

Факултет Машински

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ

202/4
(Број захтева)
26.03.2026.
(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:

Анализа и оптимизација терминално-балистичких перформанси 3Д штампаних пројектила и балистичке заштите

(пун назив предложене теме докторске дисертације)

НАУЧНА ОБЛАСТ: Машинство (ужа научна област: Војно машинство – системи наоружања)

ПОДАЦИ О КАНДИДАТУ:

1. Име, име једног од родитеља и презиме кандидата: МУХАМЕД (Муниб) БИСИЋ
2. Претходно образовање (назив и седиште факултета, студијски програм):
Машински факултет Универзитета у Сарајеву
3. Година завршетка претходног нивоа студија: 2023.
4. Година уписа на докторске студије: 2023.
5. Назив студијског програма докторских студија: Машинско инжењерство

ПОДАЦИ О МЕНТОРУ:

Име и презиме ментора: Предраг Елек

Звање: редовни професор

Списак радова који квалификују ментора за вођење докторске дисертације:

- 1.Djurovic, R., Elek, P., Markovic, M., Jevtic, D. (2025): Modification and experimental validation of the Forrestal-perforation model for high hardness armor steel plates of intermediate thickness, Defence Technology, Volume 46, . 2025, pp. 267-284, ISSN 2214-9147. (M21a)
- 2.Bisić, M., Pandžić, A., Jusufbegović, M., Čerimović, M., Elek, P. (2025). Influence of Infill Pattern on Ballistic R Capabilities of 3D-Printed Polymeric Structures, Polymers, 17(13), 1854. <https://doi.org/10.3390/polym17131854> (M21a)
- 3.Jovanović, B., Novaković, N., Milošević Govedarović, S., Kurko, S., Stamenić, Lj., Grbović Novaković, J., Elek, (2025): The Influence of Al12Mg17 Compound Concentration in High-Energy Mixtures on Thermobaric Systems Characteristics, Propellants, Explosives, Pyrotechnics, e12035, Vol. 50, No. 4, doi.org/10.1002/prep.12035. (M22)
- 4.Popović, M.M., Popović, M.M., Elek, P. (2025): A Novel Grain Configuration for Dual Thrust Solid Rocket Motc Two Propellants, Thermal Science, Vol. 29, No. 6B, p. 4693-4701. (M22)
- 5.Alameri, O., Elek, P. (2024): Efficiency Analysis of Fragmentation Warheads Through Advanced Modeling Tech Experimental and Numerical Study, Shock and Vibration, 2024, 3288510, 20 pages. (M22)

Обавештавамо вас да је Наставно – научно веће на седници одржаној 26.03.2026. године размотрило предло: тему и закључило да је тема подобна за израду докторске дисертације јер садржи оригиналну идеју и да је о: 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: 202/4
Датум: 26.03.2026. године
Београд, Краљице Марије 16

На основу члана 40. Закона о високом 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 – 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 на Универзитету у Београду - Машинском факултету, Наставно-научно веће Машинског факултета на седници од 26.03.2026. године донело је:

ОДЛУКУ

о прихватању Извештаја Комисије за оцену научне заснованости теме докторске дисертације

Прихвата се Извештај Комисије за оцену научне заснованости теме докторске дисертације кандидата **Мухамеда Бисића**, маг. инж. маш. под насловом **„Анализа и оптимизација терминално-балистичких перформанси 3Д штампаних пројектила и балистичке заштите“**.

Извештај је поднела Комисија у саставу: др Милош Марковић, ванр. проф., др Предраг Елек, ред. проф., др Михајло Поповић, ванр. проф., др Дејан Јевтић, ванр. проф. и др Небојша Христов, ванр. проф., Универзитет одбране, Војна академија.

За **ментора** докторске дисертације именује се **др Предраг Елек, ред. проф.**

Одлуку доставити: Универзитету у Београду, кандидату, ментору и архиви Факултета.

ДЕКАН
МАШИНСКОГ ФАКУЛТЕТА

проф. др Владимир Поповић

НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ

Предмет: Оцена подобности теме и кандидата **Мухамеда М. Бисића**, магист. инж. маш. за израду докторске дисертације

Одлуком Наставно-научног већа бр. 202/2 од 24.02.2026. године, именовани смо за чланове Комисије за оцену подобности теме и кандидата Мухамеда М. Бисића, магист. инж. маш. за израду докторске дисертације под називом: **„Анализа и оптимизација терминално-балистичких перформанси 3Д штампаних пројектила и балистичке заштите”**.

На основу материјала приложеног уз Захтев кандидата, Комисија подноси следећи

ИЗВЕШТАЈ

1. Подаци о кандидату

1.1. Биографски подаци

Мухамед Бисић рођен је 1. јула 1998. године у Сарајеву, Босна и Херцеговина. У Сарајеву завршава основну школу, током које је освојио више десетина награда из области техничке културе, што је рано усмерило његове интересе ка машинству и технолошком развоју. Средње образовање наставља у Средњој машинској техничкој школи у Сарајеву, где стиче звање машинског техничара – конструктора на рачунару. Током школовања усавршава практична знања из домена 3D моделовања, CNC управљања и техничког конструисања, што је поставило темељ за његов даљи професионални развој.

