеричке поставке условљено је правилним дефинисањем/спознавањем свих радних оптерећења као и утицаја осталих делова летелице. Након (експерименталне) валидације таквог структуралног модела, могуће је даље унапредити процес пројектовања кроз дефинисање оптимизационе петље која за циљ има нпр. минимизирање масе елемента, у зависности од одређених геометријских карактеристика (нпр. положаја и димензија отвора по структури) или својства материјала (типа и ређања ламина у ламинату). Притом је потребно правилно успоставити релације између улазних и излазних параметара и препознати најутицајније. Са друге стране, дефинисани структурални модел може се искористити и за дефинисање нове методе за предикцију отказа засновану на вештачкој интелигенцији (нпр. вештачким неуронским мрежама).

## Преглед и анализа литературе

Списак релевантних библиографских извора који приказују тренутно стање науке и технике у области пројектовања, израде и тестирања беспилотних композитних летелица као и њихових подсистема (структуралних елемената) дат је у наставку:

1. Skarka W., Jałowicki A.: *Automation of a Thin-Layer Load-Bearing Structure Design on the Example of High Altitude Long Endurance Unmanned Aerial Vehicle (HALE UAV)*, – Applied Sciences, Vol 11, No 6, 2021, pp. 2645. <https://doi.org/10.3390/app11062645>
2. Escobar-Ruiz A.G., Lopez-Botello O., Reyes-Osorio L., Zambrano-Robledo P., Amezcuita-Brooks L., Garcia-Salazar O.: *Conceptual Design of an Unmanned Fixed-Wing Aerial Vehicle Based on Alternative Energy* – International Journal of Aerospace Engineering, 2019, pp. 8104927. <https://doi.org/10.1155/2019/8104927>
3. Sheng T.K., Esakki B., Ponnambalam A.: *Finite Element Analysis of Amphibian UAV Structure*, – In: Li C., Chandrasekhar U., Onwubolu G. (eds) *Advances in Engineering Design and Simulation. Lecture Notes on Multidisciplinary Industrial Engineering*, 2020. Springer, Singapore. [https://doi.org/10.1007/978-981-13-8468-4\\_24](https://doi.org/10.1007/978-981-13-8468-4_24)
4. Grbović A., Kastratović G., Božić Ž., Božić I., Obradović A., Sedmak A., Sedmak S.: *Experimental and numerical evaluation of fracture characteristics of composite material used in the aircraft engine cover manufacturing*, – Engineering Failure Analysis, Vol 137, 2022, pp. 106286. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2022.106286>
5. Franke, F., Schwab, M., Burger, U., Hühne C.: *An analytical model to determine the impact force of drone strikes*, – CEAS Aeronautical Journal, Vol 13, 2022, pp. 69–84. <https://doi.org/10.1007/s13272-021-00552-4>
6. Zimmermann N., Wang P.H.: *A review of failure modes and fracture analysis of aircraft composite materials*, – Engineering Failure Analysis, Vol 115, 2020, pp. 104692. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2020.104692>
7. Zhennan H.: *Analysis of After Impact Characteristics and Structural Optimization of CFRP Composite Plate*, – MSc Thesis, Embry-Riddle Aeronautical University, 2020.
8. Wang Y., Soutis C., Ando D., Sutou Y., Narita F.: *Application of deep neural network learning in composites design*, – European Journal of Materials, Vol 2, No 1, 2022, pp. 117–170. <https://doi.org/10.1080/26889277.2022.2053302>
9. Register J.: *Artificial Intelligence based Aerospace Composite Design*, – Individual project, City, University of London, 2021. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.21648.74248>
10. Chen C., Gu G.: *Machine learning for composite materials*, – MRS Communications, Vol 9, No 2, 2019, pp. 556–566. <https://doi.org/10.1557/mrc.2019.32>

Истраживање описано у [1] фокусирано је на паметно (аутоматизовано) пројектовање танкозидих елемената структуре беспилотне летелице. Значај употребе аутоматизације и оптимизације у процесу пројектовања као и могућа олакшања и уштеде су наглашени. Концептуални дизајн и прорачун опструјавања беспилотне летелице обрађени су у [2], док је у [3] представљена структурална анализа беспилотне амфибије методом коначних елемената. Упоредно нумеричко и експериментално испитивање композитних епрувета, али и елемената структуре трупа летелице дато је у [4].

Рад [5] разматра у упоређује различите математичке моделе ударних оптерећења, док [6] даје детаљан приказ случајева и врсти отказа композитних делова. Испитивање у [7] спроведено је над композитним делом након удара, при чему је развијен валидиран коначноелементни модел, након чега је спроведена и оптимизација испитиване структуре.

