


Чувати до краја 2031. године
Функција 03, редни број 21
22.04.2026. (датум)  (обрађивач)

вс доц. др Нада Читаковић – члан,
др Марина Симовић Павловић, дипл. инж., научни сарадник – члан,
др Дарко Васиљевић, дипл. инж., научни саветник –члан.

Оцена докторске дисертације студента
Пп Дарка Јанковића, магст. инж.
Изивештај, доставља.-

**Већу за техничко – технолошке и
природно – математичке науке
Војне академије**

Одлуком Наставно-научног већа Војне академије, број 07/55 од 27.02.2026. године, акт број 1169-42 од 02.03.2026. године, именовани смо у комисију за оцену и одбрану докторске дисертације потпуковника Дарка Јанковића, магст. инж., под називом:

**„Прилог развоју оптичких метода за одређивање параметара интеракције пројектила и
препрека различитих карактеристика”**

На основу члана 10. Правилника о пријави, изради и одбрани докторске дисертације и промоцији доктора наука (“Службени војни лист” 36/2021), а након прегледа достављене дисертације, подносимо следећи

ИЗВЕШТАЈ

1. Основни подаци о докторанду и докторској дисертацији

1.1. Подаци о докторанду

- **Име и презиме:** Дарко Јанковић
- **Датум и место рођења:** 11.04.1981. године, Аранђеловац, Р. Србија
- **e-mail:** darkoojanko@gmail.com
- **Претходно образовање:**
 - **Основне академске студије:** Војнотехничка академија, Београд, смер Ваздухопловнотехничка служба, специјалност Ваздухоплови и мотори, просечна оцена 8,93.
 - **Магистар академске студије:** Универзитет Сингидунум Београд, магистар инжењер менаџмента, просечна оцена 9,43.
 - **Професионални статус (занимање/чин):** потпуковник, запослен у Војној академији Универзитета одбране Министарства одбране Републике Србије, од 2005. године.

1.2. Подаци о докторској дисертацији

Назив: Прилог развоју оптичких метода за одређивање параметара интеракције пројектила и препреке различитих карактеристика.

Научна област: Машинско инжењерство.

Ужа научна област: Системи наоружања.

Обим: Дисертација има укупно 153 странице (14 уводних страница и 131 страница текста), организованих у 8 поглавља, садржи 116 референци, 20 табела, 75 илустрација.

Кључне речи: пројектили, грануларни материјали, оптичке методе, пренос енергије, балистика.

1.3. Подаци о ментору

- **Име и презиме:** Дарко Васиљевић.
- **Звање:** научни саветник.
- **Датум избора у звање:** 27.11.2018. године.
- **Област:** природно-математичке науке-физика.
- **Установа запослења:** Институт за физику Универзитет у Београду.

2. Предмет и циљ докторске дисертације

Кандидат је као предмет истраживања ове дисертације дефинисао утврђивање предности коришћења оптичких метода за анализу дејства пројектила на препреке различитих материјала и структуре. Наведена предност је потврђена кроз спроведену системску компаративну анализу оптичким методама, при чему су добијени резултати показали њихову примењивост и поузданост у испитивању интеракције пројектила са различитим материјалима и структурама препрека.

Основни циљ истраживања да се применом математичког модела за обраду слике анализирају резултати испитивања дејства пројектила на препреке различитих врста материјала, као и да се добијени резултати упореде са резултатима других метода ради оцене предности примењених поступака у одређивању параметара интеракције пројектила и препрека, је испуњен, јер су у раду резултати експерименталних мерења обрађени оптичким и термовизијским методама и интерпретирани кроз математичку и компаративну анализу различитих типова материјала и метода.

У складу са дефинисаним оквиром истраживања, у којем су наведени различити типови материјала и предвиђено испитивање интеракције пројектила са одабраним класама, експериментална анализа у дисертацији усмерена је на грануларне материјале, при чему су разматрана три репрезентативна материјала различитих гранулација као релевантни представници ове класе балистичке заштите.

Анализа је извршена на два нивоа и приказани су добијени резултати засновани на оптичком снимању и дигиталној обради података.