Године 2018. уписује Машински факултет Универзитета у Сарајеву, смер Одбрамбене технологије. Први циклус студија завршава 2021. године, а други 2023, стичући звање мастер инжењера машинства у области одбрамбених технологија. Мастер рад под називом *„Адитивна производња у војној индустрији – 3D штампана ручна бомба”* представља један од првих свеобухватних покушаја у БиХ да се сагледа компатибилност адитивних технологија са процесима производње и испитивања нестандартне муниције. Истраживање је резултирало објавом неколико научних публикација и поставило основе за каснија, сложенија испитивања.

У периоду Мастер студија је кроз студентску праксу ангажован у компанији „Игман“ д.д. Коњиц као производни технолог, где стиче драгоцено искуство у војној индустрији. Учествовао је у разради и праћењу различитих фаза производног процеса и упознао се са стандардима, процедурама и методама контроле квалитета специфичним за производњу муниције. Комбинација академског рада и праксе омогућила му је да развије продубљено и систематично знање из домена војног машинства, балистике и нових технологија у наоружању.

По завршетку Мастер академских студија 2023. године уписује Докторске студије на Универзитету у Београду – Машинском факултету. Те исте године запошљава се као развојни инжењер у приватној компанији усмереној на развој беспилотних система, где учествује у више развојних и пројектних активности. Током 2024. године наставља рад као развојни инжењер у регионалној компанији специјализованој за заштиту од експлозија, при чему активно учествује у оснивању и техничком опремању балистичке лабораторије. У том периоду усавршава примену нумеричких метода, симулација и експерименталних процедура у области балистике на циљу.

Поред индустријског ангажмана, Мухамед Бисић је од летњег семестра академске 2024/2025. године ангажован као стручњак из привреде на Машинском факултету Интернационалног универзитета у Сарајеву.

Током претходних година био је учесник више волонтерских и развојних пројеката, едукатор на радионицама из 3D штампе на универзитетима и у компанијама широм Босне и Херцеговине, као и промотер инжењерских технологија међу младима. Један је од пионира у области истраживања могућности примене адитивних технологија у одбрамбеној индустрији у БиХ.

Аутор је и коаутор: два рада објављена у међународном часопису (M20), шест радова саопштених на међународним скуповима (M30), као и два рада објављена у часописима националног значаја (M50).

У свом раду активно користи енглески језик, CAD софтвере CATIA, Fusion 360 и AutoCAD, софтвер за нумеричке симулације ANSYS, као и MATLAB. Истраживачка интересовања усмерена су на компоненте наоружања, балистику на циљу, примену адитивних технологија и развој експерименталних метода за тестирање нестандардне муниције. Тренутно је ангажован као виши асистент на Машинском факултету Интернационалног универзитета у Сарајеву и као стручни консултант за развој у Центру за напредне технологије у Сарајеву. Има положен стручни испит из области Машинског инжењеринга и активно се бави стрељаштвом.

Нека од признања која је освојио су:

- IDEATHON Creative Thinking Hackaton 2024 Winner;
- Balkathon 4.0. Winner – RCC, 2023
- Треће место за Иновативни пројекат на „3Д Мејкатон“ 2021 такмичењу, Сарајево Unlimited;
- Друго место за Зелену идеју на „Лајк за научну екипу“ Такмичењу – УНДП, 2017.

1.2. Стечено научно-истраживачко искуство

1.2.1. Положени испити на Докторским студијама

Кандидат Мухамед М. Бисић уписао је Докторске студије на Машинском факултету Универзитета у Београду школске 2023/24. године (бр. индекса Д14/2023). Положио је све испите предвиђене Планом усавршавања студената докторских студија, укључујући и Пројекат идеје докторске дисертације, чиме је остварио укупно 120 ЕСП бодова и испунио основни услов за пријаву докторске дисертације. Списак положених предмета, остварених ЕСП бодова и оцена дат је табеларно.

Редни број	Назив предмета	Година студија, семестар и број ЕСПБ				Оцена
		1. година		2. година		
		I	II	III	IV	
1.	Виши курс математике (о)	5				8 (осам)
2.	Нумеричке методе (о)	5				10 (десет)
3.	ОМНИР и комуникација (о)	5				10 (десет)
4.	Примена експлозива (и)	5				10 (десет)
5.	Одабрана поглавља из механике (о)		5			10 (десет)
6.	Одабрана поглавља балистике на циљу (и)		5			10 (десет)
7.	Навигациони системи за вођене пројектиле (и)		5			10 (десет)
8.	Механика балистичких система (и)			5		10 (десет)
9.	Одабрана поглавља из конструкције пројектила (и)			5		10 (десет)
10.	Истраживање и публикување 1	10				10 (десет)
11.	Истраживање и публикување 2		15			10 (десет)
12.	Истраживање и публикување 3			20		10 (десет)
13.	Пројекат идеје докторске дисертације				30	10 (десет)

Легенда: о – обавезни предмет, и – изборни предмет.

