

# Prilog razvoju optickih metoda za odredjivanje parametara interakcije projektila i prepreka različitih karakteristika

*By* Darko Jankovic

УНИВЕРЗИТЕТ ОДБРАНЕ У БЕОГРАДУ  
ВОЈНА АКАДЕМИЈА

Дарко Јанковић

ПРИЛОГ РАЗВОЈУ ОПТИЧКИХ  
МЕТОДА ЗА ОДРЕЂИВАЊЕ  
ПАРАМЕТАРА ИНТЕРАКЦИЈЕ  
ПРОЈЕКТИЛА И ПРЕПРЕКА  
РАЗЛИЧИТИХ КАРАКТЕРИСТИКА

ДОКТОРСКА ДИСЕРТАЦИЈА

Београд, 2026. године



**УНИВЕРЗИТЕТ ОДБРАНЕ У БЕОГРАДУ**  
**ВОЈНА АКАДЕМИЈА**



Дарко Јанковић

**ПРИЛОГ РАЗВОЈУ ОПТИЧКИХ  
МЕТОДА ЗА ОДРЕЂИВАЊЕ  
ПАРАМЕТАРА ИНТЕРАКЦИЈЕ  
ПРОЈЕКТИЛА И ПРЕПРЕКА  
РАЗЛИЧИТИХ КАРАКТЕРИСТИКА**

ДОКТОРСКА ДИСЕРТАЦИЈА

Београд, 2026. године



**UNIVERSITY OF DEFENCE IN  
BELGRADE  
MILITARY ACADEMY**

---



Darko Janković

**A CONTRIBUTION TO THE  
DEVELOPMENT OF OPTICAL  
METHODS FOR DETERMINING  
PARAMETERS OF INTERACTIONS  
BETWEEN PROJECTILES AND  
OBSTACLES OF VARIOUS  
CHARACTERISTICS**

DOCTORAL DISSERTATION

Belgrade, 2026

## ЗАХВАЛНИЦА

Ову докторску дисертацију посвећујем свом сину Растку, мом Мики.

Његово детињство било је мој највећи изазов и мој највећи мотив. Сваку страницу овог рада исписивао сам у тренуцима када је он спавао или са њим док се играо, а свака реч је носила део наше заједничке борбе и љубави. Овај рад није само академски резултат, већ и сведочанство о снази једног детета које је, својом радошћу и присуством, давало смисао сваком мом напору.

Посебну захвалност упућујем мом ментору, професору др Дарку Васиљевићу, на подршци, разумевању и саветима који су усмеравали мој рад. Хвала и његовој асистенткињи др Марини Симовић-Павловић, на стрпљењу, помоћи и охрабрењу када је било најпотребније. Захваљујем се и Martin Ochsenhofer на несебичној помоћи и подршци у тренуцима када је било најтеже.

Од срца се захваљујем и својим родитељима, који су веровали у мене чак и онда када сам и када сумњао у себе. Најдубљу захвалност дугујем мојој мајци, која је са љубављу бринула о Мики током безброј ноћних сати проведених у раду. Без ње, овај пут не би био могућ.

Захваљујем се и свим изазовима и препрекама на овом путу, као и онима који можда нису веровали у мене. Управо су они дали посебан печат овом делу и научили ме вредним животним лекцијама о упорности, вери и снази.

Тата

**УНИВЕРЗИТЕТ ОДБРАНЕ У БЕОГРАДУ**

**Назив високошколске јединице**

**ИЗЈАВА О АУТОРСТВУ**

потпуковник Дарко Јанковић  
(име и презиме докторанда)

Изјављујем да је докторска дисертација под називом:

**ПРИЛОГ РАЗВОЈУ ОПТИЧКИХ МЕТОДА ЗА ОДРЕЂИВАЊЕ УТИЦАЈНИХ  
ПАРАМЕТАРА ИНТЕРАКЦИЈЕ ПРОЈЕКТИЛА И ПРЕПРЕКА РАЗЛИЧИТИХ  
КАРАКТЕРИСТИКА**

- резултат мог сопственог истраживачког рада,
- да предложена дисертација у целини ни у деловима није била предложена за добијање било које дипломе према студијским програмима других високошколских установа,
- да су резултати правилно наведени и
- да нисам кршио/ла ауторска права и користио/ла интелектуалну својину других лица.

**Место и датум:**

Београд, \_\_. \_\_. 2025. године

**ДОКТОРАНД:**

потпуковник

Дарко Јанковић

\_\_\_\_\_  
(потпис докторанда)

## САЖЕТАК

У овој докторској дисертацији анализирана је интеракције пројектила ваздушног и стрељачког наоружања са грануларним и другим типовима препрека, уз примену савремених оптичких метода и математичког моделирања. Рад је усмерен ка разумевању процеса преноса енергије у различитим условима, и дат је посебан осврт на примени грануларних материјала у функцији примене заштитних материјала у војне сврхе.

Ради добијања поузданих података, реализована су опсежна експериментална истраживања снимљена брзом и термовизијском камером, као и примена постојећег математичког модела за обраду слике. Постојећи модел је омогућио квантификацију параметара као што су: запремине материјала подигнутог у ваздух и праћење кретања подигнутог песка, а који су екстраховани применом стандардних модела обраде слике.

Докторска дисертација обједињује више метода: аналитичке прорачуне и експериментална мерења. На основу прикупљених података, извршена је анализа ефеката дејства пројектила, што је омогућило формулисање конкретних закључака и препорука за примену у војној техници.

Резултати овог истраживања пружају допринос унапређењу методологије анализе интеракције пројектила и препрека, посебно у контексту евентуалне заштите, и отварају могућности за даља мултидисциплинарна истраживања у области материјала, балистике и одбрамбених технологија.

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

## ABSTRACT

In this doctoral dissertation, the interactions between projectiles from air and small arms weapon systems with granular and other types of barriers were analyzed through the application of advanced optical diagnostics and mathematical modeling. The research is focused on understanding the mechanisms of energy transfer under different impact conditions, with special attention given to the potential use of granular materials as protective media in military applications.

To obtain reliable data, extensive experimental investigations were conducted using high-speed and thermographic cameras, along with the implementation of an existing mathematical model for image processing. This model enabled the quantification of parameters such as the volume of material ejected into the air and the tracking of granular motion, extracted through standard image-processing algorithms.

The dissertation integrates multiple methodologies, combining analytical calculations and experimental measurements. Based on the acquired data, a detailed analysis of projectile impact effects was carried out, allowing the formulation of specific conclusions and recommendations relevant to military engineering applications.

The results of this research contribute to the advancement of methodologies for analyzing projectile–obstacle interactions, particularly in the context of protective systems, and open new possibilities for multidisciplinary research in the fields of materials science, ballistics, and defense technologies.

Keywords: projectiles, granular materials, optical methods, energy transfer, ballistics

## САДРЖАЈ

Захвалница.....	3
Сажетак.....	4
Садржај.....	7
Списак табела.....	<b>Error!</b>
<b>Bookmark not defined.</b>	
Списак слика.....	12
Списак скраћеница.....	20
1.УВОД.....	22
2. ПРЕГЛЕД ИСТРАЖИВАЊА И МЕТОДА.....	26
2.1 Појам и дефиниција балистике.....	26
2.2 Преглед метода одређивања ефеката дејства пројектила на различите врсте препрека ..	26
2.3 Преглед метода одређивања ефеката дејства пројектила на различите врсте препрека ..	27
2.4 Појам и дефиниција материјала за заштиту ..	28
2.5 Истраживање ефеката дејства пројектила на препреку.....	31
2.6 Истраживање ефеката дејства пројектила на грануларну препреку – стање у свету ..	33
3. ОПТИЧКЕ МЕТОДЕ И ВОЈНА ПРИМЕНА.....	36
3.1 Познате оптичке методе у војној примени ..	36
3.1.1 Phase-Evaluation Methods – Методе фазне евалуације ..	36
3.1.3 Спекл Метрологија.....	40
3.1.2 Холографска интерферометрија ..	43
3.1.4 Теорија фотоеластичности ..	46
3.2 Ултрабрзе и Термовизијске камере ..	48
3.2. Термовизија ..	48
3.3 Брзе камере ..	53
4. МАТЕМАТИЧКИ АЛАТИ.....	57
4.1 Софтверске методе ..	57
4.2 Математички модел ..	58
4.2.2 Математички модел кретања пројектила стрелачког наоружања ..	61
4.2.1 Математички модел кретања пројектила ка мети за ваздушно наоружање ..	64
4.3 Удар пројектила у грануларну мету и пренос енергије.....	70
4.4 Реакција гранулата (зрна песка) након удара.....	76

5. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИ ДЕО ИСТРАЖИВАЊА.....	80
5.1 Уводно истраживање .....	79
5.1.1 Фотоапарат марке Panasonic DMC-FZ-200 .....	84
5.2 Истраживање реализовано из стрељачког наоружања .....	85
5.3 Карактеристике камера коришћених у балистичком испитивању.....	90
6. РЕЗУЛТАТИ И АНАЛИЗА РЕЗУЛТАТА.....	97
6.1 Резултати и анализа резултата испитивања дејства из ваздушне пушке и пиштоља .....	96
6.2 Резултати и анализа резултата испитивања дејства из стрељачког наоружања.....	124
6.2.1 Анализа резултата добијених термовизијском камером .....	127
6.3 Закључак о дисипацији енергије у грануларним материјалима под утицајем различитих врста пројектила.....	139
7.ЗАКЉУЧАК.....	142
8. ЛИТЕРАТУРА.....	147

## СПИСАК ТАБЕЛА

Р.Бр.	Табела	Назив табела	Страна
1	Табела 3.1.	Упоредна анализа метода обраде интерферограма по кључним параметрима параметара	40
2	Табела 3.2.	Класификација брзих и ултрабрзих камера	55
3	Табела 4.1	Упоредна анализа најзаступљенијих софтвера и метода	58
4	Табела 4.2	Коефицијенти модела и губици енергије за крупан песак, песак за мачке и ситан песак	74
5	Табела 5.1.	Основне техничке карактеристике ваздушне пушке Steyr LG 110 и ваздушног пиштоља Steyr LP 10 (према приручницима произвођача)	80
6	Табела 5.2.	Карактеристике пројектила	82
7	Табела 5.3.	Параметри експерименталног испитивања	84
8	Табела 5.4.	Карактеристике грануларне материје (резултати сопственог мерења на основу микроскопске анализе)	85
9	Табела 5.5	Кључни параметри протокола испитивања гађањем	88
10	Табела 5.6	Карактеристике песка у слојевима трослојне грануларне плоче-подаци добијени у току експерименталног истраживања	89
11	Табела 5.7	Техничке карактеристике муниције коришћене у балистичком испитивању	91
12	Табела 5.8	Техничке карактеристике цеви коришћених у балистичком испитивању	91
13	Табела 5.9.	Техничке карактеристике термовизијске камере FLIR SC 620	93
14	Табела 5.10	Техничке карактеристике камере Phantom v.9.1	95
15	Табела 6.1	Аналитички прорачун и расподела кинетичке енергије након удара пројектила испалених из ваздушног оружја у песковиту мету на растојању од 15 m	98
16	Табела 6.2	Приказ прорачунате енергије сабијања $E_1$ и енергије добијене на	102

---

Списак табела

---

---

основу енергије удара и облака  $E_{\text{exp}}$  на основу експерименталних података.

---

17	Табела 6.3	Приказ прорачунате енергије сабијања $E_1$ и енергије добијене на основу енергије удара и облака $E_{\text{exp}}$ на основу експерименталних података.	119
18	Табела 6.4	Услови гађања и параметри путање пројектила	126
19	Табела 6.5	Упоредни преглед својстава песка, бетона и панцирне плоче као заштитних структура	139
20	Табела 6.6	Преглед предности и мана грануларних материјала у заштитним структурама	140

---

**СПИСАК СЛИКА**

Р. Бр.	Слика	Назив слике	Страна
1	Слика 2.1.	Шематски приказ фаза балистичког кретања пројектила	27
2	Слика 2.2	Различити нивои панцирне заштите према NIJ стандардима	30
3	Слика 2.3	Изглед тканине и пакованих слојева Кевлара	31
4	Слика 3.1.	Приказ Mirau и Michelson интерферометара са означеним зрацима.	45
5	Слика 3.2.	Принцип рада серијског система са јединичним детектором	51
6	Слика 3.3.	Принцип рада серијског система са линијским детектором	51
7	Слика 3.4.	Блок шема серијског система	52
8	Слика 3.5.	Блок шема паралелног система са скенирањем по хоризонтала	52
9	Слика 3.9.	Принцип спорог видео записа	54
10	Слика 3.9.	Структура савремених дигиталних ултрабрзих камера	55
11	Слика 3.10.	Камера велике брзине серије CC (CrashCam)	56
12	Слика 4.1	Кориснички интерфејс у MATLAB-у за унос података балистичке симулације	64
13	Слика 4.2	Координатни систем тела пројектила са приказом аеродинамичких сила и момената потребних за моделовање путање	66
14	Слика 4.3	Кориснички интерфејс у MATLAB-у за унос података и покретање симулације балистичког кретања	70
15	Слика 4.4.	Анализа фотографија површине песка	78
16	Слика 4.5	Шематски приказ просторних трансформација експерименталне поставке: (а) нагиб мете и (б) угаоно позиционирање камере у односу на правац дејства пројектила.	79
17	Слика 5.1.	Шема експерименталног распореда	

Списак слика

18	Слика 5.2	Коришћене врсте дијабола, а) дијабола са равним врхом (wadcutter) и дијабила са купастим врхом (sharp pointed)	81
19	Слика 5.3	Геометријски приказ две дијаболе калибра 4.5 mm са назначеним димензијама	81
20	Слика 5.4.	Препреке од грануларне материје – сопствена експериментална поставка	82
21	Слика 5.5	Снимак удара пројектила у различите врсте грануларне материје	83
22	Слика 5.6.	Шематски приказ експерименталне поставке испитивања са стрелачким наоружањем	85
23	Слика 5.7.	Панцирна балистичка плоча са антитраума слојем	87
24	Слика 5.8.	Камера FLIR SC 620	89
25	Слика 5.9.	Камера Phantom v9.1	92
26	Слика 6.1	Дијаграм расподеле запреминског удела зрна у функцији пречника за три врсте песка	100
27	Слика 6.2	Дијаграм кумулативне запреминске расподеле честица по пречнику за три врсте песка	101
28	Слика 6.3	Дијаграм промене запремине облака честица у функцији времена приликом гађања из ваздушне пушке дијаболом са равним врхом и углом гађања од 0°	102
29	Слика 6.4	Дијаграм промене запремине облака честица у функцији времена приликом гађања из ваздушне пушке дијаболом са конусним врхом и углом гађања од 0°	102
30	Слика 6.5	Дијаграм промене запремине облака честица у функцији времена приликом гађања из ваздушне пушке дијаболом са равним врхом и углом гађања од 22°	103
31	Слика 6.6	Дијаграм промене запремине облака честица у функцији времена приликом гађања из ваздушне пушке дијаболом са конусним врхом и углом гађања од 22°	103
32	Слика 6.7	Дијаграм промене запремине удара у функцији времена приликом гађања из ваздушне пушке дијаболом са равним врхом и углом гађања од 0°	104

33	Слика 6.8	Дијаграм промене запремине удара у функцији времена приликом гађања из ваздушне пушке дијаболом са конусним врхом и углом гађања од $0^\circ$	104
34	Слика 6.9	Дијаграм промене запремине удара у функцији времена приликом гађања из ваздушне пушке дијаболом са равним врхом и углом гађања од $22^\circ$	105
35	Слика 6.10	Дијаграм промене запремине удара у функцији времена приликом гађања из ваздушне пушке дијаболом са конусним врхом и углом гађања од $22^\circ$	105
36	Слика 6.11	Дијаграм промене запремине облака и удара у функцији времена приликом гађања из ваздушне пушке дијаболом са равним врхом и углом гађања од $0^\circ$	107
37	Слика 6.12	Дијаграм промене запремине облака и удара у функцији времена приликом гађања из ваздушне пушке дијаболом са конусним врхом и углом гађања од $0^\circ$	107
38	Слика 6.13	Дијаграм промене запремине облака и удара у функцији времена приликом гађања из ваздушне пушке дијаболом са равним врхом и углом гађања од $22^\circ$	107
39	Слика 6.14	Дијаграм промене запремине облака и удара у функцији времена приликом гађања из ваздушне пушке дијаболом са конусним врхом и углом гађања од $22^\circ$	107
40	Слика 6.15	Приказ дијаграма акумулације ерозије гранулата у функцији времена приликом гађања из ваздушне пушке дијаболом са равним врхом и углом гађања од $0^\circ$	110
41	Слика 6.16	Приказ дијаграма акумулације ерозије гранулата у функцији времена приликом гађања из ваздушне пушке дијаболом са конусним врхом и углом гађања од $0^\circ$	110
42	Слика 6.17	Преказ дијаграма акумулације ерозије гранулата у функцији времена приликом гађања из ваздушне пушке дијаболом са равним врхом и углом гађања од $22^\circ$	111
43	Слика 6.18	Приказ дијаграма акумулације ерозије гранулата у функцији времена приликом гађања из ваздушне пушке дијаболом са конусним врхом и углом гађања од $22^\circ$	111

44	Слика 6.19 Зависност акумулације ерозије у функцији времена при гађању у крупан песак дијаболама са равним и конусним врхом	112
45	Слика 6.20 Промена запремине облака честица у функцији времена приликом гађања из ваздушног пиштоља дијаболом са равним врхом и углом гађања од 22°	114
46	Слика 6.21 Промена запремине облака честица у функцији времена приликом гађања из ваздушног пиштоља дијаболом са конусним врхом и углом гађања од 22°	114
47	Слика 6.22 Дијаграм промене запремине облака честица у функцији времена приликом гађања из ваздушног пиштоља дијаболом са равним врхом и углом гађања од 22°	115
48	Слика 6.23 Дијаграм промене запремине облака честица у функцији времена приликом гађања из ваздушног пиштоља дијаболом са конусним врхом и углом гађања од 22°	115
49	Слика 6.24 Дијаграм промене запремине удара у функцији времена приликом гађања из ваздушног пиштоља дијаболом са равним врхом и углом гађања од 0°	116
50	Слика 6.25 Дијаграм промене запремине удара у функцији времена приликом гађања из ваздушног пиштоља дијаболом са конусним врхом и углом гађања од 0°	116
51	Слика 6.26 Дијаграм промене запремине удара у функцији времена приликом гађања из ваздушног пиштоља дијаболом са равним врхом и углом гађања од 22°	117
52	Слика 6.27 Дијаграм промене запремине удара у функцији времена приликом гађања из ваздушног пиштоља дијаболом са конусним врхом и углом гађања од 22°	117
53	Слика 6.27 Дијаграм промене запремине облака и удара у функцији времена приликом гађања из ваздушног пиштоља дијаболом са равним врхом и углом гађања од 0°	118
54	Слика 6.28 Дијаграм промене запремине облака и удара у функцији времена приликом гађања из ваздушног пиштоља дијаболом са конусним врхом и углом гађања од 0°	118
55	Слика 6.29 Дијаграм промене запремине облака и удара у функцији времена	119

	приликом гађања из ваздушног пиштоља дијаболом са равним врхом и углом гађања од $22^{\circ}$	
56	Слика 6.30 Дијаграм промене запремине облака и удара у функцији времена приликом гађања из ваздушног пиштоља дијаболом са конусним врхом и углом гађања од $22^{\circ}$	119
57	Слика 6.31 Дијаграм акумулације ерозије гранулата у функцији времена приликом гађања из ваздушног пиштоља дијаболом са равним врхом и углом гађања од $0^{\circ}$	120
58	Слика 6.32 Дијаграм акумулације ерозије гранулата у функцији времена приликом гађања из ваздушног пиштоља дијаболом са конусним врхом и углом гађања од $0^{\circ}$	120
59	Слика 6.33 Дијаграм акумулације ерозије гранулата у функцији времена приликом гађања из ваздушног пиштоља дијаболом са равним врхом и углом гађања од $22^{\circ}$	121
60	Слика 6.34 Дијаграм акумулације ерозије гранулата у функцији времена приликом гађања из ваздушног пиштоља дијаболом са конусним врхом и углом гађања од $22^{\circ}$	121
61	Слика 6.35 Упоредни дијаграм промена запремине облака честица у функцији времена приликом гађања из ваздушне пушке и ваздушног пиштоља дијаболом са равним врхом у условима гађања у мету од крупног песка и углом гађања од $0^{\circ}$	122
62	Слика 6.36 Упоредни дијаграм промене интензитета удара у функцији времена приликом гађања из ваздушне пушке и ваздушног пиштоља дијаболом са равним врхом у условима мете од крупног песка и углом гађања од $0^{\circ}$	124
63	Слика 6.37 Упоредни дијаграм промене ерозије у функцији времена приликом гађања из ваздушне пушке и ваздушног пиштоља дијаболом са равним врхом у условима мете од крупног песка и углом гађања од $0^{\circ}$	125
64	Слика 6.38. Удар пројектила 7,62mm у грануларну материју (фотографија настала у току реализације експеримента)	127
65	Слика 6.39. Удар пројектила 7,62mm у бетонску плочу (фотографија настала у току реализације експеримента)	127

---

Списак слика

---

66	Слика 6.40. Приказ температурне разлике у зависности од времена при дејству пројектила 7,62mm на панцирну плочу	128
67	Слика 6.41. Темперална промена температуре у контактної зони након удара пројектила 7,62 mm у трослојну гранулатну баријеру постављену испред панцирне плоче	130
68	Слика 6.42. Промена температурне разлике у времену након удара пројектила 7,62mm у бетонску плочу направљену од гранулатног пуниоца са цементним везивом	131
69	Слика 6.43 Промена температуре у времену након удара пројектила 7,62mm у различите типове препрека (панцирна плоча, гранулатна баријера са панцирном плочом и бетонска плоча са панцирном плочом	132
70	Слика 6.44. Промена температурне разлике у времену након удара пројектила 5,56mm у бетонску плочу направљену од гранулатног пуниоца са цементним везивом	133
71	Слика 6.45 Промена температуре у контактної зони након удара пројектила 5,56mm у трослојну гранулатну баријеру постављену испред панцирне плоче	134
72	Слика 6.46 Промена температуре у контактної зони након удара пројектила 5,56mm у бетонску плочу постављену испред панцирне плоче	135
73	Упоредна анализа температурне разлике у функцији времена	
Слика 6.47	након удара пројектила 5,56 mm у панцирну плочу, песковиту баријеру и њихову комбинацију	136
74	Упоредна температурна реакција песковите баријере са панцирном плочом након дејства пројектила 7,62mm и 5,56mm	137
75	Упоредна температурна разлика након дејства пројектила	
Слика 6.50	5,56mm и 7,62mm у бетонску плочу са песковитим пуниоцем и цементним везивом	138

## СПИСАК СКРАЋЕНИЦА

Скраћеница	Значење
ADC	Аналого–дигитални конвертор
AP	Панцирни пројектили
BRL формуле	Ballistic Research Laboratory formulas
CC	CrashCam
CCD	Спољашња меморија пиксела
CMOS	Унутрашња меморија пиксела
CRT, LED, LCD	Екран
DIC	Digital Image Correlation
DEM	Discrete Element Method
DSPI	Digital Speckle Pattern Interferometr
ESPI	Electronic Speckle Pattern Interferometry
FAA модел	Federal Aviation Administration – Aircraft Vulnerability Model
FEM	1) Finite Element Method; 2) Шематски приказ експерименталне поставке испитивања са стрељачким наоружањем (navedeno u izvoru)
FPA	Focal Plane Array
FMJ	Full Metal Jacket
GSM	Различити нивои панцирне заштите према NIJ стандардима
JDM формуле	Jacob de Marre formulas

---

---

Списак скраћеница

---

Скраћеница	Значење
Jowettove формуле	Jowett empirical equations
JTCG/ME	Joint Technical Coordinating Group for Munitions Effectiveness
LAMMPS	Molecular Dynamics
LIGGGHTS	Метод дискретних елемената
МММТ	Модел модификоване материјалне тачке
МРМ	Material Point Method
NIJ	National Institute of Justice
NED	North–East–Down
SPH	Smoothed Particle Hydrodynamics
SRI формуле	Stanford Research Institute formulas
TDI	Time Delay and Integrate
THOR	Terminal High-speed Ordnance Research equations
VISAR	Velocity Interferometer System for Any Reflector
6DoF	Шест степени слободe

---

## УВОД

Развој оптичких метода је од суштинског значаја на различитим пољима, а посебно за војну примену. Оптичке методе омогућавају детаљнију анализу феномена који играју улогу у широком спектру војних активности. Једна од ужих примена односи се на посматрање и разматрање утицајних параметара интеракције пројектила и препреке, што директно повезује ову технолошку област са истраживањем физике грануларних материјала.

Шира област истраживања односи се на физику грануларних материјала и примену оптичких метода за анализу појава везаних за наведене материјале. Грануларни материјали се срећу у разним облицима и различитим срединама. Могућности искоришћавања оваквог ресурса на основу његових унапред истражених особина и предвиђеног понашања представља невероватну предност у науци и технологији материјала. Материјали су поље технологије које се даље имплементира у све друге области, па наравно и у војску.

Циљ проучавања грануларне подлоге у војсци има неколико различитих праваца. Најпре се идентификују предности и мане одређеног типа подлоге као такве. Такође се проучава физика процеса продирања пројектила у препреку од наведеног материјала, али се и одређују могуће улоге и предности испитаног материјала за даљу примену у војсци, као што су заштитни материјали у смислу заштите од дејства пројектила.

Од велике важности је осврнути се на постојеће методе и тренутне могућности истраживања поменутог феномена. Управо из наведених разлога, у другом поглављу је дат преглед стања у свету на тему истраживања интеракције пројектила са различитим подлогама са посебним освртом на грануларне подлоге које су предмет ове дисертације.

Друго поглавље се бави теоретским аспектима ове дисертације. Најпре су појашњени основи балистике на циљу као база даљег изучавања на дату тему. Затим су дефинисани материјали који се користе за заштиту у војне сврхе, док су на самом крају представљене методе које се користе за одређивање ефеката дејства пројектила на различите врсте препрека. У војсци се користе различите оптичке методе у различите сврхе.

Треће поглавље дисертације представља најважније методе, објашњава њихов принцип рада, описује домен примене истих и конкретизује се у правцу метода које се могу користити за анализу дејства пројектила на препреку. Тачније, у трећем поглављу дефинисане су методе које су коришћене за истраживање у оквиру ове дисертације. Као наставак оптичких метода, надовезано је четврто поглавље које представља математички модел за обраду слике. Овај модел је развијен и модификован наменски за истраживање на тему ове дисертације и

може бити преусмерен за даљу или сличну анализу. Веома је применљив и користи се за израчунавање конкретних података.

У петом поглављу је описан експериментални део дисертације, од саме идеје до извршења. Ово је веома аналитично поглавље, које већином приказује ток експеримента табеларно и користи методу гантограма.

Шесто поглавље даје приказ анализе експериментално добијених резултата и изведених закључака на основу исте. Резултати су графички приказани и детаљно објашњени.

Кроз анализу се изводе закључци који наводе на практични и научни допринос ове докторске дисертације приказан у седмом поглављу, а такође отварају неке нове тачке гледишта и могуће правце за даље истраживање.

Осмо поглавље је закључак аутора дисертације са личним запажањима и освртима на даље могућности истраживања.

## INTRODUCTION

The development of optical diagnostic methods has become a cornerstone in various scientific and technological domains, particularly within the field of defense and military applications. Optical methods enable a detailed, non-intrusive observation and analysis of dynamic phenomena that play a crucial role across a wide spectrum of military operations and experimental investigations. One of the more specific applications concerns the observation and quantification of parameters governing the interaction between a projectile and a barrier, directly linking this technological field to the study of granular material physics.

The broader research framework relates to the physics of granular media and the application of optical techniques for analyzing dynamic processes involving such materials. Granular materials occur in numerous forms and environments, and their behavior often lies between that of solids and fluids. The ability to exploit these materials based on their well-characterized properties and predictable response under load represents a significant advantage in both material science and applied defense technologies. Since material engineering underpins nearly all technological fields, its influence naturally extends into military research and development as well.

The study of granular substrates in the context of military applications encompasses several objectives. First, it involves identifying the advantages and limitations of specific types of substrates used in impact and penetration scenarios. Furthermore, it focuses on understanding the physics of projectile penetration into barriers composed of such materials, as well as assessing the potential of granular systems as protective structures against projectile impacts or blast effects.

A critical aspect of this research lies in evaluating existing experimental and optical diagnostic methods, as well as understanding their capabilities and limitations in capturing fast, transient events such as impact and fragmentation. For this reason, Chapter II provides an overview of the current state of research worldwide concerning projectile–substrate interactions, with particular attention given to granular targets, which represent the primary focus of this dissertation.

Chapter II also elaborates the theoretical background of the study. It begins by clarifying the fundamental principles of terminal ballistics, forming the basis for further investigation of impact dynamics. Subsequently, materials commonly used for protective military applications are categorized and described. The chapter concludes by outlining various

methodologies for determining the effects of projectile impact on different barrier types, including both conventional and advanced optical diagnostic techniques.

Chapter III presents and explains the most significant optical methods, their working principles, and respective domains of application. It narrows down to those techniques applicable to the analysis of projectile–barrier interactions, defining the methods employed in this research. Following this, Chapter IV introduces a mathematical image-processing model specifically developed and adapted for the purposes of this dissertation. This model provides a framework for quantitative data extraction and can be easily adapted for further or related analyses.

The experimental framework is described in Chapter V, covering every stage from conceptual design to practical implementation. This section is highly analytical in nature, presenting the experimental workflow in both tabular and Gantt-chart form to ensure transparency and reproducibility.

Chapter VI focuses on the analysis of experimental results, discussing the obtained data in detail and illustrating them through comprehensive graphical representations. The derived findings form the foundation for the scientific and practical contributions outlined in Chapter VII, which also identifies potential future research directions and new perspectives opened by this study.

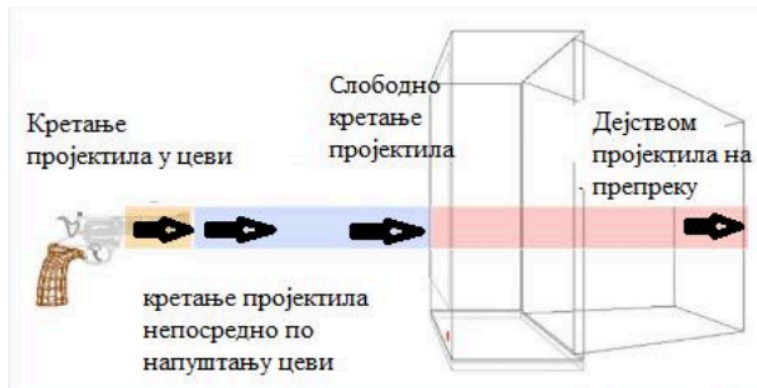
Finally, Chapter VIII provides the author’s concluding remarks, summarizing the research outcomes and presenting personal insights into the further development and application of optical and mathematical methods in the study of projectile–granular interactions.

## 2. ПРЕГЛЕД ИСТРАЖИВАЊА И МЕТОДА ОДРЕЂИВАЊА ДЕЈСТВА ПРОЈЕКТИЛА НА РАЗЛИЧИТЕ ВРСТЕ ПРЕПРЕКА

### 2.1 Појам и дефиниција Балистике циља

Балистика је научна дисциплина која проучавања кретање пројектила [1]. Назив балистика потиче од грчке речи балеин ( $\beta\acute{\alpha}\lambda\lambda\epsilon\iota\nu$ ) што у преводу значи бацити. Постоји неколико фаза кретања класичних пројектила [1, 2]:

- Кретање пројектила у цеви оруђа/оружја – проучавањем ове фазе бави се унутрашња балистика,
- Непосредно кретање пројектила по напуштању цеви оруђа – проучавањем овог периода кретања пројектила бави се прелазна балистика,
- Слободно кретање пројектила после напуштања цеви оруђа – овим периодом кретања пројектила бави се спољна балистика,
- Дејство пројектила у препреку-подлогу, односно интеракција пројектила са циљем/препреком – ова појава се изучава се у оквиру балистике на циљу (за балистику на циљу се често користи израз терминална балистика) [1].



Слика 2.1. Шематски приказ фаза балистичког кретања пројектила

Код интеракције пројектила и циља, разликујемо два основна типа процеса који зависе од врсте пројектила, и то [1]:

- Инертни пројектили су пројектили који не садрже експлозивно пуњење, тј. пројектили чије се дејство заснива искључиво на принципу претварања њихове кинетичке енергије у користан рад. Ово најчешће подразумева пробијање одређене препреке. Процес започиње контактом пројектила и препреке. основни задатак

балистике на циљу је управо био одређивање релација ко је омогућавају одређивање кључних параметара процеса пробијања (односно пенетрације или перфорације).

- пројектили који садрже експлозивно пуњење. У овом случају терминално-балистички процес је знатно сложенији и започиње активирањем упаљача, односно иницирањем експлозивног пуњења. [1]

Балистика на циљу уско је повезана са механизмима деловања бојених глава и подразумева моделирање бројних процеса као што су: детонација, фрагментација, балистика парчади, формирање кумулативног млаза, пенетрација и многе друге [1, 3]. За ову групу пројектила такође је карактеристично и рушеће дејство (бласт) које настаје као последица детонације експлозивног пуњења [1].

Постоје различите врсте класификације пројектила, где се узима у обзир калибар, начин лансирања, начин стабилизације лета, методе вођења, намену пројектила итд. За балистику на циљу, најзначајнија је подела пројектила према начину дејства на циљу. Када су у питању конвенционални пројектили који ће бити предмет ове докторске дисертације, два главна вида деловања су [1, 4]:

- Пробојно дејство (пенетрација, односно перфорација) и
- Рушеће дејство натпритиска ударног таласа (област ефекат или фугасно дејство).

Пробојно дејство је карактеристично за следеће типове пројектила [1]:

- пројектили који се испаљују из класичног стрељачког (пешадијског) наоружања (намењени за уништавање живе силе и материјално-техничких средстава),
- пројектили парчадног дејства (природна или контролисана фрагментација),
- инертни противоклопни пројектили (калибарни и поткалибарни),
- противоклопни пројектили на бази усмереног деловања експлозије (пројектили на бази кумулативног, Misznay-Schardin - овог и Норкинсон - овог ефекта) [1, 4].

Дејство натпритиска ударног таласа изазваног експлозијом је карактеристично за [1, 3]:

- пројектиле рушећег дејства,
- у извесној мери и за све друге пројектиле који садрже експлозивно пуњење (пројектили парчадно-рушећег дејства, све класе противоклопних пројектила заснованих на усмереном деловању експлозије).

Балистика на циљу је научна дисциплина која проучава дејство пројектила при удару у препреку, односно његову интеракцију са циљем. Како се тема ове докторске дисертације бави анализом параметара насталих услед удара пројектила у препреке од различитих материјала, целокупно истраживање се у потпуности сврстава у домен балистике на циљу.

## **2.2 Преглед метода одређивања ефеката дејства пројектила на различите врсте препрека**

Сагласно врсти испитивања у области Балистике на циљу карактеришу се три основна приступа истраживању, и то [1]:

- Емпиријски приступ се заснива на одређивању одговарајућих релација између проверених балистичких величина које су експериментално одређене. У погледу цене експерименталних истраживања, овај приступ је јако захтеван, али добијени односи су јако поуздани, и не могу се користити изван домена у коме су експерименти извршени.
- Аналитички приступ заснива се на примени основних физичких законитости на разматрани терминално-балистички процес. Резултат овог приступа представља сложен аналитички модел, који може бити исказан у форми једне релације, а врло често и сложених система једначина за чије је решавање неопходно формирање комплексних рачунарских програма. Ове моделе одликује инжењерски прихватљива тачност и најчешће шири домен примене него у случају емпиријских модела.
- Нумерички приступ је најсавременији приступ који подразумева примену физичких закона одржања на дискретизовану структуру која се разматра. Употребом рачунара и одговарајућег симулационог софтвера омогућава се решавање комплексних једначина за системе са веома великим бројем степена слободе. Резултати који се у конкретном случају добију у великој мери зависе од тачности коришћених модела понашања материјала. У пракси се навише користи комбиновани метод, који подразумева примену предходно наведена два метода., а са циљем добијања оптималног модела који адекватно описује посматрани процес. Као битну чињеницу треба истаћи да изучавање балистике на циљу подразумева претходна и неопходна знања из различитих научних дисциплина, као што су: механика деформабилног тела, динамика гасова, теорија ударних таласа, физика експлозије, конструкција пројектила, итд.

Поред наведених метода веома је битно напоменути да некада треба приступити и неким различитим и можда неустаљеним приступима анализе.

### **2.3 Појам и дефиниција материјала за заштиту**

Како је напоменуто у уводном делу, важан правац истраживања грануларне подлоге као препреке је и проучавање гранулата као заштитног материјала за примену у војсци.

Када се узму у обзир механичке особине материјала као и балистичка отпорност у односу на лака оружја, као одговарајући избор у правцу панцирне заштите узима се панцирни челик [4]. Панцирни челици [5] се ослањају на апсорпцију кинетичке енергије пројектила у смислу заустављања истог. Најчешћа технологија у употреби различитих типова челика за примену код панцирне заштите односи се на ваљане лимове и плоче. Ови материјали користе се код оклопних возила и код тенкова. На слици 2.2 су приказане балистичке заштитне плоче различитих нивоа заштите. Видљиви су панели

нивоа III и IV, који представљају највиши степен заштите од ватреног оружја у категорији „stand-alone” плоча. Ове плоче су обично израђене од панцирних челика, керамичких материјала или њихових хибрида, у зависности од намене и степена заштите [6-8].

У контексту војне примене, панцирни челици се користе као основни материјал за израду монолитних панела, као и за композитне системе у комбинацији са грануларним или полимерним слојевима. Овакви системи омогућавају апсорпцију и дисипацију кинетичке енергије пројектила, чиме се значајно умањује продор и смањује ризик од повреде корисника [4, 5, 9, 10].



Слика 2.2 Различити нивои панцирне заштите према NIJ стандардима [11]

За примену у производњи заштитне одеће, керамички материјали [10] су надмашили металне, али се морају користити само комбиновани са композитима од балистичких влакана. Керамички композитни материјали користе керамичку подлогу са добрим карактеристикама температурне отпорности, великим чврстоћама и малим тежинама. Како су керамички материјали крхки, ту наступају влакна високе еластичности и чврстоће која спречавају ширење пукотина те ојачавају керамичку подлогу. Керамички композитни материјали се најчешће примењују у ваздухопловству, али и у другим војним секторима.

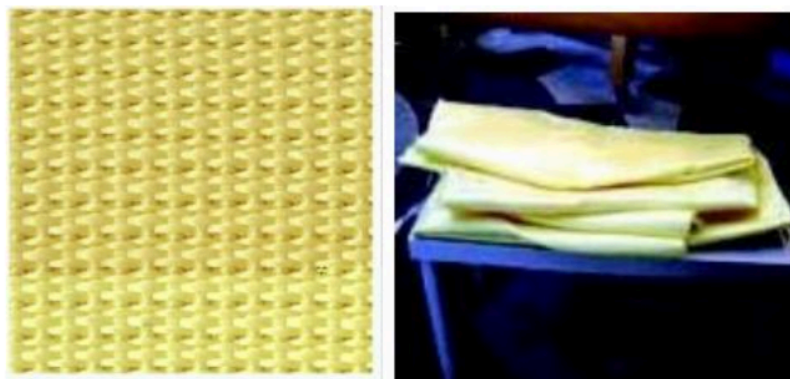
Грануларна материја [11] представља скуп (агрегацију) макроскопских честица величине почев од око 1  $\mu\text{m}$  па навише (горња граница величине практично не постоји) [11, 12]. Грануларна материја је у суштини скуп макроскопских честица и уобичајено се посматра као чврсто тело које има своје степене слободе. Битно је приметити да свака макроскопска честица има и своје локалне степене слободе. Судари између макроскопских честица доводе до преноса енергије са чврстог тела (скупа макроскопских честица) на појединачне макроскопске честице. Као резултат тога долази до дисипације енергије која може да доведе до заустављања кретања макроскопских честица унутар грануларног материјала. Грануларне материје показују значајан потенцијал за дисипацију енергије при балистичком удару, што је потврђено експерименталним и нумеричким истраживањима пенетрације пројектила у медијуме попут песка и шљунка [13, 14].

На тим принципима се заснивају и неке савремене конструкције заштитних структура, попут слојева песка или гранула [15], које су показале висок потенцијал у апсорпцији

енергије. Иако примена у војним возилима још увек није стандардизована, представља активну област истраживања и развоја [16].

Комбинације различитих материјала и њихова примена, као што су на пример легуре, полимери, стакло и гелови, хибриди и већ поменути композитни и керамички материјали, најновијим технологијама експлоатисани су у производњи такозваних паметних материјала [15]. Ради се о новој генерацији материјала са својствима таквим да реагују на спољашње стимулансе и овакви материјали се најчешће развијају за потребе војске и свемирских програма, а тек касније се преносе и на цивилни сектор.