Радови [8–10] баве се могућностима и перспективом примене вештачке интелигенције (а нарочито вештачких неуронских мрежа) при пројектовању композитних структура.

### 3. Полазне хипотезе

Детаљни, затворени процес моделирања, нумеричке анализе, оптимизације и експерименталног испитивања који је предмет истраживања подразумева нумеричке моделе и прорачуне (методом коначних елемената), различите методе оптимизације (еволутивне нпр. генетски алгоритам, уз употребу и вештачких неуронских мрежа као алата за предикцију) и мерења поља померања (класичним и оптичким методама), што заправо подразумева и њихове метематичке хипотезе. Додатне полазне хипотезе на којима је истраживање кандидаткиње Милице Милић засновано су:

1. коришћење модела љуски у нумеричком прорачуну омогућава задовољавајуће сагледавање феномена који се јављају унутар просторних структура због специфичности композитних ламината,
2. линеарна статичка напонска анализа може са довољном тачношћу описати утицај сложеног оптерећења на композитне конструкције,
3. савремене (еволутивне, нпр. генетски алгоритам) методе оптимизације могу се ефикасно/успешно користити и за димензионисање композитних структура,
4. вештачке неуронске мреже могу се користити/истренирати за поуздану предикцију отказа композитних структура (засновану нпр. на Цаи-Ву критеријуму лома или на другим савременим методама које ће бити идентификоване у оквиру истраживања доступне литературе),
5. упоредна експериментална истраживања могу се користити за валидацију упрошћених нумеричких модела.

### 4. Научне методе истраживања

Ради остваривања постављених циљева у току израде ове дисертације, потребно је користити одређене научне методе истраживања. Кренуће се од прегледа постојеће литературе и остварених резултата (неки примери у [1-10]), а затим дефинисати оквир сопственог истраживања. Поступак нумеричког истраживања (методом коначних елемената) потребно је поделити на више подсистема и њих појединачно решити изабраним методама. Потом је потребно реализовати интеграцију целокупног поступка дизајна/редизајна композитне структуре употребом одабраних метода оптимизације (неким од савремених еволутивних метода, нпр. генетским алгоритмом). Процес одабира крајњег, оптималног решења биће спроведен уз употребу различитих савремених метода оптимизације које могу укључивати и вештачке неуронске мреже. Нумеричке поставке биће проверене компаративним методама са експерименталним подацима (добитим класичним и иновативним методама). Сви прорачуни ће бити спроведени помоћу два софтверска пакета: ANSYS и Matlab.

### 5. Очекивани научни допринос

Како је у питању савремена и мултидисциплинарна научно-истраживачка тема, могуће је формулисати следећи очекивани научни допринос ове дисертације:

1. Дефинисање одговарајућег, експериментално валидираног прорачунског модела неопходног за оптимизацију и предикцију отказа елемената композитне структуре нове беспилотне летелице при несиметричним случајевима оптерећења,

који у оквиру себе подразумева:

- прецизну процену сложених оптерећења која могу деловати на беспилотну летелицу (анvelopа радних оптерећења малих беспилотних летелица значајно се разликује од утврђених граничних случајева оптерећења већих пилотираних летелица и ударна оптерећења су много заступљенија),
- развој упрошћеног структуралног модела који се може користити за брзу процену поузданости, односно могућег отказа структуре (без залажења у анализу лома композита, врши се процена да ли су локални напони/неки други индикатори већи од препоручених вредности),
- оптимизацију композитне структуре (еволутивним методама, нпр. генетским алгоритмом) (при чему се користи претходно развијени, и валидирани, поједностављени структурални модел) превасходно са циљем минимизирања масе, али и повећања радног опсега, повећања крутости, или жељене измене динамичких карактеристика разматране структуре,
- испитивање могућности примене и имплементацију вештачких неуронских мрежа (метода вештачке интелигенције) у процени понашања/отказа композитних структура,
- проверу валидности изведених процедура кроз поређење са експерименталним подацима.

Током израде дисертације остварени научни допринос биће верификован у квалитативном и квантитативном смислу у релевантним домаћим и међународним публикацијама.

## 6. План истраживања и структура рада

Након детаљне анализе расположивих библиографских јединица које су референтне за предметну област истраживања композитних беспилотних летелица, биће извршена систематизација аналитичких, нумеричких и експерименталних приступа и резултата који су до сада остварени уз класификацију предочених смерница за будућа истраживања.