1.2.2. Списак објављених радова

Категорија М20 – радови објављени у научним часописима међународног значаја

Рад у водећем међународном часопису (**М21**)

1. **Bisić, M.**, Pandžić, A., Jusufbegović, M., Ćerimović, M., Elek, P.: Influence of Infill Pattern on Ballistic Resistance Capabilities of 3D – Printed Polymeric Structures, *Polymers*, 2025, Vol. 17, Issue 13, 1854. <https://doi.org/10.3390/polym17131854>

Рад у међународном часопису (M22)

2. **Bisić, M.**, Razić, F., Pandžić, A., Bevrnja, M.: Penetration testing of 3D printed projectiles made of various types of polymers, *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2023, Vol. 37, pp. 5535-5539. <https://doi.org/10.1007/s12206-023-2304-6>

Категорија M30 – зборници међународних научних скупова

Саопштење са међународног скупа штампано у целини (M33)

3. **Bisić, M.**, Pandžić, A., Jokić, N., Bevrnja, M., Elek, P: Evaluation of Firing Reliability and Penetration Depth of 3D Printed PLA Projectiles for 9 x 19 mm Ammunition, Proceedings of the 36th DAAAM International Symposium, 2025, pp. 0154-0162, B. Katalinic (Ed.), ISBN 978-3-902734-47-1, ISSN 1726-9679, Vienna, Austria, [10/2507/36th.daaam.proceedings.020](https://doi.org/10.2507/36th.daaam.proceedings.020)
4. **Bisić, M.**, Pandžić, A.: Advances in Additive Manufacturing Application in Military Industry, In: Mitrovic, N., Mladenovic, G., Mitrovic, A. (Eds.) New Trends in Engineering Research, CNNTech 2023, Lecture Notes in Networks and Systems, Vol. 792, pp. 168-187, 2024, Springer, Cham, https://doi.org/10.1007/978-3-031-46432-4_14
5. Bevrnja, M., Imamovic, Z., **Bisic, M.**: Additive Manufacturing Application for the Inclusion of the Vision Impaired Population in Public Transport, Proceedings of the 33rd DAAAM International Symposium, pp. 0519-0525, B. Katalinic (Ed.), ISBN 978-3-902734-36-5, ISSN 1726-9679, Vienna, Austria, 2022. DOI: <https://daaam.info/33rd-proceedings-2022>
6. **Bisić, M.**, Pandžić, A.: Experimental Analysis and Comparison of Mechanical Properties of Standard Grey Resins, With and Without Post-curing, and Biocompatible SLA Printed Materials, In: Mitrovic, N., Mladenovic, G., Mitrovic, A. (Eds.) Experimental Research and Numerical Simulation in Applied Sciences CNNTech 2022. Lecture Notes in Networks and Systems, vol 564, pp. 198-212, Springer, Cham, 2023, https://doi.org/10.1007/978-3-031-19499-3_11

Саопштење са међународног скупа штампано у изводу (M34)

7. Ivković, I., **Bisić, M.**: Design of specialised unmanned underwater vehicle, Book of Abstracts, 4th Kotor International Maritime Conference, Kotor, Montenegro, November 27–29, 2024.
8. **Bisić, M.**, Pandžić, A.: 3D Printed firearm, ammunition and military equipment, International Conference of Experimental and Numerical Investigations and New Technologies CNNTech, p. 6, Zlatibor, Serbia, 4-7 July, 2023.

Рад у часопису националног значаја (M51)

9. **Bisić, M.**, Elek, P.: A Computational Study on the Influence of Explosive Type on Shaped Charge Jet Velocity in 64 mm Warhead, *Scientific Technical Review*, 2025, Vol. 75, No. 1, pp. 19-26, <https://doi.org/10.5937/str2500003B>
10. Muftić, A., Imamović, Z., **Bisić, M.**, Šupić, J., Alić, A., Muftić, E.: Development of solid microneedles for transdermal drug delivery in companion animals, *Veterinarska Stanica*, 2023, 55(1), 87–97. <https://doi.org/10.46419/vs.55.1.6>

1.3 Оцена подобности кандидата за рад на докторској дисертацији

На основу претходног приказа резултата досадашњег рада кандидата Мухамеда Бисића, Комисија констатује да је исти:

- положио све испите и испунио све обавезе предвиђене наставним планом и програмом Докторских студија, чиме је стекао 120 ЕСПБ и тиме остварио услов да му се одобри израда докторске дисертације,
- публиковао и изложио више радова и саопштења у међународним и националним научним часописима и на међународним научним скуповима из области којој припада предложена тема докторске дисертације.

Биографски и библиографски подаци, положени испити на Докторским студијама, те научне и стручне активности кандидата, према мишљењу Комисије, квалификују Мухамеда Бисића за самосталан и успешан научноистраживачки рад на предложеној теми докторске дисертације.

2. Предмет и циљ истраживања

Терминална балистика као научна област обухвата проучавање процеса који се одвијају у тренутку интеракције пројектила и циља, укључујући механизме пробијања, деформације и преноса енергије. Традиционално се развијала у оквиру војних, форензичких и инжењерских дисциплина, при чему су доминантни истраживачки модели били везани за конвенционалне материјале и класичне производне технологије. Међутим, са појавом нових материјала и савремених технолошких поступака, а нарочито адитивне производње, долази до значајног проширења спектра конструкционих решења и истраживачких приступа у области терминалне балистике. Развој 3Д штампе омогућио је израду геометријски сложених структура, контролисаних унутрашњих архитектура и функционално грађених материјала, чије понашање при изразито динамичком оптерећењу значајно одступа од понашања конвенционалних металних структура. Тиме је отворен нови истраживачки простор у којем класични модели терминалне балистике постају недовољни, а потреба за експерименталном верификацијом и прилагођеним аналитичким и нумеричким приступима постаје изражена.