Истраживање је реализовано је кроз следеће фазе:

- прикупљање и анализа научних и стручних радова и студија из области истраживања;
- анализа математичко-механичких модела динамичког процеса интеракције крутих тела са препрекама;
- дефинисање и класификација оптималних оптичких метода за истраживање динамичких процеса;
- припрема и селекција експерименталне опреме, организација и дефинисање процедура за експериментални део истраживања;
- примена одабраних оптичких метода за снимање током испитивања; Испитивање са гађањем је вршено у неколико фаза са различитим параметрима пројектила и материјала препреке, тачније, у експерименту су реализована вишефазна испитивања са различитим калибрима пројектила (5,56 mm и 7,62 mm), различитим типовима препрека (панцирна плоча, песак, бетон и њихове комбинације) и варијацијама услова дејства, што је омогућило упоредну анализу утицаја свих наведених параметара.
- прикупљање и обрада добијених резултата;
- У истраживању реализована свеобухватна анализа заснована на оптичким методама (брза и термовизијска камера), при чему су резултати временски праћени и обрађени кроз софтверску интерпретацију, што омогућава увид у динамику процеса.

Није вршено директно и систематско поређење оптичких метода са другим, независним мерним методама, јер у оквиру експеримента није спроведено паралелно мерење истих физичких величина помоћу различитих типова (нпр. не-оптичких) инструмената у истим условима и у истом временском оквиру. Уместо тога, „друге методе“ у раду су више присутне у виду допунских извора података и различитих начина интерпретације резултата, а не као потпуно независни мерни системи за директну компарацију.

Ово ограничење је последица експерименталних услова и природе испитиваних брзих процеса, где је приоритет дат високој временској резолуцији и недеструктивном мерењу, што оптичке методе чини примарно најпогоднијим алатом. Због тога је анализа фокусирана на унутрашњу компарацију оптичких техника и различитих сценарија оптерећења, а не на паралелно мултисензорско мерење исте величине.

- одређивање параметара дејства пројектила при интеракцији са препреком, на основу дефинисаних математичких модела;
- упоредна анализа експерименталних резултата и резултата прорачуна током истраживања;
дефинисање закључака и смерница за будућа истраживања.

У теоријском смислу, истраживање је допринело бољем разумевању механизма дисипације енергије, посебно кроз анализу термовизијских и записа са брзе камере, као и кроз поређење понашања различитих материјала (песак, бетон и панцирна плоча). Ови резултати омогућавају квалитативно унапређење постојећих модела интеракције пројектила и препрека.

У практичном смислу, примена оптичких метода (брза и термовизијска камера) показала је значајан потенцијал за праћење брзих процеса, посебно у погледу временске резолуције и

визуелизације динамике удара, чиме је побољшана методологија експерименталног праћења у односу на класичне приступе.

жс

3. Основне хипотезе

У складу са предметом научног истраживања и дефинисаним циљевима, кандидат је формулисао општу хипотезу научног истраживања и, са њом, три посебне хипотезе. Општа хипотеза истраживања дефинисана је као: „Поуздана и стандардизована методологија за проучавање феномена брзих механичких процеса интеракције пројектила са препрекама различитих структура и материјала може се дефинисати применом оптичких метода, уз коришћење одговарајућих математичких и експерименталних поступака.“

У оквиру истраживања развијен је и примењен јасно дефинисан експериментални приступ заснован на оптичким методама (високобрзинска и термовизијска камера), уз софтверску обраду и временску анализу података, што представља значајан корак ка формирању стандардизованог поступка праћења и анализе брзих механичких процеса. Додатно, систематично су испитане различите комбинације пројектила и материјала препрека, што доприноси репрезентативности и применљивости методологије.

Како је у питању потпуно нови приступ, у раду се не наводи као „стандардна методологија“, али се може посматрати као развијена и функционално конзистентна методологија са високим степеном поузданости, још увек у фази научно-методолошког усавршавања и стандардизације.

У оквиру научног истраживања разматране су три посебне хипотезе, и то:

1. Постоји могућност одређивања параметара дејства пројектила на препреку применом одговарајућих математичких модела;
2. Постоји могућност експерименталног одређивања параметара дејства пројектила на препреку применом специјалних оптичких метода;
3. Могуће је, на основу темељне анализе добијених експерименталних и прорачунских резултата, дефинисати поуздану методологију за одређивање параметара дејства пројектила на различите врсте препрека.

Наведене хипотезе проверене су на основу спроведене детаљне анализе резултата добијених експерименталним испитивањем и прорачунским моделима, као и у односу на актуелна референтна научна истраживања.