Кевлар [17-19] је материјал који се најчешће користи као оклоп за заштиту од метака стрељачког наоружања због своје отпорности на ударце, велике чврстоће и мале тежине. Кевлар је полимер који је добијен 1965. године у лабораторијама у DuPont-у. Наведена својства чине Кевлар идеалним материјалом који се користи као основна испуна борбених прслука. Вршено је много студија где је тестирано више слојева Кевлара различитих тежина да би се одредиле тежине и број слојева потребних за дизајнирање најоптималнијег борбеног прслука. У ту сврху урађено је много балистичких тестова на комбинацијама балистичког гела и слојева Кевлара различите тежине [17, 18]. Изглед ткања и слојева Кевлара приказан је на слици 2.3.



Слика 2.3 Изглед тканине и пакованих слојева Кевлара [11]

Испитивања су обухватала анализу механичких својстава Кевлара, биомеханичке последице пенетрације и мерење енергије удара пројектила, као и директну експерименталну анализу пенетрације FMJ (Full Metal Jacket) пројектила – стандардне врсте муниције код стрељачког наоружања, у којој је оловно језгро у потпуности омотано металном кошуљицом (најчешће бакарном или челичном), што пројектилу обезбеђује већу пробојност, мању деформацију при удару и стабилнију путању – у Кевларове панеле различитих дебљина и броја слојева [17–19].

Stopforth и Adali [17] су кроз контролисано тестирање показали да једино вишеслојне конфигурације, са најмање осам слојева Кевлара различитих површинских густина

(GSM), обезбеђују задовољавајућу балистичку заштиту од FMJ пројектила испаљених са кратке удаљености.

Узимајући у обзир релативно ниске трошкове грануларних материјала и једноставну технологију њихове обраде за обликовање балистичких компоненти, они представљају економичну алтернативу традиционалним испунским материјалима. У комбинацији са везивним или структурним медијумима, могу постићи механичке параметре приближне оним код конвенционалних материјала, што је потврђено експериментима на различитим грануларним конструкцијама [13, 14]. Поред тога, због знатно мање густине, ови материјали доприносе значајном смањењу масе заштитних панела, што је примећено при тестирањима структура модерних оклопних система [15, 16].

Рад Аудин и сарадника [9] показује да системи са слободним керамичким честицама између плоча могу пружити изразиту заштиту уз повољан однос тежине и учинка, што их чини погодним за примену у балистичкој заштити личне опреме и лаких возила.

#### **2.4 Истраживање ефеката дејства пројектила на препреку**

Више од две деценије разматране су појаве које се јављају интеракцијом пројектила и чврсте препреке, при чему су препреке биле једнослојне или вишеслојне [1, 16]. Реализована испитивања су углавном вршена у војне сврхе, те се као резултат тога појавио велики број стручних и научних радова, од експерименталних студија продора у различите типове материјала, до развоја нумеричких модела и испитивања балистичких карактеристика савремених заштитних структура [14, 17-28].

Испитивања су најчешће вршена на чврстој препреци, па се због великог броја тако реализованих експеримената, за интеракцију пројектила са таквом, чврстом препреком усталио назив „класично” испитивање.

Испитивања су углавном вршена на препреци која је изложена динамичком оптерећењу приликом удара пројектила, што изазива пластичне деформације на материјалу-препреци и појаву таласа напона [1]. Даље се кренуло у истраживања најподобније врсте препреке, као и проблема који настају приликом пенетрације. На самом почетку истраживања на ову тему коришћене су емпиријске једначине, и то:

- JDM формуле (Jacob de Marre formulas) - емпиријске релације за прорачун продора пројектила у металне препреке на основу калемљених експерименталних података [29],
- SRI формуле (Stanford Research Institute formulas)- модели развијени за потребе анализе пенетрације у вишеслојне материјале, примарно за авио и одбрамбену индустрију [2],

- BRL формуле (Ballistic Research Laboratory formulas) - формуле америчке војне лабораторије које описују однос између брзине, масе и дубине продора пројектила у челичне плоче [30],
- Neilsonове релације (Neilson empirical relations) - емпиријске формуле засноване на подацима испитивања пенетрације малокалибарског наоружања у различите материјале [2],
- Jowettове формуле (Jowett empirical equations) - формуле за прорачун дубине пенетрације које узимају у обзир облик пројектила и карактеристике препреке [31],
- JTCG/ME подаци (Joint Technical Coordinating Group for Munitions Effectiveness) — заједничка техничка координациона група америчког Министарства одбране за ефикасност муниције, која је објавила више приручника и база података за терминалну балистику [32, 33],
- FAA модел (Federal Aviation Administration – Aircraft Vulnerability Model) - модел за процену оштећења структура у авијацији услед балистичког утицаја, развијен од стране америчке Савезне управе за ваздухопловство [34],
- THOR формуле (Terminal High-speed Ordnance Research equations) - једначине које користи америчко Министарство одбране за предикцију продора различитих типова пројектила у сложене препреке [35].

Ове емпиријске једначине представљају темељ балистичких анализа у првој фази истраживања, када нису били доступни савремени нумерички модели, али се и данас користе као оријентир у калибрацији и валидацији софистициранијих симулација.

За испитивање пробоја различитих типова препрека развијени су бројни аналитички модели. Један од најпознатијих је модел Recht–Ipson [3], који је првобитно формулисан за опис перфорације танких металних плоча. Заснован на енергетском приступу, овај модел омогућава одређивање критичне брзине перфорације, као и губитка енергије пројектила током пробоја. У каснијим студијама, модел је успешно адаптиран и за анализу перфорације композитних, бетонских и керамичких структура, чиме је задржао своју примену у савременим теоријским и експерименталним истраживањима.

Поред класичних перфорационих модела, пажња је усмерена и на проучавање феномена рушећег дејства, односно зоне блиског дејства услед удара, где као последица долази до интензивне фрагментације материјала и појаве парчадског дејства [1]. У циљу бољег разумевања ове појаве, развијени су различити теоријски модели фрагментације. Међу првима је био модел фрагментације који је предложио Невил Мот (Mott) [36], базиран на једнодимензионој расподели фрагмената. Касније је Доналд Грејди (Grady) формулисао сопствени модел заснован на локалним инерцијалним ефектима током динамичког лома материјала [37]. Поред ових, значајан допринос дали су и бројни други истраживачи који су развили теоријске и експерименталне моделе расподеле облика, величине и енергије фрагмената [1].

На нашим просторима, значајан допринос истраживању балистичког дејства дали су истраживачи Машинског факултета Универзитета у Београду. Њихова истраживања обухватају моделовање фрагментације, пробоја и деформације материјала под утицајем пројектила. У раду Elek и сарадника анализирана је ефикасност фрагментационих бојевих глава, уз примену напредних метода моделовања и експерименталну валидацију добијених резултата [38]. У другим радовима бавили су се испитивањем пробоја танких челичних плоча употребом деформабилних пројектила [39], као и моделирањем пробоја једнослојних и вишеслојних металних структура [40, 41]. Истраживане су и сложене интеракције између обликованих млазева и реактивног оклопа [42], као и експанзиона динамика металних цилиндра услед дејства експлозије [43].

Посебан допринос ови истраживачи дали су у области унапређења постојећих аналитичких модела, попут модификације Forrestal–Warren модела ради његове примене на челичне плоче високе тврдоће средње дебљине [44]. Поред тога, анализирани су параметри утицаја на расподелу притиска и температуре унутар система за евакуацију цеви после опаљења [41], као и карактеристике термобаричних система базираних на високоенергетским смешама [44].

#### **2.4.1 Истраживање ефеката дејства пројектила на грануларну препреку – стање у свету**

Почетком 21. века објављено је више значајних радова у којима је анализиран динамички одговор грануларне материје на балистички удар [21, 22, 46, 47]. У раду Gilson и сарадника [46] моделирана је структура грануларне агрегације на бази алуминијум-оксида. Резултати добијени нумеричком симулацијом упоређени су са експерименталним подацима снимљеним помоћу ултрабрзе камере. Показано је да простирање ударног таласа унутар грануларне структуре, као и интеракција честица са зидовима посуде, имају значајан утицај на појаву распршења и секундарног кретања материје [47].

У циљу бољег разумевања механике продора пројектила у грануларне системе, током 19. века формулисани су основни теоријски модели који се и данас користе. Дарсијев закон (Darcy's law) објашњава проток флуида кроз порозне медијуме, што је касније примењено и на моделирање интеракције чврстог тела са грануларним материјалима [48]. Поред тога, Рејнолдсова дилатантност (Reynolds dilatancy) описује појаву повећања запремине код честица у густом паковању услед деформације, што је кључно за разумевање понашања грануларних материјала током удара [49].

Везујући се за наведене теоријске основе, последњих деценија развијени су савремени модели који обухватају сложене ефекте при продору пројектила у грануларне материјале. У више студија анализиране су силе отпора које делују на пројектил током

продора у суве и слабо збијене грануларне структуре, попут песка или зрнасте мешавине. Посебна пажња посвећена је расподели сила дуж путање пројектила, као и прелазу између квазистатичког и инерцијалног режима. При томе је показано да отпор не зависи само од брзине продора, већ и од облика пројектила, густине и паковања честица, као и услова на ивици система. Такође је примећено да присуство границе, попут зидова посуде, има значајан утицај на рефлексију сила и секундарне токове унутар медијума [50, 51].

Даље, значајан допринос дат је у моделовању ефеката експлозивних оптерећења на грануларне системе, чиме се пружа додатни увид у понашање грануларног материјала под утицајем пројектила различитих калибара. Ови модели су посебно релевантни за симулацију краткотрајних, али интензивних оптерећења која имају карактеристике сличне удару пројектила. Применом нумеричких метода симулиран је настанак кратера на површини тла, као и простирање ударног таласа кроз збијени грануларни медијум. У тим радовима указано је и на значај параметара као што су енергетска импулсност, густина материјала и структура контактне мреже честица за тачну прогнозу одговора система [50, 51].

Поред праволинијског продора, у новијим истраживањима посебна пажња посвећена је анализи косих удара, при чему је показано да угао под којим пројектил улази у грануларни медијум значајно утиче на расподелу сила и формирање анизотропних зона притиска унутар материјала [52, 53]. Применом фотоеластичне технике визуализовани су контактни напони и механизми преноса енергије, што омогућава боље разумевање утицаја почетне оријентације и динамике удара на еволуцију сила унутар система [53]. Осим тога, моделовање расподеле притиска и деформација након површинске експлозије пружа додатне увиде у еволуцију поља напона унутар грануларног медијума [54].

Иако је у литератури анализиран велики број аспеката продора пројектила у грануларне медијуме, бројна питања у вези са механизмима дисипације енергије, развојем сила отпора и улогом микроструктуре и граничних услова и даље остају отворена. Посебно је недовољно истражен утицај облика и брзине пројектила на развој сила током продора, као и просторна и временска еволуција поља притиска и померања унутар грануларног медијума. Овај недостатак јасне слике о механизмима дисипације енергије указује на потребу за детаљнијим експерименталним и нумеричким истраживањима која би обухватила широк спектар утицајних параметара – од својстава зрна до геометрије система.

У том контексту, у оквиру израде ове докторске дисертације реализован је низ експеримената и објављени су научни радови у којима се систематски приступа анализи балистичког удара у грануларну материју, кроз примену савремених снимајућих метода и анализу добијених података [55–59]. Истраживања су обухватила различите аспекте, од саморганизације унутар грануларних система под утицајем шока, преко анализе утицаја различитих врста муниције малог калибра, до процене енергетског трансфера применом технике обраде слике. Ови резултати представљају

значајан допринос разумевању понашања грануларне материје под балистичким оптерећењем и отварају простор за развој нових концепата пасивне заштите базиране на контролисаним својствима грануларне структуре.

### 3. ОПТИЧКЕ МЕТОДЕ – ВОЈНА ПРИМЕНА

#### 3.1 Познате оптичке методе у војној примени

Велику примену у истраживањима за војне сврхе нашле су оптичке методе, пре свега због своје способности да неинвазивно и прецизно региструју промене унутар испитиваних структура. Ове методе имају широку примену у различитим областима, а посебно су значајне у проучавању брзих динамичких процеса, као што је удар пројектила у различите врсте препрека [26]. Најзаступљенија оптичка метода је интерферометријска метода, укључујући микроталасне и VISAR (Velocity Interferometer System for Any Reflector) варијанте – системе засноване на интерферометријском мерењу брзине било које рефлектујуће површине. VISAR техника заузима централно место у савременим балистичким истраживањима [60]. Значајну улогу у истраживањима везаним за област балистике имају технике засноване на употреби кохерентних извора светлости, као што су ласери. Ове технике не само да омогућавају усавршавање класичних интерферометара, већ отварају и потпуно нове могућности у области мерења [61].

Развој ласера ултракратких импулса реда фемтосекунди (fs), као и напредних техника снимања и записа, приближио је мерења границама које одређују фундаменталне резолуције у времену и простору [62]. За потребе посматрања феномена који настају приликом удара пројектила у сложене препреке састављене од различитих врста материјала, у савременој експерименталној механици и балистичким испитивањима најчешће се примењују следеће оптичке методе [63, 64]:

- Phase-Evaluation Methods – Методе евалуације фазе,
- Holographic Interferometry – Холографска интерферометрија,
- Speckle Metrology – Спекл метрологија,
- Photoelasticity – Фотоеластичност.

#### 3.1.1 Phase-Evaluation Methods – Методе фазне евалуације

Методе фазне евалуације представљају скуп техника у оптици које се користе за добијање информација о фазној компоненти светлосног таласа [65, 66]. За разлику од интензитета светлости који је директно мерљив, фаза представља суптилнији параметар и захтева софистициране методе за њено одређивање [65]. Информације садржане у фази таласа могу да открију [66, 64]:

- Структуру објекта, јер промена фазе при интеракцији са објектом открива детаље његове површине, унутрашње структуре и других својстава невидљивих голим оком,
- Кретање, јер временске промене фазе омогућавају мерење брзине и правца,
- Материјална својства, попут индекса преламања, дебљине и унутрашњих напрезања.

Постоји више техника за евалуацију фазе, у зависности од конкретне примене. Најчешће коришћене су [64-66]:

- Интерферометрија, која користи суперпозицију два кохерентна светлосна таласа. Разлика у фази изазива интерференцијски образац из кога се добијају информације о геометријским и механичким својствима,
- Холографија, која омогућава снимање и реконструкцију тродимензионалних објеката. Фазне информације су кодиране у интерференцијском обрасцу,
- Фазно-контрастна микроскопија, примењива у визуализацији прозирних структура, где се фазна разлика претвара у разлику у интензитету.

Ове технике омогућавају анализу таласног фронта светлости: познати шаблон се поставља у путању светлости, а деформације интерференцијског обрасца се користе за реконструкцију фазног профила [65, 66].

Методе фазне евалуације имају широку примену [64, 66]:

- Микроскопији за снимање биолошких структура,
- Биомедицинским истраживањима за развој дијагностичких метода и терапија.
- Индустијској контроли за испитивање оптичких елемената и мерење дебљине,
- Астрономији за проучавање далеких објеката.

У области машинства, ове методе су постале кључне у анализи вибрација и дефеката. Примењују се у [65, 64]:

- Дијагностици лежајева (детекција микропукотина и хабања),
- Прoцени стања ротора (турбине, компресори),
- Контроли квалитета заварених спојева,
- Испитивању површинских слојева и премаза, што доприноси поузданости и ефикасности система.

Најзаступљенија техника је ласерска виброметрија, која користи Доплеров ефекат за мерење вибрација. Фазна компонента Доплеровог сигнала носи информације о деформацијама површине [64, 65]. Осим ње, примењују се и друге технике за детекцију и анализу механичких оштећења и динамичког понашања система [65, 66, 62]:

- Акустична емисија, уз помоћ које се детектују еластични таласи настали услед микропукотина,
- Модална анализа, уз помоћ којих се идентификују природне фреквенције и модове вибрација конструкције, при чему је фазна информација од суштинске важности за тачну реконструкцију облика мода и локализацију оштећења.

Главне предности примене ове метода су [65]:

- Рана детекција оштећења,
- Недеструктивна примена,
- Висока прецизност мерења,
- Могућност аутоматизације и обраде великог броја података.

Методе фазне евалуације представљају поуздан и софистициран приступ у техничкој дијагностици, са потенцијалом да значајно побољшају ефикасност и поузданост машинских система. Њихова вредност није само у прецизности, већ и у могућности примене у реалним индустријским условима, што је посебно наглашено у савременој литератури из области оптичког инжењеринга и сензорских технологија [64-68]. Компаративни преглед карактеристика ових метода приказан је у Табели 3.1 [65, 68].

*Табела 3.1. Упоредна анализа метода обраде интерферограма по кључним параметрима параметара*

Параметар	Скелетонизација интерференционих образаца	Фазно искорачење / померање	Фуријеова трансформација	Темпорална хетеродинација
Број интерферограма за реконструкцију	1	Минимум 3	1 (или 2)	1 по тачки детекције
Резолуција	1 – 1/100	1/10 – 1/100	1/10 – 1/30	1/100 – 1/1000
Евалуација између екстремних интензитета	Не	Да	Да	Да
Инхерентно потискивање буке	Делимично	Да	Не (или делимично)	Делимично
Аутоматско откривање знакова	Не	Да	Не (или делимично)	Да
Неопходна експериментална манипулација	Не	Да	Не (или делимично)	Да
Експериментални напон	Низак	Висок	Није потребан	Екстремно висок
Осетљивост на спољашње утицаје	Ниска	Умерена	Висока	Екстремно висока
Интеракција оператера	Могућа	Није могућа	Могућа	Није могућа
Брзина евалуације	Ниска	Висока	Ниска	Екстремно висока
Цена	Умерена	Висока	Умерена	Веома висока

У циљу испитивања понашања грануларне материје након удара пројектила, примењује се више напредних метода визуализације и анализе, међу којима се издвајају [52]:

- Ултрабрза камера, која омогућава снимање кретања појединачних честица великом брзином, што пружа детаљан увид у њихове путање, сударе и расподелу енергије,
- Дигитална холографија и whole-field оптичке методе, које омогућавају реконструкцију тродимензионалне структуре унутар грануларног узорка, што је кључно за разумевање понашања материјала у дубини,
- Ласерска доплерова виброметрија и интерферометријске технике, које омогућавају мерење брзине и смера кретања појединачних честица, посебно у зони турбуленције и динамичког мешања,
- Компјутерске симулације, које се користе за моделирање сложених интеракција унутар система, као и за тестирање хипотеза о динамици и расподели енергије у грануларним материјалима.

Узимајући у обзир све већу прецизност, осетљивост и примену оптичких метода у анализи појава код грануларне материје, очекује се да ће даља истраживања примене метода фазне евалуације допринети развоју напредних модела за описивање њихове сложене динамике и унапређење система за мониторинг и управљање у реалном времену.

У анализи динамичких удара примењивано је више техника фазне евалуације. Ове методе су коришћене за испитивање понашања композитних структура приликом удара пројектила, при чему је омогућено рано идентификовање микроскопских зона напрезања пре појаве видљивих оштећења [62, 69]. Такође, примењене су и у сврху праћења структурних промена на војним летелицама, где су успешно откривани рани знаци хабања и појава микропукотина. Поред тога, фазна анализа је употребљена и за откривање конструктивних слабости које нису биле уочљиве класичним методама. Може се закључити да методе фазне евалуације представљају поуздан и прецизан алат за неструктуривну дијагностику у војној индустрији, посебно у испитивањима оклопа, сложених структура и система изложених динамичким оптерећењима [65, 66].

### 3.1.2 Холографска интерферометрија

Холографска интерферометрија је техника која комбинује принципе холографије и интерферометрије ради добијања изузетно прецизних информација о објектима и њиховим променама. Њена примена је распрострањена у научним истраживањима, индустријској контроли и медицини. Основна намена холографског интерферометра је формирање холограма и извођење фазне анализе, како би се добили подаци о облику, деформацијама, унутрашњим напрезањима и другим феноменима на површини или унутар структуре [63, 65, 70].

За успешну реализацију холографије неопходно је испунити неколико услова [63, 64]:

- Оптичка апаратура мора бити потпуно стабилна током експеримента, изолована од механичких вибрација, звука и струјања ваздуха,

- Разлике у оптичким путањама морају бити минималне како би се одржала интерференција,
- Потребно је спречити непожељне промене поларизације,
- Целокупни систем мора бити заштићен од спољних извора светлости.

Историјски гледано, холографија у почетку није била погодна за истраживања због велике осетљивости на спољашње утицаје као што су вибрације и резонанције. Тек након значајног технолошког унапређења, постала је стабилна и применљива у експерименталним условима [63, 64].

Холографија омогућава снимање и реконструкцију тродимензионалних слика, при чему се, за разлику од класичне фотографије, бележи и фаза светлосног таласа, а не само његов интензитет. Ова техника омогућава прецизно мерење микро-деформација и визуализацију објекта под различитим угловима, што је од великог значаја у испитивању сложених структура и појава у техничким системима [63]. Интерферометрија, као саставни део ове технике, служи за мерење малих разлика у фази између два кохерентна светлосна таласа. Интерференцијски обрасци који при томе настају носе информације о променама у оптичкој путањи и могућим деформацијама објекта [65].

Предности холографске интерферометрије су бројне [63, 65]:

- Изузетна мерна прецизност јер се њеном употребом омогућава детекција веома малих промена у структури материјала који се испитује,
- Неконтактна метода јер нема потребе за физички додир са испитиваним објектом,
- Обезбеђује целовиту слику целе површине посматраног објекта,
- Има високу просторну резолуцију, што омогућава анализу и најситнијих детаља на испитиваном објекту.

И поред наведених предности, холографска интерферометрија има и одређене недостатке које могу бити израженије у зависности од реализације испитивања. Апаратура је технички сложена и захтева ангажовање високо обученог особља. Цена опреме за испитивање је висока, што ограничава примену у неким срединама. Ова метода има ограничења у анализи потпуно прозирних објеката, јер је у таквим случајевима тешко постићи адекватан контраст [63, 64].

Због сложености ситета за реализацију холографске интерферометрије, не постоји јединствени назив за уређај јер различити системи могу имати различите конфигурације. Типични елементи укључују [63, 65]:

- Ласерски извор,
- Холографска фотографска плоча или дигитални сензор,

- Системе сочива,
- Оптички делиоц ласерског снопа,
- рачунарска јединица (неопходна у случајевима када се интерференциони образац снима дигиталним сензором, јер се холограм тада реконструише применом обрнуте Фуријерове трансформације).

Основни систем обухвата снап ласера проширен сочивом, огледало или стакло као разделник зрака, као и држаче за холографске плоче. Холограми се могу израђивати и од релативно једноставних и јефтиних материјала, у зависности од тачности коју је потребно постићи [63].

У области машинства, интерферометрија се примењује у више различитих варијанти [63, 65, 68]:

- Интерферометрија двоструке експозиције,
- Интерферометрија просечног времена,
- Холографско испитивање без разарања,
- Холографска фотоеластичност,
- Пресликавање контура,
- Интерферометрија у равни слике.

Интерферометрија двоструке експозиције користи се за мерење померања, уз претпоставку да је испитивани објекат изложен истоветном оптерећењу током обе експозиције. Метод је погодан за документовање статичких деформација. Са друге стране, интерферометрија просечног времена примењује се код једноставних геометрија и захтева побуду вибрација на узорку, обично путем пиезоелектричних генератора или звучних извора [68].

Холографско испитивање без разарања представља једну од најзначајнијих примена ове технике. Њена изузетна осетљивост и способност стварања тродимензионалних интерферограма сложених облика омогућавају поуздану процену структурног интегритета без физичког контакта. У зависности од природе проблема, бирају се методе двоструке експозиције (за статичке процесе) или просечног времена (за вибрациона испитивања) [68, 66].

Фотоеластичност, која је иначе призната техника за анализу напона, може се успешно комбиновати са холографијом ради добијања детаљнијег описа стања напрезања. Истраживања показују да хибридни системи, чак и када се фотоеластични подаци не добијају у истом моменту, омогућавају одвојено посматрање главних напона и њиховог збира. Конфигурација оптичких елемената у системима за статичку фотоеластичну холографију само се минимално разликује од класичних холографских поставки [68].

У војној примени, холографска интерферометрија се користити за анализу напрезања приликом удара у тенковски оклоп, чиме ће бити омогућена идентификација критичних зона у реалном времену [64, 68]. Даље, ова метода нашла је примену и у процени термичких напрезања на компонентама ракета, на основу чега се уочавају подручја са повећаним ризиком од пуцања услед наглих температурних промена [64]. Такође, забележене су примене у авиоиндустрији за рано откривање унутрашњих оштећења конструктивних елемената летелица, што је допринело поузданијем и благовременијем одржавању [64, 68].

### 3.1.3 Спекл Метрологија

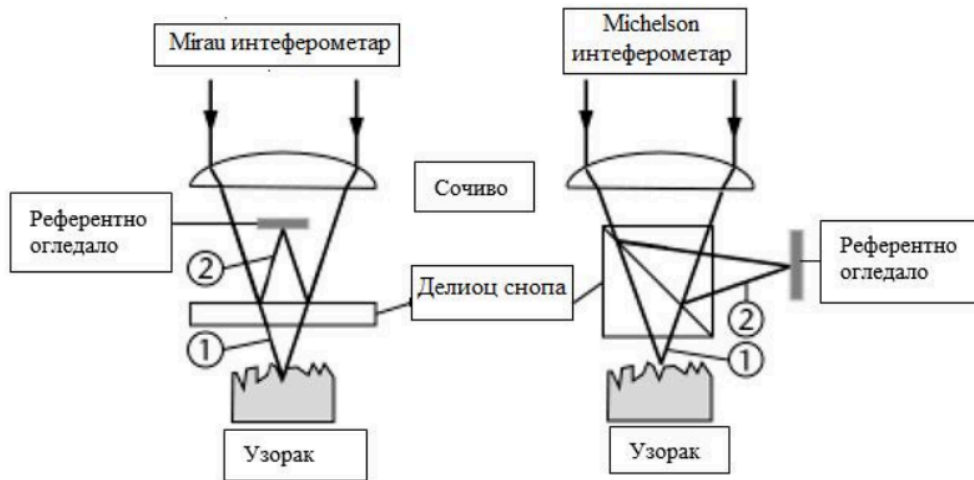
Спекл (Speckle) методологија је оптичка техника која користи случајне интерференционе обрасце, познате као спекл обрасци, за мерење различитих физичких параметара као што су деформације, напрезања и вибрације на површинама испитиваних објеката. Спекл (Speckle) методологија је нашла широку примену у областима инжењерства, науке о материјалима, као и биомедицине [68].

Спекл образац настаје када кохерентна светлост осветли грубу површину. Расипањем светлости у различитим правцима настаје случајни интерференциони образац, тзв. спекл образац. Када површина доживи деформацију, долази до померања тог обрасца, при чему је величина тог померања пропорционална деформацији [68].

Овај феномен се анализира применом техника као што су [71]:

- Дигитална корелација слика (DIC – Digital Image Correlation),
- Интерферометрија са фазним померањем (Phase Shifting Interferometry), чиме се омогућава прецизно и неконтактно мерење механичких промена.

Принцип рада спекл методологије илустрован је на Слици 3.1



Слика 3.1. Приказ *Mirau* и *Michelson* интерферометара са означеним зрацима.

1 – Улазни светлосни зрак, 2 – Интерферентни зрак.

Преузето и адаптирано према: *Speckle Metrology* [68].

Дигитална корелација слика (DIC) је моћна, неконтактна оптичка метода која је намењена за мерење деформација и померања на површинама испитиваног објекта [71]. Ова техника је нашла широку примену у експерименталној механици, инжењерству материјала, биомеханици и другим областима у којима је потребно прецизно и локализовано мерење механичких промена. Уређај за реализацију спекл методологије, укључује ласерски извор, дигиталну камеру и процесор за анализу слике, приказан је на Слици 3.1 (илустративни приказ, едукативне сврхе) [68, 71].

Процес испитивања започиње снимањем референтне слике – површине објекта у недеформисаном стању. Испитивани објекат се излаже напрезању услед чега долази до напрезања, те се врши израда серије слика у реалном времену. Специјализовани софтвер затим врши дигиталну корелацију између референтне слике и сваке накнадне слике, идентификујући карактеристичне тачке или регионе. На основу њиховог помераја, алгоритам израчунава поље деформација, чиме се добијају детаљне информације о механичком одговору материјала [65, 68, 71].

Ова метода је применљива за мерење напрезања, истезања, смицања и ротација, као и за праћење и анализу развоја ломова и пукотина у различитим материјалима [65]. Посебан значај има у испитивању композитних материјала под оптерећењем, где се прате промене у структури материјала [68]. У области биомеханике користи се за анализу кретања и деформација биолошких ткива [72], док у геомеханици омогућава испитивање понашања земљишта и геоматеријала под различитим врстама оптерећења [71].

Најзначајније предности DIC методе [68, 71]:

- Потпуно неконтактна метода јер омогућава мерење осетљивих и деликатних узорака,
- Изузетна прецизност јер омогућава мерење микро-деформација,
- Детаљна анализа јер обезбеђује увид у деформације целе површине,
- Универзалност јер је примењива на различите материјале и сложене геометрије.

Развијено је више типова спекл методологије [68, 71]:

- ESPI (Electronic Speckle Pattern Interferometry) је електронска интерферометрија за мерење статичких и динамичких деформација,
- DSPI (Digital Speckle Pattern Interferometry) је дигитална верзија ESPI, са побољшаним резолуцијама и тачношћу,
- Shearography је техника за мерење градијената површинских деформација, осетљива на локализована напрезања и закривљености.

Електронска интерферометрија спекл образаца (ESPI) представља интерферометријску технику која упоређује два спекл обрасца, тј. један пре и један након деформације са циљем мерења статичких и динамичких механичких промена. Спекл интерферометрија, заснована на анализи корелације образаца, користи се за прецизно мерење равних и неравних померања површина [71]. Дигитална интерферометрија спекл образаца (DSPI) представља надградњу ESPI метода јер омогућава већу тачност и осетљивост [68]. Shearography је посебна техника у оквиру спекл методологије јер омогућава мерење градијената површинских деформација путем поређења спекл образаца добијених из различитих углова осматрања [68, 71].

Спекл методологија има широку примену и обухвата [70, 71]:

- Откривање дефеката у материјалима и структурама,
- Мерење напрезања у различитим условима оптерећења,
- Анализу модова вибрација и амплитуда техничких структура,
- Проучавање кретања људског и животињског тела у биомеханици,
- Мерење микропрофила и храпавости површина.

Предности употребе спекл методологије [68]:

- Потпуно неконтактно мерење,
- Могућност детекције изузетно малих деформација,
- Анализа деформација целе површине објекта,
- Применљивост у динамичким условима мерења.

Спекл методологија је осетљива на утицаје из околине, јер спекл обрасци могу бити нарушени факторима као што су температурне осцилације, вибрације и могућа нестабилност поставке за испитивање. Анализа добијених података подразумева анализу великог броја слика високе резолуције, што може бити рачунарски захтевно и често временски интензивно. И поред наведених ограничења, спекл методологија бележи континуирани развој захваљујући напретку у области дигиталне обраде слике, ласерске оптике и софтверске аутоматизације [68].

У перспективи истраживачки трендови усмерени су ка стварању робуснијих и осетљивијих система и ка интеграцији спекл методологије са другим техникама, попут фотоеластичности и моаре интерферометрије, чиме ће се проширити примена у мултидисциплинарним анализама [68].

У војној примени, спекл методологија може бити успешно коришћена у анализи вибрација носача оружја, чиме би се допринело оптимизацији конструкције у циљу смањења резонантних ефеката. Такође, узимајући у обзир њену прецизност, спајк методологија може бити примењена за процену оштећења на композитним панелима ракета и беспилотних летелица, чиме ће се показати као поуздан алат за недеструктивну контролу и предикцију отказа у критичним компонентама [70].

### 3.1.4 Теорија фотоеластичности

Фотоеластичност је експериментална оптичка метода која је намењена за анализу напрезања у прозирним еластичним моделима. Ова метода је нашла широку примену у машинству, грађевинарству и другим областима где је од значаја за разумевање понашања конструкција под оптерећењем [73]. Фотоеластичност је једна од најстаријих и највреднијих интерферометријских техника у инжењерској пракси, а заснива се на посматрању двојног преламања материјала изазване унутрашњим напрезањем [66].

Фотоеластичност се спроводи на начин што се испитивани објекат излаже спољашњем оптерећењу, услед чега се унутар њега се развијају механичка напрезања која доводе до промена у индексу преламања. Ова појава позната је као „фотоеластични ефекат” и резултира појавом двојног преламања, заправо, поларизована светлост која пролази кроз такав материјал раздваја се на две компоненте које осцилују у међусобно нормалним правцима. Након поновљеног спајања ових компоненти настаје интерференциони образац који визуелно представља расподелу напрезања унутар модела [71].

У физичкој основи, површина фотоеластичног модела делује као делиоц снопа, при чему поларизовани снап бива подељен на две ортогоналне компоненте које пролазе кроз материјал исте дебљине, али различитих индекса преламања. То доводи до релативне фазне разлике која се затим, на излазу из узорка, претвара у разлику у

интензитету након анализатора. На тај начин се информација о напрезању трансформише у мерљив оптички сигнал [66, 71, 73].

Фотоеластичност не користи интерференцију таласних фронта као класичне интерферометријске методе. Уместо тога, она користи двоструко преламање које настаје у транспарентним материјалима услед напрезања у том моменру светлост се дели на две компоненте са различитим брзинама, што доводи до фазне разлике и појаве поларизационог узорка [66, 73].

Основна фотоеластична поставка састоји се од неколико основних компонената [66, 71]:

- Полариметар, уређај који омогућава генерисање поларизоване светлости и анализу интерференцијског обрасца,
- Модел, израђен од прозирног фотоеластичног материјала (најчешће епоксидне смоле),
- ласерски извор монохроматске светлости,
- Систем за оптерећење, који омогућава примену тачно дефинисаних сила (истезање, притисак, савијање) на модел.

Посматрањем модела кроз полариметар добија се интерференцијски образац који садржи информације о величини и правцу главних напрезања у свакој тачки. Овај образац, уз помоћ оптичких елемената и софтверске анализе, омогућава квантитативну процену расподеле унутрашњих напрезања [66].

Применом фотоеластичности омогућава се директна визуализација напрезања у моделима сложених геометрија и представља ефикасно средство за идентификацију зона локалне концентрације напрезања, што је од изузетног значаја за дијагностику конструктивне поузданости [73].

Фотоеластичност представља моћан алат за визуелизацију и анализу расподеле напрезања, али има одређена ограничења. Употреба методе подразумева израду физичког модела, што може бити временски и финансијски захтевно и употребљива је само за одређене материјале, најчешће полимере, и обично се користи за анализу равних (планарних) напрегнутих стања. Упркос својим недостацима, фотоеластичност је нашла широку примену у инжењерској пракси: пројектовању машинских елемената (зупчаници, осовине, лежајеви), анализи напрезања у бетонским конструкцијама и мостовима, као и у биомеханици, на пример, за истраживање расподеле напрезања у костима и зубима [71].

Све оптичке методе које се користе за детекцију промена у структурама захтевају комплексну опрему, специфичне експерименталне услове, као и знатна финансијска

средства, што додатно оптерећује инжењере приликом избора најоптималније методологије за испитивање и карактеризацију материјала [71].

Фотоеластичност је примењивана за калибрацију модела балистичке пенетрације у одређеним материјалима [64]. Ова метода је такође коришћена за визуелизацију ударних таласа и оштећења у ламинираним материјалима под високим температурама, што је од посебне важности у дизајну војне заштитне опреме [65]. Прво систематско истраживање динамичке примене фотоеластичности, кроз анализу напрезања у Castolite дисковима под ударом, представља основ за касније експерименте у области динамике материјала [64].

### **3.2 Ултрабрзе и Термовизијске камере**

У оквиру ове докторске дисертације примењене су две савремене оптичке методе: снимање ултрабрзом камером и термовизијском камером. Ултрабрза камера је омогућила анализу динамике кретања честица након удара пројектила у грануларни материјал, укључујући ширење ударног фронта и процесе релаксације након пробоја препреке. Са друге стране, термовизијска камера је омогућила визуелизацију расподеле температуре током удара, на основу чега је спроведена анализа преноса енергије и идентификован значај грануларног медијума у својству заштитног слоја.

Обе методе су бесконтактне, неразорне и у потпуности прилагођене за виšekратно спровођење експеримената у лабораторијским условима. Овај методолошки приступ представља економичну, технолошки доступну и ефикасну алтернативу у односу на традиционалне методе као што су фотоеластичност, холографија или мерење напрезања сензорима, које захтевају скупоцену и комплексну опрему, специфичне услове (нпр. транспарентне материјале), као и ангажовање висококвалификованог кадра.

Ултрабрзе и термовизијске камере омогућавају прикупљање великог броја података у само неколико секунди снимања, док накнадна анализа обезбеђује свеобухватан увид у понашање материјала, механизме оштећења и трансфер енергије. Ултрабрзо снимање је у литератури успешно примењено у анализи балистичких удара, пенетрације и фрагментације [74], док је термовизија широко примењена у неразорној инспекцији структура и дијагностици локализованих топлотних ефеката [75, 76].

У оквиру ове докторске дисертације, обједињена примена обе методе омогућила је не само како квалитативну, тако и квантитативну анализу експерименталних појава, уз знатно ниже трошкове, већу репродуктивност и једноставнију реализацију у контролисаним условима.

### **3.2. Термовизија**

Термовизијски уређаји функционишу у инфрацрвеној области електромагнетног спектра и чиме омогућавају визуелизацију објеката на основу њиховог сопственог

топлотног зрачења. За разлику од пасивних уређаја за ноћно осматрање, термовизијски уређаји региструју инфрацрвено зрачење у спектралним опсезима од 3–5  $\mu\text{m}$  и 8–14  $\mu\text{m}$ , чиме се омогућава да раде у условима потпуне таме или у присуству дима, магле и прашине. Термална слика у реалном времену добија се на начин што се детектовано зрачење претвара у електрични сигнал који се даље електронски обрађује [77].

Са аспекта конструкције, термовизијски уређаји се деле на [77]:

- Мозаичне системе (FPA – focal plane array), код којих је матрица инфрацрвених детектора смештена у жижну раван оптичког система, што омогућава тренутно снимање целокупне сцене,
- Скенирајуће системе, који слику формирају поступним читавањем зрачења путем оптомеханичког скенера и једног или више детектора.

Мозаични термовизијски системи захтевају прецизну оптику и стабилан систем хлађења. У зависности од примене и употребљених детектора, радне температуре се крећу у распону од 4 К до 195 К, што условљава употребу термоелектричних, Стирлингових или Џул-Томсонових расхладних система [77, 75].

Поред термичке стабилности и оптичке прецизности, битно је и време интеграције детектора. Да би се обезбедила висока осетљивост пожељно је време интеграције од око 33 ms, што је у пракси тешко оствариво због ограничења актуелних технолошких решења. Ипак, захваљујући својој способности да обезбеде високу резолуцију и стабилан приказ у реалном времену, мозаични системи представљају најперспективнији правац у даљем развоју термовизијских уређаја. [77, 78].

За разлику од мозаичких система, серијски скенирајући термовизијски системи, користе један или више инфрацрвених детектора постављених у линеарном низу, обично у броју од једног до шеснаест елемената. Слика се формира поступним скенирањем сцене у две димензије, дуж хоризонталне и вертикалне осе, у жижној равни оптичког система. Процес скенирања почиње из горњег левог угла и наставља се праволинијски, што подсећа на принцип рада електронског снопа код класичних катодних телевизора. На тај начин се термовизијска слика гради линију по линију [77, 78].

На слици 3.2 приказан је принцип рада серијског термовизијског система са јединичним инфрацрвеним детектором. На слици је приказана путања скенирања по координатама  $x$  и  $y$ , као и процес претварања примљеног зрачења у термалну слику у реалном времену. Ови системи су некада били чешћи због једноставне конструкције и ниже цене, али су данас у великој мери замењени савременијим мозаичним (FPA) системима, који омогућавају брже и прецизније снимање у реалном времену. Ипак, разумевање њиховог принципа рада је важно за историјски и технолошки контекст развоја термовизијских уређаја [77].



Слика 3.2. Принцип рада серијског система са јединичним детектором (према: Васиљевић Д. Оптички уређаји и оптоелектроника [77]).

Да би се целокупан лик посматраног предмета, формиран у жижној равни оптичког система, могао приказати помоћу само једног инфрацрвеног детектора, неопходно је да се та слика подели на велики број делова дуж хоризонталне и вертикалне осе, затим, сваки од тих делова мора бити довољно мали да у потпуности стане у видно поље детектора. Скенирање се реализује поступним премештањем детектора од дела до дела посматраног предмета, почевши од горњег левог угла, па све до доњег десног, чиме се редоследно формира целокупна термовизијска слика. Ови системи показују ограничења у виду ниског односа сигнал/шум, што директно утиче на осетљивост и домет уређаја. Како би се смањила мана ових система, јединични детектор се често замењује линијским детектором који представља више серијски повезаних елементарних детектора. Овим поступком омогућава се значајно побољшање односа сигнал/шум, при чему се добитак повећава пропорционално квадратном корену из броја елемената. Разлог за ово побољшање лежи у чињеници да се корисни сигнали сабирају линеарно, док се шумови, као статистички независне компоненте, сабирају по принципу средње квадратне вредности. На слици 3.3 приказан је серијски термовизијски систем са линијским детектором, који илуструје наведени принцип побољшања сензитивности путем вишеструких детекторских елемената [77, 78].