У савременом безбедносном контексту, адитивна производња добија све значајнију улогу и у војној индустрији, али истовремено представља и извор нових изазова [1,2]. Њена доступност, релативно ниски трошкови и флексибилност производње довели су до појаве 3Д штампаног оружја и муниције (или њихових делова), као и заштитних структура, најчешће израђених од полимерних и композитних материјала. Иако је овај феномен све присутнији, поузданост, стабилност и балистичко понашање оваквих система остају недовољно истражени, нарочито у случају муниције малог калибра [3]. Досадашња истраживања су углавном била усмерена на појединачне студије случаја, правне и форензичке аспекте, док систематска анализа терминално-балистичких карактеристика готово да изостаје [1,3,4]. Са друге стране, 3Д штампане структуре посматране као препреке, односно елементи балистичке заштите, нуде могућност развоја лаких, модуларних и прилагодљивих конструкција, али и успостављања нових типова стандардизованих опитних конфигурација. Контролисана унутрашња

архитектура, хелијске структуре и варијабилна густина омогућавају детаљније сагледавање механизма интеракције пројектила и мете, као и поузданију анализу понашања материјала под екстремним динамичким оптерећењима.

У том контексту, фокус ове докторске дисертације усмерен је на два савремена и концептуално повезана сегмента терминалне балистике: 3Д штампану муницију малог калибра (конкретно пројектиле) и 3Д штампане структуре намењене за балистичку заштиту. Иако се технички ради о различитим групама објеката, њихово заједничко полазиште налази се у специфичностима адитивне производње, укључујући избор материјала, слојевиту изградњу, унутрашњу геометрију и просторну расподелу масе, који директно утичу на механизме пробоја, деформације и преноса енергије.

Тема ове докторске дисертације јесте систематско разматрање терминално-балистичког понашања 3Д штампане муниције малог калибра и 3Д штампаних структура намењених за балистичку заштиту, са циљем успостављања поузданог експериментално–аналитичког оквира за њихову карактеризацију и предвиђање перформанси.

Централна идеја рада заснива се на претпоставци да се терминално-балистичко понашање адитивно произведених система не може поуздано описати применом постојећих класичних модела, развијених у правилу за хомогене металне материјале и конвенционалне технологије производње [5-8]. Стога се истраживање темељи на интеграцији обимних експерименталних испитивања са аналитичким и нумеричким приступима, у циљу успостављања поједностављеног, али инжењерски употребљивог модела понашања 3Д штампаних пројектила и структура у условима изразито динамичког оптерећења.

На основу свега претходно наведеног, предмет ове дисертације обухвата експерименталну и теоријску анализу терминално-балистичких карактеристика 3Д штампане муниције малог калибра и 3Д штампаних структура намењених за балистичку заштиту, са циљем идентификације механизма пробоја, деформације и преноса енергије, као и утврђивања утицаја материјалних, геометријских и производних параметара адитивне производње на остварене балистичке перформансе. На овај начин се остварује боље разумевање механизма интеракције пројектила и препреке, као и дефинисање критеријума понашања карактеристичних за адитивно произведене балистичке системе.

Прегледни радови из области адитивне производње у војној технологији представљају основу за сагледавање ширег контекста примене 3Д штампе у развоју оружја, муниције, структура и балистичке заштите [9–23]. Ова литература обухвата радове из различитих инжењерских дисциплина, права, економије, форензике и медицине, омогућавајући мултидисциплинарни увид у проблематику.

Иако су истраживања 3Д штампане муниције углавном усмерена на трендове и правне аспекте, у последњим годинама појављују се и форензичке студије које се баве методама идентификације штампаног оружја и муниције. У домену 3Д штампане муниције и елемената који остварују деловање на циљу постоје ограничене примене, углавном везане за специфичне медицинске и ветеринарске контексте, као и релативно мали број радова који разматрају терминално-балистичке параметре пројектила већег калибра [24–27].

Истраживања 3Д штампане балистичке заштите се, с друге стране, претежно ослањају на теоријска разматрања и поједностављене нумеричке симулације, док су испитивања под стварним динамичким оптерећењем ретка [28–42]. Овакво стање јасно указује на изражен недостатак експерименталних података, али и на значајан простор за даља истраживања, који представља основну мотивацију за спровођење истраживања у оквиру ове докторске дисертације.

Кључни задатак у оквиру истраживања за докторску дисертацију је систематско проучавање терминално-балистичких карактеристика 3Д штампане муниције малог калибра и 3Д штампаних структура намењених за балистичку заштиту, са циљем разумевања утицаја адитивне производње на понашање материјала и система при изразитим динамичким оптерећењима, а све у сврху разматрања простора за њихову практичну примену и развоја модела за предикцију перформанси.