За верификацију прве хипотезе развијен је дводимензионални математички модел за прорачун брзине кретања дијаболе испалене из ваздушног наоружања, у коме су узети у обзир гравитација, квадратични аеродинамички отпор и геометријски параметри пројектила. Нумеричко решење система добијено је применом Рунге–Кута методе у MATLAB-у. Као улазни параметри коришћени су маса, пречник дијаболе и почетна брзина (према техничкој документацији ваздушне пушке LG 110 и ваздушног пиштоља LP 10 фирме Steyr), угао испаливања одређен је на основу геометрије поставке експеримента у стрелјани Војне академије, док су стандардизована густина ваздуха и коефицијенти отпора преузети из доступне литературе. Главни излазни резултат модела је брзина у тренутку контакта са

метом и из ње изведена кинетичка енергија, која је употребљена као кључна величина за даљу анализу расподеле енергије у грануларној мети. На основу познате кинетичке енергије пројектила у тренутку удара прорачунате су: енергија сабијања, инерцијална енергија, енергија трења, енергија предата мети, енергија утрошена на деформацију пројектила, енергија трансформисана у топлоту, енергија механичких вибрација у мети, као и преостала енергија након удара. Упоредна анализа показала је добро подударане израчунате и експерименталне енергије сабијања грануларне материје, што потврђује да предложени 2D математички модел омогућава поуздано одређивање параметара дејства пројектила на препреку и представља валидну основу за наредне фазе истраживања.

Ради верификације друге хипотезе спроведено је свеобухватно експериментално истраживање ефеката удара пројектила из ваздушног и стрељачког наоружања на грануларне материјале различитих гранулација и физичког стања. Испитивања су изведена у лабораторијским и полигонским условима, уз примену брзих и термовизијских камера као основних оптичких инструмената за снимање и анализу процеса удара. У оквиру прве фазе истраживања реализовано је гађање из ваздушне пушке Steyr LG 110 и ваздушног пиштоља LP 10, дијаболама различите геометрије (са равним и купастим врхом), при почетним брзинама од 240 m/s и 160 m/s. Снимање је обављено дигиталним фотоапаратом Panasonic DMC-FZ200 при брзини од 40 fps, чиме је омогућена визуелна анализа пенетрације дијаболе у песак различите гранулације и под различитим угловима дејства (0° и 22°). У другој фази истраживања, спроведеној на полигону Никинци Техничког опитног центра, коришћене су опитне цеви стрељачког оружја M70 (7,62×39 mm) и M21 (5,56×45 mm), при чему је процес удара сниман ултрабрзом камером Phantom v9.1 и термовизијском камером FLIR SC 620. Комбиновањем оптичке визуелизације и термалне анализе добијени су подаци о брзини распршивања грануларне материје, дисипацији енергије и температурним променама унутар заштитних структура. Због велике брзине пројектила и одговарајуће кинетичке енергије није било могуће добити снимке брзом камером на начин који је дефинисан и развијен за ваздушно наоружање, док су снимци термовизијском камером омогућили одређени ниво анализе удара пројектила у мету.

На основу свеобухватне анализе експерименталних мерења и прорачунских резултата може се закључити да је трећа хипотеза делимично потврђена. Комбиновањем експерименталних испитивања дејства пројектила на различите врсте препрека и прорачунског дела добијен је конзистентан скуп података који омогућава дефинисање параметара процеса продора. Корелацијом између измерених и прорачунатих вредности дубине продора, расподеле енергије и геометрије кратера утврђена је стабилна зависност између основних карактеристика пројектила (брзина, маса, облик) и физичких својстава препреке (густина и гранулометрија). На основу тога развијена је и верификована методологија за одређивање параметара дејства пројектила, која се може применити и на различите типове материјала.

Као битно ограничење идентификовани су брзина пројектила и његова кинетичка енергија. Коришћени поступак показао се као адекватан за брзине до 250 m/s и кинетичке енергије до 15 J. Брзине преко 750 m/s и кинетичке енергије преко 2000 J показале су се превеликим за примењени поступак, услед чега нису добијени смислени резултати.

4. Кратак опис садржаја докторске дисертације

Дисертација је организована кроз осам поглавља:

- **Поглавље 1 – Увод:** У овом поглављу истакнут је значај развоја оптичких метода, посебно у војној примени, јер омогућавају детаљну анализу брзих феномена и параметара интеракције пројектила и препреке. Посебан акценат стављен је на физику грануларних материјала и на могућност да се њихово понашање под ударом пројектила разуме и искористи у функцији балистичке заштите. Полазећи од тога, дефинисана је потреба за ослањањем на савремене методе визуелизације и мерења као основу за даља истраживања и анализу резултата у наставку дисертације.
- **Поглавље 2 – Преглед истраживања и метода одређивања дејства пројектила на различите врсте препрека:** У другом поглављу дат је преглед литературе и савремених приступа у проучавању дејства пројектила на различите типове препрека, са освртом на класична испитивања чврстих мета и новија истраживања грануларних материјала. Посебно су размотрени механизми интеракције пројектила и препреке, укључујући начине апсорпције и дисипације енергије у грануларној подлози. Приказане су кључне методе одређивања параметара процеса (емпиријски, аналитички и нумерички приступ), као и типичне величине које се прате у експериментима. Поред тога, наглашене су технике визуелизације и мерења релевантних параметара као што су брзина, убрзање и дубина пенетрације, уз примену оптичких и термовизијских система.
- **Поглавље 3 – Оптичке методе – војна примена:** У овом поглављу приказана је примена савремених оптичких метода за праћење балистичког удара пројектила у грануларну препреку, пре свега ултрабрзог снимања и термовизије. Ултрабрза камера омогућава детаљно бележење тренутка удара, кретања честица, ширења ударног фронта и релаксације узорка након пробоја, док термовизијска камера омогућава визуелизацију температурних поља током интеракције пројектила и подлоге. На основу термовизијских записа могуће је анализирати пренос енергије и проценити улогу грануларног медијума као потенцијалног заштитног слоја. Посебно је истакнуто да су ове технике бесконтактне, неразорне и погодне за поновљива лабораторијска испитивања, уз мање трошкове и једноставнију реализацију у односу на класичне методе као што су фотоеластичност, холографија или мерење сензорима. Дат је преглед основа термовизије, принципа рада, типова система и кључних компоненти термовизијских уређаја, као и кратак приказ генерација уређаја. Такође је објашњена улога брзих и ултрабрзих камера, њихова структура и ограничења, као и типичне примене у балистици и анализи брзих динамичких процеса. На крају је дат осврт на друге познате оптичке методе у војној примени (интерферометрија, холографска интерферометрија, спекл метрологија и фотоеластичност) и њихове предности и ограничења у испитивању удара и оштећења.
- **Поглавље 4 – Математички алати:** У овом поглављу приказано је да је удар пројектила у грануларну материју сложен феномен који захтева мултидисциплинарни приступ и примену симулационих техника. Наведене су најчешће коришћене нумеричке методе за моделовање (DEM, FEM, SPH и MPM), као и њихове

комбинације у оквиру савремених симулационих софтвера (нпр. CFD–DEM, GFS, OpenFOAM, LIGGGHTS). Дат је преглед најзначајнијих софтверских пакета и њихових намена: LIGGGHTS и LAMMPS за грануларне системе, Abaqus и ANSYS за брзе динамичке ударе и велике деформације, Chrono:Engine за механичке и контактне симулације, као и DualSPHysics за SPH приступ. Поред основних симулационих алата, истакнути су и помоћни алати за визуализацију и обраду података (ParaView, Python) и за визуелне симулације (Blender), уз напомену о њиховој примени. У оквиру дисертације анализирају се три кључне појаве: кретање пројектила до мете, пренос енергије при удару у грануларну мету и реакција гранулата након удара. За симулацију путање и одређивање брзине непосредно пре удара развијени су MatLab кодови (2Д за ваздушно, 3Д/6DoF за стрељачко наоружање), на основу којих се одређује кинетичка енергија пројектила. За анализу релаксације и морфолошких промена површине песка коришћен је код у програмском језику C++ уз OpenCV библиотеку, који прати кретање зрна из серије снимака и извучи параметре „облак”, „рупа”, „ерозија” и „енергија“.

- **Поглавље 5 – Експериментални део истраживања:** Експериментални део истраживања започет је прелиминарним испитивањем у пиштољској стрељани Војне академије, са циљем да се анализира утицај пројектила мале кинетичке енергије на песак различите гранулације. Коришћени су ваздушна пушка и ваздушни пиштољ STEYR (LG 110 и LP 10), при даљини гађања 15 m и брзинама пројектила од 160 до 240 m/s, као и два типа дијабола (равни и купасте врх). Мете су биле дрвени рамови истих димензија, пуњени истом количином песка, при константној температури, док је угао дејства међан између 0° и 22° померањем стрелца. Снимање је реализовано фиксним фотоапаратом Panasonic DMC-FZ200, чиме је обезбеђена репродуктивност услова и прикупљени су визуелни подаци за анализу удара и понашања грануларне материје. Након снимања, анализирани су кадрови удара за три врсте песка, уз увођење параметара специфичне густине и гранулације као релевантних карактеристика материјала. У наставку је реализовано испитивање са стрељачким наоружањем (цеви M70 7,62 mm и M21 5,56 mm) у контролисаним условима, на кевларној плочи и на комбинованој препреци са грануларним слојем испред кевлара. Поређене су и препреке од слободног гранулата и гранулата везаног цементом у трослојним панелима, како би се проценио утицај структуре на дисипацију енергије. Динамика удара и термални ефекти праћени су ултрабрзом камером Phantom v9.1 и термовизијском камером FLIR SC 620, а добијени снимци су након тога анализирани у програму који је развијен у програмском језику C++ уз коришћене OpenCV библиотеке и програму FLIR ResearchIR MAX ради праћења кретања зрна и процеса релаксације.
- **Поглавље 6 – Резултати и анализа резултата:** У овом поглављу приказани су резултати испитивања дејства пројектила из ваздушног и стрељачког оружја на грануларне и чврсте препреке, уз обједињавање три независна извора података: MATLAB прорачуна спољне балистике, анализе снимака у C++/OpenCV и термовизијских записа у FLIR ResearchIR MAX. На основу измерених/израчунатих брзина непосредно пре удара одређена је укупна кинетичка енергија и распоређена на компоненте (пенетрација, деформација, топлота, вибрације/звук и преостала