Слика 3.3. Принцип рада серијског система са линијским детектором (према: Васиљевић Д. Оптички уређаји и оптоелектроника [77]).

Да би се помоћу линијског инфрацрвеног детектора могао реконструисати цео лик предмета у жижној равни, неопходно је да се тај лик подели на низ сегмената дуж хоризонталне и вертикалне осе, као и у случају скенирања јединичним детектором [79,

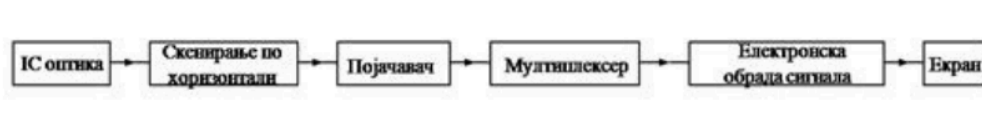
80]. За поуздану реконструкцију слике неопходно да сви елементарни детектори истовремено детектују исти сегмент сцене (ради сабирања сигнала), примењује се техника временског кашњења и интеграције TDI (Time Delay and Integrate). Применом ове технике се обезбеђује временско усаглашавање сигнала: први елементарни детектор даје сигнал без кашњења, други са једном јединицом кашњења, трећи са две, итд. Временска јединица у овом контексту дефинише се као однос димензије сегмента и брзине померања детектора. Тако је омогућено да сви прикупљени сигнали представљају исту тачку објекта у временски синхронизованом облику. Блок шема серијског система са TDI механизмом приказана је на слици 3.4 [77, 78].



Слика 3.4. Блок шема серијског система (према: Васиљевић Д. Оптички уређаји и оптоелектроника [77]).

Механичка структура серијских термовизијских система заснива се на примени двоосног скенирања, што се може видети на слици 3.4. Уобичајено решење укључује брзо ротирајуће хоризонтално огледало за скенирање у правцу азимута и спорије вертикално огледало за елевацију. Прецизна синхронизација ова два механичка подсистема представља кључни изазов у пројектовању, јер је од ње директно зависан квалитет и стабилност реконструисане слике [77, 78].

Паралелни термовизијски системи, приказани на слици 3.5, користе линеарни низ детектора постављен нормално на правац скенирања. Ови системи захтевају скенирање само у једној димензији, најчешће хоризонтално, што поједностављује конструкцију. Да би се добила слика стандардне резолуције  $640 \times 480$  пиксела, у зависности од оријентације, користе се или вертикални низ од 640 детектора који скенира 480 редова, или обрнуто. Пошто је неопходно преплитање кадрова, систем ради при фреквенцији од 60 Hz, чиме се обезбеђује приказ слике у реалном времену [77, 78, 79].



Слика 3.5. Блок шема паралелног система са скенирањем по хоризонтала (према: Васиљевић Д. Оптички уређаји и оптоелектроника [77]).

Матрични инфрацрвени детектор може се формирати спајањем више линијских детектора у један проширени систем, који функционише у TDI режиму. Ова

конфигурација омогућава побољшан однос сигнал/шум, већу униформност слике и знатно већи домет у детекцији и препознавању циљева [77, 78, 79].

#### Генерације термовизијских уређаја

У војној индустрији је усвојен концепт заједничких модула за коришћење истих подклопова у различитим типовима уређаја ради смањења трошкова и повећања флексибилности [79]. Развој термовизије дели се на четири генерације:

- 0 генерација заснива се на једноелементним детекторима и сложеним оптомеханичким системима за скенирање. Због ниске резолуције и мале фреквенције приказа (<10 Hz). Ови уређаји се користе углавном за безконтактно мерење температуре, не и у војне сврхе.
- I генерација уводи линијске детекторе у TDI или паралелном режиму, чиме се побољшава резолуција и осетљивост и на овај начин ТВ компатибилан приказ постаје могућ. Развијена су три концепта модула:
  - Британски концепт (SPRITE детектори са обрадом сигнала у самом елементу),
  - Француски концепт (матрица 5×11 елемената у TDI режиму),
  - Амерички концепт (линијски детектори од 60–180 елемената уз паралелно скенирање и приказ на ЛЕД екрану).Ови уређаји се масовно користе у војним системима.
- II генерација се користи за компактније матричне детекторе (нпр. 480×4), који омогућавају бољи квалитет слике, вишу поузданост и мање габарите. Ови уређаји су већ дуго у серијској производњи и представљају стандард у многим применама, иако су данас све присутнији системи III генерације и напредне FPA конфигурације [79].
- III генерација заснива се на фокалним матрицама смештеним у жижној равни. Развој иде у два правца:
  - Системи са хлађеним матрицама за специјалну намену и
  - Нехлађени за широку употребу.

Предности употребе термовизије као оптичке методе [79]:

- Бесконтактно мерење чиме се омогућава регистрацију топлотних појава без физичког контакта са посматраним објектом,
- Реалновременски приказ што омогућава праћење процеса у стварном времену, што је посебно важно за анализу брзих појава,
- Једноставнија поставка у поређењу са неким другим методама јер термовизија не захтева сложена механичка интеграција са испитиваним системом,

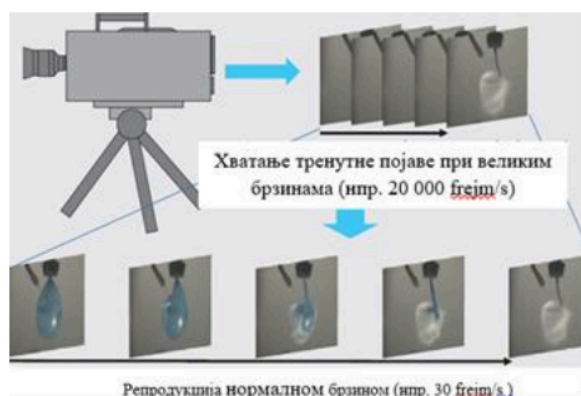
- Широка применљивост јер је употребљива је у различитим условима (ноћ, прашина, дим), што проширује спектар употребе.

Ограничења употребе термовизије [77]:

- Ова метода је зависна од температурних разлика јер се ова метода се ослања на постојање довољног топлотног контраста, што у неким условима може ограничити видљивост,
- Прецизност мерења је знатно повезана са спољашњим условима условима, као што си висока влажност, рефлексија или утицаја других извора топлоте,
- Висока цена опреме јер савремени термовизијски системи, посебно оне са хлађеним детекторима, могу значајно повећати укупне трошкове истраживања.

### 3.3 Брзе камере

Брзе видео камере се користе за снимање феномена који није могуће забележити људским оком, а што се учинити видљивим успореним репродуковањем, као што је приказано на слици 3.9 [80].



Слика 3.9. Принцип спорог видео записа (измењено према: Редјими А. Просторно-временска калибрација система за анализу вишеканалних видео и аудио записа [81]).

Историја ултрабрзог снимања, започиње је са филмским камерама. Филмске камере користиле су филм и имале су бројна ограничења, која су се делимично превазишла преласком на дигитално снимање. Ипак, и поред многобројних модификација, одређена ограничења се ни до данас нису превазишла. Неке од ограничења употребе филмске камере била су [80]:

- Лош квалитет слике јер је био потребан јако осетљив филм.
- Брзине снимања нису могле да достигну стотине хиљада фрејмова у секунди као данас.

Са технолошким развојем, јавила се потреба за детаљнијим снимањем краткотрајних и сложених појава. Повећање потражње за ултрабрзим камерама омогућила је визуелизацију феномена са високом временском резолуцијом. Данас се брзе камере користе као аналитички алат у бројним областима: балистици и аеродинамици, анализи експлозија, плазменим појавама, електричним пражњењима, итд. [80].

Структура дигиталних ултрабрзих камера приказана је на слици 3.9



Слика 3.9. Структура савремених дигиталних ултрабрзих камера (измењено према: Редјими А. Просторно-временска калибрација система за анализу вишеканалних видео и аудио записа [81]).

Основне компоненте дигиталног система за ултрабрзо снимање су [80, 67]:

- Објектив, намењен је да прикупља светлосне зраке са посматраног објекта и креира слику на детектору.
- Детектор слике, CCD или CMOS сензори који претварају светлост у електрични сигнал. Број излазних терминала (64–128) ограничава количину података, што захтева компромис између резолуције и брзине снимања.
- Аналогно–дигитални конвертор (ADC) намењен да претвара аналогни сигнал у дигитални.
- Меморија задужена да високом брзином врши упис података. Већа меморија омогућава дуже време снимања.

Класификација брзих и ултрабрзих камера дата је у табели 3.2 [80].

Табела 3.2. Класификација брзих и ултрабрзих камера [80].

Коришћен а метода за повећање брзине	Брза камера	Ултрабрза камера	
	Паралелни излаз и ограничавање површине излазног пиксела	Меморија унутар уређаја	
Тип детектора		CMOS	Унутрашња меморија пиксела
		CMOS	CCD

За чување података, брза камера користи интерну меморију која омогућава тренутно снимање без зависности од спољашњих система за обраду података, али се подаци из интерне меморије касније могу пребацити у спољну меморију [80].

Додатне компоненте [80, 67]:

- Блок за обраду сигнала је намењен да врши појачање, обраду сигнала, компресију и припрему за приказ.
- Екран приказује слику и може бити интегрисан или спољашњи (CRT, LED, LCD).
- Камере велике брзине могу снимати са експозицијом мањом од 1/1000 с и преко 250 fps. Прво су користиле филм, а данас се користе сензори слике. Пример једне такве камере дат је на слици 3.10.



Слика 3.10. Камера велике брзине серије CC (CrashCam) [82]

Камера велике брзине серије CC (CrashCam), америчке фирме Integrated Design Tools Inc. се користе у науци за снимање биомеханичких, аеродинамичких и балистичких процеса [83]. У комбинацији екрана фосфорним премазом, могу снимати и рендгенске видео записе. Брзина је ограничена временом опадања фосфорног екрана [80].

Тренутно, брзе и ултрабрзе камере представљају незаменљив инструмент у савременој експерименталној механици, балистици, аеродинамици и сродним областима где се проучавају краткотрајни, високодинамички процеси. Применом ових камера омогућава се увид у појаве које се одвијају у делићу секунде, а што је немогуће постићи другим методама. Ипак, као и свака технологија, и ова има своје предности и ограничења [80].

Предности примене брзих камера [80, 65, 64]:

- Изузетна временска резолуција јер је омогућено снимање феномена који трају микро– или наносекунде, са фрејм-рејтом од неколико стотина хиљада кадрова у секунди (fps), што је од кључне важности у балистичким испитивањима, експлозијама, удару, и сл.
- Могућност успорене репродукције снимака на основу чега се може извршити анализа брзих појава у спором приказу, што значајно повећава разумевање динамике процеса и идентификацију кључних догађаја (деформације, руптуре, ширења таласа и сл.).
- Висок степен визуелизације, тј. интеграцију са другим методама мерења, као што су шпирен, шадоуграфија, интерферометрија, што омогућава комплементарну анализу физичких појава.
- Неповратни догађаји се могу више пута анализирати. Једном снимљени процеси могу се архивирати и поново прегледати без потребе за понављањем експеримента, што је од посебног значаја када су у питању сложене или скупи експерименти.
- Квантитативна анализа могућа путем софтверске обраде. Савремене камере омогућавају софтверско праћење положаја, брзине, убрзања и деформација објеката, што даје могућност детаљне обраде без додатне инструментализације.

Ултрабрзо снимање има своја ограничења која се морају узети у обзир при планирању експеримената. [80, 65]:

- Висока цена уређаја и додатне опреме. Ултрабрзе камере и пратећи системи (оптика, осветљење, меморија, софтвер) имају високу цену, што ограничава оправданост набавке мањим истраживачким центрима и лабораторијама.
- Потреба за интензивним осветљењем. Кратка експозиција захтева снажне изворе светлости (нпр. ласере или специјалне ЛЕД системе), што може представљати додатни трошак и технички изазов у реализацији.
- Велики обим података. Снимање кратких експеримената може генерисати више десетина гигабајта видео података, што захтева велике капацитете за складиштење података, брзу обраду добијених резултата и напредан софтвер (RAID системи, SSD, GPU процесирање).
- Компромис између резолуције и брзине снимања. Са повећањем броја кадрова у секунди, смањује се просторна резолуција, што се може одразити на квалитет добијене слике и прецизност анализе.
- Техничка сложеност примене. Реализација експеримента са оваквом опремом захтева обучено особље, прецизну синхронизацију и пажљиво планирање, што повећава укупну комплексност реализације испитивања.
- Ограничен рад у неповољним условима. Камере су често осетљиве и мање погодне за теренске услове, што може представљати проблем у војним или индустријским испитивањима на отвореном.

## 4. МАТЕМАТИЧКИ АЛАТИ

### 4.1 Софтверске методе

Удар пројектила у грануларну материју представља сложену појаву а за описивање ове појаве може бити укључено више дисциплина: физика удара, механика грануларних медијума, као и елементи механике флуида и чврстих тела. За моделовање ове појаве користе се различите симулационе технике. Најзаступљенији су метод дискретних елемената (DEM – Discrete Element Method), метод коначних елемената (FEM – Finite Element Method), метод честица (SPH – Smoothed Particle Hydrodynamics) и метод материјалне тачке (MPM - Material Point Method) [84-90]. У одређеним случајевима примењују комбинације наведених метода:

- LIGGGHTS (DEM) користи метод дискретних елемената, веома је популаран за симулацију кретања гранулата и може се користити за симулацију судара, фрикције и контактне силе гранулата. Језик у ком се врши програмирање је C++ [84],
- LAMMPS (DEM, MD-Molecular Dynamics) користи метод динамике, а може се користити и за методу дискретних елемената. Представља вишенаменски симулациони пакет и често се користи у комбинацији са LIGGGHTS-ом [85],
- Abaqus (FEM- Finite Element Method+ DEM) представља комбинацију методе коначних елемената и методе дискретних елемената уз могућност симулације честица (више FEM-DEM комбиновано) и има високу инжењерску примену. Поседује високу тачност, погодан је за описивање великих деформација, а нашао је високу примену у балистици [86],
- ANSYS (Explicit Dynamics) користи нумерички метод за симулацију брзих, динамичких појава као што су: удари (пројектили, експлозије), фрактуре и ломови, падови и сударања, велике деформације у кратком времену. Овај софтвер се користи за симулацију удара у чврсте материјале али се на одређени начин може прилагодити и користити за грануларне моделе [87],
- Chrono:Engine (DEM, механичке симулације) је библиотека развијена за симулацију: механичких система (тј. тела, веза, мотора...), грануларне материје (користећи DEM – Discrete Element Method), флуида (SPH или флуидна динамика), роботике, возила, балистике и има Open-source, што значи да је слободан за коришћење и модификацију. Представља моћан софтвер за реалистичне симулације механике, укључујући контакт, фрикцију, флуиде. Програмирање се врши у C++ језику, а има и Python интерфејс [88],
- DualSPHysics (SPH метод- Smoothed Particle Hydrodynamics) користи метод честица (Smoothed Particle Hydrodynamics). Овим софтвером се може симулирати понашање гранулата као флуида, погодан је за мешовите системе (гранулат + течност) [89],
- MPM софтверска библиотека (Material Point Method), је погодна за симулације мешовитих медијума: чврсте, грануларне и флуидне, примењени је нашао у индустрији, али и у науци [90].

Поред наведених софтвера корсите се и додатни алати:

- „ParaView” и то визуализацију резултата („DEM”, „CFD” итд) [91],
- Програмски језик „Python” за обраду података и контролу симулација [92],
- „Blender” (са „PhysX” или „MantaFlow”) за визуелно реалистичне симулације уз важну напомену да има мање научну а више визуелну примену [93].

Упоредна анализа најважнијих софтвера извршена је на основу доступне литературе и документације о наведеним софтверима [84-93] и приказано је у табели 4.1

Табела 4.1 Упоредна анализа најзаступљенијих софтвера и метода

Софтвер	Отвореност	Тип апликације	Програмирање
<b>LIGGGHTS</b>	Отворен код	Алат за симулације (могућност развоја сопствене апликације)	Да (C++, Python)
<b>LAMMPS</b>	Отворен код	Алат за симулације (могућност развоја сопствене апликације)	Да (C++, Python)
<b>Chrono Engine</b>	Отворен код	Алат за физичке симулације	Да (C++)
<b>Abaqus</b>	Затворен код (комерцијалан)	Заокружена апликација (FEM)	Могуће користити Python (за проширење)
<b>ANSYS</b>	Затворен код (комерцијалан)	Заокружена апликација (FEM и више)	Скрипте (ANSYS Parametric, Python)
<b>DualSPHysics</b>	Отворен код	Заокружена апликација (SPH)	Да (Python, C++)
<b>ParaView</b>	Отворен код	Заокружена апликација (визуализација података)	Да (Python скриптирање за прилагођавање)
<b>Blender</b>	Отворен код	Заокружена апликација (3D моделирање и анимација)	Да (Python за проширење функционалности)

#### 4.2 Математички модел

У овој дисертацији анализирају се три повезане појаве:

1. Кретање пројектила ка мети,
2. Удар пројектила у грануларну мету и пренос енергије и
3. Реакција гранулата (зрна песка) након удара пројектила.

За анализу дејства пројектила у гранулат потребно било познавање вредности брзина пројектила непосредно пре удара у мету-гранулат. Брзина пројектила је одрђена уз примену кода написаног у MATLAB програмском пакету. Програм симулира путању пројектила у реалном дводимензуоналном и тродимензионалном простору, уз утицај аеродинамичког отпора и израчунава брзину непосредно пре ударау мету. На овај начин описана је прва појава, тј. Кретање пројектила ка мети. Кинетичка енергија пројектила израчунава се по формули (4.1) [94]:

$$E_k = \frac{1}{2}mv^2 \quad (4.1)$$

где је :

$E_k$  - кинетичка енергија пројектила [J],

$m$  – маса пројектила [kg],

$v$  - брзина пројектила пре удара [m/s],

Аеродинамички отпор је сила која делује супротно од правца кретања пројектила кроз флуид (у овом случају – ваздух) и представља резултанту свих притисака и трења који се јављају услед релативног кретања пројектила и ваздуха. Сила аеродинамичког отпора пројектила одређује се по формули (2) [95]:

$$F_D = -\frac{1}{2}\rho C_D Av^2 \quad (4.2)$$

где је:

$F_D$  - сила аеродинамичког отпора[N],

$\rho$  - густина флуида (нпр. ваздуха) [kg/m<sup>3</sup>],

$C_D$  - коефицијент отпора (без димензије),

$A$  - попречна површина пројектила [m<sup>2</sup>],

$v$  - брзина пројектила [m/s],

Основна диференцијална једначина кретања материјлне тачке формулисана је на основу Њутновог закона и гласи) [95, 96]:

$$\vec{F} = m \cdot \vec{a} = m \frac{d\vec{v}}{dt} = m \cdot \frac{d^2\vec{r}}{dt^2} \quad (4.3)$$

где је:

$\vec{F}$  – укупна сила која делује на тело [N],

$m$  – маса тела [kg],

$\vec{a}$  – убрзање [m/s<sup>2</sup>],

$\vec{r}(t)$  – положај у времену [m].

За другу посматрану појаву, тј. 2. удар пројектила у грануларну мету и пренос енергије, карактеристичан је пренос енергије са пројектила на мету – гранулат, услед чега долази до формирања такозваног „облака” (запремина гранулата која је подигнута у ваздух), појаве „рупе” (запремина истиснутог гранулата на месту удара пројектила у мету), као и накнадног процеса „ерозије” (додатно урушавање насталих рупа након удара у мету). Ове појаве представљају основне механизме преноса енергије током и након удара пројектила у грануларни медијум [97, 59].

За описивање треће појаве, реакцију гранулата (зрна песка) након удара пројектила, неопходно је било посматрање сваког појединачног зрна песка, за које се одређује положај у времену, а обрадом серије фотографија или видео-снимка. Као излазни параметри из ове анализе добијају се запремински удели подигнутог („облак”), истиснутог („рупа”) и урушавајућег („ерозија”) гранулата унутар простора удара пројектила. Посматрањем подигнутог, истиснутог и урушеног песка врши се анализа преноса енергије, а резултати се графички приказују у облику дијаграма формираних у одговарајућем програму [59].

У овој дисертацији коришћена су два посебно развијена кода у програмском пакету MatLab, за потребе одређивања брзина пројектила ваздушног и стрељачког наоружања. Њихова основна функција је израчунавање брзине пројектила у тренутку удара у препреку, на основу чега се одређује кинетичка енергија коју пројектил преноси на грануларну материју. За модел ваздушног наоружања коришћен је дводимензионални простор, имајући у виду једноставније услове кретања и ниже брзине, док је за стрељачко наоружање примењен модел у тродимензионалном простору [59].

#### 4.2.1 Математички модел кретања пројектила ка мети за ваздушно наоружање

##### *Кретање пројектила ка мети*

Кретање пројектила (дијаболе) испаљеног из ваздушног оружја може се моделовањем приближити кретању материјалне тачке под утицајем гравитације и отпора ваздуха, при чему се занемарују ефекти као што су ротација Земље и утицај ветра. Модел је заснован на класичној формулацији спољне балистике [95, 96].

##### *Основне физичке претпоставке*

Дијабола се посматра као тело масе  $m$ , које се креће у гравитационом пољу Земље на коју делује отпор ваздуха. Сила отпора је приближно пропорционална квадрату брзине кретања, што је специфично за релативно високе брзине кретања тела кроз ваздух. Према другом Њутновом закону, резултанта сила које делују на тело једнака је производу масе и убрзања [95, 96]:

$$\vec{F} = m \vec{a} = m \frac{d\vec{v}}{dt} \quad (4.4)$$

Где је  $\vec{v}$  вектор брзине, а  $\vec{F}$  збир свих сила које делују на тело.

##### *Силе које делују на тело*

На пројектил-дијаболу која се креће делују следеће силе [95, 96]:

- Сила гравитације:

$$\vec{F}_g = m \vec{g} \quad (4.5)$$

Где је:

$m$  – маса пројектила [kg],

$\vec{g}$  - вектор убрзања Земљине теже [m/s<sup>2</sup>], обично се узима  $g=9.81\text{m/s}^2$

- Сила отпора ваздуха (сила која делује у смеру супротном од брзине):

$$\vec{F}_D = -\frac{1}{2} \rho C_d S V^2 \frac{\vec{v}}{V} \quad (4.6)$$

где су:

$\rho$  – густина ваздуха [ $\text{kg/m}^3$ ],

$C_d$  – коефицијент отпора (димензионално без јединице),

$S$  – површина попречног пресека тела [ $\text{m}^2$ ],

$V = \left| \begin{matrix} \rightarrow \\ v \end{matrix} \right|$  – интензитет брзине [ $\text{m/s}$ ].

### ***Пројекција на координатне осе***

Увођењем димензионалног координатног система где је  $x$  хоризонтална оса, а  $y$  вертикална, брзина пројектила се разлаже на компоненте [95, 96]:

$$v_x = V \cos \theta \quad (4.7)$$

$$v_y = V \sin \theta \quad (5.8)$$

Раслагањем сила добијају се следеће компонентне диференцијалне једначине [95, 96]:

$$\frac{dv_x}{dt} = -\frac{1}{2m} \rho C_d S V v_x \quad (4.9)$$

$$\frac{dv_y}{dt} = -\frac{1}{2m} \rho C_d S V v_y - g \quad (4.10)$$

Увођењем ознаке  $k = \frac{1}{2} \rho C_d S$ , добија се [95, 96]:

$$\frac{dv_x}{dt} = -\frac{k}{m} V v_x \quad (4.11)$$

$$\frac{dv_y}{dt} = -\frac{k}{m} V v_y - g \quad (4.12)$$

Овај облик једначина представља класичан модел кретања тела са квадратичним отпором у медијуму [95, 96].

### ***Прелазак на систем са интензитетом брзине и углом путање***

Уместо компонентног облика, систем се чешће записује у параметрима [95, 96]:

- $V(t)$  – интензитет брзине у времену,
- $\theta(t)$  – угао путање у односу на хоризонталу.

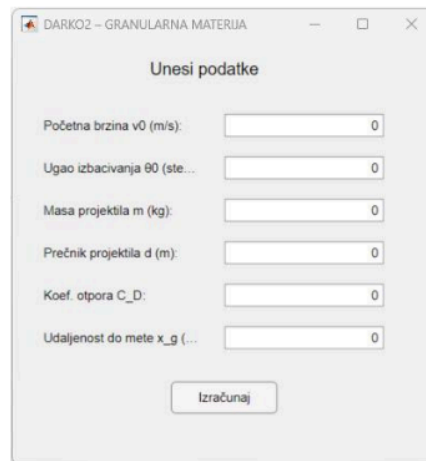
Применом векторске анализе и пројекције резултанте убрзања у тангентном и нормалном правцу, добија се [95, 96]:

$$\frac{d\vec{v}}{dt} = \frac{dV}{dt} \vec{e}_v + V \frac{d\theta}{dt} \vec{e}_\theta \quad (13)$$

Расподелом сила у смеру кретања и нормално на путању, добија се следећи систем једначина [95, 96]:

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = V \cos \theta \\ \frac{dy}{dt} = V \sin \theta \\ \frac{dV}{dt} = -\frac{k}{m} V^2 - g \sin \theta \\ \frac{d\theta}{dt} = -\frac{g}{V} \cos \theta \end{cases} \quad (14)$$

Овај систем диференцијалних једначина решен је нумерички у програмском пакету MATLAB, применом методе Рунге-Кута, 4. реда (RK4). За израду симулације потребно је унети почетне и физичке параметре система. Улазне величине обухватају податке о дијаболи, условима гађања и карактеристике медијума (ваздуха), како је приказано у слици 4.1.



Слика 4.1 Кориснички интерфејс у MATLAB-у за унос података балистичке симулације

За покретање симулације и одређивање брзине пројектила у тренутку удара у мету, било је потребно унети све релевантне почетне и граничне услове система.

Почетна брзина пројектила – дијаболе, преузета је из техничке документације и приручника за ваздушно оружје марке Steyr (модели LG 110 и LP 10) [98, 99]. Почетни угао испаливања израчунат је на основу односа између висине положаја стрелца и висине мете, у односу на хоризонталну удаљеност до циља. Почетна висина испаливања прецизно је измерена током реализације експеримента у контролисаним условима.

Маса и пречник пројектила били су познати на основу техничких података из каталога дијабола, док је густина ваздуха узета као стандардизована вредност за нормалне атмосферске услове. Вредност коефицијента аеродинамичког отпора је преузет је из релевантне научне литературе [100]. У прорачуну је коришћено убрзање земљине теже

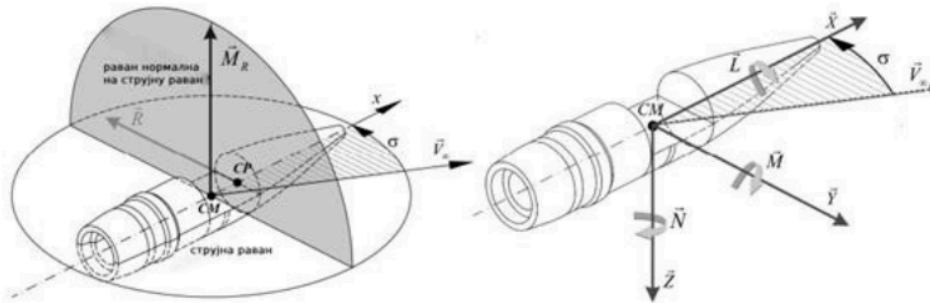
$g = 9,81 \frac{m}{s^2}$ . Позиција мете, њено растојање и висина, били су дефинисани у складу са

конкретним условима реализације експеримента.

#### 4.2.2 Математички модел кретања пројектила стрељачког наоружања

Кретање пројектила из стрељачког наоружања у реалним условима представља сложен физички процес који се одвија у три димензије, уз утицај сила гравитације и отпора ваздуха, као и унутрашњих аеродинамичких момената насталих услед ротације тела. Овај модел подразумева шест степени слободе (6DoF): три translациона и три ротациона, и формално се назива модел модификоване материјалне тачке (МММТ). Овај приступ су је формулисан [101, 96] у циљу што прецизнијег описа реалног понашања пројектила током лета.

На слици 4.2 приказан је координатни систем који је везан за тело пројектила, као и аеродинамички параметри потребни за описивање путање пројектила у простору. Аеродинамичке силе  $X, Y, Z$  делују дуж координатних оса, а моменти  $L, M, N$  ротирају око одговарајућих оса. Углови и угаоне брзине пројектила  $p, q, r$  као и тензор инерције, укључени су у модел како би се обухватио утицај ротационе динамике током лета [101, 96].



Слика 4.2 Координатни систем тела пројектила са приказом аеродинамичких сила и момената потребних за моделовање путање [101]

Модел претпоставља да пројектил има [96]:

- коначне димензије и масу,
- моменте инерције,
- могућност ротације око све три осе тела,
- аеродинамичке коефицијенте који зависе од углова, брзине и облика.

Циљ овог модела је да се, кроз систем диференцијалних једначина, опише како се положај, оријентација и брзина пројектила мењају током времена у тродимензионалном простору, што омогућава израчунавање брзине у тренутку удара у мету.

#### Координатни системи и вектор стања пројектила

Да би се кретање пројектила у простору описало на физички тачан и математички обрадив начин, неопходно је дефинисати два координатна система: референтни (непомични) и локални (везан за тело пројектила), као и увести вектор стања који у сваком тренутку садржи све релевантне параметре положаја и оријентације тела [96, 101].

Референтни координатни систем, најчешће означен као „NED” (North-East-Down) или „XYZ”, везан је за Земљу и користи се као основа за праћење путање пројектила у простору. Његове осе дефинишу се на следећи начин [96, 101]:

- Оса X је хоризонтална оса, и усмерена је у правцу гађања (домет)
- Оса Y је бочна компонента (десно),
- Оса Z је вертикална компонента (надоле, у смеру гравитације).

Други координатни систем је фиксиран у односу на само тело пројектила и ротира се заједно са њим током лета. Познат је као локални координатни систем или „body-fixed” system, и дефинише се на следећи начин [96, 101]:

- Оса x: у смеру дужине пројектила (напред),
- Оса y: попречно (лево-десно),
- Оса z: нормално на x и y, чини десноорјентисан систем.

Комплетно динамичко стање пројектила у сваком тренутку описује се такозваним вектором стања, који укључује следеће величине [96, 101]:

- Положај тежишта у непомичном систему координата:  $\vec{r} = [x, y, z]^T$ ,
- Брзину тежишта:  $\vec{v} = [v_x, v_y, v_z]^T$ ,
- Угаону брзину пројектила у локалном систему:  $\vec{\omega} = [p, q, r]^T$  и
- Оријентацију тела у простору, која се описује Ојлеровим угловима:  $\phi, \theta, \psi$ .

#### *Диференцијалне једначине кретања пројектила*

Кретање пројектила у простору описује се системом диференцијалних једначина који обухвата: транслационо кретање тежишта, ротационо кретање тела око тежишта и кинематичке релације које дефинишу оријентацију тела у простору [96, 102].

#### *Транслационо кретање*

Транслација тежишта пројектила у непомичном координатном систему одређује се применом II Њутновог закона [96, 102]:

$$m \frac{d\vec{v}}{dt} = \vec{F}_g + \vec{F}_a \quad (4.15)$$

где је:

- сила теже  $\vec{F}_g = m \vec{g}$
- аеродинамичке силе у телесном систему  $\vec{F}_a = [X, Y, Z]^T$

$$\begin{aligned} X &= -\frac{1}{2} \rho V^2 S C_x \\ Y &= -\frac{1}{2} \rho V^2 S C_y \\ Z &= -\frac{1}{2} \rho V^2 S C_z \end{aligned} \quad (4.16)$$

### Ротационо кретање

Окретање тела пројектила око тежишта описује се преко једначине момента, у складу са законима ротационе динамике [96, 102]:

$$I \frac{d\vec{\omega}}{dt} + \vec{\omega} \times (I \vec{\omega}) = \vec{M}_a \quad (4.17)$$

где је:

- угаона брзина  $\vec{\omega} = [p, q, r]^T$ ,
- тензор инерције  $I = \text{diag}(I_x, I_y, I_z)$ ,
- аеродинамички моменти  $\vec{M}_a = [M_x, M_y, M_z]^T$ .

$$\begin{aligned} M_x &= -\frac{1}{2} \rho V^2 S_d C_l \\ M_y &= -\frac{1}{2} \rho V^2 S_d C_m \\ M_z &= -\frac{1}{2} \rho V^2 S_d C_n \end{aligned} \quad (4.18)$$

### Кинематичке везе

Оријентација пројектила у простору прати се помоћу Ојлерових углова ( $\phi, \theta, \psi$ ), чија промена се дефинише следећим кинематичким релацијама [96, 102].

$$\begin{aligned} \dot{\phi} &= p + \tan \theta (q \sin \phi + r \cos \phi) \\ \dot{\theta} &= q \cos \phi - r \sin \phi \\ \dot{\psi} &= \frac{q \sin \phi + r \cos \phi}{\cos \theta} \end{aligned} \quad (4.19)$$

**Комплетан систем једначина**

Сва кретања пројектила описују се системом од укупно 12 диференцијалних једначина првог реда [96, 102]:

- 3 за положај ( $\vec{r}$ ),
- 3 за брзину ( $\vec{v}$ ),
- 3 за угаону брзину ( $\vec{\omega}$ ),
- 3 за оријентацију ( $\phi, \theta, \psi$ ).

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \vec{r} \\ \vec{v} \\ \vec{\omega} \\ \phi, \theta, \psi \end{bmatrix} = \text{функција}(\vec{v}, \vec{\omega}, C_i, I_j, m, S, d, \rho, g, \dots) \quad (4.20)$$

Модел спољне балистике са шест степени слободe омогућава дубљу анализу динамике пројектила у реалним условима, а његова примена обухвата [96, 102]:

- Анализу путање тежишта у тродимензионалном простору,
- Анализу стабилности лета,
- Утицај аеродинамичких коефицијената на скретање, узгон и моменте.

У оквиру спроведених експеримената, вредности брзине пројектила у тренутку непосредно пре удара у мету биле су измерене помоћу радарског уређаја. Циљ нумеричког прорачуна био је да се, коришћењем математичког модела, теоријски одреди вредност брзине у моменту удара ради упоређивања са експерименталним подацима и валидације модела.

Кретање пројектила дефинисано је системом диференцијалних једначина које описују промену положаја и брзине тежишта током времена. Због сложене природе тродимензионалног модела и утицаја нелинеарних сила, не постоји затворено аналитичко решење за време лета  $t$ , па се решење добија применом нумеричке интеграције у малим временским корацима.

- положај  $\vec{r}(t) = [x(t), y(t), z(t)]$  и
- брзину  $\vec{v}(t) = [v_x(t), v_y(t), v_z(t)]$ .

Пројектил се испаљује из тачке  $\vec{r}_0$ , а крајња мета се налази у тачки  $\vec{r}_{meta}(t) = [x_m, y_m, z_m]$

Пошто је позната позиција мете, уводи се критеријум за удар као приближавање пројектила тачки мете у простору:

$$\left\| \vec{r}(t_i) - \vec{r}_{meta} \right\| \leq \varepsilon \quad (4.21)$$

где је  $\varepsilon$  задати праг приближавања (у конкретном случају представља удаљење мете од места гађања). У том тренутку, вектор брзине пројектила  $\vec{v}(t_i)$  се узима као вредност у моменту удара, а његов интензитет:

$$v_{удар} = \sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2} \quad (4.22)$$

У циљу практичне примене и визуелизације резултата, развијен је и графички кориснички интерфејс у MATLAB програмском пакету. Он омогућава:

- унос физичких карактеристика пројектила (маса, површина, инерцијски моменти),
- подешавање почетних услова (брзина, угао, положај, ротација),
- унос координата мете и граничних услова.

У експерименталном испитивању коришћене су цеви калибра 7,62 мм и 5,56 мм, постављене у опитни блок. Испаљивање је извршено у контролисаним условима, а параметри симулације засновани су на стварним мереним и израчунатим подацима.

Почетна брзина пројектила измерена је радарским уређајем, док је почетни угао испаљивања израчунат као функција разлике у висини између положаја опитног блока и мете, у односу на хоризонталну удаљеност до мете. Почетна висина испаљивања прецизно је измерена током реализације експеримента.

Осим тога, уносе се и подаци о маси и пречнику пројектила, који су преузети из техничке документације и стандарда. За густину ваздуха је коришћена стандардизована вредност, док је коефицијент аеродинамичког отпора преузет из литературе и стандарда [94, 95, 102]. У прорачуну је коришћена стандардна вредност убрзања земљине теже  $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ . Положај мете и гранични критеријум за приближавање мети дефинисани су у складу са експерименталним условима.

### 4.3 Удар пројектила у грануларну мету и пренос енергије

Када пројектил-дијабола удари у мету (у овом случају песак), његова укупна кинетичка енергија пре удара износи [1, 96].

$$E_k = \frac{1}{2} m_p v^2 \quad (4.23)$$

Где је:

$E_k$  – кинетичка енергија пројектила пре удара [J],

$m_p$  – маса пројектила [kg],

$v_i$  – брзина пројектила у тренутку удара [m/s].

Ова енергија се распоређује на више различитих облика енергије у зависности од природе мете, брзине и облика пројектила, као и услова удара [1, 96].

Ова енергија се не предаје целокупно мети, већ се дели на неколико компоненти [1, 96]:

$$E_k = E_m + E_d + E_T + E_v + E_R \quad (4.24)$$

Где је:

$E_m$  - Енергија пренета на мету

$E_d$  - Енергија пластичне деформације

$E_T$  - Топлотна енергија

$E_v$  - Енергија звучног и ударног таласа

$E_R$  - Резидуална енергија

Енергија пренета на мету  $E_m$ , ова компонента представља количину енергије која се непосредно преноси на мету у виду механичког деловања – сабијања и распршивања зрна песка [1, 96].

$$E_m = \eta E_k \quad (4.25)$$

На основу расположиве литературе [1, 96] за песковите и друге грануларне мете, вредност  $\eta$  се креће од 0.4 до 0.7, у зависности од:

- запреминске густине песка  $\rho_s$  [kg/m<sup>3</sup>],
- влажности,

- степена сабијања (порозност),
- облика и величине зрна.

У случају грануларних мета, енергија пренета мети  $E_m$  састоји се од три главне компоненте:

- $E_1$  – енергија сабијања (сепарација зрна),
- $E_2$  – инерцијска енергија зрна у мети,
- $E_4$  – енергија трења.

Отпор мете се у овом случају прорачунава применом Понцелетовог модела пенетрације [96]:

$$R = k_v s (a + bV^2) \quad (4.26)$$

Где је

- $a$  - квазистатички отпор,
- $bV^2$  инерцијски отпор,
- $s = \frac{\pi d^2}{4}$  - попречни пресек пројектила, а
- $k_v$  - корекциони фактор облика врха.

Енергија сабијања  $E_1$  израчунава се по формули:

$$E_1 = \frac{am}{2b} \ln\left(1 + \frac{b}{a} v_0^2\right) \quad (4.27)$$

Инерцијски део  $E_2$  добија се као остатак укупног рада у мети након што се одузму  $E_1$  и евентуално  $E_4$ . Другим речима, ова енергија је директно повезана са интегралом члана  $bV^2$  у моделу и представља рад утрошен на убрзавање зрна у мети [96].

За разлику од  $E_1$  и  $E_2$ , енергија трења  $E_4$  није експлицитно издвојена у основној Понцелетовој формулацији, већ се у пракси уводи као емпиријска апроксимација:

$$E_4 = E_m f_0 (1 + \alpha \sin^2 \theta) \quad (4.28)$$

са типичним вредностима  $f_0 \approx 0,05$  (5% при нормалном удару) и  $\alpha \approx 1$  за угаоне ударе. Ова апроксимација базира се на резултатима мерења и експерименталних калибрација. То је емпиријска апроксимација базирана на мерењима [96].

Угао  $\theta$  у терминалној балистици означава угао под којим пројектил погађа мету у односу на нормалу на њену површину.

- $\theta = 0^\circ$  пројектил иде право, нормално на мету (под правим углом, „директно“ у песак).
- $\theta > 0^\circ$  обличан удар (под углом) значи да је оса путање пројектила померена за  $22^\circ$  у односу на нормалу, односно  $68^\circ$  у односу на раван мете,
- $\theta = 90^\circ$  удар паралелно са метом (ричошет или клизање по површини).