У оквиру наведеног, истраживање има за циљ:

- проширење постојећег знања о терминалној балистици кроз експериментално и аналитичко сагледавање 3Д штампаних пројектила и заштитних структура,
- формирање поуздане базе експерименталних података о балистичком понашању 3Д штампаних материјала,
- идентификацију предности и ограничења адитивне производње у контексту савремених захтева балистичке заштите и муниције.

Литература:

- [1] Ficzer, P.; Additive Manufacturing in the Military and Defence Industry. *Design of Machines and Structures* 2022. 12. 80-85. 10.32972/dms.2022.016.
- [2] Danieleczyk, J.; 3-D Printed Guns: A Developing Technology with Dangerous Potential, *Pittsburgh J. Technol. Law Policy* 2017, 17, pp. 1–34. <https://doi.org/10.5195/tlp.2017.199>
- [3] Szwed, A.; Schaufelbühl, S.; Gallusser, A.; Werner, D.; Delémont, O.; Was a 3D-printed firearm discharged? Study of traces produced by the use of six fully 3D-printed firearms, *Forensic Sci. Int.* 2023, 348, 111736. <https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2023.111736>
- [4] Wenzinger ZE, Wetzel S, Bernarding B, Viator J, Kohlhepp B, Marshall P. The relevance of current forensic firearms examination techniques when applied to 3D printed firearms. *J Forensic Sci.* 2024;69:659–68. <https://doi.org/10.1111/1556-4029.15467>
- [5] Djurovic, R.; Elek, P.; Marković, M.; Jevtić, D.; Erčević, M.; Numerical Analysis of the Tungsten Carbide-Cobalt Cored Bullet Penetrating the High-Hardness Steel Plate. 10th International Scientific Conference on Defensive Technologies OTEH 2022, Belgrade, Serbia
- [6] Djurovic, R.; Elek, P.; Markovic, M.; Jevtic, D.; Modification and experimental validation of the Forrestal-Warren perforation model for high hardness armor steel plates of intermediate thickness, *Defence Technology* 2025, 46, pp. 267–284. <https://doi.org/10.1016/j.dt.2024.11.006>
- [7] Yoon, G.H., Mo, J.S., Kim, K.H. *et al.* Investigation of bullet penetration in ballistic gelatin via finite element simulation and experiment. *J Mech Sci Technol* 29, 3747–3759 (2015). <https://doi.org/10.1007/s12206-015-0821-7>

- [8] Wen, Y.; Xu, C.; Jin, Y.; Batra, R.C.; Rifle bullet penetration into ballistic gelatin, *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials* **2017**, *67*, pp. 40–50. <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2016.11.021>
- [9] Adeleke, A.K.; Portillo Montero, D.J.; Lottu, O.A.; Nindwezuor-Ehiobu, N.; Ani, E.C.; 3D Printing in Aerospace and Defense: A Review of Technological Breakthroughs and Applications, *World J. Adv. Res. Rev.* 2024, 21, pp. 1149–1160. <https://doi.org/10.30574/wjarr.2024.21.2.0558>
- [10] Chaari, M.Z.; The Impact of 3D Printing on the Defense Industry, IEEE TechDefense 2024, Naples, Italy, pp. 149–153. <https://doi.org/10.1109/TechDefense63521.2024.10863694>
- [11] Bisić, M.; Pandžić, A.; Advances in Additive Manufacturing Application in Military Industry. In: Mitrovic, N. et al. (eds), *New Trends in Engineering Research*, CNNTech 2023, LNNS 792, Springer, 2024. https://doi.org/10.1007/978-3-031-46432-4_14
- [12] Marciniak, M.; 3D Printing in Military Applications: FDM Technology, Materials, and Implications, *Adv. Mil. Technol.* 2023, 18, pp. 241–257. <https://doi.org/10.3849/aimt.018463>
- [13] Harper, J.; Military 3D Printing Projects Face Challenges, *National Defense*, 100(744), 2015, pp. 24–25.
- [14] Booth, J.; Edwards, E.; Whitley, M.; Kranz, M.; Seif, M.; Ruffin, P.; Military Comparison of 3D Printed vs. Commercial Components, *Proc. SPIE* 2018, 10597, 105970J. <https://doi.org/10.1117/12.2300773>
- [15] Kowalski, K.; Biernikowicz, W.; Stankiewicz, G.; Possibilities of Using 3D Printing in Field Repairs of Military Equipment, *Rocznik Bezpieczeństwa Morskiego* 2024, XVIII, pp. 873–886. <https://doi.org/10.5604/01.3001.0054.8334>
- [16] Stankiewicz, G.; Kocur, R.; Kowalski, K.; Additive manufacturing in military using, *Military Logistics Systems*, 58(1), 2023, pp. 129–148. <https://doi.org/10.37055/slw/175936>
- [17] Peleshok, S.A.; Fisun, A.Y.; Morozov, A.V.; Kalinin, S.V.; Eliseeva, M.I.; Additive technologies in military affairs, *Russ. Mil. Med. Acad. Rep.* 40(2), 2021, pp. 5–12. <https://doi.org/10.17816/rmmar77796>
- [18] Bird, D.T.; Ravindra, N.M.; Additive Manufacturing of Sensors for Military Monitoring Applications, *Polymers*, 2021, 13, 1455. <https://doi.org/10.3390/polym13091455>
- [19] Kalender, M.; Kılıç, S.E.; Ersoy, S.; Bozkurt, Y.; Salman, S.; Additive Manufacturing and 3D Printer Technology in Aerospace Industry, 2019 9th Int. Conf. Recent Advances in Space Technologies (RAST), Istanbul, Turkey, pp. 689–694. <https://doi.org/10.1109/RAST.2019.8767881>
- [20] Fey, M.; 3D Printing and International Security: Risks and Challenges of an Emerging Technology, PRIF Reports 144; Hessische Stiftung Friedens- und Konfliktforschung: Frankfurt, 2017, 41 pp. <https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:0168-ssoar-51867-8>
- [21] Colorado, H.A.; Cardenas, C.A.; Gutierrez-Velazquez, E.I.; Escobedo, J.P.; Monteiro, S.N.; Additive manufacturing in armor and military applications: research, materials, processing technologies, perspectives, and challenges, *J. Mater. Res. Technol.* 27, 2023, pp. 3900–3913. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.11.030>
- [22] Munro, C.; Review of Structural Additive Manufacturing for Defence Applications: Current State of the Art, DRDC-Atlantic Scientific Report DRDC-RDDC-2018-R212; Defence Research and Development Canada, April 2019.