енергија), у зависности од типа мете и услова гађања. Код ваздушног оружја, оптичком анализом су квантификоване грануларне појаве „облак”, „удар” и „ерозија” као индиректни показатељи преноса енергије, при чему се показало да врста песка и облик врха дијаболое значајно утичу на динамику дисипације, док угао дејства више мења ток процеса него коначни поредак материјала. Експериментално изведена енергија на основу запремине и просечне брзине избациваних зрна показала је добро слагање са прорачунатом енергијом сабијања код крупног песка, док су код ситнијих гранула одступања већа због тешкоће прецизног одређивања брзина честица. Код стрељачког наоружања (7,62 mm и 5,56 mm), снимци нису били погодни за исту типологију појава као код ваздушног оружја, па је интерпретација дисипације енергије ослоњена пре свега на термовизију, која се тумачи кроз промену температурне разлике у времену. Термовизијски резултати показују да песковита баријера испред панцирне плоче даје најизраженији и продужени термални одговор услед унутрашњег трења и судара зрна, док бетон показује умеренији термички скок, али већу структурну стабилност и дубљу апсорпцију енергије. Укупно посматрано, грануларни материјали имају значајан потенцијал као адаптивни слој у вишеслојним заштитним системима, при чему ефекат зависи од гранулације, конфинације/везива, облика врха и енергетског нивоа пројектила.

- **Поглавље 7 – Закључак:** У овој докторској дисертацији је показано да грануларна материја (песак) има изражену способност дисипације енергије удара пројектила кроз сабијање, трење и унутрашње сударе зрна, при чему се део енергије трансформише у топлоту, што је потврђено термовизијским мерењима. Код пројектила мањих енергија гранулат може да делује као ефикасан дисипативни слој који значајно утиче на смањење продора и на расподелу енергије унутар мете. Код високих енергија грануларна баријера не спречава пробој, али мења механизам преноса енергије и смањује локализовано оштећење, посебно у комбинацији са чврстим заштитним слојем. Утврђено је да на ефикасност највише утичу гранулација и структура гранулата, као и облик врха пројектила, док угао удара углавном мења динамику процеса, али не и коначни поредак дисипативних способности материјала. Комбиновањем прорачунског модела и оптичких метода могуће је поуздано одређивање параметара удара у домену нижих брзина и енергија, док за домен стрељачког наоружања ови поступци захтевају сложенију експерименталну поставку и напредније мерење. На основу добијених резултата закључује се да грануларни материјали имају значајан потенцијал као адаптивни и модуларни елемент у вишеслојним системима балистичке заштите, уз потребу даљег оптимизовања дебљине слоја, гранулације и начина конфинације (везивање/затварање) у зависности од нивоа претње.

5. Остварени резултати и научни допринос докторске дисертације

Кандидат потпуковник Дарко Јанковић је у оквиру докторске дисертације остварио значајне научне и стручне резултате у областима везаним за балистику, механику удара и интеракцију пројектила са грануларним медијумима, као и примену оптичких метода и обраде слике у анализи брзих динамичких процеса.

У истраживању је кроз примену високобрзинске и термовизијске оптичке методе омогућено временски високо резолутивно праћење процеса удара, као и квантитативна и квалитативна анализа параметара као што су промена температуре, динамика дисипације енергије и временски ток релаксације система. Ови резултати јасно показују предности оптичких метода у односу на класичне приступе у погледу визуелизације, временске прецизности и могућности праћења брзих транзијентних појава.

У раду су предности оптичких метода доказане кроз интерну анализу добијених података и поређење различитих сценарија експеримента, те је јасно да би директна паралелна валидација са независним мерним системима била сувишна.