Даљи план истраживања током израде докторске дисертације може се разврстати у следеће главне активности:

- Преглед и систематизација постојеће научне литературе на тему анализе елемената композитне структуре беспилотних летелица;
- Анализа и систематизација доминантних случајева оптерећења и отказа елемената композитне структуре беспилотних летелица;
- Одабир и развој одговарајућих прорачунских модела;
- Спровођење нумеричких анализа;
- Дефинисање (мултидисциплинарних) оптимизационих проблема, развој, имплементација и спровођење оптимизационих поступака;
- Дефинисање метода за предикцију отказа композитних елемената заснованих на вештачким неуронским мрежама;
- Спровођење експерименталних истраживања;
- Упоредна анализа нумеричких и експерименталних резултата;
- Дискусија са извођењем закључака и препорукама за будућа истраживања.

Предвиђено је да докторска дисертација има следећу структуру:

1. Увод
2. Преглед доступне литературе и досадашњих релевантних истраживања
3. Опис летелице чији елементи структуре се детаљније проучавају
4. Преглед могућих случајева оптерећења и отказа подсистема беспилотне летелице
5. Преглед, одабир и употреба одговарајућих нумеричких и оптимизационих метода
6. Преглед и спровођење експерименталних испитивања
7. Упоредивање добијених нумеричких и експерименталних резултата
8. Развој методе/алата за предикцију отказа
9. Закључак и дискусија
10. Литература

## 7. Закључак и предлог

Одлуком Наставно-научног већа Универзитета у Београду – Машинског факултета, број 831/3 од 22. 06.2023. године, за менторе докторске дисертације кандидаткиње Милице Милић именовани су **др Јелена Сворцан**, ванредни професор Универзитета у Београду – Машинског факултета и **др Тони Иванов**, доцент Универзитета у Београду – Машинског факултета. Комисија је сагласна са наведеном одлуком о именовању ментора.

На основу свега наведеног, пријаве за израду докторске дисертације архивирани под бројем 831/1 од 26.05.2023. године и уз сагласност Катедре за ваздухопловство архивирани под бројем 832/2 од 16.06.2023. године, Комисија за оцену научне заснованости теме сматра да је предложена тема јасно дефинисана, научно утемељена и изузетно актуелна, те да је као таква пододбна за израду докторске дисертације и да се њеним изучавањем може остварити значајан научни и стручни допринос. Комисија такође закључује да је кандидаткиња испунила све потребне услове за пријаву теме докторске дисертације, дефинисане Законом о високом образовању, Статутом Универзитета у Београду – Машинског факултета и Правилником о Докторским студијама Универзитета у Београду – Машинског факултета, као и да је способан да самостално реализује наведене предвиђене циљеве истраживања. Комисија предлаже Наставно-научном већу Машинског факултета у Београду да се

**Милице Милић, маг.инж.маш.**

одобри израду докторске дисертације под називом

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

која припада научној области Машинско инжењерство, и ужој научној области Ваздухопловство, а за коју је матичан Универзитет у Београду – Машински факултет.

Београд, 24.08.2023. 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

.....  
Ван. проф. др Огњен Пековић,  
Универзитет у Београду – Машински факултет

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

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ  
- МАШИНСКИ ФАКУЛТЕТ –  
Број:831/3  
Датум: 22.06.2023.  
Београд, Краљице Марије бр.16

На основу члана 64. Статута Машинског факултета Универзитета у Београду – пречишћени текст број 1136/4 од 28.06.2021. године, Одлуке о изменама и допунама Статута број 239/6 од 17.02.2023. године и члана 28. Правилника о докторским студијама на Универзитету у Београду од 24.05.2016.г., Наставно-научно веће Машинског факултета на седници одржаној дана 22.06.2023. године, донело је следећу

### ОДЛУКУ

Именују се **др Јелена Сворцан, ванр. проф. и др Тони Иванов, доц.** за менторе докторске дисертације **„МУЛТИДИСЦИПЛИНАРНИ ПРИСТУП ОПТИМИЗАЦИЈИ И ПРЕДИКЦИЈИ ОТКАЗА СЛОЖЕНО ОПТЕРЕЋЕНИХ ВАЗДУХОПЛОВНИХ КОМПОЗИТНИХ СТРУКТУРА“** кандидата **МИЛИЦЕ МИЛИЋ, маг. инж. маш.,** студента докторских студија.

Одлуку доставити: ментору, докторанту и архиви.

ДЕКАН  
МАШИНСКОГ ФАКУЛТЕТА

проф. др Владимир Поповић