- [23] Dey, A.; Adeniran, O.; Ramoni, M.; Yodo, N.; Cong, W.; Additive Manufacturing Applications in Mission-Critical Operations: A Review, *J. Manuf. Mater. Process.* 2025, 9, 70. <https://doi.org/10.3390/jmmp9030070>
- [24] Schaufelbühl, S.; Florquin, N.; Werner, D.; Delémont, O.; The emergence of 3D-printed firearms: An analysis of media and law enforcement reports, *Forensic Sci. Int. Synerg.* 2024, 8, 100464. <https://doi.org/10.1016/j.fsisyn.2024.100464>
- [25] Dass, R.; 3D-Printed Firearms: Global Proliferation Trends and Analyses, *Stud. Conflict Terrorism*, 2025, pp. 1–35. <https://doi.org/10.1080/1057610X.2025.2477849>
- [26] Veilleux-Lepage, Y.; CTRL, HATE, PRINT: Terrorists and the Appeal of 3D-Printed Weapons, ICCT Perspective 2021. <https://hdl.handle.net/1887/3503709>
- [27] Honsberger, H.; Werner, D.; Rhumorbarbe, D.; Riva, F.; Glardon, M.; Gallusser, A.; Delémont, O.; How to recognise the traces left on a crime scene by a 3D-printed Liberator? Part 2. Elements of ammunition, marks on the weapons and polymer fragments, *Forensic Sci. Int.* 2019, 295, 137–144. <https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2018.12.010>
- [28] Cizdziel, J.; Black, O.; Forensic Analysis of Gunshot Residue, 3D-Printed Firearms, and Gunshot Injuries, Nova Science Publishers, 2019. <https://nij.ojp.gov/library/publications/forensic-analysis-gunshot-residue-3d-printed-firearms-and-gunshot-injuries>
- [29] Falardeau, M.S.; Mireault, C.; Daoust, B.; Muehlethaler, C.; Chemical analysis of polymers used for 3D printing of firearms, *Forensic Sci. Int.* 2024, 357, 111999. <https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2024.111999>
- [30] Taylor, M.; Forensic Analysis of 3D-Printed Firearms: Beyond Traditional Traceology, *Forensic Magazine* 2020. <https://www.forensicmag.com/561677-Forensic-Analysis-of-3D-printed-Firearms-Beyond-Traditional-Traceology/>
- [31] Bertino, G.; Acquaviva, A.; 3D-Printed Firearms: Forensic Considerations and Trace Analysis, *Forensic Sci. Int.* 2021, 321, 110720. <https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2021.110720>
- [32] Vandenburg, J.R.; Examining the effects of 3D printed projectiles on firearm identification, *J. Forensic Sci.* 2025, 00, 1–12. <https://doi.org/10.1111/1556-4029.70122>
- [33] Courtney, E.; Courtney, A.; Andrusiv, L.; Courtney, M.; Terminal performance of lead-free pistol bullets in ballistic gelatin using retarding force analysis from high speed video, arXiv preprint 2016, arXiv:1604.01000. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1604.01000>
- [34] Vandenburg, J.R.; The forensic implications of polymer-copper ARX bullets, *AFTE Journal* 2022.
- [35] Long, J.; Nand, A.V.; Ray, S.; Mayhew, S.; White, D.; Bunt, C.R.; Seyfoddin, A.; Development of customised 3D printed biodegradable projectile for administering extended-release contraceptive to wildlife, *Int. J. Pharmaceutics* 2018, 548(1), 349–356. <https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2018.07.002>
- [36] Ma, Q.; Rejab, M.R.M.; Song, Y.; Zhang, X.; Hanon, M.M.; Abdullah, M.H.; Kumar, A.P.; Effect of Infill Pattern of Polylactide Acid (PLA) 3D-Printed Integral Sandwich Panels under Ballistic Impact Loading, *Mater. Today Commun.* 2024, 38, 107626.
- [37] Gladys, A.K.; Damodaran, A.; Ezhilan, J.J.; Raghavan, M.; Venkatesan, N.; Effect of Infill Patterns on Carbon Nylon 3D-Printed Composites under Ballistic Impact, *Phys. Scr.* 2025, 100, 065919
- [38] Junio, R.F.P.; da Silveira, P.H.P.M.; Neuba, L.d.M.; Monteiro, S.N.; Nascimento, L.F.C.; Development and Applications of 3D Printing-Processed Auxetic Structures for High-Velocity Impact Protection: A Review, *Eng.* 2023, 4, 903–940.