Остварени резултати који утичу на научни допринос су следећи:

- Дефинисана је и развијена методологија заснована на оптичким методама за проучавање феномена брзих механичких процеса интеракције пројектила са препрекама различитих структура и материјала, уз стандардизацију корака снимања, обраде и интерпретације резултата.
- Развијен је дводимензионални математички модел за прорачун брзине кретања дијаболе испале из ваздушног наоружања, у који су укључени гравитација, квадратични аеродинамички отпор и геометријски параметри пројектила, при чему је нумеричко решење реализовано применом Рунге–Кута методе у МАТЛАБ-у. Овим је омогућено поуздано одређивање брзине у тренутку контакта са метом и кинетичке енергије као кључне величине за даљу анализу.
- Уведен је енергетски биланс интеракције пројектила и грануларне мете кроз прорачун карактеристичних компоненти енергије (укључујући енергију сабијања, трења, деформације, енергију предату мети, топлоту и др.), што омогућава систематску анализу дисипације енергије током удара.
- Спроведено је свеобухватно експериментално истраживање удара пројектила из ваздушног и стрељачког наоружања на грануларне материјале различитих гранулација и физичког стања, у лабораторијским и полигонским условима, уз примену брзих и термовизијских камера као основних мерних средстава за визуелизацију и анализу процеса.
- Развијена је и верификована методологија квантитативне анализе карактеристичних облика понашања грануларног материјала након удара пројектила, путем параметаризације појава „облак” (моментално распршење/подизање материјала), „рупа” (тренутно измештање материјала из зоне удара) и „ерозија” (накнадно реорганизовано кретање зрна). Посебан допринос представља временска анализа наведених параметара, којом је омогућено јасније разумевање трансфера енергије од почетне концентрације до стабилизације унутар грануларне структуре.
- Извршена је дорада постојећег математичког модела и прилагођавање C++ алата за обраду видео-записа, чиме је омогућена прецизнија и репродуктивна обрада експерименталних снимака и добијање квантитативних показатеља који описују динамику грануларне мете.

- На основу упоредне анализе експерименталних мерења и прорачунских резултата утврђен је домен применљивости предложене методологије у зависности од брзине пројектила и кинетичке енергије, при чему је показано да је приступ посебно адекватан за ниже брзине и енергије (до приближно 250 m/s и 15 J), док за високе брзине и енергије (реда величине преко 750 m/s и 2000 J) захтева примену сложенијих експерименталних поставки и мерних система.
- Термовизијска мерења пружила су додатну потврду добијених закључака, указујући на значај термалног одзива услед трења и унутрашњих судара зрна, чиме је показано да грануларни медијум учествује у трансформацији енергије не само у механичком и кинетичком, већ и у термичком облику.

Научни допринос докторске дисертације огледа се у развоју нове, интегрисане оптичке методологије за квантитативну анализу интеракције пројектила и грануларних препрека, засноване на синхронизованој примени брзе камере и термовизије, као и у дефинисању нових параметара за опис овог процеса.

6. Објављени и саопштени научни резултати који чине саставни део докторске дисертације

Резултати истраживања проистекли из ове докторске дисертације објављени су у следећим научним радовима:

I. Објављени радови којима се доказује услов за одбрану докторске дисертације:

1. Janković DD, Pavlović SM, Nikolić ZM, Tomić LD, Jerković DD, Vasiljević DM. Using image analysis to determine the energy transfer profile of a projectile impact in a granular substrate. *Sci Sinter*. 2025;00(00):24. doi:10.2298/SOS250210024J (M22).

II. Остали објављени радови који су повезани са садржајем докторске дисертације:

1. Ivanković N, Rajić D, Karkalić R, Radovan M, Janković D, Radovanović Ž, Stupar S, Janković D. Influence of the aerosol flow and exposure time on the structural changes in the filtering half masks material. *Journal of the Serbian Chemical Society*, 2018; 83(4): 463–471. DOI je: 10.2298/JSC170624004I (M21),
2. Janković D, Vasiljević D, Tomić Lj, Duvnjak S, Savremene snajperske puške u opremi Vojske Srbije, *Vojnotehnički glasnik* (3/2019), vol.67, br. 3, str. 663-668, (M51),
3. Janković D, Simović Pavlović M, Nikolić Z, Tomić Lj, Vasiljević D. Is The Thread Posed by Air Weapons Underrated – Analysis of The impact of a projectile fired from an air rifle on a sandy substrate In: ARCHIBALD TEISS DAYS 2024; 2023; Belgrade, Serbia. (M51)
4. Janković D, Simović Pavlović M, Pagnacco M, Nikolić Z, Bokić B, Kolarić B, Tomić Lj, Vasiljević D. Revealing self-organization of granular matter: From fundamental physics to military technology applications. In: *Proceedings of the General Scientific Meeting, Belgian Physical Society; 2023 May 17; Namur, Belgium. Namur: Belgian Physical Society; 2023. p. CMN1–CMN1. (M33),*
5. Simović Pavlović M, Nestorović K, Janković D, Radulović A, Pagnacco M. Different butterfly wing structures as an inspiration for military applications. In: *Proceedings of the 9th International Congress of the Serbian Society of Mechanics – ICSSM 2023; 2023 Jul 5–7; Vrnjačka Banja, Serbia. (M33),*