При томе нормална компонента брзине ( $v_n = v_0 \cos \theta$ ) одређује дубину продирања, док тангенцијална компонента ( $v_t = v_0 \sin \theta$ ) појачава рад трења и смичања у мети.

За потребе прорачуна пенетрације дијаболе у грануларне мете усвојени су коефицијенти који одговарају три различита типа песка: крупан (шодер), песак за мачке и ситан (фини) песак. Вредности параметара  $a$ ,  $b$  као и коефицијената трења, топлоте, деформације и звучног таласа одабране су на основу литературних података и експерименталних запажања, уз прилагођавање специфичностима сваког медијума. Ови коефицијенти приказани су у табели 4.2 и представљају основу за даље израчунавање расподеле енергија.

Табела 4.2 Коефицијенти модела и губици енергије за крупан песак, песак за мачке и ситан песак

Врста песка	$a$ [МПа]	$b$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$f_0$ [%]	$\eta_Q$
Крупан псак	1,5	1770	5	0,30
Песак за мачке	1	1700	3,5	0,25
Ситан песак	2	1350	6	0,35

За крупан песак усвојен је параметар  $b$  који има исту вредност као и густуна песка јер крупна зрна и мешовита гранулација дају већи инерцијски отпор, док је статички отпор  $a=1,5$  МПа. Трење је умерено ( $f_0=5\%$ ) па је топлотни коефицијент  $\eta_Q=\eta_Q$ . Деформација пројектила је ограничена (3%), а звучни талас око 1%.

Песак за мачке због глатких, уједначених зрна од 3–4 mm има мањи статички отпор ( $a=1,0$  МПа), а густина и инерцијски отпор ( $b$ ) су блиски измереној расутој густини. Трење је најмање ( $f_0=3,5\%$ ), па и топлотни коефицијент ( $\eta_Q=0,25$ ). Деформација је минимална (2,5%), а звучни талас око 0,9%.

Код ситног песка због финих зрна јавља се највећи статички отпор ( $a=2,0$  МПа) и већи инерцијски отпор ( $b$ ). Трење је највеће ( $f_0=6\%$ ), а и топлотни коефицијент ( $\eta_Q =0,35$ )

јер фини песак развија више топлоте при клизању. Деформација пројектила је израженија (5%), а звучни талас нешто већи (1,1%).

Енергија пластичне деформације пројектила  $E_d$  представља деформацију која настаје ударом пројектила у мету и израженија је уколико је пројектил направљен од мекшег материјала (нпр. олова). Ова енергија се израчунава из [1, 96]:

$$E_d = \int \sigma_y d\varepsilon \quad (4.29)$$

Где је:

$\sigma_y$  – граница течења материјала пројектила [Pa],

$\varepsilon$  – пластична деформација (без димензија).

Овај облик енергије ће бити занемарен јер се разматра случај дијабола као пројектила и гађање из ваздушног оружја, осим ако ударају у металну мету [1, 96].

Топлотна енергија  $E_T$  представља део укупне енергије која се ослобађа као топлота услед трења и сабијања песка [1, 96].

Формула за израчунавање ове енергије је [1, 96]

$$E_T = cm_c \Delta T \quad (4.30)$$

где је:

$c$  – специфичан топлотни капацитет песка (~830 J/kg·K),

$m_c$  – маса песка у зони удара [kg],

$\Delta T$  – промена температуре [K].

Енергија звучног и ударног таласа  $E_v$  представља енергију која настаје услед брзог удара и компресије ваздуха око зоне удара. Обично ова енергија износи мање од 2% укупне енергије и тешко се мери без специјалних микрофона [1, 96].

Резидуална енергија  $E_R$ , настаје као последица продора пројектила кроз мету где она задржава део укупне енергије [1, 96]:

$$E_R = \frac{1}{2} m_p v_i^2 \quad (4.31)$$

Где је:

$v_i$  - брзина пројектила при изласку из мете.

Уколико пројектил остаје у мети (као у овом случају), онда је  $v_i = 0$  и  $E_R = 0$  [96].

Истраживање је проширено и на случај стрељачког наоружања, аналогно поступку примењеном за ваздушно наоружање. Прорачун је извршен за цеви пушака М70 (калибра 7.62 mm) и М21 (калибра 5.56 mm), при чему су пројектили испаливани у три различите врсте мета:

- Панцирну плочу,
- Комбинацију песка и панцирне плоче и
- Комбинацију бетона и панцирне плоче.

Примењене су исте основне физичке једначине и методолошки приступ као и за ваздушно наоружање, док за случај стрељачког наоружања настају значајне разлике услед веће почетне енергије пројектила, масе пројектила што за последицу има различиту расподелу енергије након удара пројектила стрељачког наоружања у наведене врсте мета.

Кинетичка енергија пројектила у тренутку удара одређена је стандардном формулом [96]:

$$E_k = \frac{1}{2} m_p v^2 \quad (4.32)$$

где је маса пројектила  $m_p$  неколико пута већа, а брзина  $v$  реда величине од 800 до 950 m/s, што резултује укупном енергијом од неколико хиљада џула. Овакве енергије захтевају детаљнију анализу расподеле енергије на више механизма, како би се разумела интеракција пројектила са различитим типовима мета.

Према Carlucci & Jacobson укупна кинетичка енергија се дели на више компоненти [1, 96]:

$$E_k = E_{pen} + E_d + E_{plast} + E_T + E_a + E_v \quad (4.33)$$

где су:

$E_{pen}$  – енергија продора (доминантна код бетона и плоча),

$E_d$  – енергија распршивања материјала (доминантна код песка),

$E_{plast}$  – пластична деформација пројектила и мете,

$E_T$  – топлотни губици услед трења и деформација,

$E_a$  и  $E_v$  – занемарљиви губици у акустици и вибрацији.

У зависности од типа мете, расподела енергије се значајно разликује за случај:

- Панцирне плоче као мете,
- Комбинације песка и панцирне плоче као мете и
- Комбинације бетона и панцирне плоче као мете.

Релативни удео сваке компоненте зависи од физичких својстава мете, тј врсте мете. За грануларне мете попут песка, значајан део енергије одлази на распршивање зрна, што се апроксимира следећом изразом [1, 96]:

$$E_d \approx \eta E_k \quad (4.34)$$

при чему је  $\eta \in [0.4, 0.7]$

У случају бетонских мета, доминира механичка енергија продора

$$E_{pen} \gg E_d \quad (4.35)$$

И може се рећи следеће:

- Већи део енергије одлази на микро-фрактуре и лом бетона,
- Процењује да ће до 70–85% енергије потрошити на механичко разарање структуре и
- Емпиријски модели за пенетрацију бетона узимају у обзир густину и чврстоћу бетона, као и облик и брзину пројектила [1, 96].

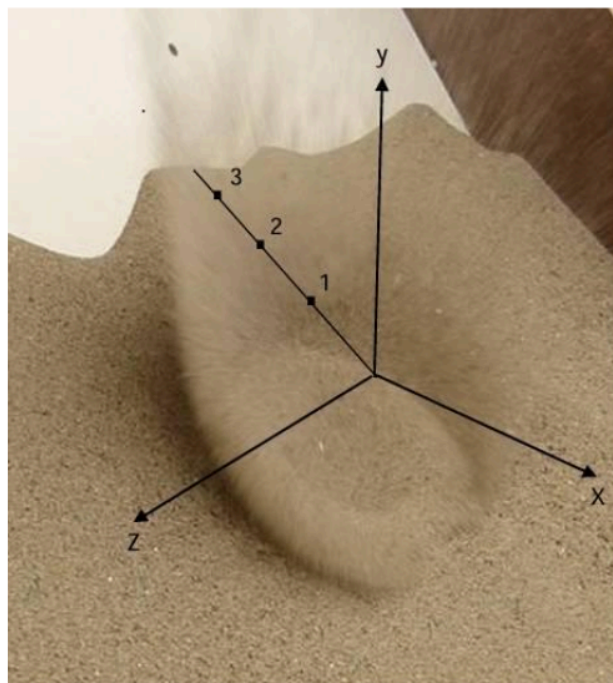
Панцирне плоче од челика или керамике пружају знатно већи отпор. Значајан део енергије троши се на деформацију пројектила и локализовано пробијање. Расподела зависи од облика носа пројектила (flat, ogival, AP), јер облици врха утичу на механизам оштећења плоче и преноса енергије. Због стварања већег притиска, пројектили са равним врхом (flat) на малој површини често доводе до локалне фрактуре, док пројектили са заобљеним врхом (ogival) обезбеђују бољу пенетрацију захваљујући повољнијем распореду напрезања. Панцирни пројектили (AP) имају тврдо језгро омогућавају дубљи продор и пренос веће количине енергије кроз плочу. Процент продора може бити нижи уколико метак не пробије плочу, тада доминира  $E_{plast}$  [1, 96].

Код панцирних плоча највећи удео енергије одлази на деформацију пројектила и евентуално локализовано пробијање, што укључује и значајне топлотне и пластичне губитке. Такође, код стрељачког наоружања присутна је већа температурна конверзија енергије услед високих брзина пројектила, што је у мањој мери било изражено у анализи овог типа за ваздушно наоружање [1, 96].

Ова анализа је кључна за интерпретацију експерименталних снимака, као и за разумевање различитих облика реакције мета у зависности од структуре и материјала, што представља значајан допринос у области терминалне балистике.

#### 4.4 Реакција гранулата (зрна песка) након удара

За описивање треће појаве, реакција гранулата (зрна песка) након удара пројектила, коришћен је постојећи програм написан C++ програмском језику уз подршку OpenCV библиотеке, која омогућава анализу процеса релаксације грануларног узорка у тренутку удара пројектила. Циљ је био да се анализа просторна расподела зрна, мерење дубине продора и морфолошка промена површине песка током и након удара, како је приказано на слици 4.3. Улазни параметри за овај програм су брзина пројектила (кинетичка енергија пројектилаж) у тренутку удара у мети и специфична густина песка добијена микроскопским мерењем песка [59].



Слика 4.3. Анализа фотографија површине песка

Постојећи математички модел комбинује опште физичке принципе и податке добијене обрадом снимака да би се одредиле брзине појединачних зрна и просторна расподела зрна након удара пројектила у песак. Суштина модела су алгоритми за трансформацију тродимензионалних података у одговарајуће дводимензионалне податке који су затим детаљно обрађени.

Улазни подаци су:

- брзина пројектила у тренутку удара добијена на основу приказаног математичког модела (m/s),
- густина песка добијена на основу експерименталних снимака ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ),
- маса пројектила каталогски податак за одређени тип пројектила (kg),
- снимци настали брзом камером.

Уводне претпоставке:

- Песак се посматра као дискретно-фазни медијум у коме појединачне честице (зрна) могу бити детектоване и праћене оптички (детекција на основу снимака брзе камере),
- Хидродинамичке интеракције које нису видљиве на снимцима (унтра-грануларни контакти који се дешавају у дубини гранулата) апсорбују енергију и третирају се као губици у енергетском билансу и
- Перспективна пројекција се коригује помоћу одговарајућих трансформација улазних података.

Главне операције које користи математички модел:

1. Детекција и праћење појединачних зрна песка на основу алгоритама за обраду снимака брзе камере (image-based particle tracking),
2. Претварање измерених путања изабраних референтних честица у брзину на основу познатог времена кретања честица (размак између две снимљене фотографије је 0.025 s),
3. Маса зрна песка је претходно експериментално одређена и кинетичка енергија зрна је одређена на основу познате масе и брзине зрна песка.

Математички модел одређује:

- Појединачне брзине  $v_i$  за изабрана референтна зрна песка,
- Укупну детектовану кинетичку енергију,
- Геометрију кратера (дијаметар и положај кратера) и запремина избачених зрна песка добијену на основу снимака брзе камере.

Модел има одређена ограничења и то:

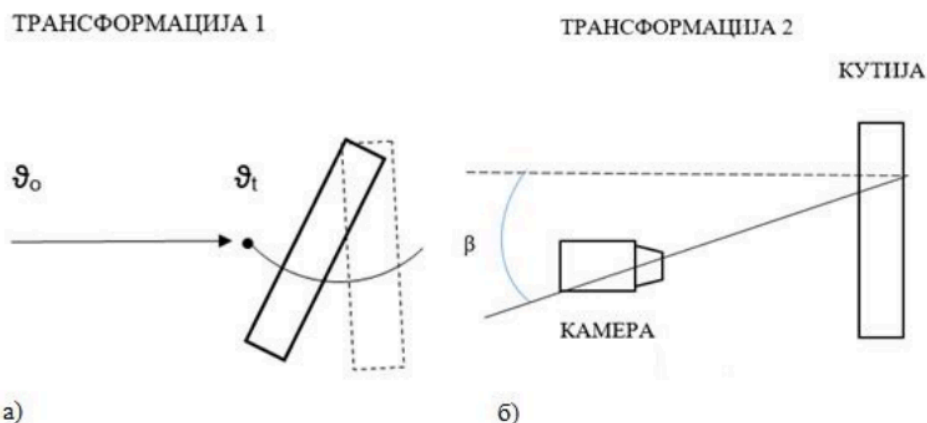
- Кључна осетљивост модела је на квалитет и брзину снимања, доња граница је резолуција појединог снимка од 5 MP (2560 x 1920) и брзина снимања од 40 fps (40 снимака у секунду). Што је већа резолуција и брзина снимања то се добија више података који се могу користити у даљој обради;
- Маса појединачних зрна су оцењене на основу експериментално снимљених података. Пре сваког експеримента са различитим грануларним материјалима (различитим врстама песка) неопходно је експериментално снимити расподелу грануларног материјала и обрадити је користећи одговарајуће методе за обраду слика.

На овај начин реализована је могућност идентификације и праћења сваког појединачног зрна песка. Позиције зрна су анализирани кроз серију фотографија снимљених брзом камером, чиме се добија временска динамика кретања. За одређивање запремине зрна песка примењена је метода запремине ротирајућег тела, при чему је на основу дводимензионалних пројекција одређена дужина најдуже осе ротације. Облик зрна је коригован уносом стандардне девијације контурних тачака. [59].

С обзиром на то да фотографије представљају дводимензионалну пројекцију тродимензионалног простора, било је неопходно извршити одговарајуће трансформације како би се омогућила просторна анализа распршења зрна песка након удара пројектила. У примеру првог експеримента, гађање је извршено из ваздушног наоружања у мету коју је представљао сандук испуњен песком. Ради добијања информација о дубини и реалној путањи кретања зрна, спроведене су две кључне трансформације:

1. Нагиб мете, сандук са песком је постављен под одређеним углом у односу на вертикалу, што је омогућило бољу визуелизацију распршења у простору и
2. Позиционирање камере, јер је камера била постављена под углом у односу на правац дејства пројектила, чиме је добијена паралакса и просторна перспектива неопходна за процену треће димензије.

У другом експерименту, услед другачијег распореда мете и захтева за мерењем, била је довољна само једна трансформација јер су камере биле постављене под одређеним углом у односу на правац дејства. Овај приступ трансформацији експерименталне геометрије омогућио је добијање релевантних просторних података из дводимензионалних снимака. Шематски приказ примене ових трансформација дат је на слици 4.4.



Слика 4.4 Шематски приказ просторних трансформација експерименталне поставке: (а) нагиб мете и (б) угаоно позиционирање камере у односу на правац дејства пројектила.

Подаци потребни за анализу добијају се посматрањем серије фотографија где се могу уочити четири основна параметра: „облак”, „рупа”, „ерозија” и „енергија”. Облак представља запремину подигнутог песка након удара, рупа представља непосредни копани облик у површини, ерозија указује на накнадне промене у структури површине, а енергија представља укупан износ измештеног материјала у  $\text{mm}^3$ . Уведен је референтни координатни систем којим се региструје све три фазе: облак, рупа и ерозија, чиме се добија кумулативна слика преноса енергије. Замишљен је фиктивни „референтни координатни систем” који се заснива само на процесима кретања припреме песка као резултат удара пројектила. Први покрет представља такозвани „облак”, односно запремину песка која се одваја у ваздуху непосредно након удара пројектила. Други покрет мери запремину измештеног песка у такозваним „рупама” које настају на месту удара. Трећи покрет је додатни покрет и односи се на ерозију песка која се јавља непосредно након стварања „рупе”. Ова три типа кретања представљају механизме детекције преноса енергије и све заједно чине слику онога што се дешава после удара пројектила. Пренета енергија удара се мери кроз запремину песка у  $\text{mm}^3$  за сва три померања у исто време.

## 5. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИ ДЕО ИСТРАЖИВАЊА

У оквиру овог поглавља представљена је реализација експерименталног испитивања ефеката удара пројектила на грануларне материјале различите гранулацијепанцирну плочу, уз примену два типа наоружања, ваздушног и стрељачког. Испитивање је обухватило дејство дијабола различите геометрије (са равним и купастим врхом), као и муниције за стрељачко наоружање, на мете сачињене од ситног, средњег и крупног песка, у слободном и везаном стању. Циљ истраживања био је анализа утицаја облика пројектила, његове кинетичке енергије и физичких својстава препрека на степен пробојности, распршивање материјала и дисипацију енергије. У ту сврху примењене су три методе снимања: дигиталним фотоапаратом Panasonic Lumix DMC-FZ200, ултрабрзом камером Phantom v9.1 и термовизијском камером FLIR SC 620, чиме је обезбеђена прецизна визуелна и термичка анализа процеса удара.

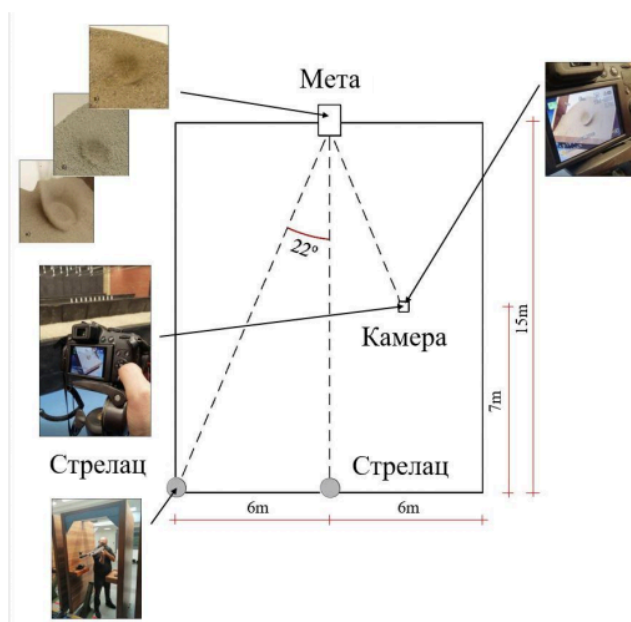
### 5.1 Уводно истраживање

Прелиминарно истраживање спроведено је у пиштољској стрељани Војне академије, са циљем анализе утицаја пројектила мале кинетичке енергије на грануларне материјале различитих гранулација. Експеримент је реализован употребом ваздушне пушке STEYR модела LG 110 и ваздушног пиштоља марке LP 10 [98, 99]. Као мете коришћене су кутије испуњене песком три различите гранулације (ситна, средња и крупна). Основни технички подаци о примењеном ваздушном наоружању приказани су у табели 5.1.

Табела 5.1. Основне техничке карактеристике ваздушне пушке Steyr LG 110 и ваздушног пиштоља Steyr LP 10 (према приручницима произвођача [98, 99])

Карактеристике	STEYR LG 110 (пушка)	STEYR LP 10 (пиштољ)
Укупнадужина	1170 mm	400 mm
Укупнависина	200 mm	142 mm
Дужинацеви	550 mm	227 mm
Калибар	4.5 mm / .177 in	4.5 mm / .177 in
Маса	4750 g	968 g
Ширина	—	50 mm
Погон	Компресованиваздух	Компресованиваздух
Окидач	Механички	Механички
Повлачењеокидача	50–250 g	50–250 g
Излазнаенергијапројектила	24 J	17 J
Почетнабрзинапројектила	240 m/s	160 m/s

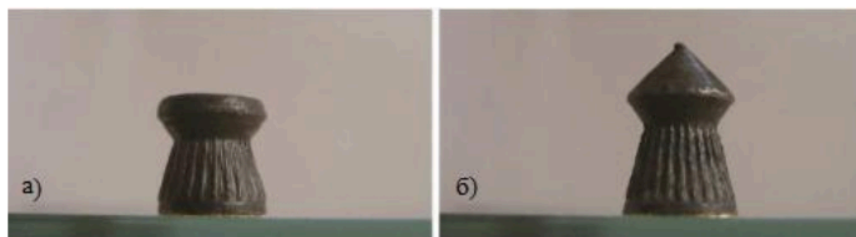
Гађање је изведено са положаја предвиђеног за стрелца, у складу са експерименталном шемом приказаном на слици 5.1.



Слика 5.1. Шема експерименталног распореда[59]

Гађање је вршено са удаљености од 15 m, у стојећем ставу, са приближне висине од 1,5 m, узимајући у обзир просечну висину војника. Ватрене позиције су биле усклађене са положајима намењеним стрелцима. Промена угла дејства ( $0^\circ$  и  $22^\circ$ ) постигнута је променом положаја стрелца између различитих ватрених тачака. Након сваке серије гађања прављене су паузе како би се очувала конзистентност експерименталних услова. Мете су били дрвени рамови димензија  $640 \times 640 \times 120$  mm, испуњени песком масе 4,5 kg, различите гранулације (ситан, песак за мачке и крупан песак). Температура у стрелани током целог експеримента била је константна. Гађање је понављано са циљем постизања погодака на истој висини у односу на доњу ивицу рама и приближно у централној зони.

Коришћене су две врсте дијабола: са равним и са купастим врхом (Слика 5.2), чије су основне карактеристике дате у табели 5.2.

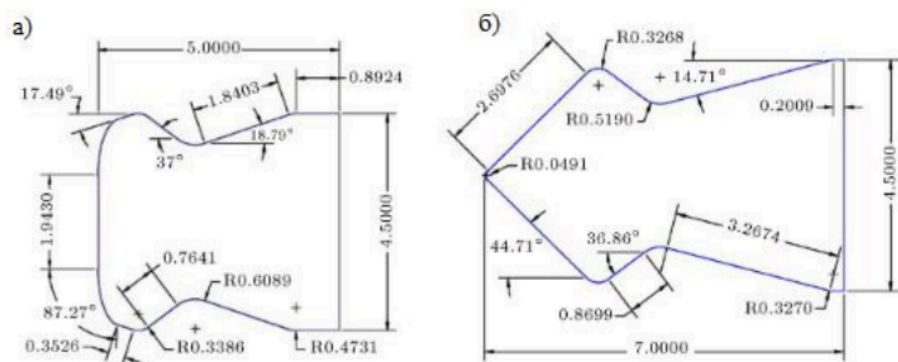


Слика 5.2Коришћене врсте дијабола, а) дијабола са равним врхом (wadcutter)и дијабила са купастим врхом (sharp pointed) [103]

Табела 5.2. Карактеристике пројектила[103]

Карактеристика	Зарављени врх	Купастиврх
Калибар	4.50 mm	4.50 mm
Дужина	5mm	7 mm
Маса	0.5 g	0.6 g

У циљу анализе утицаја геометрије на аеродинамичко понашање пројектила типа дијабола, извршено је поређење две врсте дијабола калибра 4,5 mm, чији су детаљни геометријски параметри приказани на Слици 5.3. Прва дијабола има класичну равну предњу површину (wadcutter), са укупном дужином од 5,0 mm и наглашеним прелазима у геометрији тела, укључујући угао од  $37^\circ$  и радијус заобљења  $R = 0,3386$  mm. Друга дијабола поседује купаст облик врха (sharp-pointed), укупне дужине 7,0 mm, са благим углом врха од  $14,71^\circ$  и постепенијим прелазима у структури, при чему радијус заобљења износи  $R = 0,5190$  mm[103].



Слика 5.3. Геометријски приказ две дијаболе калибра 4.5 mm са назначеним димензијама[103]

(а) Пројектил са равним врхом (wadcutter) дужине 5.0 mm, карактеристичан за краткодметну употребу и висок коефицијент отпора.

(б) Пројектил са купастим врхом (sharp-pointed) дужине 7.0 mm, оптимизован за боље аеродинамичке перформансе и мањи отпор при већим брзинама.

У више радова који се баве пројектилма малог калибра, посебна пажња посвећена је утицају спољне геометрије на отпор ваздуха, стабилност путање и задржавање кинетичке енергије током лета. Rafeie и Teymourtash [104] су применом нумеричке анализе (CFD и динамичких једначина кретања), показали да пројектили са купастим или шилатим предњим делом имају знатно повољније аеродинамичке карактеристике у односу на оне са равним фронталним површинама. Нарочито је уочено да облик носа (врха дијаболе), дужина тела и прелазни радијуси утичу на величину аеродинамичког отпора и губитак брзине током путање.

У експерименталним условима, Ladommatos [100] је испитао преко 30 различитих облика дијабола и утврдио да дијаболе са наглим ивицама и кратким телом имају

значајно већи коефицијент отпора. Посебно је наглашено да пројектили са равним предњим делом (нпр. дужина тела 5,00 mm, угао предње ивице  $37^\circ$ , мали радијус заобљења  $R = 0,3386$  mm) имају мању енергетску ефикасност у лету у односу на пројектиле са купастим врхом (дужина тела 7,00 mm, угао врха  $14,71^\circ$ , глатки прелаз  $R = 0,5190$  mm), који постижу мањи отпор и бољу стабилност путање.

Радови Rafeiei Ladommatos [104, 100] указују на значај геометрије пројектила у контексту аеродинамичког отпора и стабилности путање. У раду Janković et al. [59] анализиран је утицај пројектила са купастим врхом на интеракцију са грануларним материјалима, при чему су остварени значајни увиди у начин распршивања и дисипације енергије након удара.

Полазећи од претходно изложених сазнања, у овом раду извршено је поређење две дијаболе истог калибра (4.5 mm), једне са равним предњим делом (wadcutter) и друге са купастим врхом (sharp-pointed), чија је геометрија приказана на Слици 5.2. Дијабола са равним врхом, због своје скраћене дужине и наглих геометријских прелазних зона, ствара зону повишеног притиска испред тела током лета и брже губи кинетичку енергију. Очекује се да ће овај облик показати слабију пробојност и краћи домет. Насупрот томе, sharp-pointed дијабола, са већом укупном дужином и глатким аеродинамичким прелазима, постиже смањени отпор ваздуха, спорији губитак брзине и бољу стабилност лета, што је посебно важно у условима ниже енергије, као што је гађање из ваздушног пиштоља [104, 100]

У оквиру овог истраживања анализиран је утицај обе геометрије пројектила на дејство у мете од песка различите гранулације. Положај мета у оквиру експерименталне поставке приказан је на Слици 5.4.



Слика 5.4. Препреке од грануларне материје – сопствена експериментална поставка  
Основни параметри реализованог експеримента приказани су у табели 5.3.  
Табела 5.3. Параметри експерименталног испитивања

Експериментални део истраживања

Р. Бр.	Врста наоружања	Калибар	Угао гађања	Даљина гађања	Почртна брзина гађања	Врста гранулације	Врста пројектила
1	Ваздушна пушка марке STEYER LG 110	4,5 mm	0°	15 m	240m/s	Ситна гранулација песка	дијабола са равним врхом
2						Средња гранулација песка	
3						Крупна гранулација песка	
4	Ваздушна пушка марке STEYER LG 110	4,5 mm	22°	16,2 m	240m/s	Ситна гранулација песка	дијабола са равним врхом
5						Средња гранулација песка	
6						Крупна гранулација песка	
7	Ваздушна пушка марке STEYER LG 110	4,5 mm	0°	15 m	240m/s	Ситна гранулација песка	дијабола са купастим врхом
8						Средња гранулација песка	
9						Крупна гранулација песка	
10	Ваздушна пушка марке STEYER LG 110	4,5 mm	22°	16,2 m	240m/s	Ситна гранулација песка	дијабола са купастим врхом
11						Средња гранулација песка	
12						Крупна гранулација песка	
13	Ваздушни пиштољ марке STEYER LP 10	4,5 mm	0°	15 m	160m/s	Ситна гранулација песка	дијабола са равним врхом
14						Средња гранулација песка	
15						Крупна гранулација песка	
16	Ваздушни пиштољ марке STEYER LP 10	4,5 mm	22°	16,2 m	160m/s	Ситна гранулација песка	дијабола са равним врхом
17						Средња гранулација песка	
18						Крупна гранулација песка	
19	Ваздушни пиштољ марке STEYER LP 10	4,5 mm	0°	15 m	160m/s	Ситна гранулација песка	дијабола са купастим врхом
20						Средња гранулација песка	
21						Крупна гранулација песка	
22	Ваздушни пиштољ марке STEYER LP 10	4,5 mm	22°	16,2 m	160m/s	Ситна гранулација песка	дијабола са купастим врхом
23						Средња гранулација песка	
24						Крупна гранулација песка	

Снимање је обављено дигиталним фотоапаратом Panasonic DMC-FZ200, при брзини од 40 снимака у секунди и резолуцији 2560×1920 пиксела (5 MP)[105]. Фотоапарат је био фиксиран на статив, а покретање снимања вршено је даљинским управљачем, како би се обезбедила стабилност и репродуктивност експерименталних услова са исте удаљености и под истим углом у односу на мету. Забележени су ударци пројектила у три различите врсте грануларних материјала, како је приказано на Слици 5.5.



Слика 5.5 Снимак удара пројектила у различите врсте грануларне материје: а) ситан песак, б) песак за мачке, в) крупан песак (ауторска фотографија) – снимљено Panasonic DMC-FZ200, сопствена експериментална поставка

Након експерименталног снимања, извршена је анализа забележених кадрова на метама. Уочени су ударци пројектила у три различите врсте песка, при дејству под два угла,  $0^\circ$  и  $22^\circ$ . Специфична густина узорака песка кретала се у распону од  $1340$  до  $1770 \text{ kg/m}^3$ , а подаци о гранулацији и густини приказани су у табели 5.4. Вредности су добијене применом микроскопске анализе узорака песка пре извођења експеримента.

Табела 5.4. Карактеристике грануларне материје (резултати сопственог мерења на основу микроскопске анализе) [59].

Врста песка	Специфична густина [ $\text{kg/m}^3$ ]	Гранулација [mm]
Крупан песак	1770	~4-10
Песак за мачке	1700	~3
Ситан песак	1340	~0-0,3

Песак је у овом истраживању коришћен као представник зрнастих материјала, који имају широку примену у одбрамбеним и заштитним структурама [59]. Утицај пројектила на ову врсту подлоге анализиран је у контексту фундаменталних физичких принципа. На основу познате масе пројектила и измерене почетне брзине, примењена кинетичка енергија је израчуната применом класичне формуле  $E_k = \frac{1}{2}mv^2$ , и утврђено је да у свим испитиваним случајевима не прелази вредност од  $10 \text{ J}$ .

### 5.1.1 Фотоапарат марке Panasonic DMC-FZ-200

У реализацији експеримента употребљен је дигитални фотоапарат Panasonic Lumix DMC-FZ200, представник класе супер-зум модела у својој генерацији [105]. Овај уређај поседује објектив са константним отвором бленде  $F2.8$  у читавом опсегу жижне даљине ( $25\text{--}600 \text{ mm}$ ).

Комбинација великог отвора бленде и наменски развијеног MOS сензора од 12,1 MP омогућава високе перформансе снимања при слабом осветљењу, уз мањи ниво шума и већу контролу над ISO вредностима. То омогућава употребу нижих вредности осетљивости уз задржавање одговарајућих брзина затварача, чиме се добијају боље дефинисани кадрови [105].

Кључне техничке карактеристике Panasonic Lumix FZ200 [105]:

- Објектив: 24x зум (25–600 mm еквивалент), F2.8 кроз читав опсег,
- Сензор: 12,1 MP High Sensitivity MOS,
- Брзина снимања: 12 fps континуираноодносно 40 fps у трајању од 1 секунде и при резолуцији од 5 MP што је коришћено у експерименту.
- Видео снимање:
  1. Full HD 1080p (60 fps) у форматима AVCHD/MP4 и
  2. Снимање видео записа великом брзином: 120 fps (при HD резолуцији 1920x1080 пиксела), 240 fps (при VGA резолуцији 640x480).
- Електронски тражило (EVF): 0.2 инча, резолуција 1.312.000 тачака,
- LCD екран: 3.0 инча, слободно ротирајући, резолуција 460.000 тачака,
- Режији: Панорамско снимање, HDR, ручна и аутоматска контрола,
- Подршка за RAW и RAW+JPEG формат.

## 5.2 Истраживање реализовано из стрељачког наоружања

Са циљем стицања значајних научних сазнања применљивих у одбрамбене сврхе, спроведено је испитивање ефеката стрељачког наоружања веће кинетичке енергије у поређењу са ваздушним оружјем. У овом сегменту истраживања коришћене су цеви аутоматске пушке калибра 7,62 mm M70 [106-108] и аутоматске пушке калибра 5,56 mm M21 [109], које су биле монтиране у опитни блок ради обезбеђивања стабилних и контролисаних услова испаливања.

Као мете у овом делу истраживања коришћене су две врсте препрека:

- Панцирна балистичка плоча са антитраума слојем и
- Комбинована препрека, састављена од панцирне плоче испред које је додат слој гранулата, са циљем испитивања ефекта дисипације енергије приликом удара пројектила.

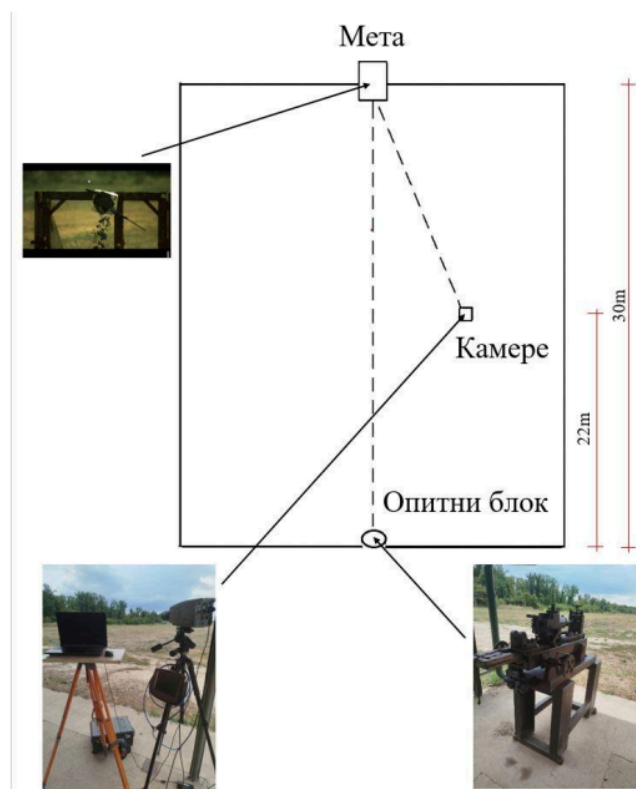
Грануларна материјалпостављена је у три слоја преко панцирне плоче, при чему сваки слој грануларне материје је имао дебљину од 7 mm и био сачињен од различите врсте песка. Редослед послављања слојева је био такав да је најкрупнија гранулација била одмах до панцирне плоче. За стабилизацију структуре и очување репродуктивности у условима дејства, слојеви су фиксирани водом односно грађевинским везивом (цементом), чиме је добијена компактна препрека.

Испитивање је реализовано у две итерације:

- Прва итерација обухватала је гађање панцирну плочу и
- Друга итерација подразумевала је гађање у комбиновану препреку, у којој се испред панцирне плоче налазио слој грануларне структуре.

Током експеримента, извршено је снимање брзом камером, у циљу анализе удара, расипања зрнасте структуре и реконструкције трансфера кинетичке енергије. Поред тога, коришћен је и термовизијска камера, како би се утврдио температурни профил и степен термалне апсорпције унутар панцирне плоче кој је направљена на бази кевларне структуре након удара пројектила.

Посебна пажња посвећена је анализи деформације и перфорације кевларне плоче, односно, карактеристикама отвора насталог при директном поготку, пре и после додавања грануларне препреке. Пројектили употребљени у овом испитивању имали су масу у распону од 4,1 g до 8,0 g, док су се почетне брзине кретале између 730 m/s и 930 m/s, у зависности од типа муниције [106-109]. Шематски приказ експерименталне поставке испитивања са стрељачким наоружањем приказан је на слици 5.6



Слика 5.6. Шематски приказ експерименталне поставке испитивања са стрељачким наоружањем

Циљ овог експеримента био је да се, путем снимања брзом и термовизијском камером, евидентира и анализира понашање грануларне материје различите гранулације и густине под дејством пројектила из стрељачког наоружања. Реализација експеримента била је усмерена на систематизацију резултата у оквиру следећих истраживачких аспеката:

- Анализе термалне реакције унутар плоче као индиректног показатеља преноса енергије и
- Визуелна реконструкција ударног процеса на основу снимака добијених током удара у испитивану структуру.

Експерименти су реализовани при амбијенталној температури од 10 °С, а мерења почетне и преостале брзине пројектила ( $v_0$  и  $v_{30}$ ) вршена су Doppler радаром модела ED-2605DR. Све кључне карактеристике реализације испитивања приказане су у Табели 5.7 Протокол испитивања гађањем.

Табела 5.5 Кључни параметри протокола испитивања гађањем

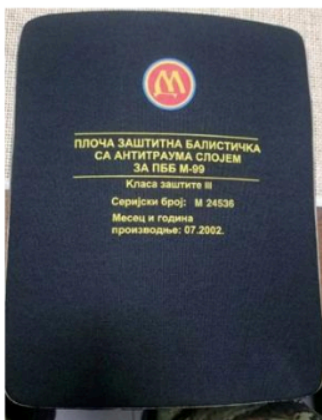
Р. Бр.	Оружје	$V_0$ (m/s)	$V_{30}$ (m/s)	Муниција	Препрека
1	Опитна цев 7,62mm x39, број ББ	740,2	700,4	7,62 mm O3 M67 серије ППУ 9401 месингана чаура, берут СБ 515 с.МБЛ 9370	Панцирна плоча
2		765,0	707,6		
3		751,1	708,5		Панцирна плоча + песак
4		744,9	704,5		Панцирна плоча + песак са везивом
5	Опитна цев 5,56mm, број ББ	941,9	885,5	5,56 mm O3 M03 серије ППУ 1701- 02 месингана чаура, берут СБ 511 с.МБЛ 171714	Панцирна плоча + песак са везивом
6		932,7	894,1		Панцирна плоча
7		941,4	895,4		Панцирна плоча + песак
8		941,5	897,3		
9		955,3	898,9		
10		938,7	894,8		

Врсте песка коришћене у овом експерименту одговарале су онима из првог испитивања, с тим што су, ради обезбеђивања стабилног вертикалног положаја мете, примењени влажан песак и песак са везивом (грађевинским цементом). Податци о карактеристикама употребљених материјала приказани су у Табели 5.6

Табела 5.6 Карактеристике песка у слојевима трослојне грануларне плоче- подаци добијени у току експерименталног истраживања

Врста песка	Специфична густина [kg/m <sup>3</sup> ]	Гранулација [mm]
Влажан крупан песак	2140	~4-10
Влажан песак за мачке	1680	~3
Влажан цитан песак	2140	~0-0,3

Димензије панела који су се стављали испред панцирне плоче, износиле су 290 × 230 × 21 mm, при чему је сваки слој имао специфичну гранулацију и био обрађен у складу са прописаним условима. Изглед испитиване панцирне плоче приказан је на Слици 5.7



Слика 5.7. Панцирна балистичка плоча са антитраума слојем– фотографија настала током експерименталног испитивања на полигону ТОЦ Никинци

Мешање грануларне материје и воде 3:1, са циљем да се обезбеди довољна чврстоћа уз очување способности за реалистичну дисипацију енергије током удара пројектила.

Плоче сачињене од песка и воде, где је сваки слој представљао комбинацију одређене врсте песка и одговарајуће количине воде. Конкретно:

- горњи слој: најситнији песак (ситни грађевински) и вода,
- средњи слој: песак средње гранулације (тзв. „песак за мачке“) и вода,
- доњи слој: крупнозрни песак и вода.

Обе варијанте плоча и суве и влажне, коришћене су као експериментални аналози реалних балистичких баријера, са циљем анализе трансфера енергије и карактеристика деформације унутар грануларних препрека различитог физичког стања. Конструкцијом

плоча у три слоја различите гранулације и влаге, настојало се да се симулира прогресивно отпорно понашање материјала од почетног контакта пројектила са површином до фазе коначне апсорпције његове кинетичке енергије.

Експериментално испитивање реализовано је на полигону Техничког опитног центра (ТОЦ) у Никинцима, у контролисаним условима који омогућавају поновљивост резултата и висок степен безбедности приликом тестирања балистичких својстава различитих заштитних материјала.

Даљина гађања била је дефинисана у складу са стандардима NIJ-0101.04 и NIJ-0101.06 Националног института за правду Сједињених Америчких Држава (NIJ – National Institute of Justice) [110, 111], који одређују нивое балистичке заштите панцира и заштитних структура. Ови стандарди примењивани су у домену балистичког тестирања у Републици Србији, у оквиру спецификација опреме за војне, полицијске и безбедносне потребе, с обзиром на то да национални стандард тренутно не постоји.