- [39] Xue, J.; Hou, Y.; Chu, W.; Zhang, Z.; Dong, Z.; Zhang, L.; Wen, G.; 3D printed B4C-based honeycomb ceramic composite and its potential application in three-dimensional armor structure, *Chem. Eng. J.* 2024, 493, 152607.
- [40] Medvedev, A.E.; Maconachie, T.; Leary, M.; Qian, M.; Brandt, M.; Perspectives on additive manufacturing for dynamic impact applications, *Mater. Des.* 2022, 221, 110963.
- [41] Porter, M.M.; Ravikumar, N.; Barthelat, F.; Martini, R.; 3D-printing and mechanics of bio-inspired articulated and multi-material structures, *J. Mech. Behav. Biomed. Mater.* 2017, 73, 114–126.
- [42] Martini, R.; Balit, Y.; Barthelat, F.; *A comparative study of bio-inspired protective scales using 3D printing and mechanical testing*, *Acta Biomater.* 2017, 55, 360–372.

3. Полазне хипотезе

Полазећи од дефинисаног предмета истраживања, анализе релевантне литературе и досадашњих експерименталних сазнања, предложено истраживање се заснива на следећим полазним хипотезама:

- Могуће је адитивном производњом израдити 3Д штампане пројектиле малог калибра чије се терминално-балистичко понашање и ефекти на циљу могу унапред предвидети и контролисати кроз избор материјала, геометрије и параметара штампе.
- Терминално-балистички ефекти 3Д штампаних пројектила значајно се разликују од конвенционалне металне муниције, при чему су те разлике директно повезане са слојевитом структуром, унутрашњом геометријом и механичким особинама штампаних материјала.
- Могуће је пројектовати 3Д штампане полимерне и композитне структуре које остварују мерљиву и поновљиву балистичку отпорност кроз механизме контролисане деформације, фрагментације и дисипације енергије.
- Терминално-балистичко понашање 3Д штампане муниције и отпорност 3Д штампаних заштитних структура може се описати и анализирати применом интегрисаног експерименталног и теоријског приступа, чиме се омогућава формирање поузданих референтних података за инжењерску праксу.

4. Научне методе истраживања

У раду на докторској дисертацији са предложеном темом биће примењене следеће научне методе истраживања:

- Анализа и систематизација релевантне литературе, која обухвата преглед досадашњих истраживања из области адитивне производње, балистике на циљу, балистичке заштите и муниције малог калибра, са циљем идентификације постојећих модела, експерименталних приступа и уочених истраживачких празнина.
- Аналитичко моделирање терминално-балистичких процеса, усмерено на опис понашања пројектила и препрека при удару, укључујући механизме пенетрације, деформације и преноса енергије, уз уважавање специфичности 3Д штампаних материјала и геометрија.

- Нумеричко моделирање, применом савремених рачунарских алата, ради симулације понашања 3Д штампаних пројектила и балистичких структура при изразито динамичким оптерећењима, као и предикције кључних балистичких параметара.
- Обимно експериментално истраживање, које представља централни део дисертације, а обухвата велики број контролисаних балистичких испитивања, са систематском варијацијом материјала, геометрије и параметара адитивне производње, у циљу прикупљања поузданих и поновљивих експерименталних резултата.
- Упоредна анализа резултата, кроз поређење аналитички и нумерички добијених предиктивних вредности са експериментално измереним резултатима, уз спровођење поступака верификације и валидације развијених модела.
- Статистичка обрада и интерпретација података, ради идентификације трендова, корелација и доминантних утицајних параметара на терминално-балистичке перформансе 3Д штампаних пројектила и заштитних структура.

5. Очекивани научни допринос

Имајући у виду дефинисани предмет истраживања, формулисане хипотезе и примењене научне методе, очекивани научни допринос ове докторске дисертације огледа се у следећем:

- креирање референтне базе експерименталних резултата и формирање одговарајућих аналитичких и нумеричких модела ограниченог домена важења, за карактеризацију терминално-балистичког понашања 3Д штампаних пројектила малог калибра и 3Д штампаних заштитних структура, чиме се по први пут систематски и квантитативно дефинише утицај параметара адитивне производње (висине слојева, густине и типа испуне, оријентације штампе итд.), као и материјала за 3Д штампу, на механизме пенетрације, деформације и преноса енергије при балистичком удару.