6. Simović Pavlović M, Obradović V, Janković D, Pagnacco M, Tomić Lj, Vasiljević D. Influence of small arms ammunition on targets made of granular matter. In: 11th International Scientific Conference on Defensive Technologies – OTEX 2024; 2024 Oct 11; Belgrade, Serbia. p. 535–538. (M33),
7. Janković D, Tomić Lj, Jerković D, Simović Pavlović M, Vasiljević D. Experimental determination of the optical parameters in granular impact. In: Proceedings of the 11th International Conference on Defensive Technologies – OTEH 2024; Belgrade, Serbia: Military Technical Institute; 2024. (M33),
8. Jankovic D, Vasiljevic D, Majstorovic G, Tomić Lj, Kostić I, Perić S, Dikić G, Application of infrared thermography in monitoring of water cooling on materials of different thermal properties, 9th International Scientific Conference on Defensive Technologies– OTEH,8. – 9. october 2020, Military TechnicalInstitute Belgrade, (M33),
9. Janković D, Ochsenhofe M, Simović Pavlović M, Nestorović K, Stojnović S, Jerković D, Vasiljević D. Impact analysis of high-speed projectiles on granular material. Contemporary Materials. Vol. XV, No. 2, 2024. pp. 158–163. (M33)
10. Janković D, Simović Pavlović M, Vasiljević D, Nikolić Z, Tomić Lj. Thermal and optical characterization of ballistic events in composite and granular targets. Contemporary Materials. Vol. XV, No. 2, 2024. pp. 164–170. (M33),
11. Simović Pavlović M, Maksimovic T, Maksimovic J, Radulovic A, Janković D, Pagnaco M. Defining phosphate tungsten bronze structure through the fractal dimension Contemporary Materials. Book 69, Banja Luka 2025, pp. 185–189. (M30)
12. Janković D, Simović Pavlović M, Ochsenhofe M, Radisavljević I, Vasiljević D. Analysis of projectile effects on different types of materials In: Conference on Advances in Science and Technology – COAST 2024; 2024; Herceg Novi, Montenegro. (M33),
13. Simović Pavlović M. Radulovic A, Janković D, Vasiljević D. Image Analysis of butterfly Wing Surfaces for the Creation of New Biomimetic Materials In: The 1st International Online Conference on Biomimetics – IOCB 2024; 2024; Serbia. (M33),
14. Janković D, Simović Pavlović M, Nikolić Z, Tomić Lj, Vasiljević D. Analysis of thermal characteristics of air rifle barrels after multiple firings. In: Conference on Advances in Science and Technology – COAST 2025; 2025; Herceg Novi, Montenegro. (M33),
15. Majstorović G, Tomić Lj, Janković D. Primena crvene termografije u praćenju rada benzinskog i dizel motora / Application of infrared thermography in monitoring the operation of petrol and diesel engines. In: Zbornik radova naučne konferencije vojnih nauka „VojNa 2023“; Ministarstvo odbrane Republike Srbije, Institut za strategijska istraživanja; 2023. p. 275–276. (M33).

Објављени резултати представљају конкретну потврду достигнућа из докторске дисертације.

7. Подаци о извршеној провери на плагијаризам

Провера оригиналности рукописа докторске дисертације кандидата пп Дарка Јанковића извршена је у Проректорату за НИД Универзитета одбране у Београду, применом софтверског алата за проверу оригиналности. О провери је сачињен **Технички извештај о провери на плагијаризам** (акт РУО број 18-300 од 02.12.2025. године)

Приликом предметне провере утврђено је да **нема подударања текста разматране докторске дисертације са било којим извором текста**, односно да је степен подударања 0%.

На основу Техничког извештаја, оригиналност докторске дисертације је **позитивно оцењена**, а ментор је израдио **Извештај о оцени оригиналности** наведене докторске дисертације (акт ВА број **10-484** од **22.12.2025. године**), у којем је наведено да **није било подударања текста докторске дисертације са претходно публикованим научним радовима**.