Поред NIJ стандарда, у специјализованим истраживањима и пројектима за извоз, као референтни оквири користе се и немачки стандард VPAM [112], као и НАТО стандард STANAG 2920 [113], који се примењују у зависности од врсте опреме, тактичке намене и нивоа заштите који се захтева.

Редослед испаливања у оквиру експеримента био је следећи:

- Прва серија испаливања реализована је коришћењем метка калибра 7,62×39 mm, испалиног из цеви аутоматске пушке Застава М70, фиксиране на опитно постоље ради обезбеђивања стабилности и контролисаних услова и
- Друга серија испаливања обављена је метком калибра 5,56×45 mm, испалиним из цеви аутоматске пушке Застава М21, такође постављене на опитно постоље.

Након што је извршено гађање стандардне панцирне плоче, приступило се испитивању ефеката дејства пројектила на панцирну плочу испред које су се налазилослојеви грануларне материја са везивом у виду воде. Ова фаза експеримента омогућила је детаљну анализу утицаја слободно распоређене зрнасте структуре на дисипацију енергије и динамику распршивања при удару.

У завршној фази, реализовано је и гађање панела са песком и везивом (грађевинским цементом) постављених испред панцирне плоче, који су изливени по претходно описаним критеријумима.

На овај начин омогућено је директно поређење:

- Понашања неконсолидоване (слободне) и консолидоване (везане) грануларне структуре и

- Упоредна анализа њихове ефикасности у односу на стандардну панцирну плочу и када се испред ње налази грануларна материја.

Техничке карактеристике муниције коришћене у овом испитивању приказане су у табели 5.7 [106-109]

Табела 5.7 Техничке карактеристике муниције коришћене у балистичком испитивању [106-109]

Карактеристичне величине	Метак 7,62×39 mm	Метак 5,56×45 mm	Величина мере
Дужина чауре	38,70	44,70	mm
Укупна дужина	57,00	57,40	mm
Капацитет чауре	2,31	1,85	cm <sup>3</sup>
Пречник зрна	10,07	5,70	mm
Пречник врата	11,35	6,43	mm
Пречник вице	9,96	9,60	mm
Дебљина вице	1,50	1,40	mm
Почетна брзина	738,0	905–940	m/s
Почетна енергија	2179	1639–1812	J
Маса пројектила	8,0	4–4,1	g

Гађање је вршено из цеви аутоматске пушке монтиране у опитни блок, на висини од 110 cm, чиме су обезбеђени стабилни и поновљиви услови испитивања. Кључне техничке карактеристике цеви које су коришћене у испитивању систематизоване су у Табели 5.8.

Табела 5.8 Техничке карактеристике цеви коришћених у балистичком испитивању [106-109]

Карактеристика	7,62×39 mm (M70)	5,56×45 mm (M21)
Дужина цеви	415 mm	460 mm
Број жлебова	4	6
Материјализраде	Висококвалитетни хром-ванадијум челик	Висококвалитетни челик
Пречник цеви	7,62 mm	5,56 mm
Облик жлебова	V	Полигонални
Ефективни домет	400 m	400–600 m

### 5.3 Карактеристике камера коришћених у балистичком испитивању

Са циљем праћења динамике удара и температурних промена током балистичког испитивања, примењене су две врсте камера: ултрабрза камера Phantom v9.1 и термовизијска камера FLIR SC 620. У наставку текста представљене су њихове кључне техничке карактеристике и функционална примена у оквиру експерименталног поступка, на основу спецификација произвођача [114, 115].

Снимање погодака у мете различитих физичких својстава извршено је синхронизовано помоћу брзе и термовизијске камере, што је омогућило детаљну анализу брзинских промена, механизма распршивања материјала и трансфера топлотне енергије унутар испитиване структуре.

За потребе снимања температурних појава током удара пројектила, коришћена је термовизијска камера FLIR SC 620 (Слика 5.8), опремљена нехлађеним микроболометарским матричним детектором. Њен таласни опсег креће се у интервалу од  $7,5\ \mu\text{m}$  до  $13\ \mu\text{m}$ , што омогућава детекцију инфрацрвеног зрачења у широком температурном спектру.

Техничке карактеристике термовизијске камере FLIR SC 620 дате су у Табели 5.10 [114].



Слика 5.8. Камера FLIR SC 620 [114]

Камера је била опремљена додатном опремом за директно повезивање са рачунаром, што је омогућило континуирано снимање термалних слика (термограма) у реалном времену. Термална слика формирана је мерењем инфрацрвеног зрачења са површине објекта или сцене, након чега је, уз помоћ пратећег софтвера, конвертована у термограм – визуелну мапу температурне расподеле.

FLIR SC 620 поседује широк температурни опсег, што је омогућило снимање објеката са наглашеним температурним разликама [114].

Камера је коришћена и као стационарни сензор, управљан преко рачунара. Путем специјализованог софтвера, камера и рачунар били су програмирани да аутоматски снимају термограме у унапред дефинисаним временским интервалима, као и да идентификују температурна одступања у односу на унапред задате критеријуме. У случају прекорачења дефинисаних граничних вредности, активиран је алармни сигнал [114].

Температурна одступања могла су се дефинисати у односу на [114]:

- Максималну, минималну или средњу вредност и
- Конкретну тачку, линију или зону унутар термограма

Техничке карактеристике термовизијске камере FLIR SC 620 приказане су у табели 5.9.

Табела 5.9. Техничке карактеристике термовизијске камере FLIR SC 620 [114]

Тип детектора	Матрични детектор постављен у жижној равни (Focal Plane Array-FPA)
Видно поље (Field of View-FOV)	24° хоризонтално и 18° вертикално
Спектрални опсег	7.5 $\mu\text{m}$ - 13 $\mu\text{m}$
Температурна осетљивост/NETD	< 0.045°C при 30 °C
Фреквенција слике	30Hz (опционо 120Hz )
ИС резолуција	640x480 пиксела (опционо 640x120 пиксела)
Минимално растојање фокуса	0.3m; зависи од објектива камере (24°објектив)
Жижна даљина	38mm; (објектив са углом видног поља од 24°)
Просторна резолуција	(IFOV) 0.65 mrad; (уз објектив са углом од 24°)
F-број	1.1
Тачност	2°C или 2% пуне скале
Домен мерења температуре	0 до 500 °C (са могућношћу проширења

	до 1500°C)
Радна температура	40°C до 120°C
Време снимања по слици	< 33ms (опционо 8.33 ms)
Меморија за снимање слика	1 GB картица, Преко 1000 слика
Комуникациона веза	Firewire, USB, Bluetooth, composite video
Дисплеј	LCD
Видео излаз	NTSC/PAL
Функције	Фокус, снимање, меморисање, поновни позив
Маса	1.8kg са објективом и батеријом

Термовизијском камером праћен је процес удара пројектила у различите типове препрека, укључујући:

- Стандардну панцирну плочу,
- Грануларну препреку сачињену од три слоја песка различитих гранулација и
- Плочу изливену од исте грануларне мешавине уз додатак цементног везива.

Просторна расподела температуре на површини снимљених објеката добијена је анализом одабраних кадрова уз помоћ софтверског пакета FLIR Research Studio [116]. Камера је била постављена на удаљености дефинисаној према експерименталној шеми, док је снимање реализовано у интервалу од неколико секунди пре и након удара пројектила у мету. Такав временски оквир омогућио је прецизну идентификацију температурних пикова и анализу механизма дисипације енергије у почетној фази трансфера топлоте кроз испитивани материјал.



Слика 5.9. Камера Phantom v9.1 [115]

Поред термовизијске камере, за снимање реализације експеримента коришћена је и ултрабрза камера Phantom v9.1 (Слика 5.9), произведена од стране компаније Vision Research [115]. Phantom v9.1 представља уређај високе прецизности, димензија  $109 \times 102 \times 236$  mm, масе 3,8 kg, са напајањем од 24 VDC / 1,5 A. Камера омогућава снимање до 1016 кадрова у секунди (fps) при пуној резолуцији од  $1632 \times 1200$  пиксела, захваљујући CMOS матрици сензора слике. Систем омогућава кориснику да адаптира резолуцију ради повећања брзине снимања или продужења укупног времена снимања, чиме се постиже велика флексибилност у реалним експерименталним условима. Phantom v9.1 обједињује високу брзину и резолуцију без компромиса, што обезбеђује изузетан квалитет снимака, чак и при екстремним брзинама снимања [115].

Камера подржава 14-битну дубину слике, сегментацију снимака, као и брз пренос података, док HD-SDI интерфејс и могућност континуираног стримовања (опционо) омогућавају ефикасно праћење и анализу сложених динамичких процеса. Техничке карактеристике ултрабрзе камере Phantom v9.1 приказане су у Табели 5.10 [115].

Табела 5.10 Техничке карактеристике камере Phantom v.9.1 [116]

Дубина бита слике	14-битни (стандардни)
Екстремни динамички опсег	За исправну експозицију када објекат садржи веома светла подручја као и тамнија подручја
Непрекидни пренос података	Опционо. До 500 fps (8 бита), 350 fps (12 бита)

Видео излаз	NTSC , PAL и HD-SDI (720п, 1080р, 1080i, 1080psf при 24, 25, 59,9 и 60 fps)
Осетљивост	2400 ISO/ASA монохроматски, 600 ISO/ASA боја
Контролни интерфејс	Gigabit Ethernet или RS232 серијски интерфејс
Начин окидања (Trigger)	Континуирано променљиво пре/пост
Резолуција	1632x1200 - 14 бита
Сензор	CMOS
Видео Output	Video, HD-SDI, GigE
Макс. Брзина кадра	1000 fps (пуна резолуција) до 153,846 (96x8 пиксела)
Меморија	6 – 24GB
Радна температура	10° – 50 °C

Брзом камером Phantom v9.1 сниман је процес удара пројектила у различите типове балистичких препрека, са циљем анализе деформација и динамике распршивања материјала у првим милсекундама након контакта. Снимање је реализовано упоредо са термовизијским снимањем.

Оваквом применом ултрабрзе камере омогућено је детаљно праћење интеракције пројектила са површином препреке, укључујући појаву фрагментације, продора и ширења ударног таласа унутар материјала.

Након експеримента, добијени снимци и фотографије анализирани су у програму који је написан на програмском језику C++, уз коришћење OpenCV библиотеке за обраду слика[59]. У оквиру развијеног програма, имплементирана је метода за одређивање положаја појединачног зрна у времену, чиме је омогућено праћење динамике распршивања и релаксације грануларне материје након удара.

## 6. РЕЗУЛТАТИ И АНАЛИЗА РЕЗУЛТАТА ИСПИТИВАЊА

У овом поглављу приказани су резултати испитивања дејства пројектила ваздушног и стрелачког оружја на грануларне и чврсте мете, уз интеграцију три независна извора података:

1. спољнобалистичких прорачуна у MATLAB-у (верификованих мерењима брзине на 15 m за ваздушно оружје и на 30 m за калибре 7,62 mm и 5,56 mm),
2. снимака брзе камере обрађених у C++/OpenCV ради квантификације грануларних појава („облак”, „удар”, „ерозија”) и
3. термовизијских записа анализираних у програму FLIR ResearchIR MAX ради праћења температурне разлике у времену као индиректне мере дисипације енергије.

На основу израчунате односно измерене брзине кретања пројектила непосредно пре удара у мету, одређена је укупна кинетичка енергија пројектила и аналитички расподељена на компоненте (пенетрација, деформација, топлота, вибрације односно звук и преостала енергија), у зависности од врсте мете (песак различите гранулације) и услова гађања (врста оружја, угао, облик врха дијаболе).

Термовизијска мерења се у овом раду интерпретирају као промена температурне разлике (не апсолутне температуре), будући да прецизна апсолутна мерења захтевају калибрисану камеру и познату емисивност сваког материјала. Упоредивањем термовизијских резултата са високобрзинским снимцима и прорачунатим енергетским билансом добијен је целовит оквир за разумевање начина дисипације енергије и процену ефикасности заштитних конфигурација. Тиме се обезбеђује кохерентан оквир за тумачење дисипације енергије и процену ефикасности различитих заштитних конфигурација.

### 6.1 Резултати и анализа резултата испитивања дејства из ваздушне пушке и пиштоља

За потребе анализе фотографија насталих при удару пројектила из ваздушног наоружања (пушка и пиштољ) у грануларни материјал користили смо C++ и библиотеку OpenCV. Циљ анализе био је описати дејство пројектила на мете различитог гранулометријског састава. Да би тај опис био валидан, било је неопходно одредити брзину пројектила у тренутку удара. Такође је требало квантитативно проценити количину кинетичке енергије која је предата мете при удару. Одређене вредности брзине и пренете енергије користиле су се за корелацију визуелних ефеката на снимцима са физичким својствима грануларних материјала. Брзина дијаболе и кинетичка енергија након 15 m лета израчунате су у програмском пакету MATLAB, применом модела који укључује утицај отпора ваздуха, приказаног у Поглављу 4. Аналитичка расподела брзине и енергије на компоненте у зависности од угла дејства  $\alpha$  дата је у Табели 6.1, што представља полазну основу за даљу анализу.

Табела 6.1 – Аналитички прорачун и расподела кинетичке енергије након удара пројектила испаљених из ваздушног оружја у песковиту мету на растојању од 15 m

Врста ваздушног наоружја	Песак	$\alpha$ [°]	$v_0$ [m/s]	$v_{15}$ [m/s]	$E_k$ [J]	$E_m$ [J]			$E_d$ [J]	$E_T$ [J]	$E_v$ [J]	$E_R$ [J]
						$E_1$ [J]	$E_2$ [J]	$E_4$ [J]				
STEYR LG 110	Ситан	0	240	214	11,449	0,813	9,085	0,632	0,572	0,221	0,126	0
	За мачке	0		214	11,449	0,623	9,958	0,384	0,286	0,096	0,103	0
	Крупан	0		214	11,449	0,566	9,721	0,541	0,343	0,162	0,114	0
	Ситан	22		208.6	10.879	0,773	8,520	0,683	0,544	0,239	0,120	0
	За мачке	22		208.6	10.879	0,594	9,395	0,415	0,272	0,104	0,096	0
	Крупан	22		208.6	10.879	0,541	9,141	0,585	0,326	0,106	0,109	0
STEYR LP 10	Ситан	0	160	145	5,256	0,661	3,883	0,290	0,263	0,101	0,057	0
	За мачке	0		145	5,256	0,515	4,342	0,176	0,131	0,044	0,047	0
	Крупан	0		145	5,256	0,470	4,253	0,248	0,158	0,075	0,053	0
	Ситан	22		139	4.830	0,616	3,510	0,303	0,242	0,106	0,053	0
	За мачке	22		139	4.830	0,482	3,953	0,184	0,121	0,046	0,043	0
	Крупан	22		139	4.830	0,442	3,858	0,260	0,145	0,078	0,048	0

Где су:

- $\alpha$  – угао дејства,
- $v_0$  – почетна брзина дијаболе,
- $v_{15}$  – брзина дијаболе наком 15m и
- $E_k$  – укупна кинетичка енергија дијаболе,
- $E_1$  – енергија сабијања,
- $E_2$  – инерцијална енергија,

- $E_4$  – енергија трења,
- $E_m$  – енергија предата мети,
- $E_d$  – енергија утрошена на деформацију пројектила,
- $E_T$  – енергија трансформисана у топлоту,
- $E_v$  – енергија механичких вибрација у мети,
- $E_R$  – преостала енергија након удара.

У оквиру анализе дефинисан је фиктивни „референтни систем” заснован на процесима кретања зрна песка након удара пројектила. Идентификована су три основна облика тог кретања:

1. „облак” – запремина песка која се одваја и подиже у ваздух непосредно након удара;
2. „удар” – запремина песка која се тренутно измешта из зоне удара;
3. „ерозија” – секундарно кретање песка које се јавља након почетне деформације, као последица трансформације потенцијалне енергије зрна песка у кретање и реорганизацију зрна песка.

Ови облици представљају главне механизме преноса енергије са дијаболе на мету, при чему је пренета енергија мерена као запремина помереног гранулата ( $\text{cm}^3$ ) у свакој фази у истом временском интервалу.

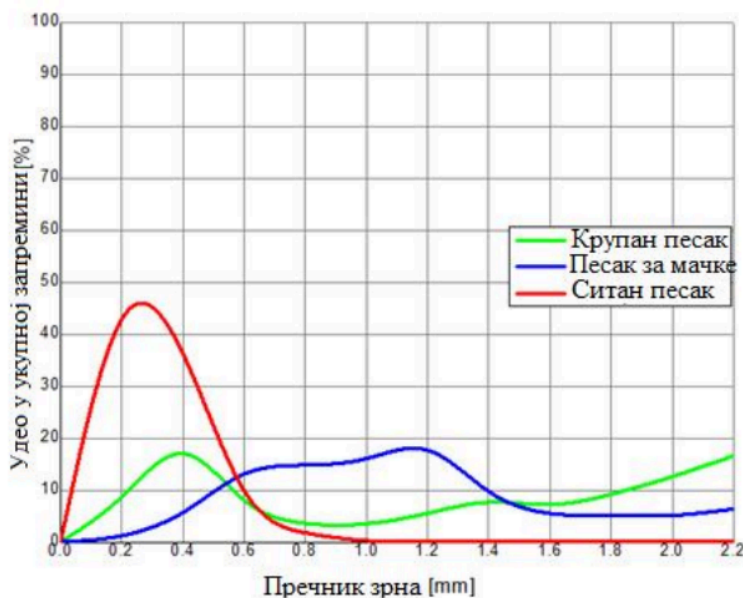
У контексту овог експеримента, „енергија” означава укупну запремину песка померену услед удара, кроз облак, рупу и ерозију и служи као индиректна мера преноса кинетичке енергије на препреку. Изражава се у  $\text{cm}^3$ , а за сваку посматрану појаву узета је највиша забележена вредност у односу на врсту наоружања, угао гађања и врсту песка.

Снимање удара дијаболе у мету вршено је дигиталним фотоапаратом при 40 кадрова у секунди (fps) и резолуцији од 5 MP, што одговара интервалу снимања од 0,025 s по фотографији. Пре обраде, све фотографије су усаглашене и поравнате, јер је сандук са песком био постављен под нагибом, а пуцање извођено „надоле“ под одређеним углом. Ово је захтевало прецизно усклађивање положаја и перспективе сваког кадра, како би анализа била тачна (дефинисано у поглављу 4).

За даљу интерпретацију кретања и преноса енергије анализирани су вредности параметра „енергија” за све услове експеримента, односно за сваку комбинацију:

- врсте наоружања (пиштољ / пушка),
- врста дијаболе,
- угла дејства и
- врсте песка.

Са циљем бољег разумевања утицаја грануларне структуре на дисипацију енергије при удару пројектила, извршена је анализа расподеле зрна по величини за све три врсте песка коришћене у експерименту: ситан песок, песок за мачке (средња гранулација) и крупан песок. Овом анализом утврђивано је у којој мери расподела величине зрна и њихов запремински удео утичу на начин распршивања енергије приликом удара. Дијаграми 6.1 и 6.2 приказују дистрибуцију броја зрна и запремине по класи пречника за сва три типа песка и служе као основа за тумачење добијених енергетских резултата.

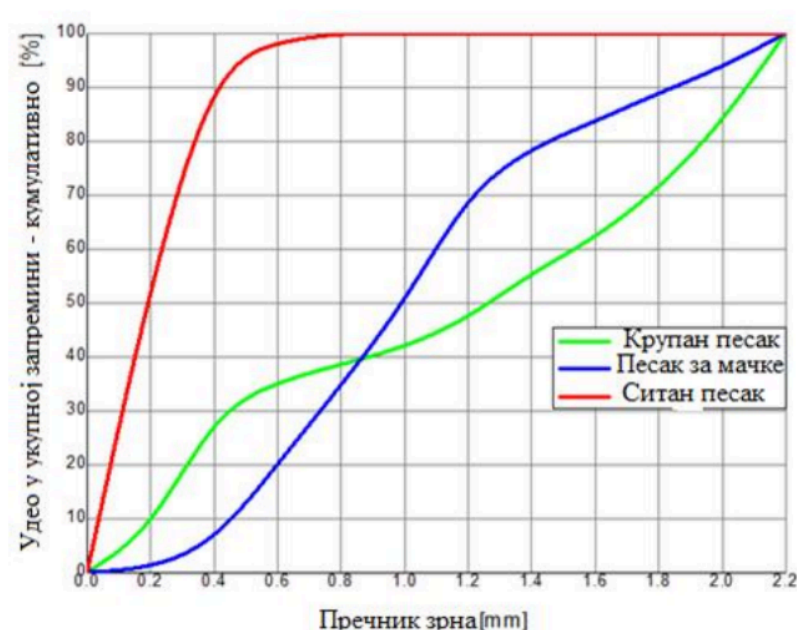


Слика 6.1 Дијаграм расподеле запреминског удела зрна у функцији пречника за три врсте песка

На слици 6.1 приказан је дијаграм приказује запреминску расподелу честица по пречнику за ситан песок, песок за мачке и крупан песок. Ситан песок (црвена крива) има изразито мономодалну расподелу (већина зрна има приближно исту величину), у овом случају око 0,25mm. Оваква структура указује на високу хомогеност и већу густину паковања, што доводи до локализоване дисипације енергије у непосредној зони удара. Крупан песок (зелена крива) има ширу и равномернију расподелу величина зрна, која обухвата и ситније и крупније честице, што омогућава постепенију дисипацију енергије у дубљим слојевима. Песак за мачке (плава крива) одликује се приближно хомогеном расподелом зрна, што обезбеђује стабилну структуру и уједначену прераспodelу импулса. Упоредивањем облика кривих могу се уочити значајне разлике у понашању материјала током удара, што је од суштинске важности за избор адекватног гранулата у балистичким и инжењерским применама.

Слика 6.2 приказује дијаграм кумулативне расподеле честица по пречнику за ситан песок, песок за мачке и крупан песок. Ситан песок (црвена крива) достиже готово 100%

запремине већ код зрна величине око 0,4mm, што указује на његову изразиту хомогеност и мономодалну структуру. Такав материјал има високу густину паковања и карактеристичан је по брзој локализацији енергије у зони удара. Крупан песак (зелена крива) показује постепенији пораст удела, са широм расподелом величина зрна која се протеже и до 2mm. Овај тип материјала обезбеђује постепенију дисипацију енергије у дубљим слојевима. Песак за мачке (плава крива) заузима средњи положај између претходна два, иако је приближно хомоген у распону зрна, кумулативна крива показује равномернији раст, што га чини погодним за уједначену расподелу импулса при удару.

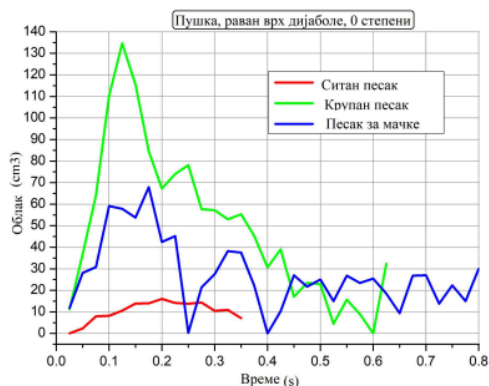


Слика 6.2 Дијаграм кумулативне запреминске расподеле честица по пречнику за три врсте песка

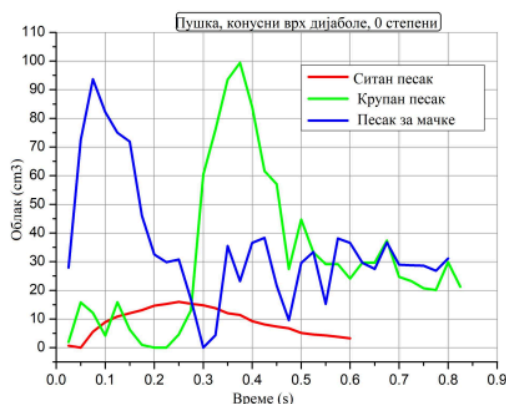
За разлику од дијаграма 6.1, где је приказана расподела учешћа честица по пречнику, кумулативна крива на дијаграму 6.2 омогућава директан увид у то колико процената укупне запремине заузимају честице испод одређене величине. Оваква анализа је значајна јер показује брзину којом се материјал „засићује” од ситнијих ка крупнијим честицама. Управо ова разлика у динамици засићења објашњава зашто ситан песак апсорбује енергију локализовано, док крупан песак и песак за мачке обезбеђују постепенију и равномернију дисипацију енергије током удара.

На дијаграмима са слике 6.3 и 6.4 приказана је временска промена запремине „облака” тј., дела гранулата који је подигнут у ваздух у тренутку удара дијаболе са равним врхом и конусним врхом дијаболе у мету направљену од три различита типа песка (крупан, ситан и песак за мачке) у условима гађања под углом од 0°, и то за случај гађања из

ваздушне пушке. Запремина облака је изражена у  $\text{cm}^3$ , а време у секундама од момента удара.



Слика 6.3 Дијаграм промене запремине облака честица у функцији времена приликом гађања из ваздушне пушке дијаболом са равним врхом и углом гађања од  $0^\circ$



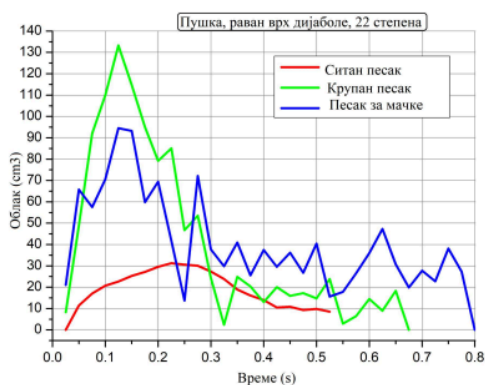
Слика 6.4 Дијаграм промене запремине облака честица у функцији времена приликом гађања из ваздушне пушке дијаболом са конусним врхом и углом гађања од  $0^\circ$

На дијаграмима са слика 6.3 и 6.4 је приказано формирање и динамика „облака” приликом дејства ваздушном пушком под углом дејства од  $0^\circ$  за два различита облика врха дијаболе, са равним и конусним врхом. Запремина облака представља количину песка која је подигнута у ваздух непосредно након удара, као индикатор иницијалног преноса импулса са пројектила на гранулат.

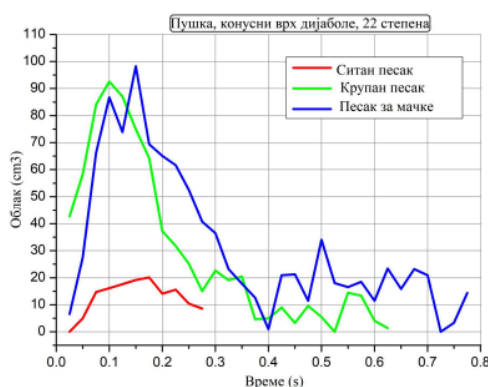
У случају дијаболе са равним врхом (слика 6.3), уочава се да крупан песак (зелена крива) остварује највеће вредности облака, са израженим максимумом од преко  $130\text{cm}^3$  у првих  $0,13\text{s}$ , што указује на снажан иницијални померај зрна и широку дисперзију материјала. Песак за мачке (плава крива) бележи средње вредности, са стабилнијим током и умеренијим максимумом око  $60\text{-}70\text{cm}^3$ , што је последица хомогеније гранулације и уједначенијег преноса енергије. Ситан песак (црвена крива) показује најниже вредности, са релативно благим растом и максимумом од око  $15\text{cm}^3$ , при чему се енергија дисипира локализовано у зони удара. Код дијаболе са конусним врхом (слика 6.4), карактер облака је измењен: песак за мачке у почетној фази бележи највеће вредности, преко  $90\text{cm}^3$  у првих  $0,1\text{s}$ , док крупан песак достиже врхунац нешто касније (око  $0,35\text{-}0,4\text{s}$ ) са максималних  $100\text{cm}^3$ . Ово указује да конусни врх производи динамичнију и временски распршенију дисперзију, при чему иницијални одзив песка за мачке има нагли скок, док крупан песак реагује са закашњењем али снажнијим ефектом. Ситан песак поново остаје на нижим вредностима (до  $15\text{cm}^3$ ), задржавајући карактер локализоване и слабије дисипације.

Упоредна анализа показује да облик врха дијаболе значајно утиче на иницијалну динамику облака: раван врх концентрише енергију у директном продору што доводи до брзог и израженог подизања зрна код крупног песка, док конусни врх генерише постепенији и временски развучен процес, са различитим фазама доминације појединих гранулата. У оба случаја, ситан песок показује најнижи одзив, што је у складу са његовом мономодалном структуром и високим степеном паковања зрна.

На дијаграмима са слике 6.5 и 6.6 приказана је временска промена запремине „облака” за случај гађања из ваздушне пушке под углом од  $22^\circ$ . Анализирани су различити облици врха дијаболе (раван и конусни) и три типа песка: крупан, ситан и песок за мачке.



Слика 6.5 Дијаграм промене запремине облака честица у функцији времена приликом гађања из ваздушне пушке дијаболом са равним врхом и углом гађања од  $22^\circ$



Слика 6.6 Дијаграм промене запремине облака честица у функцији времена приликом гађања из ваздушне пушке дијаболом са конусним врхом и углом гађања од  $22^\circ$

На дијаграмима са слика 6.5 и 6.6 приказано је формирање и динамика облака приликом гађања под углом од  $22^\circ$ , за два различита облика врха дијаболе. Због косог удара у грануларну материју јављају се специфичне разлике у интензитету и трајању дисперзије.

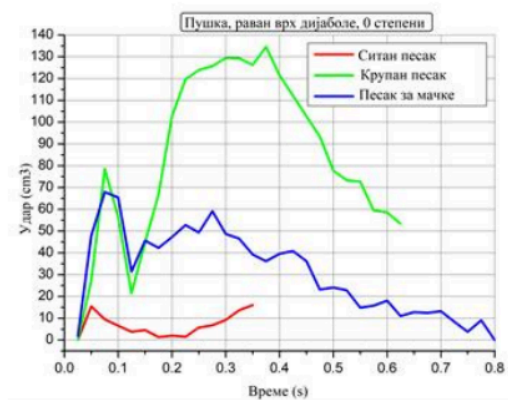
Код дијаболе са равним врхом (слика 6.5), крупан песок поново бележи највећи максимум, преко  $130\text{cm}^3$  у првих 0,12s, што указује на снажан почетни импулс и широку дисперзију зрна. Песак за мачке има средње вредности, са наглим порастом у почетној фази и максимумом око  $90\text{cm}^3$ , али и израженом осцилацијом након тога, што говори о нестабилнијем одзиву структуре при косом удару. Ситан песок задржава најнижи ниво, са постепеним порастом до око  $30\text{cm}^3$  и стабилним, али релативно slabим одзивом.

У случају конусног врха дијаболе (слика 6.6), распоред резултата се делимично мења. И крупан песок и песак за мачке достижу приближно исте максималне вредности, око 90-

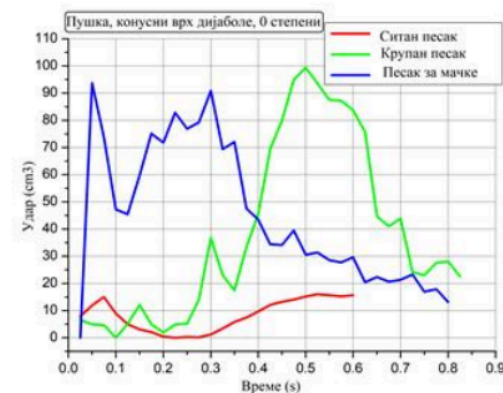
100cm<sup>3</sup>, али са различитом динамиком: код крупног песка врхунац је брз и концентрисан у првих 0,1-0,15s, док песак за мачке показује дужи интервал повишених вредности и постепенији пад. Ситан песак остаје на најнижим нивоима (до 20cm<sup>3</sup>), са равномерним и предвидљивим током.

Упоредна анализа показује да угао од 22° доводи до мањег укупног задржавања облака у времену, јер део енергије бива расут у латералном правцу. Раван врх и даље изазива најизраженије иницијалне вредности облака код крупног песка, док конусни врх омогућава балансирању одзив, где песак за мачке добија значајнију улогу. У свим случајевима ситан песак показује најслабији одзив, што је у складу са његовом компактном структуром и мањом способношћу дисперзије.

На дијаграмима 6.7 до 6.10 приказана је временска промена запремине „удара“ који предствља део гранулата који је дислоциран у зони контакта дијаболе са метом. Анализа је спроведена у истим условима као код облака: гађање из ваздушне пушке под углом од 0° и 22°, употребом два различита облика врха дијаболе, са равним и конусним врхом, као и за три типа песка: крупан, ситан и песак за мачке. Запремина удара изражена је у cm<sup>3</sup>, а време у секундама од момента удара.



Слика 6.7 Дијаграм промене запремине удара у функцији времена приликом гађања из ваздушне пушке дијаболом са равним врхом и углом гађања од 0°



Слика 6.8 Дијаграм промене запремине удара у функцији времена приликом гађања из ваздушне пушке дијаболом са конусним врхом и углом гађања од 0°

На дијаграмима је приказана динамика „удара“, запремине песка која је дислоцирана у зони контакта пројектила са метом за случај гађања из ваздушне пушке под углом од 0°. Анализирани су равни и конусни врх дијаболе, као и три типа песка (крупан, ситан и песак за мачке).

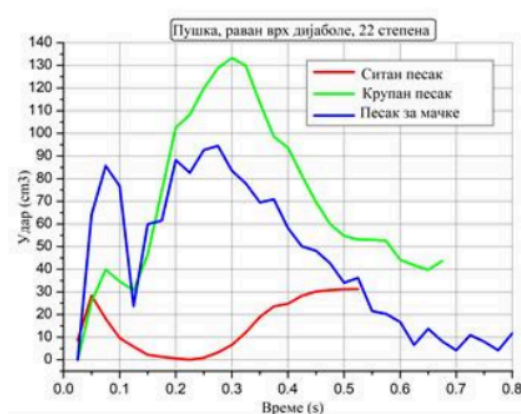
У случају дијаболе са равним врхом (слика 6.7), највеће вредности удара бележи крупан песак (зелена крива), са максимумом који прелази 130cm<sup>3</sup> око 0,35-0,4s након удара. Ово је последица већих зрна и порозније структуре, која омогућава израженију

дислокацију материјала. Песак за мачке (плава крива) показује средње вредности, са иницијалним порастом и стабилнијим током, али нижи максимум у односу на крупан песак, и то око  $70\text{cm}^3$ . Ситан песак (црвена крива) задржава најниже вредности до  $15\text{cm}^3$ , што је у складу са његовом компактном структуром и мањим међузрнстим шупљинама.

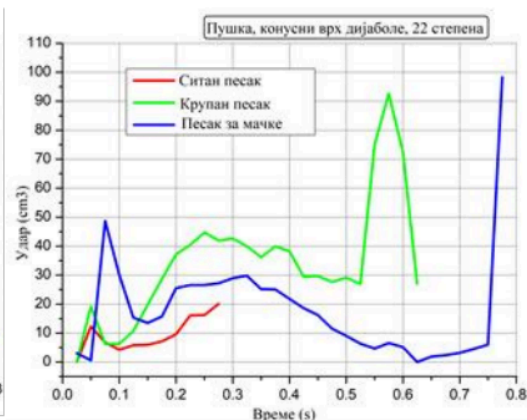
Код дијаболе са конусним врхом (слика 6.8), распоред резултата је донекле измењен. Песак за мачке у првим тренуцима удара показује највећи иницијални скок од преко  $90\text{cm}^3$  у првих  $0,1\text{s}$ , али већ након  $0,2\text{ s}$  крупан песак преузима доминацију и достиже вршну вредност око  $100\text{cm}^3$ , са дужим трајањем у односу на песак за мачке. Ситан песак и у овом случају остаје на најнижој линији на око  $15\text{cm}^3$ , показујући стабилан, али слаб одзив.

Упоредна анализа показује да код удара под углом од  $0^\circ$  најизраженији одзив има крупан песак, који због већих зрна и порозније структуре омогућава снажан и дуготрајан померај материјала. Песак за мачке заузима средњу позицију и бележи наглашен иницијални скок у запремини удара, али тај ефекат траје краће у односу на крупан песак. Ситан песак показује најслабији одзив, што је последица његове мономодалне структуре тј. већина зрна је приближно исте величине (око  $0,25\text{mm}$ ), што доводи до збијеног паковања и мање могућности за померање и дислокацију. Управо ова хомогеност структуре ограничава његову способност дисипације енергије у почетној фази процеса.

На дијаграмима 6.9 и 6.10 приказана је временска промена запремине „удара“ за случај гађања из ваздушне пушке под углом од  $22^\circ$ .



Слика 6.9 Дијаграм промене запремине удара у функцији времена приликом гађања из ваздушне пушке дијаболом са равним врхом и углом гађања од  $22^\circ$



Слика 6.10 Дијаграм промене запремине удара у функцији времена приликом гађања из ваздушне пушке дијаболом са конусним врхом и углом гађања од  $22^\circ$

На дијаграмима са слика 6.9 и 6.10 приказана је динамика „удара”, запремине песка која је тренутно дислоцирана у зони контакта пројектила са метом и за случај гађања из ваздушне пушке под углом од  $22^\circ$ . Анализирани су равни и конусни врх дијаболе, као и три типа песка (крупан, ситан и песак за мачке).

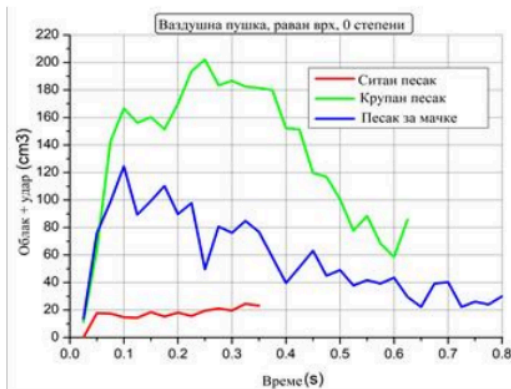
У случају дијаболе са равним врхом (слика 6.9), крупан песак (зелена крива) показује највеће вредности удара, са вршним максимумом преко  $130\text{cm}^3$  у периоду око  $0,3\text{s}$ . Ово указује на снажну дислокацију већих зрна и изражено расипање енергије у дубљим слојевима. Песак за мачке (плава крива) има нешто нижи максимум на око  $90\text{cm}^3$ , али и дужи интервал задржавања на повишеним вредностима, што упућује на стабилнији и постепенији одзив структуре. Ситан песак (црвена крива) бележи најмање вредности, са максимумом до  $30\text{cm}^3$ , што потврђује његову ограничену способност дислокације.

Код дијаболе са конусним врхом (слика 6.10), резултати показују измењену динамику. Крупан песак у овом случају има умерене вредности у првој фази, али достиже максимум од око  $90\text{cm}^3$  касније у процесу на око  $0,6\text{s}$ . Песак за мачке бележи иницијални нагли скок преко  $45\text{cm}^3$  у првих  $0,1\text{s}$ , након чега следи стабилнији ток са коначним порастом ка крају интервала, где достиже готово  $100\text{cm}^3$ . Ситан песак и даље остаје на најнижој линији на око  $20\text{cm}^3$ , без већих осцилација.

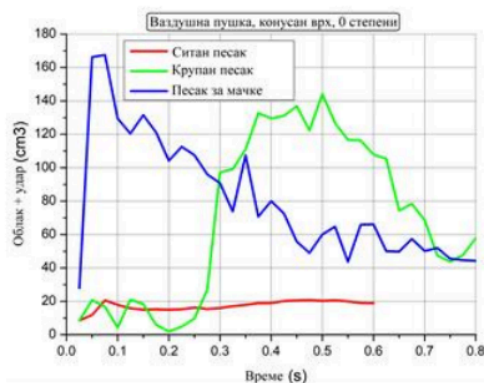
Упоредна анализа показује да угао од  $22^\circ$  доводи до умереног смањења укупних вредности удара у односу на угао од  $0^\circ$ , што је последица делимичног расипања енергије у латералном правцу. Раван врх дијаболе и даље остварује највеће вредности код крупног песка, док конусни врх показује сложенију динамику са наглашеним каснијим максимумима. Песак за мачке у оба случаја задржава улогу „средњег” материјала, са умереним али стабилним одзивом, док ситан песак остаје најмање подложен дислокацији.

Посебно је извршена анализа појаве облака и удара, и у овом делу приказан је њихов заједнички ефекат („облак + удар”), који представља укупну количину измештеног материјала у функцији времена. Овај параметар даје свеобухватнију слику о процесу дисипације енергије, јер у себи обједињује иницијалну дисперзију зрна у ваздух (облак) и истовремено померање и сабијање материјала унутар мете (удар).

На сликама 6.11 и 6.12 приказани су збирни дијаграми промене запремине облака и удара у функцији времена, за случај дејства ваздушне пушке под углом гађања од  $0^\circ$  дијаболом са равним и конусним врхом. Слика 6.11 односи се на дејство дијаболом са равним врхом, док Слика 6.12 приказује резултате за конусни врх.