Овим истраживањем се попуњава изражена празнина у савременој литератури, у којој балистика на циљу 3Д штампаних система до сада није била обухваћена кроз контролисану, поновљиву и упоредиву експерименталну испитивања, нити кроз њихову верификацију аналитичким и нумеричким моделима. Резултати дисертације омогућавају успостављање поузданих референтних вредности и критеријума понашања 3Д штампане муниције и балистичке заштите, чиме се проширује постојеће знање из области балистике на циљу и адитивне производње у савременом међународном истраживачком контексту.

Поред научног доприноса, очекивани стручни допринос ове дисертације огледа се у:

- развоју експериментално верификованог и инжењерски применљивог оквира за пројектовање, процену и поређење 3Д штампаних пројектила малог калибра и 3Д штампаних структура намењених за балистичку заштиту. Претходно поменути нови инжењерски модели могу послужити као практична основа за развој, оптимизацију и евалуацију адитивно произведених балистичких компоненти у истраживачким, едукативним и примењеним инжењерским окружењима, као и за њихово поуздано поређење са конвенционалним балистичким системима.

6. План истраживања и структура рада

Истраживање у оквиру предложене докторске дисертације биће реализовано кроз више међусобно повезаних фаза, односно тематских целина, које су конципиране тако да омогуће систематско сагледавање проблема терминалне балистике адитивно произведене муниције и балистичке заштите, као и верификацију постављених хипотеза:

- Прва целина обухвата теоријска разматрања и преглед релевантне литературе из области терминалне балистике и адитивне производње у војној индустрији. Посебан акценат биће стављен на досадашња истраживања балистичких перформанси полимерних и композитних материјала, као и на постојеће приступе аналитичком и нумеричком моделирању процеса пробоја, деформације и преноса енергије при динамичком оптерећењу.
- Друга целина односи се на експериментални приступ истраживању балистичког понашања 3Д штампане муниције малог калибра. Након прегледа постојећих експерименталних метода, биће дефинисан и реализован обиман сопствени експериментални програм, усмерен на испитивање утицаја геометрије пројектила, масе, материјала и параметара адитивне производње на терминално-балистичке ефекте и интеракцију пројектила са стандардним балистичким метамата.
- Трећа целина посвећена је експерименталном испитивању 3Д штампаних балистичких заштитних структура. Истраживања ће обухватити различите концепте и конфигурације заштитних структура, са циљем карактеризације њиховог понашања при ударним оптерећењима, механизма апсорпције енергије и отпорности на пробој, као и утицаја параметара адитивне производње на остварене балистичке перформансе.
- Четврта целина обухвата развој поједностављених аналитичких и нумеричких модела за опис терминално-балистичког понашања 3Д штампане муниције и балистичке заштите. Модели ће бити формулисани тако да омогуће предикцију кључних балистичких параметара и да буду применљиви унутар јасно дефинисаног домена важења.
- Пета целина рада усмерена је на упоредну анализу експериментално добијених резултата са резултатима аналитичких и нумеричких предиктивних модела. Ова фаза обухвата верификацију и валидацију развијених модела, критичку процену њихове тачности, применљивости, као и ограничења.
- Шеста целина разматра могућности оптимизације геометрије и структуре 3Д штампане муниције и балистичких заштитних система, на основу добијених експерименталних података и валидираних модела. Посебна пажња биће посвећена идентификацији оптималних комбинација материјала и производних параметара у зависности од жељених терминално-балистичких ефеката.
- Завршна целина садржи закључна разматрања, синтезу остварених резултата, осврт на потврду или одбацивање постављених хипотеза, као и идентификацију праваца за будућа истраживања у области терминалне балистике адитивно произведених система.

7. Закључак и предлог

Анализом пријаве теме докторске дисертације кандидата **Мухамеда М. Бисића**, маг. инж. маш., Комисија за оцену подобности и научне заснованости теме докторске дисертације закључује да је предложена тема научно утемељена и актуелна, као и да кандидат испуњава све предвиђене услове прописане Законом о високом образовању и Статутом Машинског факултета. Сходно томе, Комисија предлаже Наставно-научном већу Машинског факултета Универзитета у Београду да се кандидату **Мухамеду М. Бисићу**, маг. инж. маш., одобри израда докторске дисертације са темом:

Анализа и оптимизација терминално-балистичких перформанси 3Д штампаних пројектила и балистичке заштите.

Тема припада области техничких наука – машинство, у којој научној области војно машинство – системи наоружања за коју је Машински факултет Универзитета у Београду матичан.

За ментора предметне дисертације предлаже се **др Предраг Елек, редовни професор** на Катедри за системе наоружања Машинског факултета Универзитета у Београду, који у претходних десет година има десет објављених радова у научним часописима са SCiE Web of Science листе у домену машинског инжењерства – система наоружања, дакле има све неопходне компетенције у оквиру научне области којој припада тема докторске дисертације.

ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ

др Милош Марковић, ванредни професор
Универзитет у Београду, Машински факултет

др Предраг Елек, редовни професор
Универзитет у Београду, Машински факултет

др Михајло Поповић, ванредни професор
Универзитет у Београду, Машински факултет

др Дејан Јевтић, ванредни професор
Универзитет у Београду, Машински факултет

др Небојша Христов, ванредни професор
Универзитет одбране, Војна академија