Сходно томе, анализа Техничког извештаја о провери на плагијаризам и Извештаја ментора о оцени оригиналности потврђују да је докторска дисертација кандидата пп Дарка Јанковића **оригинална**, да представља резултат **самосталног научноистраживачког рада** докторанда и да су **све коришћене референце правилно наведене**.

8. Закључак са детаљним образложењем научног доприноса докторске дисертације

Докторска дисертација кандидата пп Дарка Јанковића, под насловом „Прилог развоју оптичких метода за одређивање параметара интеракције пројектила и препрека различитих карактеристика”, представља оригиналан и свеобухватан научноистраживачки рад који даје значајан допринос областима балистике, експерименталне механике и примењених оптичких метода, посебно у домену анализе брзих динамичких процеса при удару пројектила у различите типове препрека.

Научни допринос ове докторске дисертације огледа се у развоју и примени интегрисане оптичке методологије за експериментално одређивање параметара интеракције пројектила и грануларних препрека, као и у дефинисању нових дескриптивних параметара који омогућавају квантитативну анализу овог сложеног динамичког процеса.

Оригиналност приступа се огледа у увођењу три квантитативна дескриптора интеракције – ерозије (поврат зрна у кратер), геометрије формираног кратера и дисперзије материјала (облак зрна) – који су дефинисани на основу директне оптичке опсервације и даље обрађени применом метода анализе слике и физичко-математичког моделирања. На тај начин омогућена је квантификација феномена који се у постојећим истраживањима углавном разматрају квалитативно.

Комбиновањем визуелних и термичких података остварен је нови ниво увида у динамику система, чиме је омогућено повезивање кинематичких и енергетских аспеката интеракције. Предложена методологија омогућава не само експериментално одређивање релевантних параметара, већ и успостављање основе за предикцију понашања грануларних материјала у зависности од њихових карактеристика.

Одређени резултати истраживања из ове докторске дисертације су јавно публиковани у релевантном научном часопису и у зборницима међународних научних скупова, што потврђује њихов научни квалитет и релевантност. Као научни рад у часопису објављен је: Janković DD, Pavlović SM, Nikolić ZM, Tomić LD, Jerković DD, Vasiljević DM. *Using image*

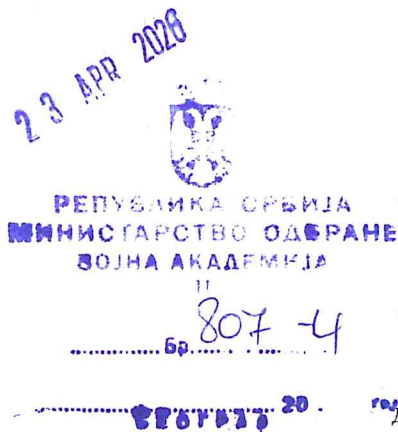
analysis to determine the energy transfer profile of a projectile impact in a granular substrate. *Sci Sinter*. 2025;00(00):24. doi:10.2298/SOS250210024J (M22).

Поред тога, резултати истраживања су презентовани кроз **конференцијске радове** на релевантним научним скуповима.

Финално, може се констатовати да су све суштинске хипотезе у потпуности потврђене. Случајеви у којима су поједине хипотезе делимично испуњене адекватно су образложени у извештају, методолошки оправдани и не утичу на валидност нити значај коначних резултата дисертације.

Комисија закључује да је докторска дисертација урађена у складу са одобреном пријавом теме докторске дисертације (Одлука Сената Универзитета одбране, број 7/136, акт Универзитета одбране у Београду, број 27-211 од 28.06.2023. године), да **представља оригинално научно дело и да су се стекли услови за њену јавну одбрану. Сходно томе, Комисија предлаже Наставно-научном већу Војне академије Универзитета одбране у Београду да докторску дисертацију под насловом „Прилог развоју оптичких метода за одређивање параметара интеракције пројектила и препрека различитих карактеристика” кандидата пп Дарка Јанковића стави на увид јавности и, након тога, прихвати.**

У Београду, 22.04.2026.године.



ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ:

Н. Чираковић
вс доц. др Нада Чираковић – члан,

М. Симић
др Марина Симић Павловић, научни сарадник – члан,

Дарко Васиљевић
др Дарко Васиљевић, научни саветник – члан.

Достављено:

- Већу за ТТиПМН Војне академије,
- Наставно-научном већу Војне академије (е/р, н/з),
- Департману за ТТиПМН Војне академије (е/р, н/з),
- Катедри ВМИ (е/р),
- а/а.