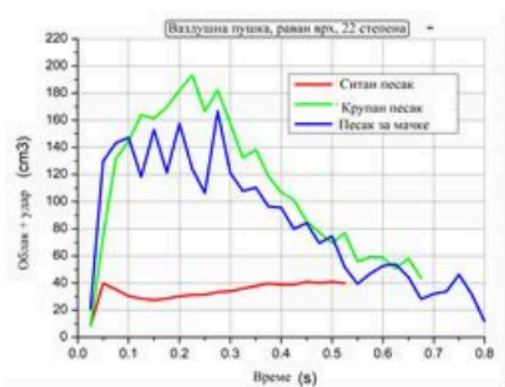
Слика 6.11 Дијаграм промене запремине облака и удара у функцији времена приликом гађања из ваздушне пушке дијаболом са равним врхом и углом гађања од  $0^\circ$



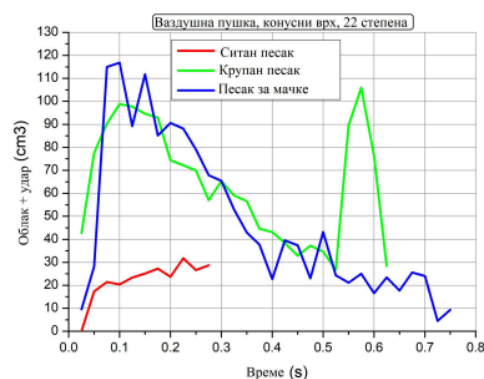
Слика 6.12 Дијаграм промене запремине облака и удара у функцији времена приликом гађања из ваздушне пушке дијаболом са конусним врхом и углом гађања од  $0^\circ$

Ови дијаграми представљају свеобухватан приказ укупне количине измештеног материјала (облак + удар) у времену и омогућавају директно поређење два различита облика пројектила при истим условима гађања. Анализом добијених кривих може се уочити како геометрија врха дијаболе утиче на почетну динамику дисперзије зрна, на величину максималног измештања и на трајање процеса дисипације енергије унутар мете.

На сликама 6.13 и 6.14 приказани су збирни дијаграми промене запремине облака и удара у функцији времена за дејство ваздушне пушке под углом гађања од  $22^\circ$ . Слика 6.13 односи се на резултате добијене при употреби дијаболе са равним врхом, док Слика 6.14 приказује резултате за конусни врх.



Слика 6.13 Дијаграм промене запремине облака и удара у функцији времена приликом гађања



Слика 6.14 Дијаграм промене запремине облака и удара у функцији времена приликом

*из ваздушне пушке дијаболом са равним врхом  
и углом гађања од 22°*

*гађања из ваздушне пушке дијаболом са  
конусним врхом и углом гађања од 22°*

Посматрањем појаве удара дијаболом у мету од песка уочава се више ефеката: сабијање зрна, његово истискивање из зоне удара и формирање облака распршених честица. Претпоставка је да део укупне кинетичке енергије пројектила који је у прорачуну означен као енергија сабијања  $E_1$  одговара енергији облака и удара.

Енергија се изражава у џулима (J). У анализи резултата експеримената енергија се представљала као функција запремине избачених честица. Да би се дошло до праве вредности енергије потребно је одредити густину песка да би се добила маса избаченог песка и брзина избачених честица да би се добила кинетичка енергија.

Просечна брзина кретања одређена је помоћу програма написаног у C++ програмском језику уз подршку OpenCV библиотеке, којим је снимљено кретање зрна песка са серије фотографија добијених током снимања удара дијаболом у песок.

Кинетичка енергија избаченог песка одређивана је из израза (1):

$$E = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}\rho Vv_z^2 \quad (1)$$

Где је:

$\rho$  - густина песка,

$V$  - запремина избаченог и сабијеног песка [m<sup>3</sup>],

$v_z$  - просечна брзина зрна песка [m/s].

Вредности облака и удара за крупан песок очитаване су са експерименталних дијаграма и добијених резултата. На основу познатих густина песка (поглавље 5) и одређених просечних брзина зрна, израчунате су експерименталне вредности енергија које представљају енергију сабијеног, избаченог и распршеног песка.

Важно је нагласити да су ове вредности приближне, јер се користи просечна брзина зрна песка, док у реалности постоји одређени распон брзина.

У табели 6.2 приказани су прорачунати и експериментални резултати дела енергије која је предата након удара пројектила у мету од песка.

Табела 6.2 Приказ прорачунате енергије сабијања  $E_1$  и енергије добијене на основу енергије удара и облака  $E_{exp}$  на основу експерименталних података.

Врста ваздушног наоружја	Песак	$\alpha$ [°]	$v_0$ [m/s]	$v_{15}$ [m/s]	V [m <sup>3</sup> ]	$v_z$ [m/s]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$E_1$ [J]	$E_{exp}$ [J]
STEYR LG 110	Крупан	0	240	214	0,202	1,868	1770	0,566	0,618

Где је:

$\alpha$  – угао дејства,

$v_0$  – почетна брзина дијаболе,

$v_{15}$  – брзина дијаболе наком 15m,

V - запремина избаченог и сабијеног песка [m<sup>3</sup>],

$v_z$  - просечна брзина зрна песка [m/s],

$\rho$  - густина песка,

$E_1$  - енергија сабијања,

$E_{exp}$  - екпериментално измерена вредност енергије облака и удара.

Спроведени експеримент потврђује да се део енергије пројектила након удара у грануларну мету дисипира у процесима сабијања, истискивања и распршивања зрна песка. Коришћење оптичке методе за одређивање брзине зрна (анализом низа фотографија) показало се оправданим, јер омогућава директно праћење динамике облака и процену кинетичке енергије избациваног материјала. На овај начин је било могуће квантификовати енергију која се не задржава у пројектилу и мети, већ одлази у облику „облака” и „удара”, што иначе није могуће добити класичним механичким мерењем.

Поређењем прорачунатих и експерименталних вредности показало се да постоји добро поклапање код крупног песка, што је последица величине зрна која омогућава јасно дефинисану запремину избациваног материјала. Са друге стране, код песка за мачке и ситног песка јављају се већа одступања. Разлог није у одређивању запремине, која се може прецизно измерити, већ у немогућности да се довољно тачно одреди брзина честица услед њихове дисперзије и сложених путања. То доводи до несигурности у прорачуну кинетичке енергије и узрокује уочена одступања.

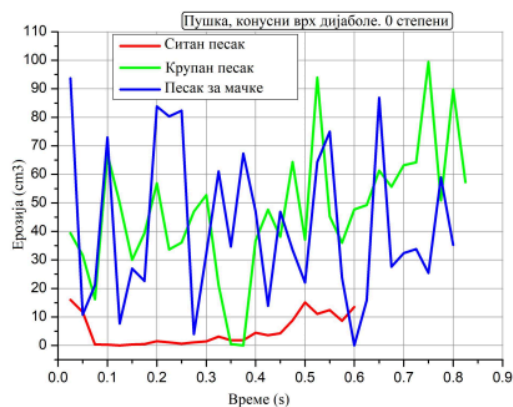
Потребно је нагласити и да је снимање вршено обичним фотоапаратом са фреквенцијом од 40 слика у секунди, што је релативно мало за овако брзе појаве. Због тога добијени резултати представљају апроксимацију засновану на просечној брзини зрна, док реална

дисперзија брзина остаје недовољно обухваћена. Упркос том ограничењу, експеримент оправдава примену оптичких метода у балистичким истраживањима дисипације енергије, а будућа унапређења у смислу коришћења брзих камера омогућила би још прецизније мерење и бољи увид у механизме расипања енергије.

На дијаграмима са слика 6.15 и 6.16 приказана је акумулација „ерозије”, запремине песка која се трајно помера и урушава након иницијалног удара дијаболе, за случај гађања из ваздушне пушке под углом од  $0^\circ$ . Анализиран је различит облик врха дијаболе (раван и конусни), као и три типа песка: крупан, ситан и песок за мачке. Ерозија је изражена у  $\text{cm}^3$ , а време у секундама од момента удара.



Слика 6.15 Приказ дијаграма акумулације ерозије гранулата у функцији времена приликом гађања из ваздушне пушке дијаболом са равним врхом и углом гађања од  $0^\circ$



Слика 6.16 Приказ дијаграма акумулације ерозије гранулата у функцији времена приликом гађања из ваздушне пушке дијаболом са конусним врхом и углом гађања од  $0^\circ$

На дијаграмима са слика 6.15 и 6.16 приказана је динамика „ерозије”, запремине песка која се трајно помера и урушава након иницијалног удара дијаболе у мету, за случај гађања из ваздушне пушке под углом од  $0^\circ$ . Анализирани су равни и конусни врх дијаболе, као и три типа песка (крупан, ситан и песок за мачке).

Код дијаболе са конусним врхом (слика 6.16), резултати показују нешто другачију динамику. Песак за мачке у овом случају достиже највише иницијалне вредности око  $90\text{cm}^3$ , али са снажним осцилацијама у току процеса, што указује на нестабилнији механизам урушавања. Крупан песок достиже стабилне и дуготрајне вредности, често преко  $100\text{cm}^3$ , што потврђује његову улогу као најјачег дисипативног медијума. Ситан песок и даље остаје на најнижој линији око  $10\text{-}15\text{cm}^3$ , без значајнијих промена.

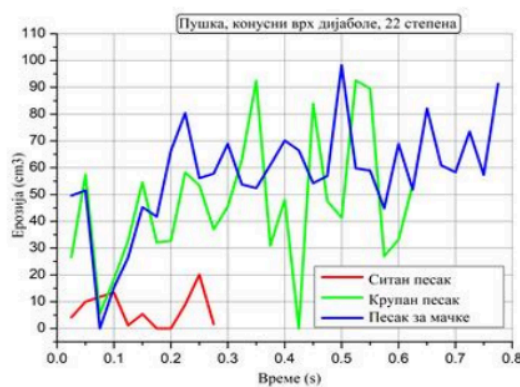
Упоредна анализа показује да енергија садржана у ерозији, за разлику од енергије која је садржана у облаку и удару и која одговара енергији сабијања  $E_1$ , представља

трансформацију потенцијалне енергије зрна песка у кинетичку енергију која изазива покретање песка и попуњавање настале рупе од удара пројектила у песок. Код угла од  $0^\circ$ , највеће разлике уочавају се између крупног и ситног песка, док песок за мачке има средњи и често нестабилнији одзив.

На дијаграмима са слика 6.17 и 6.18 приказана је акумулација „ерозије”, трајно померања и урушавања песка након удара дијаболе, за случај гађања из ваздушне пушке под углом од  $22^\circ$ . Анализирани су различити облици врха дијаболе (раван и конусни) и три типа песка: крупан, ситан и песок за мачке. Ерозија је изражена у  $\text{cm}^3$ , а време у секундама од момента удара.



Слика 6.17 Преказ дијаграма акумулације ерозије гранулата у функцији времена приликом гађања из ваздушне пушке дијаболом са равним врхом и углом гађања од  $22^\circ$



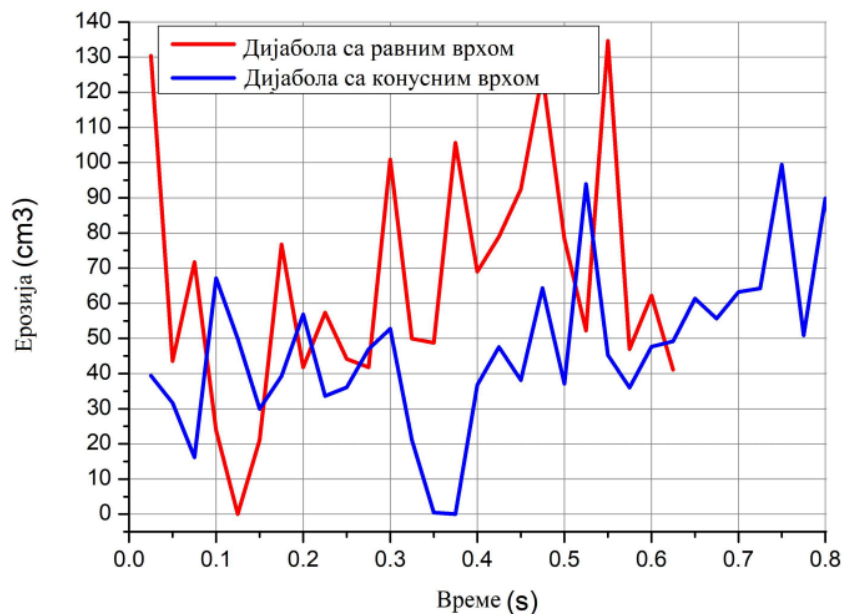
6.18 Приказ дијаграма акумулације ерозије гранулата у функцији времена приликом гађања из ваздушне пушке дијаболом са конусним врхом и углом гађања од  $22^\circ$

На дијаграмима са слика 6.17. и 6.18 приказана је временска промена ерозије, запремине песка која се трајно дислоцира и урушава након удара пројектила, за случај гађања из ваздушне пушке под углом од  $22^\circ$ . Анализирани су различити облици врха дијаболе (раван и конусни) и три типа песка (крупан, ситан и песок за мачке).

У случају дијаболе са равним врхом (слика 6.17), крупан песок (зелена крива) и даље бележи највеће вредности ерозије, са максимумима изнад  $130\text{cm}^3$ , али уз наглашене осцилације током времена. Ова појава упућује на то да коси удар ствара сложеније механизме урушавања у структури. Песак за мачке (плава крива) заузима средњу позицију, са вредностима у распону  $40\text{-}90\text{cm}^3$ , уз честе флукуације које одражавају нестабилнији процес дисипације. Ситан песок (црвена крива) задржава најмање вредности, до око  $20\text{-}30\text{cm}^3$ , али показује блажи раст у каснијим фазама, што је последица ограничене, али ипак постојеће способности за трајно померање зрна.

Код дијаболе са конусним врхом (слика 6.18), резултати показују другачији однос. Песак за мачке достиже највеће вредности ерозије око  $90\text{cm}^3$ , са стабилнијим трендом у односу на равни врх. Крупан песак показује умерене вредности, углавном између  $50$  и  $90\text{cm}^3$ , али са изразитим осцилацијама и падовима, што указује на неуједначен процес урушавања при косом дејству. Ситан песак и у овом случају остаје на најнижој линији до  $20\text{cm}^3$ , потврђујући ограничени капацитет дисипације енергије. Упоредна анализа показује да угао од  $22^\circ$  у односу на  $0^\circ$  доводи до веће нестабилности у току ерозије, са учесталијим флукуацијама код свих типова песка. Раван врх наглашава разлике између крупног и ситног песка, док конусни врх омогућава песку за мачке да преузме доминантну улогу. У свим случајевима ситан песак остаје најмање подложен ерозији, што потврђује да је његова мономодална и компактна структура фактор који ограничава трајне дислокације.

На дијаграму са слике 6.19 приказан је утицај облика врха дијаболе на акумулацију ерозије приликом гађања у мету од крупног песка. представља трајно померање и урушавање зрна након удара.



Дијаграм 6.19 Зависност акумулације ерозије у функцији времена при гађању у крупан песак дијаболама са равним и конусним врхом

Дијабола са равним врхом (црвена крива) показује веома високе и изразито осцилирајуће вредности ерозије, са максимумима који достижу преко  $130\text{cm}^3$ . Ово указује на снажан иницијални утицај и нестабилнији процес урушавања, при чему долази до наглих промена у дислокацији материјала. Насупрот томе, дијабола са конусним врхом (плава крива) бележи умереније вредности, до око  $90\text{--}100\text{cm}^3$ , али са

стабилнијим током и мање наглим скоковима. Такав облик врха омогућава постепеније преношење енергије и равномернији процес ерозије.

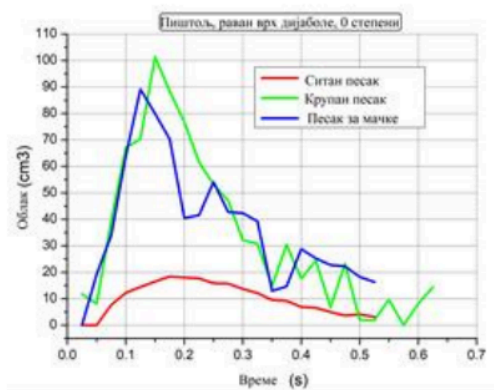
Равни врх дијаболе у крупном песку доводи до већих и нестабилнијих вредности ерозије, док конусни врх показује стабилнији и равномернији ток.

На основу анализе резултата може се уочити да угао гађања ( $0^\circ$  и  $22^\circ$ ) не игра пресудну улогу у укупној дисипацији енергије. Иако се јављају извесне разлике у динамици облака и ерозије, оне нису довољно значајне да би се угао посебно разматрао као доминантан параметар. Стога је у даљој анализи акценат стављен на врсту песка и облик врха дијаболе као факторе који суштински одређују механизам преноса енергије.

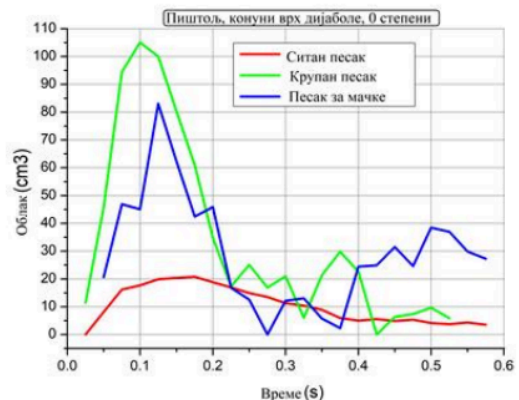
Упоредна анализа дијаграма за угао  $0^\circ$  и  $22^\circ$  показује да се код облака јављају нешто веће почетне вредности при гађању под нултим углом, док гађање под углом  $22^\circ$  доводи до равномернијег и распршенијег развоја облака. Слично томе, код ерозије се на  $22^\circ$  јављају чешће осцилације, али је редослед по дисипативној способности пескова остао непромењен. Код удара се на  $22^\circ$  јављају „развученије” криве и каснији максимуми, али без промене у хијерархији материјала. Из ових разлога може се закључити да угао дејства утиче на динамику процеса, али не и на коначни распоред и релативну оцену дисипативних способности.

Нови допринос овог истраживања огледа се у томе што је први пут омогућена систематска процена дисипативне способности различитих песковитих структура на основу више индикатора и то: облака, удара и ерозије. У овом истраживању тај ефекат је квантификован прорачуном енергије сабијања  $E_1$ , што омогућава прецизнији избор оптималног материјала за заштиту од продора.

На дијаграмима са слика 6.20 и 6.21 приказана је временска промена запремине „облака” приликом гађања из ваздушног пиштоља под углом од  $0^\circ$  за случај гађања дијаболом са равним и конусним врхом у три врсте песка: крупан, ситан и песак за мачке. Запремина облака је изражена у  $\text{cm}^3$ , а време у секундама од момента удара.



Дијаграм 6.20 Промена запремине облака честица у функцији времена приликом гађања из ваздушног пиштоља дијаболом са равним врхом и углом гађања од 22°



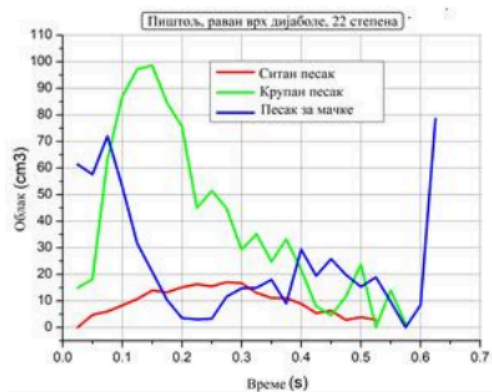
Дијаграм 6.21 Промена запремине облака честица у функцији времена приликом гађања из ваздушног пиштоља дијаболом са конусним врхом и углом гађања од 22°

У случају дијаболе са равним врхом (слика 6.20), уочава се да крупан песок (зелена крива) постиже највеће вредности облака, са максимумом од око  $100\text{cm}^3$  у првих  $0,15\text{s}$ , што указује на брзу и снажну дисперзију зрна у иницијалној фази удара. Песак за мачке (плава крива) показује сличан карактер, са врхом нешто испод  $90\text{cm}^3$ , али са израженијим падовима и локалним осцилацијама које указују на нестабилније кретање подигнутог материјала. Ситан песок (црвена крива) бележи најниже вредности, са максимумом од око  $15\text{-}20\text{cm}^3$ , што је последица његове компактне структуре и већег степена паковања.

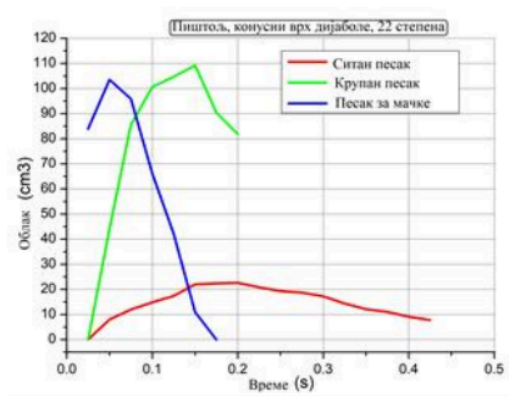
Код дијаболе са конусним врхом (слика 6.21), карактер облака је измењен. Крупан песок поново остварује највећи максимум, нешто изнад  $100\text{cm}^3$ , али у ранијој фази (око  $0,02\text{-}0,1\text{s}$ ). Песак за мачке достиже вредности од  $80\text{-}85\text{cm}^3$ , али са наглашеним краткотрајним врхом и бржим падом у односу на крупан песок. Ситан песок и у овом случају остаје на нижим вредностима око  $15\text{cm}^3$ , без већих одступања.

Упоредна анализа резултата за пиштољ показује да облик врха дијаболе утиче на динамику формирања облака: равни врх доводи до постепенијег пораста и дужег трајања облака код крупног песка, док конусни врх генерише оштрији и временски концентрисанији одзив. У оба случаја, ситан песок показује најнижи ниво дисперзије, што је у складу са његовим физичким карактеристикама.

На дијаграмима са слика 6.22 и 6.22 приказана је временска промена запремине „облака” приликом гађања из ваздушног пиштоља под углом од  $22^\circ$  за два различита облика врха дијаболе (раван и конусни). Анализирана су три типа песка: крупан, ситан и песок за мачке.



Слика 6.22 Дијаграм промене запремине облака честица у функцији времена приликом гађања из ваздушног пиштоља дијаболом са равним врхом и углом гађања од 22°



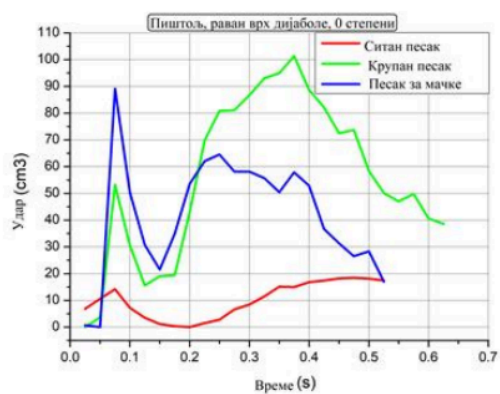
Слика 6.23 Дијаграм промене запремине облака честица у функцији времена приликом гађања из ваздушног пиштоља дијаболом са конусним врхом и углом гађања од 22°

У случају дијаболе са равним врхом (слика 6.22), уочава се да крупан песок (зелена крива) бележи највеће вредности, са врхом близу  $100\text{cm}^3$  у првих 0,15-0,2s, након чега следи постепено опадање. Песак за мачке (плава крива) достиже око  $70\text{cm}^3$  у почетној фази, али затим бележи оштар пад и нестабилнији ток са израженим осцилацијама. Ситан песок (црвена крива) остаје на најнижој скали, са максимумом од свега  $15\text{cm}^3$  и релативно равномерним током.

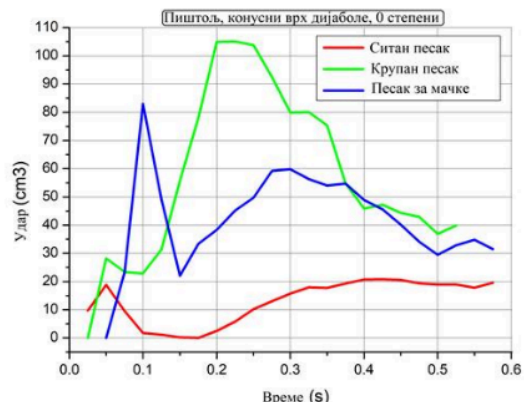
Код дијаболе са конусним врхом (слика 6.23), доминирајућа дисперзија се јавља код крупног песка и песка за мачке, при чему оба гранулата достижу врхунце од преко  $100\text{cm}^3$  у врло кратком временском интервалу (0,05-0,15s). За разлику од равног врха, облак је овде изразито краткотрајан, што указује на нагли иницијални одзив и брзо смиривање структуре. Ситан песок поново остаје на најнижим вредностима до  $20\text{cm}^3$ , што потврђује да због густог паковања и fine гранулације има најслабију реакцију на удар.

Упоредна анализа за угао од 22° показује да облик врха дијаболе снажно утиче на динамику облака: равни врх обезбеђује дуже трајање облака са умеренијим падом, док конусни врх производи краткотрајну али интензивнију дисперзију. И у овим условима ситан песок задржава најнижи одзив, док крупан песок и песок за мачке доминирају у различитим фазама.

На дијаграмима са слика 6.24 и 6.25 приказана је временска промена интензитета „удара“ при гађању из ваздушног пиштоља под углом од 0°, и то за случај дијаболе са равним и конусним врхом, за случај гађања у три типа песка: крупан, ситан и песок за мачке. Вредности удара су изражене у  $\text{cm}^3$ , а време у секундама од момента поготка.



Слика 6.24 Дијаграм промене запремине удара у функцији времена приликом гађања из ваздушног пиштоља дијаболом са равним врхом и углом гађања од  $0^\circ$



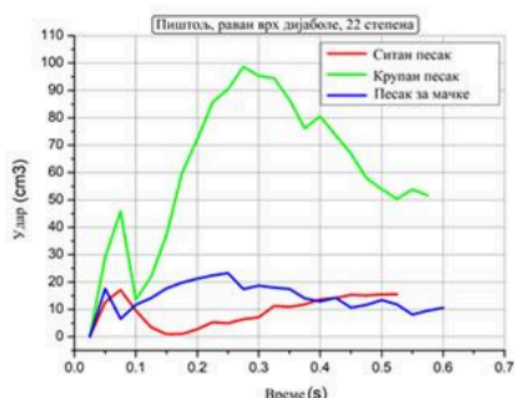
Слика 6.25 Дијаграм промене запремине удара у функцији времена приликом гађања из ваздушног пиштоља дијаболом са конусним врхом и углом гађања од  $0^\circ$

У случају дијаболе са равним врхом (слика 6.24), најбржи одзив бележи песак за мачке (плава крива), са наглим скоком до вредности око  $90\text{cm}^3$  у првих  $0,07\text{s}$ , након чега следи пад и стабилизација у распону  $50\text{-}60\text{ cm}^3$ . Крупан песак (зелена крива) показује постепенији пораст са максимумом од око  $100\text{cm}^3$  у периоду око  $0,4\text{ s}$ , што указује на трајније и продужено дисипирање енергије. Ситан песак (црвена крива) има најниже вредности, са максимумом до  $15\text{cm}^3$  и релативно уједначеним током.

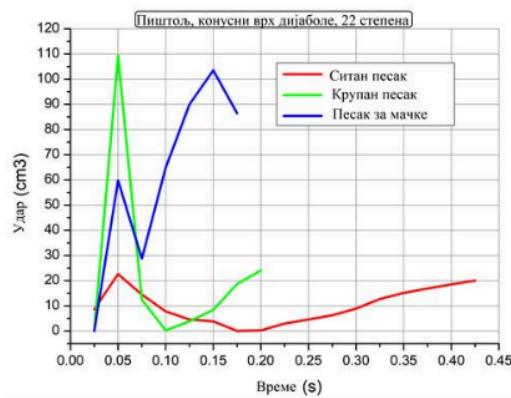
Код дијаболе са конусним врхом (слика 6.25), крупан песак показује доминантнији одзив у односу на остале гранулате, достижући вредности преко  $100\text{cm}^3$ , са израженим максимумом око  $0,2\text{ s}$ . Песак за мачке бележи оштар иницијални врх од преко  $80\text{cm}^3$  у првих  $0,08\text{ s}$ , али затим бележи нагли пад и стабилизацију на нижем нивоу  $40\text{-}60\text{ cm}^3$ . Ситан песак поново остаје најслабији, са максимумом до  $20\text{ cm}^3$ .

Упоредна анализа показује да код пиштоља доминантну улогу у интензитету удара имају крупан песак и песак за мачке, али са различитим динамичким карактером: крупан песак има постепенији и продуженији одзив, док песак за мачке бележи нагли скок и брзу стабилизацију. Ситан песак је и овде најинертнији материјал, са најнижом способношћу преноса енергије.

На дијаграмима са слика 6.26 и 6.27 приказана је временска промена интензитета удара приликом гађања из ваздушног пиштоља под углом од  $22^\circ$  за дијаболу са равним и конусним врхом. Анализирана су три типа песка: крупан, ситан и песак за мачке.



Слика 6.26 Дијаграм промене запремине удара у функцији времена приликом гађања из ваздушног пиштоља дијаболом са равним врхом и углом гађања од 22°



Слика 6.27 Дијаграм промене запремине удара у функцији времена приликом гађања из ваздушног пиштоља дијаболом са конусним врхом и углом гађања од 22°

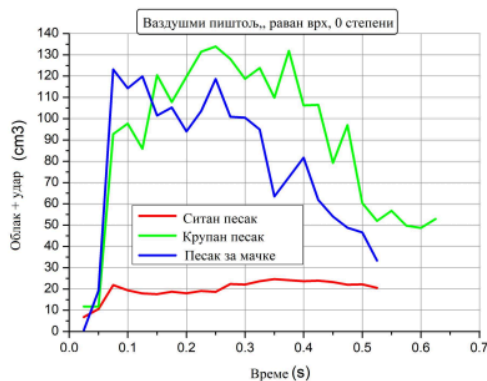
У случају дијаболе са равним врхом (слика 6.26), највећи одзив бележи крупан песак (зелена крива) са израженим порастом и максимумом од око 100cm<sup>3</sup> у интервалу од 0,25-0,3s. Песак за мачке (плава крива) има умереније вредности, са максимумом око 25cm<sup>3</sup> и релативно стабилним током. Ситан песак (црвена крива) остаје на најнижем нивоу до 15cm<sup>3</sup>, са постепеним и уједначеним порастом без наглих скокова.

Код дијаболе са конусним врхом (слика 6.27), уочава се потпуно другачија динамика: песак за мачке (плава крива) достиже нагли максимум од преко 100cm<sup>3</sup> већ у првих 0,15s, након чега следи нагли пад. Крупан песак (зелена крива) има краткотрајни врх око 110cm<sup>3</sup> у првих 0,05s, али се врло брзо стабилизује на нижим вредностима. Ситан песак (црвена крива) поново има најниже вредности, до 20cm<sup>3</sup>, са постепеним и стабилним порастом без изражене динамике.

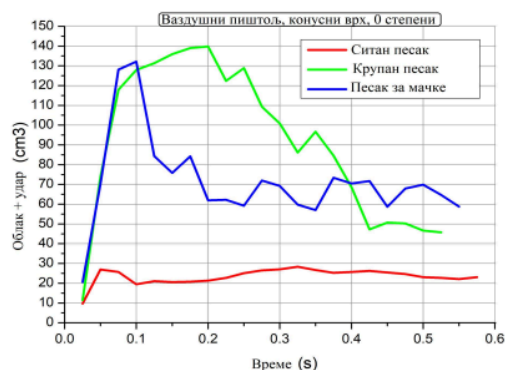
Упоредна анализа показује да код угла од 22° конусни врх дијаболе изазива краткотрајне али врло интензивне максимуме удара, посебно код песка за мачке и крупног песка. Насупрот томе, равни врх доводи до стабилнијег и продуженијег развоја удара, са доминацијом крупног песка. У оба случаја ситан песак остаје материјал са најнижом реактивношћу.

На сликама 6.27–6.30 приказани су збирни дијаграми промене запремине облака и удара у функцији времена за дејство ваздушног пиштоља у различитим условима. Дијаграми обухватају комбинације два облика врха дијаболе (раван и конусни) и два угла гађања (0° и 22°).

Слике 6.27 и 6.28 приказују утицај облика врха дијаболе (конични и равни) на промену запремине облака и удара у функцији времена при гађању из ваздушног пиштоља под углом од  $0^\circ$ . У оба случаја највеће вредности бележи крупан песак, док је ситан песак најмање реаговао, са стабилним и ниским вредностима. Песак за мачке у оба експеримента показује средње, али динамичније одзиве са флукуацијама.



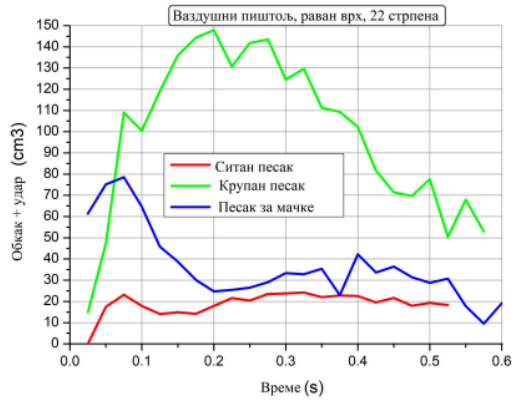
Слика 6.27 Дијаграм промене запремине облака и удара у функцији времена приликом гађања из ваздушног пиштоља дијаболом са равним врхом и углом гађања од  $0^\circ$



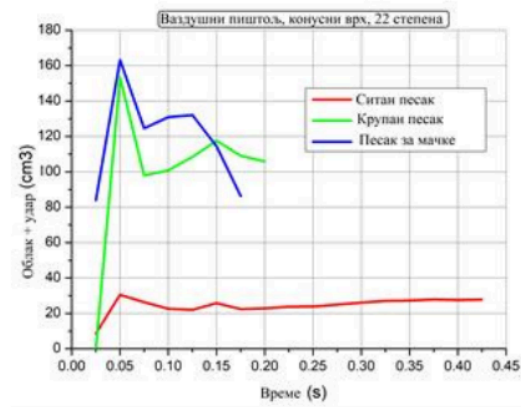
Слика 6.28 Дијаграм промене запремине облака и удара у функцији времена приликом гађања из ваздушног пиштоља дијаболом са конусним врхом и углом гађања од  $0^\circ$

Поређењем два облика врха уочава се да равни врх (слика 6.27) производи нешто наглији почетни раст и израженије максимуме код крупног песка, док конусни врх (слика 6.28) доводи до умеренијег и равномернијег одговора без великих осцилација. Ово упућује на закључак да облик врха дијаболе значајно утиче на иницијалну дисипацију енергије: конични врх концентрише енергију у дубљим слојевима и даје наглије максимуме, док равни врх распоређује енергију равномерније у почетној зони удара.

На сликама 6.29 и 6.30 приказани су дијаграми промене запремине облака и удара у функцији времена приликом гађања из ваздушног пиштоља под углом од  $22^\circ$ . Анализа обухвата два облика дијаболе: са равним и са конусним врхом и три врсте песка различите гранулације. Циљ је да се испита утицај облика врха дијаболе и структуре гранулата на иницијално дисипирање енергије у условима косог удара.



Слика 6.29 Дијаграм промене запремине облака и удара у функцији времена приликом гађања из ваздушног пиштоља дијаболом са равним врхом и углом гађања од  $22^\circ$



Слика 6.30 Дијаграм промене запремине облака и удара у функцији времена приликом гађања из ваздушног пиштоља дијаболом са конусним врхом и углом гађања од  $22^\circ$

Оно што се може видети са дијаграма 6.29 и 6.30 је да:

- равни врх доводи до стабилнијег и постепеног процеса, где је крупан песак најосетљивији,
- конусни врх производи наглије и динамичније ослобађање енергије, са јасним максимумом код песка за мачке и
- Ови резултати указују на значајну улогу облика врха дијаболе у условима косог удара, где се механизам дисипације енергије прилагођава структури песка.

Експериментални резултати добијени оптичком анализом (просечне брзине и запремине избаченог, сабијеног и разлетелог песка) проверени су на исти начин и упоређени са прорачунатим вредностима енергетског биланса за случај ваздушног пиштоља. У табели 6.3 дат је приказ прорачунате енергије сабијања  $E_1$  и енергије добијене на основу енергије удара и облака  $E_{exp}$  на основу експерименталних података.

Табела 6.3 Приказ прорачунате енергије сабијања  $E_1$  и енергије добијене на основу енергије удара и облака  $E_{exp}$  на основу експерименталних података.

Врста ваздушног наоружања	Песак	$\alpha$ [°]	$v_0$ [m/s]	$v_{15}$ [m/s]	$V$ [m³]	$v_z$ [m/s]	$\rho$ [kg/m³]	$E_1$ [J]	$E_{exp}$ [J]
STEYR LP 10	Крупан	0	160	145	0,134	1,830	1770	0,470	0,395

Где је:

$\alpha$  – угао дејства,

$v_0$  – почетна брзина дијаболе,

$v_{15}$  – брзина дијаболе наком 15m,

$V$  - запремина избаченог и сабијеног песка [m<sup>3</sup>],

$v_z$  - просечна брзина зрна песка [m/s],

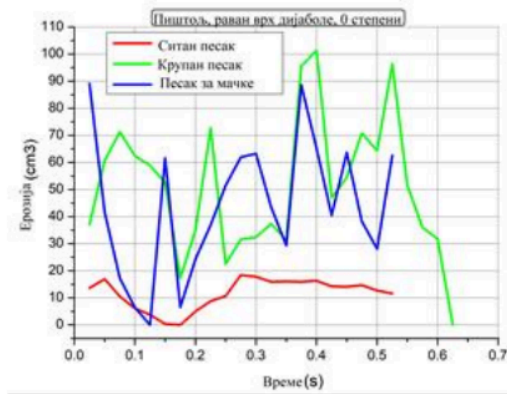
$\rho$  - густина песка,

$E_1$  - енергија сабијања,

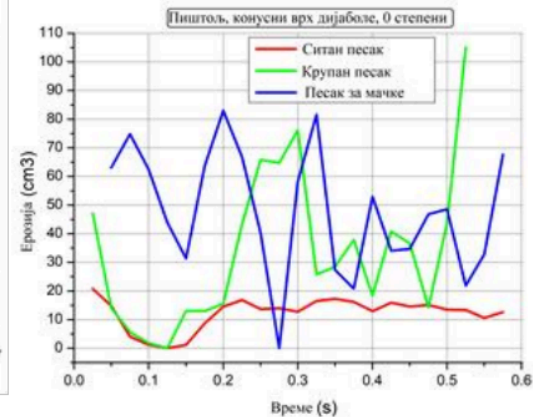
$E_{\text{exp}}$  - експериментано измерена вредност енергије облака и удара.

Као и за случај гађања из ваздушне пушке и овде је уочљиво подударење прорачунате енергије сабијања са експерименталним вредностима добијене енергије за облак и удар, енергије која се утроши сабијање, избацавање и разлетање песка.

На дијаграмима са слика 6.31 и 6.32 приказана је временска промена запремине ерозије приликом гађања из ваздушног пиштоља под углом од 0° за два различита облика врха дијаболе (раван и конусни). Анализирана су три типа песка: крупан, ситан и песок за мачке. Запремина ерозије је изражена у cm<sup>3</sup>, а време у секундама од момента удара.



Слика 6.31 Дијаграм акумулације ерозије гранулата у функцији времена приликом гађања из ваздушног пиштоља дијаболом са равним врхом и углом гађања од 0°



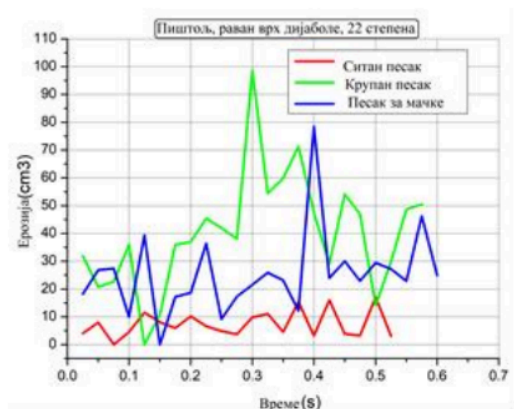
Слика 6.32 Дијаграм акумулације ерозије гранулата у функцији времена приликом гађања из ваздушног пиштоља дијаболом са конусним врхом и углом гађања од 0°

У случају дијаболе са равним врхом (слика 6.31), најизраженије вредности бележи крупан песок (зелена крива), са врхунцем око 100cm<sup>3</sup> у интервалу од око 0,35-0,4s. Песак за мачке (плава крива) показује нестабилнији ток, са великим осцилацијама у распону од 30 до 90cm<sup>3</sup>, што указује на динамичније кретање зрна унутар мете. Ситан песок (црвена крива) остаје на најнижој скали, до 20cm<sup>3</sup>, са релативно равномерним током.

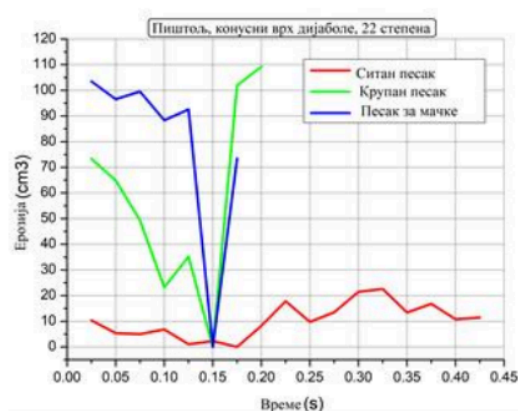
Код дијаболе са конусним врхом (слика 6.32), карактер ерозије је другачији: крупан песак има вишеструке локалне врхунце у распону од 40 до преко 100cm<sup>3</sup>, док песак за мачке бележи снажне осцилације са честим наглим порастима и падовима у интервалу 30-80cm<sup>3</sup>. Ситан песак поново бележи најниже вредности око 10-20 cm<sup>3</sup>, без значајних одступања.

Упоредна анализа за угао 0° показује да је ерозија код пиштоља најизраженија у случају крупног песка и песка за мачке, док ситан песак има стабилно ниске вредности. Разлика између равног и конусног врха огледа се у динамици, раван врх даје нешто уједначенији развој ерозије, док конусни врх изазива нестабилније кретање песка и чешће осцилације.

На дијаграмима са слика 6.33 и 6.34 приказана је временска промена запремине ерозије приликом гађања из ваздушног пиштоља под углом од 22° за дијаболу са равним и конусним врхом. Анализирана су три типа песка: крупан, ситан и песак за мачке.



Слика 6.33 Дијаграм акумулације ерозије гранулата у функцији времена приликом гађања из ваздушног пиштоља дијаболом са равним врхом и углом гађања од 22°



Слика 6.34 Дијаграм акумулације ерозије гранулата у функцији времена приликом гађања из ваздушног пиштоља дијаболом са конусним врхом и углом гађања од 22°

У случају дијаболе са равним врхом (слика 6.33), највећи одзив бележи крупан песак (зелена крива), са израженим максимумом од близу 100cm<sup>3</sup> у интервалу око 0,3s. Песак за мачке (плава крива) показује снажне осцилације у распону 20-80cm<sup>3</sup>, са наглим скоковима и падовима што указује на нестабилно кретање материјала. Ситан песак (црвена крива) има најниже вредности, до 15cm<sup>3</sup>, са релативно равномерним током.

Код дијаболе са конусним врхом (слика 6.34), уочава се изразито краткотрајан али снажан одзив код песка за мачке и крупног песка. Песак за мачке достиже преко 100cm<sup>3</sup>

у првих 0,05-0,1s, након чега нагло опада, док крупан песак има два врха, и то: један рани максимум око  $70\text{cm}^3$  и један каснији близу  $110\text{cm}^3$ . Ситан песак остаје стабилно на најнижем нивоу до  $20\text{cm}^3$ .

Упоредна анализа показује да код угла од  $22^\circ$  ерозија има динамичнији и нестабилнији ток у односу на угао од  $0^\circ$ . Конусни врх дијаболе доводи до наглих и снажних максимума ерозије, посебно код песка за мачке и крупног песка, док раван врх производи постепенији и уједначенији развој са мање израженим осцилацијама. Ситан песак је и овде најинертнији материјал са ниским вредностима.

Анализа резултата добијених за облак, удар и ерозију показује да ваздушни пиштољ има другачији динамички карактер у односу на ваздушну пушку. За све параметре, облак, удар и ерозију уочене су ниже максималне вредности у поређењу са пушком, али са специфичностима које га чине препознатљивим.

Облак генерише облак мањег интензитета у односу на пушку, са максимумима у распону од  $90-100\text{cm}^3$ . Облик врха дијаболе знатно утиче, равни врх даје постепенији раст и умереније вредности, док конусни врх производи наглије и краткотрајније максимуме. Ситан песак у свим случајевима остаје најинертнији, док крупан песак и песак за мачке доминирају у различитим фазама.

Код удара се бележи умеренији интензитет у односу на пушку, са максимумима око  $100\text{cm}^3$ . Карактеристично је да код удара крупан песак показује трајнији одзив, док песак за мачке често бележи нагле и краткотрајне пикове. Ситан песак, као и у случају облака, има најниже вредности и најстабилнији ток.

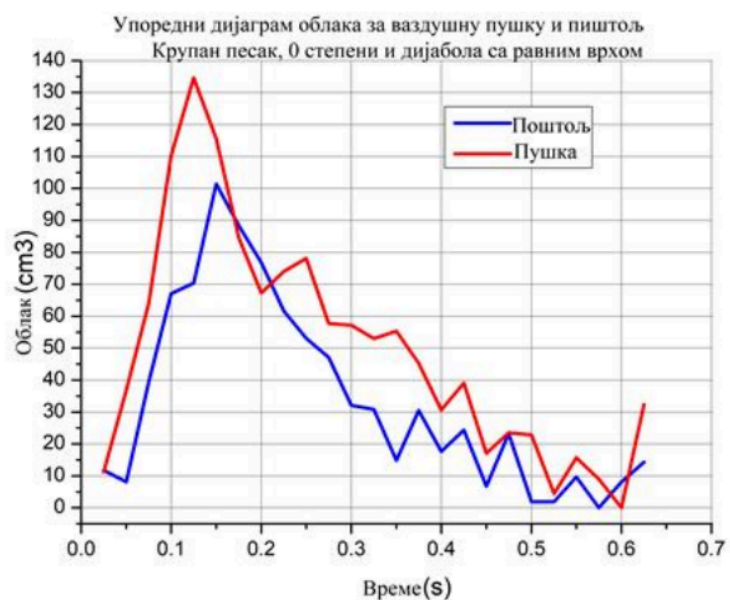
Ваздушни пиштољ производи ерозију нижег интензитета у односу на пушку, углавном у распону од  $30-90\text{cm}^3$ , са мање израженим амплитудама. Код равног врха ерозија је стабилнија, док код конусног врха има више осцилација, али и даље без достизања екстремних вредности које су забележене код пушке.

Ваздушни пиштољ има мањи енергетски потенцијал у односу на пушку, што се огледа у нижим вршним вредностима облака, удара и ерозије. Док пушка показује снажније и наглије дисперзије, пиштољ генерише умереније и контролисаније одзиве, што га сврстава у категорију оружја са мањим али равномернијим утицајем на гранулат.

Након приказаних резултата за појединачне случајеве гађања из ваздушне пушке и ваздушног пиштоља, у наставку је дата упоредна анализа ради сагледавања разлика у понашању ова два типа оружја под истим условима. Циљ је да се директним поређењем прикаже динамика формирања облака приликом гађања у мету од крупног песка дијаболом са равним врхом под углом од  $0^\circ$ .

На слици 6.35 приказан је дијаграм који приказује упоредну промену запремине облака честица у функцији времена приликом гађања из ваздушне пушке и ваздушног

пиштоља дијаболом са равним врхом у условима мете од крупног песка и углом гађања од  $0^\circ$ . Уочава се да ваздушна пушка (црвена крива) генерише већи облак, са максимумом од око  $135\text{cm}^3$  у првих  $0,12\text{s}$ , што указује на снажан иницијални импулс и брзу дисперзију зрна. Ваздушни пиштољ (плава крива) бележи мањи максимум, нешто изнад  $100\text{cm}^3$ , уз постепеније опадање и мање секундарне осцилације.



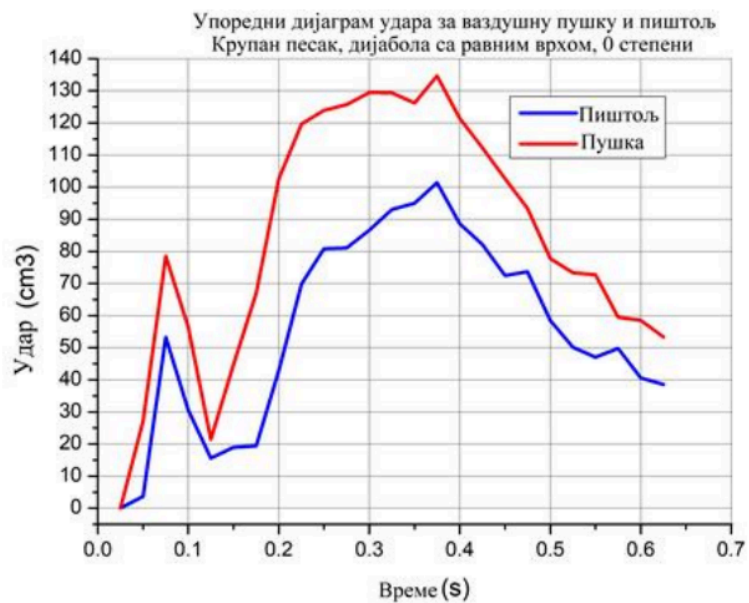
Слика 6.35 Упоредни дијаграм промена запремине облака честица у функцији времена приликом гађања из ваздушне пушке и ваздушног пиштоља дијаболом са равним врхом у условима гађања у мету од крупног песка и углом гађања од  $0^\circ$

Упоредна анализа показује да пушка (црвена крива) ствара израженији иницијални облак честица са већом вршном вредношћу, али и са бржим падом након максимума. Пиштољ (плава крива), иако достиже ниже вршне вредности, одликује се умеренијом динамиком. Ови резултати указују на разлике у енергетском потенцијалу две врсте оружја и њиховој способности преноса импулса на гранулат при истим условима гађања.

Након анализе формирања облака честица, у наставку је дата упоредна анализа интензитета удара приликом гађања из ваздушне пушке и ваздушног пиштоља. Циљ је да се покаже разлика у динамици преноса енергије са пројектила на мету у условима истог материјала и под истим углом дејства.

На слици 6.36 приказан је дијаграм који приказује упоредну промену интензитета удара у функцији времена приликом гађања из ваздушне пушке и ваздушног пиштоља дијаболом са равним врхом у условима мете од крупног песка и углом гађања од  $0^\circ$ . Видљиво је да ваздушна пушка (црвена крива) бележи изражено веће вредности удара,

са врхунцем од преко  $130\text{cm}^3$  око  $0,35\text{-}0,4\text{s}$ , што указује на снажнији и трајнији пренос енергије. Ваздушни пиштољ (плава крива) достиже максимум нешто изнад  $100\text{cm}^3$ .

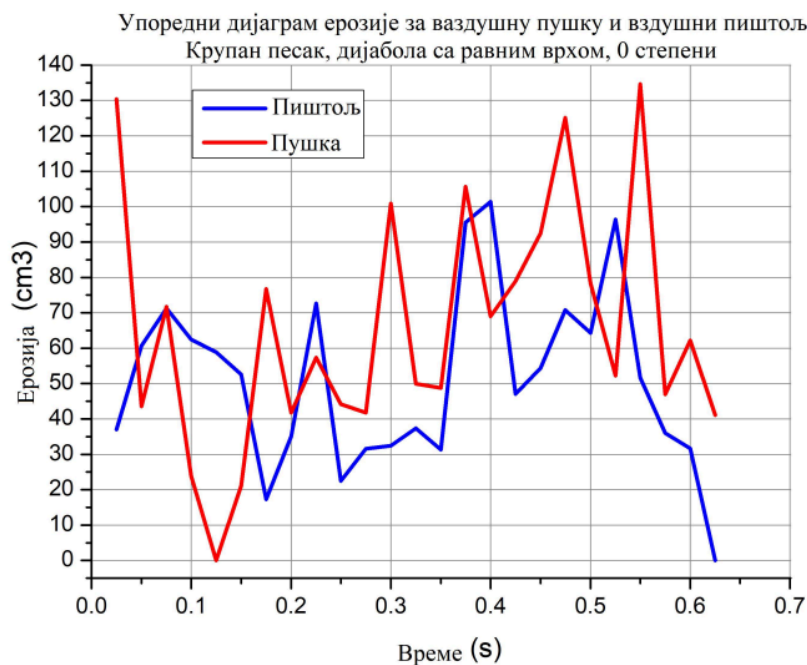


Слика 6.36 Упоредни дијаграм промене интензитета удара у функцији времена приликом гађања из ваздушне пушке и ваздушног пиштоља дијаболом са равним врхом у условима мете од крупног песка и углом гађања од  $0^\circ$

Упоредна анализа показује да пушка (црвена крива) има већи интензитет удара у односу на пиштољ (плава крива), чије су вредности умереније. Разлика у облику и трајању кривих јасно указује на већи енергетски потенцијал пушке и њену способност дубљег преноса импулса у структури гранулата, док се код пиштоља уочава бржа дисипација и краће задржавање енергије у зони удара.

Да би се сагледала разлика у динамици ерозије између ваздушне пушке и ваздушног пиштоља, приказан је упоредни дијаграм. На овај начин омогућено је директно поређење деловања различитих извора енергије на мету од истог материјала и под истим условима гађања.

Дијаграм 6.37 приказује упоредну промену запремине ерозије у функцији времена приликом гађања из ваздушне пушке и ваздушног пиштоља дијаболом са равним врхом у условима мете од крупног песка и углом гађања од  $0^\circ$ . Уочава се да пушка (црвена крива) постиже веће вредности ерозије, са бројним локалним врхунцима који достижу око  $130\text{cm}^3$ . Пиштољ (плава крива) бележи ниже вредности, углавном у распону од  $20$  до  $100\text{cm}^3$ , али са мање израженим пиковима и нешто равномернијом динамиком.



Слика 6.37 Упоредни дијаграм промене ерозије у функцији времена приликом гађања из ваздушне пушке и ваздушног пиштоља дијаболом са равним врхом у условима мете од крупног песка и углом гађања од 0°

Упоредна анализа показује да пушка има знатно израженију ерозију, са већим амплитудама осцилација и вишим вршним вредностима, што указује на снажније ремећење структуре гранулата. Пиштољ, иако са умеренијим вредностима, показује стабилнији ток са мање наглих промена.

## 6.2 Резултати и анализа резултата испитивања дејства из стрелачког наоружања

У циљу анализе дејства високобрзинских пројектила на различите типове мета, извршена је симулација спољнобалистичког лета метака калибра 7,62mm и 5,56mm на растојању од 30m.

Укупна кинетичка енергија пројектила се у овом случају распоређује на следеће компоненте:

- Енергија пенетрације – улаже се у пробијање мете, значајна код песка и бетона,
- Енергија деформације – утрошена на промену облика пројектила и/или мете,
- Топлотна енергија – резултат трења, сабијања и пластичне деформације,
- Акустична енергија – ослобађа се у облику звука након удара,
- Преостала енергија – енергија коју пројектил задржи након пробијања мете, ако до њега дође, а што зависи од врсте мете.

У току реализације експеримента уочено је да у случају гађања у панцирну плочу, пројектил бива потпуно заустављен, услед чега је енергија пенетрације једнака нули, док се остале компоненте укупне енергије распоређују на деформацију, топлоту и звук. Када је испред плоче постављен слој песка или бетона, одређени део енергије се троши на пенетрацију тог слоја пре удара у саму плочу.

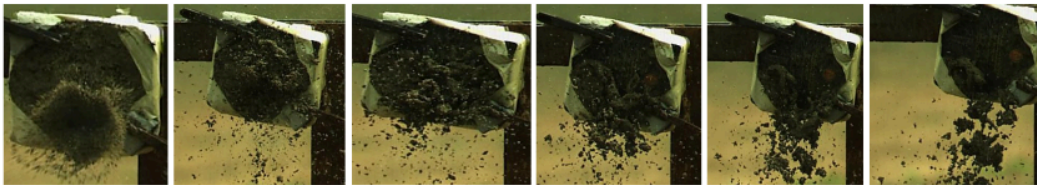
Услови гађања и параметри путање пројектила, који представљају улазне вредности у анализи резултата, приказани су у табели 6.3. Почетна брзина пројектила, као и брзина у тренутку удара у мету, измерене су помоћу Doppler радара модела ED-2605DR, а целокупни подаци су добијени у форми званичног извештаја са стрелишта. Ови параметри су коришћени за тачну реконструкцију кинематике пројектила и као основ за разматрање пренеса енергије у систему.

Табела 6.3 Услови гађања и параметри путање пројектила

Р. Бр.	$V_0$ (m/s)	$V_{30}$ (m/s)	Муниција	Испитивани предмет	Напомена
1	740,2	700,4	7,62mm ОЗ М67 серије ППУ 9401 месингана чаура, барут СБ 515 с. МБЛ 9370	Плоча	
2	765,0	707,6		Плоча	
3	751,1	708,5		Плоча и песак	
4	744,9	704,5		Плоча и бетон	
5	941,9	885,5	5,56mm ОЗ М03 серије ППУ 1701-02 месингана чаура, барут СБ 515 с. МБЛ 171714	Плоча и бетон	Није измерена брзина, узета аритметичка средина за даље испитивање
6	932,7	894,1		Плоча	
7	941,4	895,4		Плоча и песак	
8	941,5	897,3		Плоча и песак	

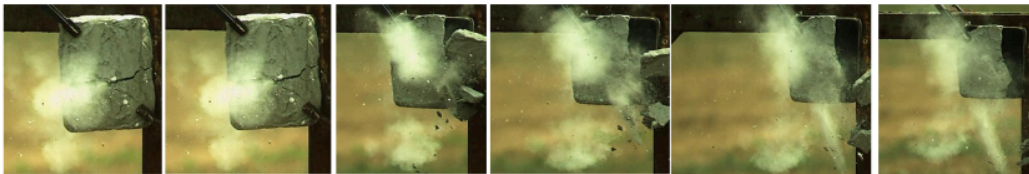
9	955,3	898,9		Плоча и песак	
10	938,7	894,8		Плоча и песак	

На основу добијених видео-записа снимљених ултрабрзом камером Phantom v9.1, уочено је да се готово целокупна грануларна материја (песак) услед велике кинетичке енергије претвара у облак, односно у запремину зрна која се одвајају и подижу у ваздух непосредно након удара пројектила у мету, како је приказано на слици 6.38.



Слика 6.38. Удар пројектила 7,62mm у грануларну материју (фотографија настала у току реализације експеримента)

Такође, запажено је да приликом удара пројектила у панцирну плочу он остаје заробљен у њој, док се у случају удара у бетонску плочу, пројектил пролази кроз њену структуру, а што је приказано на слици 6.39.



Слика 6.39. Удар пројектила 7,62mm у бетонску плочу (фотографија настала у току реализације експеримента)

На основу наведених резултата може се закључити да се у овим експериментима нису развиле сличне појаве као у експериментима са ваздушним наоружањем.

Ипак, појава дисипације енергије може се поузданије тумачити на основу резултата добијених термовизијском камером, која омогућава регистрацију температурних промена у времену и простору као последицу расподеле и губитака енергије унутар мете.

### 6.2.1 Анализа резултата добијених термовизијском камером

Записи добијени термовизијским снимањем обрађени су у лиценцираном софтверу FLIR ResearchIR MAX v4.40 (Teledyne FLIR). Дијаграми 6.40, 6.41 и 6.42 представљају промену температурне разлике у функцији времена након дејства пројектила 7,62mm на различите препреке: панцирну плочу, комбинацију песка и панцирне плоче и бетона и панцирне плоче.

Важно је нагласити да се на свим дијаграмима приказују разлике у температури, јер прецизно мерење апсолутне температуре захтева калибрисану термовизијску камеру и познату емисивност сваког испитиваног материјала, што у овом случају није било могуће обезбедити. Калибрација камере важи одређени временски период после чега се мора вршити поновљена калибрација. На слици 6.40. дат је приказ температурне разлике у зависности од времена при дејству пројектила 7,62mm на панцирну плочу.



Слика 6.40. Приказ температурне разлике у зависности од времена при дејству пројектила 7,62mm на панцирну плочу

Експеримент је изведен са циљем праћења удара пројектила калибра 7,62mm на панцирну плочу. Панцирна лоча се састоји од вишеслојног материјала, коме је језгро израђено од високо проводљиве керамике, док је задњи слој изведен као антитраума структура са функцијом амортизације удара. Бележи се нагли скок температуре од приближно 36 °C у првих 0,5 секунди након удара. Након скока температуре после удара следи брзо опадање температуре на око 15 °C у наредне две секунде, а затим постепена стабилизација на нивоу од око 5 °C изнад почетне вредности у интервалу до 7 секунди. Овај термички профил указује на присуство материјала високе термалне проводљивости у структури плоче, што омогућава ефикасан пренос и расипање топлоте из зоне удара.

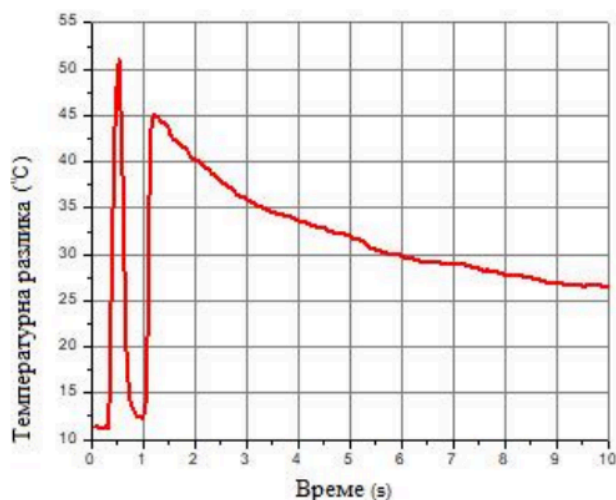
Плоча садржи компоненте попут силицијум-карбида (SiC), чија је термална проводљивост у стандардним условима приближно  $180 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ .

Антитраума слој се састоји од материјала као што је Кевлар са ниском термалном проводљивошћу и служи за апсорпцију механичке енергије удара пројектила, чиме се смањује пренос удара на тело војника. Овај слој не доприноси термичкој дисипацији али је његова улога у заштити кључна. У тренутку удара пројектила, део енергије претвара у топлоту, део у деформацију плоче и пројектила, док остатак може бити пренет кроз структуру у виду механичког удара. Узимајући у обзир да постоји скок температуре те пад, види се да је одређени део енергије дисипиран у облику топлоте.

Са дијаграма се може видети да температурна крива указује на три фазе дисипације енергије:

- Иницијална фаза удара (0–0.5s), тј. нагли скок температуре услед тренутног ослобађања енергије трења и деформације,
- Фаза брзог расипања (0.5–2.5s), тј. динамички пренос топлоте у околни материјал и
- Фаза термичке релаксације (2.5–7s): стабилизација температуре.

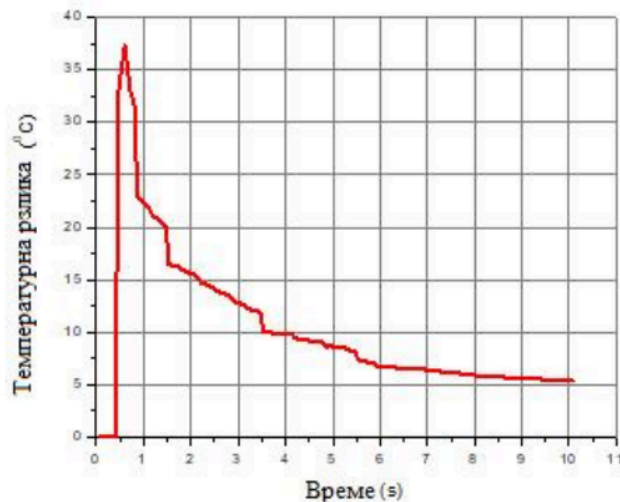
Комбинована структура панцирне плоче омогућава контролисану дисипацију енергије кроз механичке и термичке механизме, чиме се постиже уравнотежен одговор на балистичко оптерећење. На основу тога приступило се анализи дејства пројектила калибра  $7,62\text{mm}$  на вишеслојну плочу са додатим слојем гранулата. На слици 6.41 приказана је темпорална промена температуре у контактної зони након удара пројектила у трослојну гранулатну баријеру (формирана из три слоја песка различите гранулације а по деимензијама приказаним у поглављу 5) постављену испред панцирне плоче, што омогућава јасније сагледавање процеса дисипације енергије и термалног одговора структуре.



Слика 6.41. Темперална промена температуре у контактної зони након удара пројектила 7,62 mm у трослојну гранулатну баријеру постављену испред панцирне плоче

Промена брзине пројектила у тренутку продора кроз грануларну материју указује на делимичан губитак кинетичке енергије већ у почетној фази контакта са песком, што се одмах манифестује као дисипација енергије. Та енергија се распоређује кроз механичку деформацију зрна, стохастичке унутрашње сударе, настанак звука и вибрација, као и кроз појаву топлоте. Температурни дијаграм показује да процес дисипације није једноставан, већ се одвија у две јасно раздвојене фазе. У првој фази, приликом иницијалног продора пројектила у песак, регистрован је краткотрајан температурни скок који достиже приближно 52°C, након чега долази до наглог пада температуре у периоду од око једне секунде. Ова појава одговара брзом ослобађању енергије у самом гранулатном медијуму. У другој фази, након удара пројектила у панцирну плочу, јавља се нови пораст температуре, а потом постепено и знатно спорије хлађење. Разлог за спорију дисипацију у овој фази лежи у томе што слој песка изнад плоче делује као изолатор и успорава пренос топлоте ка околини. Стога се може закључити да је дисипација енергије укупно посматрана кроз два процеса – први, брз и интензиван при контакту са песком, и други, спорији и дуготрајнији, условљен интеракцијом са плочом и ограниченом проводношћу песка.

На слици 6.42 приказана је временска промена температуре у зони дејства пројектила након удара зрна калибра 7,62mm на мету која представља комбинацију бетона и панцирне плоче.

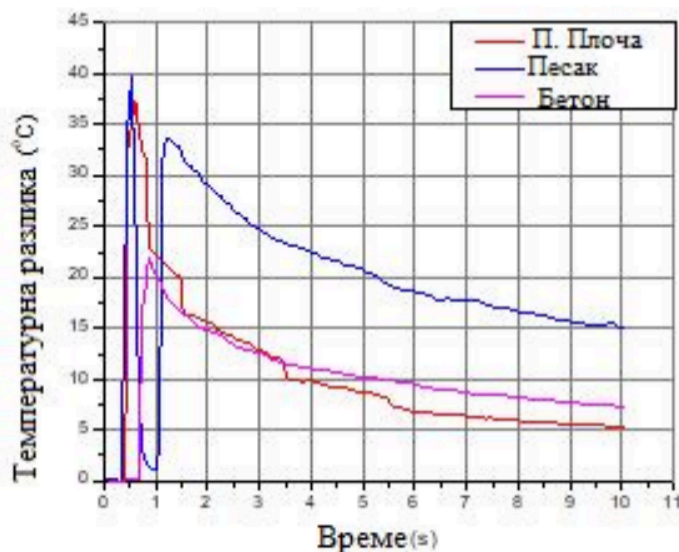


Слика 6.42. Промена температурне разлике у времену након удара пројектила 7,62mm у бетонску плочу направљену од гранулатног пуниоца са цементним везивом

Бетонска плоча је формирана додавањем везивног средства, цемента у трослојну мешавину песка различите гранулације (фине, средње и крупнозрнасте структуре) и

постављена је директно испред панцирне плоче са циљем симулације вишеслојне додатне заштите. На дијаграму је регистрован пораст температуре до приближно 37°C, што је знатно мање од температурног скока забележеног у експерименту са песком без везива. Ова разлика указује на промену механизма дисипације енергије: док расути песак омогућава микрофлукуације и локалне ударе зрна који производе топлоту у контактної зони, бетонска плоча дисперзује енергију кроз пуцање, сабијање и унутрашња напрезања, без значајнијег ослобађања топлоте на површини. Занимљиво је да у овом случају није регистровано загревање панцирне плоче, што се највероватније објашњава тиме да се бетонска плоча није у потпуности распала, па је већину енергије апсорбовала и пренела дубље у своју структуру. Након иницијалног скока у првој секунди, температура опада стабилно, да би се у другој половини графика вредности задржале на око 9°C изнад почетне. Упоређењем са претходним резултатима (експеримент без везива) уочава се да бетонска плоча показује нижи термички одговор, али виши укупни капацитет апсорпције енергије, што је последица њене унутрашње чврстоће и способности да пренесе и дисперзује ударне таласе дубље у материјал.

На слици 6.43 приказане су температурне разлике у функцији времена које настају услед дејства пројектила 7,62mm на три врсте препрека: панцирну плочу, комбинацију три слоја песка (фине, средње и крупнозрнасте структуре) постављену испред панцирне плоче и бетонску плочу постављену испред панцирне плоче.



Слика 6.43 Промена температуре у времену након удара пројектила 7,62mm у различите типове препрека (панцирна плоча, гранулатна баријера са панцирном плочом и бетонска плоча са панцирном плочом)

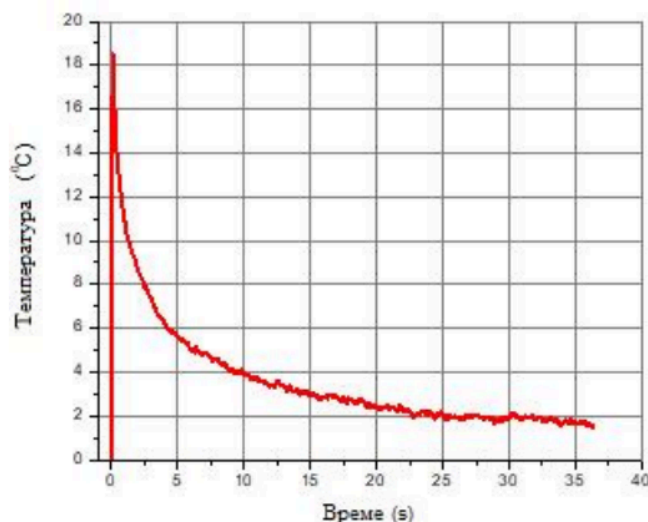
Након удара, све испитиване варијанте бележе нагли пораст температуре у контактної зони, али је тај ефекат најизраженији код комбинације песка и плоче, што указује на

појачану дисипацију енергије кроз расуту структуру. Овај резултат може се посматрати као једна од кључних предности грануларне материје, која у функцији додатне заштите доприноси ефикаснијем пригушивању ударног импулса. Насупрот томе, самостална панцирна плоча показује мање изражен врх и брже опадање температуре, што значи да се енергија преноси и ослобађа у краћем временском интервалу. Бетонска плоча постављена испред панцирне плоче, услед своје компактности, остварује стабилнији и умеренији одговор, при чему је дисипација енергије равномерније распоређена у маси материјала.

У каснијој фази, након пет секунди, уочава се да се панцирна плоча и бетон релативно брзо стабилизују и достижу ниже вредности температурне разлике, док гранулатна баријера наставља да задржава повишене вредности током дужег периода. Овај продужени термални одговор потврђује да је у растреситој структури присутан интензиван процес унутрашњег трења и судара зрна, који омогућава ефикаснију дисипацију кинетичке енергије пројектила. На основу добијених резултата може се закључити да увођење грануларне материје као додатног слоја има значајан потенцијал у смислу побољшања балистичке заштите.

Исти поступак је поновљен и са гађањем из цеви калибра 5.56mm. Редослед испитивања је био следећи: прво је гађано у панцирну плочу, трослојни гранулат (фине, средње и крупнозрнасте структуре) постављен испред панцирне плоче и након тога бетон постављен испред панцирне плоче.

На слици 6.44 приказана је промена температуре у времену након удара пројектила 5,5mm у панцирну плочу.



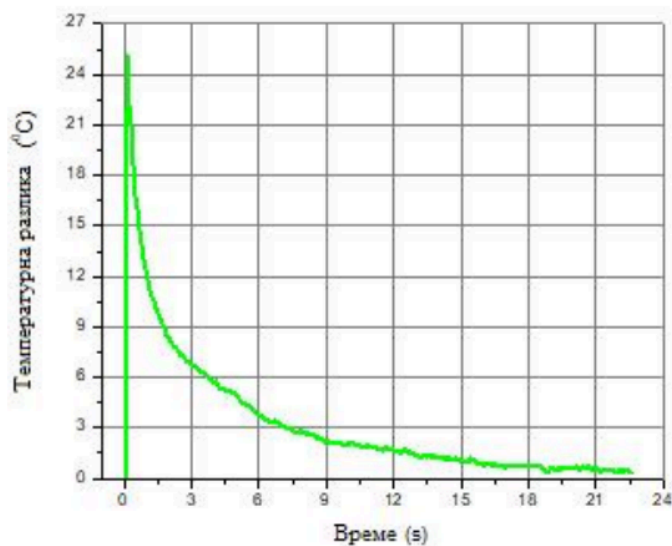
Слика 6.44. Промена температурне разлике у времену након удара пројектила 5,56mm у бетонску плочу направљену од гранулатног пуниоца са цементним везивом

На дијаграму је приказана промена температуре у контактної зони панцирне плоче након удара пројектила калибра 5,56mm. Одмах након удара уочава се нагли пораст температуре, који достиже вредност од око 19 °C у првој секунди. Овај оштар скок температуре одговара моменту трансфера кинетичке енергије пројектила на материјал и брзој локалној дисипацији енергије у виду топлоте.

Након иницијалног максимума, температура експоненцијално опада током времена. У периоду од 5 до 10 секунди где се вредност температуре стабилизују испод 5 °C, што указује на брзо смиривање термалног одговора и релативно ограничено задржавање енергије у структури. Даље, у интервалу до 35 секунди, температура наставља да постепено опада све до приближно 1°C, чиме се систем враћа у стационарно стање.

Оваква крива карактеристична је за компактне и хомогене структуре као што је панцирна плоча где се иницијална енергија преноси нагло, а дисипација је брза и краткотрајна, без продужених процеса унутрашњег трења и сударења зрна као код грануларних баријера. То потврђује да код челичне плоче доминира краткотрајни термални одговор ограниченог интензитета.

На слици 6.45 приказана је промена температуре у контактної зони након удара пројектила 5,56mm у трослојну грануларну баријеру (фине, средње и крупнозрнасте структуре) постављену испред панцирне плоче



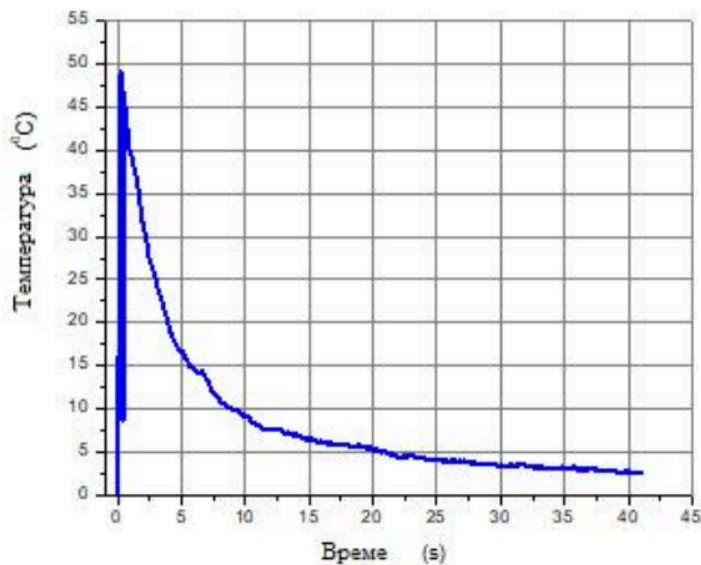
Слика 6.45 Промена температуре у контактної зони након удара пројектила 5,56mm у трослојну грануларну баријеру постављену испред панцирне плоче

На дијаграму је приказана промена температуре у времену након удара пројектила калибра 5,56 mm у комбинацију грануларне баријере постављене испред панцирне плоче. Одмах након удара региструје се нагли пораст температуре, са максималном вредношћу од око 26 °C у првој секунди. Овај иницијални врх је знатно израженији него код гађања самосталне панцирне плоче, што указује да расута структура песка у интеракцији са плочом доводи до појачане дисипације енергије услед унутрашњег трења зрна и њихових судара.

У наредном периоду температура експоненцијално опада, али задржава релативно више вредности у односу на плочу без грануларне материје-песка. Након приближно 20 секунди температурна разлика се смањује на око 1 °C, што указује на завршетак процеса стабилизације.

Овакво понашање јасно потврђује да гранулатна баријера продужава трајање термалног одговора у односу на гађање у саму плочу, јер у растреситој структури постоји механизам дуготрајнијег унутрашњег дисипирања енергије. На основу добијених резултата може се закључити да песак као додатни слој и у случају гађања из цеви калибра 5,56 mm делује као ефикасно средство за апсорпцију и распршивање енергије пројектила.

На слици 6.46 Приказана је промена температуре у контактної зони након удара пројектила 5,56mm у бетонску плочу постављену испред панцирне плоче.



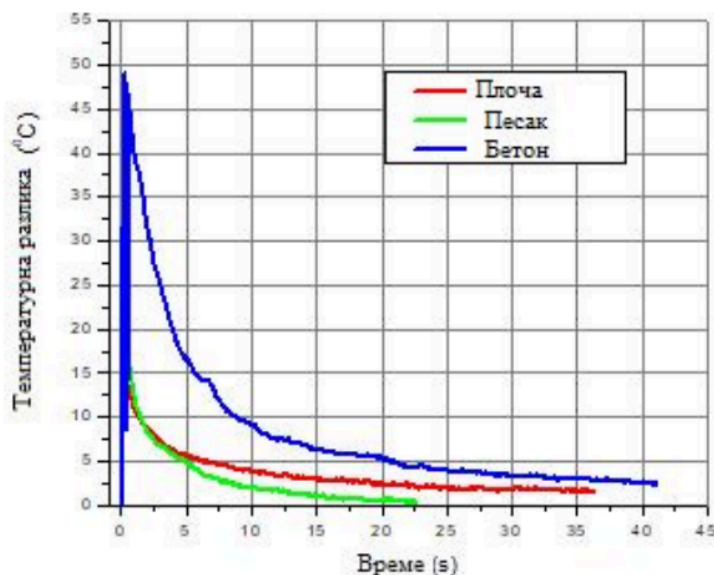
Слика 6.46 Промена температуре у контактної зони након удара пројектила 5,56mm у бетонску плочу постављену испред панцирне плоче

На дијаграму је приказана промена температуре у времену након удара пројектила калибра 5,56mm у бетонску плочу постављену испред панцирне плоче. Одмах након удара региструје се веома нагли пораст температуре, са максималном вредношћу од око 50°C у првој секунди, што представља највиши иницијални скок међу свим испитиваним варијантама. Овај резултат указује да компактна структура бетона, иако доприноси укупној чврстоћи система, доводи до интензивне локалне трансформације енергије у топлоту у моменту удара.

Након око 5 секунди температура опада експоненцијалним трендом, али и даље остаје на релативно високим вредностима у поређењу са другим структурама. Постепено стабилизовање се наставља у дужем временском интервалу, све до око 40 секунди, након чега температурна разлика достиже вредности близу 3 °C.

Овакво понашање показује да бетонска баријера у комбинацији са панцирном плочом има двоструки ефекат: са једне стране узрокује изразито висок иницијални термални одговор, али са друге стране омогућава постепенију дисипацију енергије током продуженог периода. То потврђује да бетон, као компактни материјал са великом топлотном инерцијом, има способност да значајно апсорбује и задржава енергију, при чему његов термални одговор остаје продужен у односу на самосталну плочу или комбинацију песка и плоче.

На дијаграму 6.47 приказане су све испитиване комбинације ради поређења њихових термалних одговора, са циљем формулисања коначног закључка о оправданости примене грануларних материјала у функцији додатне балистичке заштите.



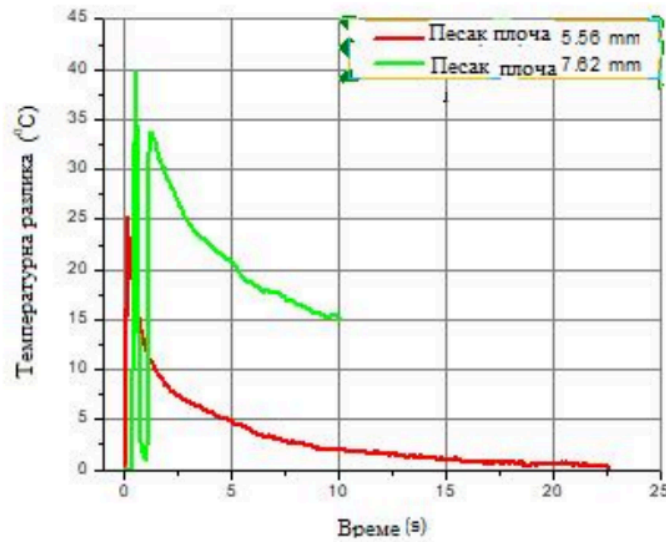
*Дијаграм 6.47 Упоредна анализа температурне разлике у функцији времена након удара пројектила 5,56 mm у панцирну плочу, песковиту баријеру и бетонску плочу*

На слици 6.47 приказан је упоредни дијаграм температурне разлике у функцији времена након удара пројектила калибра 5,56mm у три различите заштитне конфигурације: панцирну плочу (црвена линија), комбинацију песка постављен испред панцирне плоче (зелена линија) и бетонску плочу постављену испред панцирне плоче (плава линија).

Највиши температурни скок забележен је код бетонске плоче са панцирном подлогом, где температура достиже вредност око 50°C у првој секунди. Овај резултат указује на снажну конверзију кинетичке енергије у топлоту у компактној структури, уз продужено задржавање енергије у времену. Комбинација песка и плоче показује умерен температурни одговор (око 20 °C), али и продужено време дисипације, што потврђује улогу гранулата у успоравању и контролисању преноса енергије. Самостална панцирна плоча има најнижи скок (око 18°C) и најстабилнији пад температуре, што је карактеристика материјала високе топлотне проводљивости.

Упоредна анализа показује да компактни материјали (бетон, панцирна плоча) обезбеђују већу структурну стабилност, али различито распоређују енергију: бетон са снажним почетним скоком и дугим трајањем, а панцирна плоча са ограниченим топлотним одзивом. Са друге стране, комбинација песка и панцирне плоче представља оптималан компромис између иницијалне апсорпције и контролисаног преноса енергије, што потврђује оправданост примене грануларних материјала у функцији додатне заштите.

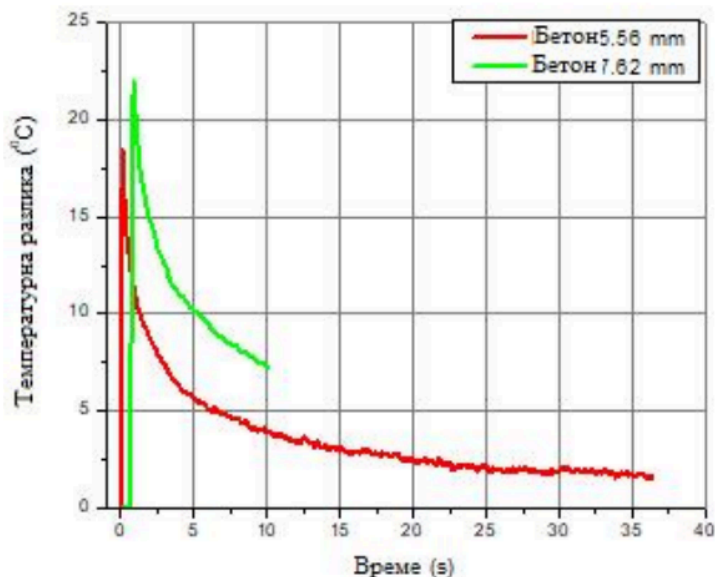
У даљој анализи извршено је додатна анализа гађања из две врсте цеви, 7,76 и 5,56mm у песок постављен испред панцирне плоче. На слици 6.49 приказана је температурна реакција грануларне материје без везива постављене испред панцирне плоче након дејства пројектила 7,62mm и 5,56mm.



Слика 6.49 Упоредна температурна реакција песковите баријере са панцирном плочом након дејства пројектила 7,62mm и 5,56mm

Упоредна анализа при дејству пројектилама калибра 5,56mm и 7,62mm у мете комбинације песок постављен испред панцирне плоче показује изражену зависност термалног одговора од енергије удара. У случају 7,62mm региструје се знатно виши иницијални температурни скок који приближно износи око 40°C и продужена релаксација, што упућује на доминацију фриксионо-колизионог механизма унутар расуте структуре гранулата. Насупрот томе, код 5,56mm тај скок је умеренији и износи око 25°C уз брже смиривање до вредности близу стационарних у интервалу од приближно 10 секунди. Ови налази потврђују да грануларна баријера, у комбинацији са панцирном плочом, ефикасно дисипира кинетичку енергију пројектила, али да при већим енергетским нивоима постаје неопходна оптимизација слоја (дебљина, врста гранулације и конфинација) ради ограничења скока и скраћења термалног „репа“. Ова полазна слика биће упоређена са случајем увођења везива (цемент), где се очекује промена механизма, прелаз ка компактнијој структури са већом иницијалном концентрацијом топлоте и измењеном динамиком релаксације.

Слика 6.50 приказује је упоредну временску промену температурне разлике у зони удара након дејства два различита пројектила 7,62mm и 5,56mm на идентичну структуру тј. бетон постављен испред панцирне плоче.



Слика 6.50 Упоредна температурна разлика након дејства пројектила 5,56mm и 7,62mm у бетонску плочу са песковитим пуниоцем и цементним везивом

На дијаграму је приказана промена температурне разлике након удара пројектила калибра 5,56mm (црвена крива) и 7,62mm (зелена крива) у бетонску плочу постављену испред панцирне плоче.

Одмах након удара уочавају се јасне разлике у интензитету одзива. Пројектил 7,62mm изазива виши иницијални температурни скок на око 27 °C, док је код пројектила 5,56 mm тај пик нешто нижи и износи око 18 °C. Након првих неколико секунди, обе криве показују нагли пад, али је код пројектила 7,62mm релаксација спорија те након 10 секунди температура се задржава на вредностима од око 10 °C, док код пројектила 5,56mm у истом интервалу износи око 5 °C.

У даљем току па до 35 секунди, крива за 5,56 mm наставља постепено да опада све до приближно 1 °C, док 7,62 mm остаје израженији и на крају мери нешто више вредности у односу на мањи калибар. Овакви резултати показују да бетон као компактни материјал у комбинацији са плочом узрокује релативно умерене, али продужене термалне одговоре. Иако су разлике у скоковима мање изражене него код узорака песка постављеног испред панцирне плоч. Јасно је да већи калибар производи интензивније и дуготрајније загревање, док мањи калибар брже прелази у стационарно стање.

На основу свега наведеног може се извести упоредни преглед својстава песка, бетона и панцирне плоче као заштитних структура а што је приказано у табели 6.5

Табела 6.5 Упоредни преглед својстава песка, бетона и панцирне плоче као заштитних структура

Критеријум	Грануларни материјал (песак)	Бетон са песком	Панцирна плоча
Дисипација енергије	Висока, моментална, кроз трење и сударе зрна	Умерена, унутар микроструктуре (пукотине, сабијање)	Ниска, већина енергије се преноси или рефлектује
Температурни скок	Средњи (до 20°C)	Висок (око 50°C)	Нижи (≈18°C)
Време термичке релаксације	Кратко (25 s)	Дуже (45 s), стабилан пад	Средње (35 s)
Структурна стабилност	Веома слаба, потребна допуна	Висока, чврста компактна структура	Висока, али са ризиком преноса енергије
Поновна употребљивост	Једнократна без интервенције	Вишеструка (зависно од оштећења)	Вишеструка
Отпорност на атмосферске утицаје	Ниска	Висока	Висока
Тежина и сложеност уградње	Лака и флексибилна	Тешка, захтева припрему и очвршћавање	Средња, али захтева металну обраду
Цена и доступност	Веома ниска	Средња	Висока
Идеална намена	Амортизација енергије и заштита у комбинацији	Пасивна дубинска заштита са структуром	Чиста механичка отпорност и прва линија одбране

На основу експерименталних резултата добијених термовизијским мерењима након дејства пројектила калибра 5,56mm и 7,62mm на различите препреке, издвајају се кључне предности и ограничења употребе грануларних материјала (попут песка) у контексту балистичке заштите. У табели 6.6 дат је преглед предности и мана грануларних материја у заштитним структурама.

Табела 6.6: Преглед предности и мана грануларних материјала у заштитним структурама

Предности	Мане
Висока способност дисипације енергије кроз трење и сабијање зрна	Нема конструктивну стабилност, распада се након дејства
Јефтине, доступни и лако заменљиви материјали	Велики температурни скокови у зони удара, без дубинске дисипације
Могућност слојевитог прилагођавања (фини, средњи, груби песак)	Неотпоран на влагу, ветар, спољне утицаје без заштите
Добар ефекат амортизације у комбинацији са чврстом плочом	Није погодан за вишеструке или серијске ударе без регенерације структуре
Споро преношење топлоте ка позадини (штити друге слојеве)	Нема самосталну носивост, потребна допуна у виду плоче или цемента

Грануларни материјал (песак) пружа високу способност дисипације енергије, али има слабу структурну стабилност и није погодан за вишеструке ударе без допунске конструкције. Бетон пружа добар баланс између дисипације енергије и структурне стабилности, погодан за вишеструке ударе и има добру отпорност на атмосферске утицаје. Панцирна плоча обезбеђује високу механичку отпорност и вишеструку употребљивост, али има мању способност дисипације енергије и већу тежину.

Ово поређење може послужити као основа за избор одговарајућег материјала у зависности од специфичних захтева заштите и оперативних услова.

### **6.3 Закључак о дисипацији енергије у грануларним материјалима под утицајем различитих врста пројектила**

На основу свеобухватне анализе резултата добијених из експеримената са ваздушним и стрељачким наоружањем, укључујући обраду брзих видео снимака, термовизијских записа и нумеричке интерпретације, може се закључити да је дисипација енергије у великој мери условљена структуром препреке, типом пројектила и динамиком удара.

У случају ваздушног наоружања, истражени су различити углови дејства ( $0^\circ$  и  $22^\circ$ ), врсте песка и облик врха дијаболе. Резултати показују да се највећа дисипација енергије постиже у комбинацији крупног песка, угла од  $22^\circ$  и купастог врха, где се енергија не концентрише, већ шири унутар структуре.

У оквиру експеримента са стрељачким наоружањем коришћени су пројектили калибра 7,62 mm и 5,56 mm, испаливани на различите типове препрека: панцир, песак + панцир и бетон + панцир. Снимци добијени високобрзинском камером нису били погодни за

анализу појава које су претходно дефинисане у методолошком оквиру, за разлику од снимака добијених током испитивања ваздушног наоружања. Ови резултати указали су на потребу прилагођавања методологије и примене другачијег приступа испитивању, те су у даљим разматрањима коришћени искључиво подаци добијени термовизијском камером.

Термовизијска анализа омогућила је посматрање дисипације енергије из другачије перспективе, применом алтернативне оптичке методе. Највећи термички одзив забележен је код песковитих баријера без везивног материјала, што потврђује да слободно кретање зрна и трење између њих доводе до директне конверзије кинетичке енергије у топлоту. Са друге стране, бетонске структуре показале су ниже термичке скокове, али стабилнији енергетски профил током времена, што указује на њихову способност дубље апсорпције и распршивања ударних таласа.

Упоредном анализом свих резултата, може се закључити да је грануларна материја не само енергетски дисипативна, већ и функционално адаптивна, њена ефикасност зависи од облика врха, калибра пројектила, угла удара и унутрашње структуре. Због својих својстава, грануларни материјали имају велики потенцијал за примену у новим генерацијама пасивне заштите, нарочито као адаптивни слојеви у вишеслојним панцирним системима.

## 7. ЗАКЉУЧАК

У оквиру ове докторске дисертације спроведено је свеобухватно експериментално и теоријско истраживање са циљем да се расветли улога грануларне материје у дисипацији енергије након удара пројектила. Истраживање је обухватило више нивоа, од примене оптичких метода, преко математичког моделирања и развоја постојећег алгоритама, до реализације контролираних експеримената са различитим врстама наоружања и мете.

У првом делу дисертације, извршена је анализа литературе и савремених приступа у проучавању дејства пројектила на различите типове препрека. Посебан акценат стављен је на механизме преноса енергије у грануларним медијумима, као и на методе визуелизације и мерења.

У другом делу дисертације дефинисан је појам балистике и објашњене су значајне појаве које је прате, са циљем појмовног одређења улоге и значаја грануларне материје у балистици, а самим тим и у њеној примени као материјала за балистичку заштиту. Детаљно су приказане кључне карактеристике савремених материјала за заштиту који су тренутно у употреби. Посебна пажња посвећена је значају описивања дејства пројектила на циљу, као и прегледу актуелних достигнућа домаћих и страних аутора који се баве овим проблемом. Акценат је стављен на анализу дејства пројектила на грануларну материју, која и даље представља недовољно истражен феномен у области балистике.

У трећем делу дисертације приказан је опис оптичких метода које се користе за анализу појава које представљају предмет истраживања ове докторске дисертације. Посебан акценат стављен је на четири методе које се најчесталије примењују у војне сврхе, а посебно за описивање процеса који настају приликом удара пројектила у препреку. У оквиру ове дисертације примењене су методе обраде слике и видео записа добијених брзим и термовизијском камером. Због тога је значајан део овог поглавља посвећен дефинисању основних појмова, као и приказу принципа рада брзих и термовизијских камера, које ће бити коришћене као кључно средство за анализу и тумачење добијених резултата.

Четврти део дисертације представља приказ основних балистичких формула и образаца који су коришћени за прорачун брзине пројектила, његове кинетичке енергије, као и других облика енергије који настају приликом дејства пројектила на грануларну материју. Детаљно је описан сваки појам који представља значајан елемент или појаву током удара пројектила у гранулат. У оквиру овог дела дисертације развијен је програм у Matlab-у који омогућава прорачун брзине пројектила непосредно пре удара у грануларну материју. Поред тога, програм врши и прорачун кинетичке енергије коју пројектил поседује пре удара, као и других облика енергије који се јављају након интеракције пројектила и мете. Посебан технички добринос ове дисертације је дорада развијеног математичког модела и прилагођавање C++ алата за обраду видеозаписа. На

овај начин омогућена је прецизна квантитативна анализа карактеристичних облика понашања грануларног материјала након удара пројектила, као што су „облак” (запремина песка која се подиже у ваздух), „рупа” (запремина тренутно измештеног материјала из зоне удара) и „ерозија” (секундарно кретање зрна услед њихове реорганизације након удара).

Практични део овог рада представља реализацију експеримента, који је подељен на два кључна истраживачка дела: дејство пројектила–дијаболе ваздушног наоружања (пушка и пиштољ) и дејство стрељачког наоружања. Овај део је обрађен у оквиру петог и шестог дела доктората. У оба случаја коришћена су три типа песка (ситан, мачији и крупан) где је за случај дејства из стрељачког наоружања коришћено везиво у виду воде и индустријског цемента са циљем појашњења значаја грануларне материје у меком и чврстом стању. Резултати су регистровани брзом и термовизијском камером. На основу обраде слика и видео-записа, као и анализе кретања зрна у простору услед удара пројектила у грануларну материју, добијени су параметри који директно описују фазну дисипацију енергије: тренутни удар („рупа”), моментално распршење („облак”) и накнадно кретање („ерозија”). Посебна вредност овог истраживања огледа се у временској анализи наведених параметара, чиме је омогућено јасно разумевање процеса трансфера енергије, од њене почетне концентрације, преко динамичног распршења, до коначне стабилизације унутар структуре грануларне мете.

У шестом делу доктората приказани су резултати у облику дијаграма и табела. Добијени резултати показују да грануларна материја поседује способност да делује као динамички дисипативни слој, при чему је њена ефикасност најизраженија код пројектила мањег калибра и нижих енергија, где долази до потпуног заустављања продора. Са друге стране, код пројектила већих енергија ситуација је знатно другачија – песак не може спречити пробој, али значајно утиче на начин распршивања енергије у дубини мете. На тај начин избегава се локализовано оштећење и смањује ризик по заштићени објекат. Посебно је важно истаћи да појаве уочене при дејству пројектила из ваздушног наоружања („облак”, „ерозија” и „удар”) није било могуће детаљно описати у случају стрељачког наоружања, како из техничких разлога, тако и услед велике кинетичке енергије пројектила, што захтева реализацију знатно комплекснијих експеримената.

Посебну потврду добијених резултата пружили су термовизијски снимци, који су показали да слободни грануларни медијум доводи до већег термалног одзива услед трења и унутрашњих судара зрна. То указује да се део енергије прелази у топлоту, чиме грануларни материјал учествује у више облика трансформације енергије, механичком, кинетичком и термичком.

Овај рад потврђује да је грануларна материја применљива у савременим концептима балистичке заштите, посебно као адаптивни, модуларни или уграђени елемент у вишеслојним баријерама. За разлику од класичних панцирних материјала, песак пружа већу еластичност, мање преноси вибрације и омогућава замену или рециклажу након

дејства. То отвара простор за даље развоје у домену лаких преносивих заштитних структура, као и хибридних материјала који комбинују чврсте и грануларне слојеве.

У истраживању се полази од следећих претпоставки - хипотеза:

- Постоји могућност одређивања параметара дејства пројектила на препреку, применом одговарајућих математичких модела;
- Постоји могућност експерименталног одређивања параметара дејства пројектила на препреку, применом специјалних оптичких метода;
- Могуће је на основу темељне анализе добијених експерименталних и прорачунских резултата дефинисати поуздану методологије одређивања параметара дејства пројектила на различите врсте препреке.

За верификацију прве хипотезе развијен је дводимензионални математички модел за прорачун брзине кретања дијаболе испаљене 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. За улазне параметре коришћени су маса, пречник дијаболе и почетна брзина (према техничкој документацији Steyr), угао испаљивања је одређен на основу геометрије (поставка експеримента у стрељани Војне Академије), а стандардизована густина ваздуха и коефицијенти отпора узети су из доступне литературе. Главни излазни резултат модела је брзина у тренутку контакта са метом и од ње изведена кинетичка енергија, која је употребљена као кључна величина за даљу анализу расподеле енергије у грануларној мети. Даље, 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 и преостала енергија након удара.

Упоредна анализа показала је добро подударње израчунате и експерименталне енергије сабијања грануларне материје, што потврђује да предложени 2D математички модел за ваздушно наоружање омогућава поуздано одређивање параметара дејства пројектила на препреку и представља валидну основу за следеће 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 полигоним 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 у песак различите гранулације и под различитим угловима дејства (0° и 22°). У другој фази истраживања, спроведеној на полигону Никинци Техничког

опитног центра, примењена су опитне цеви стрелачког 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 велике кинетичке енергије није била могућа снимака добијених брзом камером на начин који је дефинисан и развијен за ваздушно наоружање. Снимци термовизијском камером су омогућили одређену анализу удара пројектила у мету.

На основу свеобухватне анализе експерименталних мерења и прорачунских резултата спроведених у овом истраживању, може се закључити да је трећа хипотеза у делимично потврђена. Комбиновањем експерименталних испитивања дејства пројектила на различите врсте препрека и прорачунским делом 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. Битно ограничење је брзина пројектила и његова кинетичка енергија. Коришћени поступак се показао као одличан за брзине до 250 m/s кинетичке енергије до 15 J. Брзине преко 750 m/s и кинетичке енергије преко 2000 J биле су превелике за коришћени поступак и нису добијени смислени резултати.

Будућа истраживања требало би да се усмере ка развоју нових симулационих модела који у реалном времену могу предвидети понашање грануларног система под балистичким оптерећењем, као и ка практичној примени у војној индустрији, првенствено у домену заштите возила, објеката и појединачне опреме. Комбинација оптичких метода, брзе обраде података и материјалног инжењеринга отвара могућност стварања нове генерације „паметних баријера” које ће на ефикасан и адаптиван начин одговарати на различите нивое претњи.



**8. ЛИТЕРАТУРА**

- [1] Elek, P. *Balistika na cilju*. Beograd: Mašinski fakultet, Univerzitet u Beogradu, 2018.
- [2] NATO Standardization Office. *NATO Handbook on Ballistic and Blast Protection*. AOP-55. Bruxelles: NATO Standardization Office, 2005.
- [3] Recht, R. F., Ipson, T. W. „Ballistic Perforation Dynamics.” *Journal of Applied Mechanics*, 30 (1963): 384–390.
- [4] Aliyu, O. H. „A Review on Mechanics of Impacts on Steel Plates.” *Journal of Engineering Research*, 24 (1), 2019: 12–28.
- [5] Čabrilo, A. „Balistička otpornost savremenih pancirnih materijala na osnovu čeličnih limova.” *Vojnotehnički glasnik*, 66 (3), 2018: 585–599.
- [6] Dewapriya, M. A. N., Miller, R. E. Molecular dynamics study of the penetration resistance of multilayer polymer/ceramic nanocomposites under supersonic projectile impacts. *Extreme Mechanics Letters*, 44, 2021, 101238. <https://doi.org/10.1016/j.eml.2021.101238>
- [7] Sen, S., Shaw, A., Adhikari, B. On the possibility of using Ramie – A natural material in cost-effective low threat body armours. *Journal of Industrial Textiles*, 51(4\_suppl), 2022, 6612S–6639S. <https://doi.org/10.1177/15280837221076576>
- [8] Gallo, L. S., Villas Boas, M. O. C., Rodrigues, A. C. M., Melo, F. C. L., Zanotto, E. D. Transparent glass–ceramics for ballistic protection: materials and challenges. *Journal of Materials Research and Technology*, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.05.006>
- [9] Aydin, M., Soydemir, M., et al. Ballistic protection performance of a free ceramic particle armor system. *Ceramics International*, 2021; 47(6)
- [10] Reddy, P. R. S., Savio, S. G., Madhu, V. Ceramic composite armour for ballistic protection. *Handbook of Advanced Ceramics and Composites*, 2020, str. 357–402. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-16347-1\\_10](https://doi.org/10.1007/978-3-030-16347-1_10)
- [11] Simić, D. M. *Ballistic Hybrid Nanocomposite Materials Reinforced with Inorganic Fullerenes*. Doktorska disertacija. Beograd: Univerzitet u Beogradu, Tehnološko-metalurški fakultet, 2017.
- [12] Obradović, V. M. *Procesiranje i karakterizacija hibridnih nanokompozitnih materijala povećane otpornosti na udar*. Doktorska disertacija. Beograd: Univerzitet u Beogradu, 2016.
- [13] Herrmann, H. J. „Granular matter.” *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 2002; 313(1–2): 188–210.
- [14] Capriz, G., Giovane, P., Mariano, P. M. *Mathematical Models of Granular Matter*. Lecture Notes in Mathematics, vol. 1937. Berlin: Springer-Verlag, 2008.
- [15] Zhang Y, Zhu F, Lu G, Wang Z. Ballistic performance of protective structures using sand and foam-filled layers. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2020;161:120268. doi:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.120268
- [16] Carlucci DE, Jacobson SS. *Ballistics: Theory and Design of Guns and Ammunition*. 2nd ed. Boca Raton (FL): CRC Press; 2007

- [17] Stopforth R, Adali S. Experimental study of bullet-proofing capabilities of Kevlar, of different weights and number of layers, with 9 mm projectiles. *Defence Technology*. 2018;14(2):137–143. doi:10.1016/j.dt.2017.11.005
- [18] Stopforth R, Adali S. Comparative study of .22 and 9 mm projectile penetration on Kevlar vests of various GSM ratings. *Current Materials Science*. 2020;16(1):56–63.
- [19] Stopforth R, Reddy E, Manilal R. Full Metal Jacket projectile penetration analysis of Kevlar-only bulletproof vest. In: *IEEE International Conference on Ballistics and Protective Materials*; 2018.
- [20] Radjai, F., Roux, J. N., Daouadji, A. Modeling granular materials: century-long research across scales. *Journal of Engineering Mechanics*, 2017; 143(4): 04017002.
- [21] Børvik, T., Hopperstad, O. S., Berstad, T., Langseth, M. Penetration of granular materials by small-arms bullets. *International Journal of Impact Engineering*, 2015; 78: 89–102. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2014.12.006>
- [22] Sharma, A., Garg, H., Bhatnagar, R., Sharma, V. Projectile penetration in granular material. *AIP Conference Proceedings*, 2020; 2282: 030004.
- [23] Hu, W., Zhu, F., Lu, G., Fang, D.-N. Ballistic impact experiments of sandwich panels with a metallic foam core. *International Journal of Impact Engineering*, 2010; 37: 1045–1055.
- [24] Anderson, C. E. Jr. An overview of the theory of hydrocodes. *International Journal of Impact Engineering*, 1987; 5(1–4): 33–59.
- [25] Jonas, G., et al. Penetration and perforation of layered targets by small-caliber projectiles. *Journal of Mechanics of Materials and Structures*, 2008; 3(8): 1451–1466.
- [26] Field, J. E., Walley, S. M., Proud, W. G., Goldrein, H. T., Siviour, C. R. Review of experimental techniques for high rate deformation and shock studies. *International Journal of Impact Engineering*, 2004; 30(7): 725–775.
- [27] Bless, S. J., Brar, N. S., Green, M. L. Ballistic penetration of armor ceramics. *Journal de Physique IV*, 1997; 7(C3): C3-287–C3-292.
- [28] Simha, H., Ramesh, K. T., Wright, T. W. Void growth in impact loaded ductile metals. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 48(2), 2000, 227–251.
- [29] De Marre, J. Formulas for penetration analysis. *Military Ballistics Archive*, 1943.
- [30] U.S. Army Ballistics Research Laboratory. BRL memorandum report no. 1193. 1957.
- [31] Jowett, E. C. Empirical equations for projectile penetration. *Ballistics Journal*, internal report, 1962.
- [32] Joint Technical Coordinating Group for Munitions Effectiveness (JTTCG/ME). Terminal ballistics guide. Department of Defense, 1975.
- [33] Joint Technical Coordinating Group for Munitions Effectiveness (JTTCG/ME). Ballistic data for penetration depth modeling. Department of Defense, 1981.
- [34] Federal Aviation Administration (FAA). Aircraft vulnerability model documentation. 1986.
- [35] U.S. Department of Defense. THOR penetration equations handbook. 1988.
- [36] Mott NF. A theory of fragmentation. Ministry of Supply, Advisory Council on Scientific Research and Technical Development; 1943.

- [37] Grady DE. Local inertial effects in dynamic fragmentation. *J Appl Phys.* 1982;53(1):322–5. doi:10.1063/1.329157.
- [38] Elek, P. M., Alameri, O. „Efficiency analysis of fragmentation warheads through advanced modeling techniques: Experimental and numerical study.” *Shock and Vibration*, vol. 2024, 2024.
- [39] Elek, P. M., Jaramaz, S. S., Mickovic, D. M., Miloradovic, N. M. „Experimental and numerical investigation of perforation of thin steel plates by deformable steel penetrators.” *Thin-Walled Structures*, vol. 102, 2016, str. 58–67. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2016.02.023>
- [40] Elek, P. M., Jaramaz, S. S., Mickovic, D. M. „Modeling of perforation of plates and multi-layered metallic targets.” *International Journal of Solids and Structures*, vol. 42, br. 3–4, 2005, str. 1209–1224. <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2004.06.029>
- [41] Elek, P. M., Mickovic, D. M., Jaramaz, D. D., Jaramaz, L. S., Djurovic, R. V., Markovic, M. D. „Analysis of parameters influencing the pressure and temperature distribution in the gun bore evacuator.” *Thermal Science*, 2023; 27(1B): 727–738.41, br. 1, 2016, str. 53–61. <https://doi.org/10.1002/prep.201400223>
- [42] Mickovic, D. M., Jaramaz, S. S., Elek, P. M., Miloradovic, N. M., Jaramaz, D. D. „A model for explosive reactive armor interaction with shaped charge jet.” *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, vol.
- [43] Jaramaz, S. S., Mickovic, D. M., Elek, P. M. "Modeling of Expansion Dynamics of Explosively Driven Metal Cylinders." 27th International Symposium on Ballistics, 2012, vol. 1, str. 783–794.
- [44] Djurovic, R. V., Elek, P. M., Markovic, M. D., Jevtic, D. T. „Modification and experimental validation of the Forrestal-Warren perforation model for high hardness armor steel plates of intermediate thickness.” *Defence Technology*, 2025; 46: 267–284.
- [45] Elek, P. M., Jovanovic, B., Novakovic, N. B., Milosevic-Govedarovic, S. S., Kurko, S. V., Stamenic, L. S., Grbovic-Novakovic, J. D. „The influence of  $Al_{12}Mg_{17}$  compound concentration in high-energy mixtures on thermobaric systems characteristics.” *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2025.
- [46] Gilson, L., Rabet, L., Imad, A., Coghe, F., Van Roey, J., Guéders, C., Gallant, J. „Ballistic impact response of an alumina-based granular material: Experimental and numerical analyses.” *Powder Technology*, 2021; 385: 273–286. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2021.02.065>
- [47] Savvateev, A. F., Budin, A. V., Kolikov, V. A., and Rutberg, P. G. 2001. “High-Speed Penetration into Sand.” *International Journal of Impact Engineering* 26 (1): 675–681. [https://doi.org/10.1016/S0734-743X\(01\)00051-3](https://doi.org/10.1016/S0734-743X(01)00051-3).
- [48] Darcy, H. 1856. *Les fontaines publiques de la ville de Dijon*. Paris: Victor Dalmont.
- [49] Reynolds, O. On the Dilatancy of Media Composed of Rigid Particles in Contact. *Philosophical Magazine*, 20, 1885, стр. 469–481.
- [50] Ciamarra MP, Lara A, Lee A, Goldman DI. Dynamics of drag and force distributions for projectile impact in a granular medium. *Phys Rev E.* 2004;70(4):041301. doi:10.1103/PhysRevE.70.041301

- [51] Roth LK. Constant speed penetration into granular materials: drag forces from the quasistatic to inertial regime. arXiv preprint. 2019. arXiv:1910.03173.
- [52] Vivek, P., Sitharam, T. G. Granular Materials Under Shock and Blast Loading. Springer Transactions in Civil and Environmental Engineering, 2020. <https://doi.org/10.1007/978-981-15-0438-15-0438->
- [53] Bester CS, Burton JA, Daniels KE. Dynamics of oblique impact in a photoelastic granular medium. Phys Rev Lett. 2019;123(4):048001. doi:10.1103/PhysRevLett
- [54] Bjelovuk, I., Jaramaz, S., Elek, P., Mickovic, D., Kricak, L. Modelling of characteristics of a crater emerged from a surface explosion on the soil. Combustion Explosion and Shock Waves, 2015; 51(3): 395–400.123.048001.
- [55] Janković D, Simović Pavlović M, Pagnacco M, Nikolić Z, Bokić B, Kolarić B, Tomić L, 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
- [56] Janković D, Ohsenhofen M, Simović Pavlović M, Vasiljević D. Experimental and numerical analysis of high-speed projectile impact into granular material. In: Proceedings of the International Conference COAST 2024 – Contemporary Achievements in Science and Technology; 2024 May 15–17; Herceg Novi, Montenegro. Herceg Novi: University of Montenegro, Faculty of Mechanical Engineering; 2024. p. 135–142
- [57] Janković D, Ohsenhofen M, Simović Pavlović M, Nestorović K, Vasiljević D, Stojnović S, et al. Impact analysis of high-speed projectiles on granular material. In: Proceedings of the International Scientific Conference Contemporary Materials 2024 – Impact Analysis of High-Speed Projectiles on Granular Material; 2024 Sep 5–7; Banja Luka/Herceg Novi, Bosnia and Herzegovina & Montenegro. Contemporary Materials; 2024. p. 8
- [58] Simović Pavlović M, Obradović V, Janković D, Pagnacco M, Tomić L, 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. 535–8.
- [59] 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
- [60] Jia X, Tang L, Weng J, Ma H, Tao T, Liu S, et al. Microwave velocity interferometry for the parameter diagnosis of the interior ballistic of a two-stage light gas gun or powder gun. Explosion and Shock Waves. 2022;42(3):034101. doi:10.11883/bzycj-2021-030
- [61] Peng QX, Meng JH, Liu J, Li ZR. Laser velocity interferometry for interior ballistic research. Journal of Ballistics. 2008 Sep.
- [62] Kube C.M., Payne B., Huber R., Dapkus P.D. Ultrafast laser-based optical metrology for material response at high strain rates. Experimental Mechanics. 2016;56(4):515–524. <https://doi.org/10.1007/s11340-015-0108-2>

- [63] Cloud GL. Optical Methods of Engineering Analysis. Cambridge: Cambridge University Press; 1998.
- [64] Rastogi PK. Optical Measurement Techniques and Applications. Boston: Artech House; 1997.
- [65] Sirohi RS. Optical Methods of Measurement: Wholefield Techniques. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press; 2009.
- [66] Bass M, et al. Handbook of Optics, Volume I: Geometrical and Physical Optics, Polarized Light, Components and Instruments. 3rd ed. New York: McGraw-Hill; 2010.
- [67] Fraden J. Handbook of Modern Sensors: Physics, Designs, and Applications. 4th ed. New York: Springer; 2010.
- [68] Rastogi PK. Digital Speckle Pattern Interferometry and Related Techniques. Weinheim: Wiley-VCH; 2001
- [69] Bass M, et al. Handbook of Optics, Volume V: Atmospheric Optics, Modulators, Fiber Optics, X-Ray and Neutron Optics. 3rd ed. New York: McGraw-Hill; 2010.
- [70] Bass M, Enoch JM, Lakshminarayanan V, editors. Handbook of Optics, Volume III: Vision and Vision Optics. 3rd ed. New York: McGraw-Hill; 2010.
- [71] Webster JG, editor. The Measurement, Instrumentation and Sensors Handbook. Boca Raton: CRC Press; 1999.
- [72] Tie B, Steffen T, Müller R. Validation of finite element models of biological tissue using two optical full-field techniques: DSPI and 3D-DIC. J Biomech. 2005;38(9):1813–24. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2004.08.019>
- [73] Dally JW, Riley WF. Experimental Stress Analysis. New York: McGraw-Hill; 1991.
- [74] Suzuki M, Namba Y, Watanabe T. Visualization of High-Speed Impact of Projectile in Granular Sheet with Destructive Collision of Particles. J Flow Control Meas Vis. 2016;6(3):136–51.
- [75] Maldague X. Theory and Practice of Infrared Technology for Nondestructive Testing. Hoboken: Wiley-Interscience; 2001.
- [76] Vollmer M, Möllmann KP. Infrared Thermal Imaging: Fundamentals, Research and Applications. Weinheim: Wiley-VCH; 2010.
- [77] Vasiljević D. Optički uređaji i optoelektronika. Beograd: Mašinski fakultet, Univerzitet u Beogradu; 2004.
- [78] Holst GC. Common Sense Approach to Thermal Imaging. Richmond: JCD Publishing; 2003.
- [79] Kaplan H. Practical Applications of Infrared Thermal Sensing and Imaging Equipment. Bellingham: SPIE Press; 2007.
- [80] Holst GC. CMOS/CCD Sensors and Camera Systems. Bellingham (WA): SPIE Press; 2007.
- [81] Redžimi A. Redžimi A. Просторно-временска калибрација система за анализу вишеканалних видео и аудио записа [doktorska disertacija]. Beograd: Univerzitet odbrane, 2017.

- [82] Integrated Design Tools. CrashCam™ mini 1540 high-speed imaging crash camera. 2021.
- [83] Lan X, Feng S, Huang Q, Zhou T. Blast response of continuous-density graded cellular material based on the 3D Voronoi model. *Defence Technol.* 2018;14(4):433–440. <https://doi.org/10.1016/j.dt.2018.06.003>
- [84] Kloss, C., Goniva, C., Hager, A., Amberger, S., Pirker, S. “Models, algorithms and validation for opensource DEM and CFD-DEM.” *Progress in Computational Fluid Dynamics*, 2012; 12(2–3): 140–152.
- [85] Plimpton, S. “Fast Parallel Algorithms for Short-Range Molecular Dynamics.” *Journal of Computational Physics*, 1995; 117(1): 1–19.
- [86] Dassault Systèmes. Abaqus Theory Guide. Providence: Dassault Systèmes, 2022.
- [87] ANSYS Inc. ANSYS Explicit Dynamics User’s Guide. Canonsburg: ANSYS Inc., 2021.
- [88] Tasora, A., Serban, R., Mazhar, H., Melanz, D., Pazouki, A., Heyn, T., Guo, Y., Bartholomew, A., Repe, B., Negrut, D. “Chrono: An Open Source Multi-physics Dynamics Engine.” *Lecture Notes in Computer Science*, 2016; 9776: 19–34.
- [89] Crespo, A. J. C., Domínguez, J. M., Barreiro, A., Gómez-Gesteira, M., Rogers, B. D. “DualSPHysics: Open-source SPH for fluid and granular dynamics.” *Computer Physics Communications*, 2015; 187: 204–216.
- [90] Sulsky, D., Chen, Z., Schreyer, H. L. “A particle method for history-dependent materials.” *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 1994; 118(1–2): 179–196.
- [91] Ahrens, J., Geveci, B., Law, C. “ParaView: An End-User Tool for Large Data Visualization.” In: Hansen, C. D., Johnson, C. R. (eds) *Visualization Handbook*, Elsevier, 2005; pp. 717–731.
- [92] Van Rossum, G., Drake, F. L. *Python 3 Reference Manual*. Scotts Valley: CreateSpace, 2009.
- [93] Roosendaal, T. et al. *Blender – a 3D Modelling and Rendering Package*. Stichting Blender Foundation.
- [94] Carlucci, D. E., Jacobson, S. S. *Ballistics: Theory and Design of Guns and Ammunition*. 3rd ed. Boca Raton: CRC Press, 2018. ISBN 978-1-4987-8903-4.
- [95] Anderson, J. D. *Fundamentals of Aerodynamics*, 5th Edition, McGraw-Hill Education, 2010.
- [96] Carlucci, D. E., Jacobson, S. S. *Ballistics: Theory and Design of Guns and Ammunition*. 3rd ed. Boca Raton: CRC Press, 2018. ISBN 978-1-4987-8903-4.
- [97] Zhao, C., Wang, S., Guo, C., Liu, D., Ma, F. “Experimental study on fragmentation of explosive loaded steel projectile.” *International Journal of Impact Engineering*, 2020; 144: 103610.
- [98] Steyr Sport GmbH. *Operating Manual – Steyr LG 110 Match / Light / Bench Rest / Rapid Fire*. Raming, Austria: Steyr Sport GmbH, 2023. Доступно на: <https://www.steyr-sport.com/en/downloads-air-rifles/manuals>
- [99] Steyr Sport GmbH. *Operating Manual – Steyr LP 10 / Compact*. Raming, Austria: Steyr Sport GmbH, 2023. Доступно на: <https://www.steyr-sport.com/en/downloads-air-pistols/manuals-1>

- [100] Ladommatos, N. Drag coefficients of air rifle pellets with wide range of geometries. *Journal of Mechanical Engineering Science, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C*, 2021; 235(23): 6133–6152. DOI: 10.1177/09544062211003928
- [101] Jerković, D., Regodić, D. The influence of aerodynamic coefficients on the elements of classic projectile paths, *Vojnotehnički glasnik*, vol. 59, no. 2 (2011), стр. 5–28
- [102] Регодић, Д., Спољна балистика – основи, ВИЗ, Београд, 1993.
- [103] R. Mehdi, and A. R. Teymourtash, *Sci. Iran* 23, 4 (2016) 1767-1776.
- [104] Rafeie, M., Teymourtash, A.R. Aerodynamic and dynamic analyses of three common 4.5 mm-caliber pellets in a transonic flow. *Scientia Iranica, Transactions B: Mechanical Engineering*, 2016; 23(4): 1767–1776.
- [105] Panasonic. Lumix DMC-FZ200 – Digital Camera Specification. Panasonic Global.
- [106] Правило пушака и пушкомитраљеза 7,62 мм., Савезни секретаријат за народну одбрану, Генералштаб ЈНА, Београд, 1983.
- [107] Правило о измени пушака и пушкомитраљеза 7,62 мм, Београд, 2021. Генералштаб оружаних снага СФРЈ, Управа пешадије, Београд, 1987.
- [108] Zastava Arms. Technical specifications of 7.62×39 mm and 5.56×45 mm ammunition. Internal catalog, Kragujevac, 2021
- [109] Правило пушка аутоматска 5,56 мм, Београд, Генералштаб Војске Србије Управа за планирање и развој (Ј-5), Београд, 2009.
- [110] National Institute of Justice. NIJ Standard–0101.06: Ballistic Resistance of Body Armor. Washington, D.C.: U.S. Department of Justice, Office of Justice Programs, 2008.
- [111] National Institute of Justice. NIJ Guide 100: Selection and Application Guide to Ballistic-Resistant Body Armor, Вашингтон, 2008.
- [112] VPAM BSW 2006 – Ballistic Resistance of Body Armour. Vereinigung der Prüfstellen für angriffshemmende Materialien und Konstruktionen (VPAM), 2006
- [113] NATO Standardization Agreement (STANAG) 2920. Ballistic Test Method for Personal Armour Materials and Combat Clothing. NATO Standardization Office (NSO), Brussels, Belgium, 2003.
- [114] FLIR Systems Inc. SC 600 Series: User’s Manual – Models SC620, SC640, SC660. Wilsonville, OR: FLIR Systems; 2007.
- [115] Phantom v9.1 Digital High-Speed Camera – Technical Manual. Vision Research Inc., Wayne, NJ, USA.
- [116] FLIR Research Studio – User Manual. Teledyne FLIR LLC, 2023. Available online: <https://support.flir.com> (accessed: June 2025).

# Prilog razvoju optičkih metoda za određivanje parametara interakcije projektila i prepreka različitih karakteristika

---

ORIGINALITY REPORT

---

0%

SIMILARITY INDEX

---

PRIMARY SOURCES

---

EXCLUDE QUOTES ON

EXCLUDE BIBLIOGRAPHY ON

EXCLUDE SOURCES < 1%

EXCLUDE MATCHES < 9 WORDS