

UNIVERZITET U BEOGRADU

MAŠINSKI FAKULTET

Muhamed M. Bisić

**ANALIZA I OPTIMIZACIJA TERMINALNO-
BALISTIČKIH PERFORMANSI 3D ŠTAMPANIH
PROJEKTILA I BALISTIČKE ZAŠTITE**

doktorska disertacija

Beograd, 2026

UNIVERSITY OF BELGRADE
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

Muhamed M. Bisić

**ANALYSIS AND OPTIMIZATION OF
TERMINAL BALLISTIC PERFORMANCE OF
3D-PRINTED PROJECTILES AND BALLISTIC
PROTECTION**

Doctoral Dissertation

Belgrade, 2026

Mentor doktorske disertacije:

dr Predrag Elek, redovni profesor
Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet

Članovi komisije za odbranu doktorske disertacije:

dr Miloš Marković, vanredni profesor
Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet

dr Predrag Elek, redovni profesor
Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet

dr Aleksandar Simonović, redovni profesor
Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet

dr Mihajlo Popović, redovni profesor
Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet

dr Nebojša Hristov, vanredni profesor
Univerzitet odbrane, Vojna akademija

Datum odbrane:

Najveću zahvalnost dugujem prof. dr Predragu Eleku na nesebičnoj i neizmjernoj podršci, posvećenosti radu, strpljenju i dijeljenju znanja. Hvala mu što mi je pokazao šta znači biti prije svega čovjek, a onda i mentor u pravom smislu te riječi, te na motivaciji i savjetima koji su usmjeravali cijeli moj razvojni put.

Zahvaljujem se članovima komisije, prof. dr Milošu Markoviću, prof. dr Aleksandru Simonoviću, prof. dr Mihajlu Popoviću i prof. dr Nebojši Hristovu, na izuzetnom stručnom doprinosu, svakom savjetu i komentaru. Hvala i prof. dr Dejanu Jevtiću na zalaganju i pomoći pri definisanju teme i pravca istraživanja. Zahvaljujem se Mašinskom fakultetu Univerziteta u Beogradu, dragim profesorima, kolegama, te svim dobrim ljudima s fakulteta koji su mi olakšali ovaj put, a posebno Biljani, Ermini, Katarini i Danijeli na svakoj uputi i pomoći.

Beskrajno hvala mom prijatelju Nikoli Jokiću na svemu što je učinio za mene i moj akademski put.

Od srca hvala profesorima i kolegama s MEF UNSA i IUS-a; prof. dr Samiru Muzaferiji, prof. dr Adiju Pandžiću, prof. dr Faruku Raziću, prof. dr Alanu Čatoviću, prof. dr Benjaminu Durakoviću, prof. dr Merimu Jusufbegoviću, Mustafi Bevrnji, Zejdu Imamoviću i drugima, na velikoj podršci mojim idejama, pri pisanju radova i eksperimentalnim ispitivanjima te na neprocjenjivim diskusijama i savjetima. Hvala i prof. dr Altijani Hromić - Jahjefendić, prof. dr Muhamedu Hadžiabdiću, Rektor, prof. dr Ali Osman Kusakci i Upravi IUS-a.

Zahvaljujem se kompanijama Igman d.d. Konjic i PTG Goražde te Streljačkom klubu „Point” i drugima na podršci pri eksperimentalnim ispitivanjima.

Ništa od ovoga ne bi bilo moguće bez podrške moje porodice, prvenstveno mame i daidže, koji su najviše vjerovali u mene, Amine A. i moje voljene Amre. Hvala svim mojim prijateljima i kolegama, posebno Hamzi, Ismaru, Aldinu, Amaru, Dinu, Jagošu i Igoru, na zainteresovanosti i podršci na mom putu.

Mojoj mami, daidži i rahmetli ocu.

Analiza i optimizacija terminalno-balističkih performansi 3D štampanih projektila i balističke zaštite

Rezime

Aditivna proizvodnja je sve zastupljenija proizvodna metoda u vojnoj industriji, sa posebnim fokusom u posljednje vrijeme na izradi konvencionalnih i nekonvencionalnih projektila i zaštitnih struktura. S druge strane, terminalna balistika je kroz historiju razvijana prvenstveno na homogenim metalnim materijalima, pa njeni klasični modeli nisu prilagođeni polimerima i ćelijskim strukturama dobijenim 3D štampanjem. Istovremeno, sistematski i ponovljivi eksperimentalni podaci za ovu oblast praktično izostaju. Kod municije malog kalibra dominiraju forenzički i pravni radovi, a kod zaštite teorijska razmatranja i pojednostavljene numeričke simulacije. Predmet disertacije je eksperimentalna, analitička i numerička analiza terminalno-balističkih performansi 3D štampanih projektila malog kalibra, primarno 9x19 mm i 3D štampanih struktura balističke zaštite, u interakcijama projektil – meta. Glavni cilj rada je proširenje znanja i baza eksperimentalnih podataka te utvrđivanje prednosti i ograničenja aditivne proizvodnje u ovom kontekstu. Postavljeno je i testirano nekoliko hipoteza koje se odnose na kontrolu efekata na cilju kroz odabir materijala za 3D štampu, variranjem geometrije i parametara štampe. Analizirano je i da li su razlike 3D štampane nemetalne municije u odnosu na konvencionalnu metalnu municiju posljedica različite mase, slojevitosti i unutrašnje geometrije, da li je moguće projektovati i izraditi 3D štampane strukture s mjerljivom i ponovljivom balističkom otpornošću, te da li integrisani analitičko-eksperimentalni pristup daje pouzdane referentne podatke za inženjersku praksu. Istraživanje je zasnovano na standardizovanim i nestandardizovanim eksperimentima, dopunjenim analitičkim i numeričkim modeliranjem. Kod projektila su mjereni pritisak u komori, brzina i bljesak na ustima cijevi, tačnost i preciznost i naposljetku dejstvo na cilju, primarno mjereći dubinu penetracije u balističkom gelu. Osim sveobuhvatnog mjerenja, inicijalno je testiran koncept praktične primjene 3D štampanih projektila za izradu disperzne anti-dron municije, kalibra 7,62x39 mm. S druge strane, koncept 3D štampane balističke zaštite je ispitivan kroz štampane ćelijske mete, uz variranje geometrije, orijentacije, materijala i gustine ispune, te na hibridnim sendvič panelima. Paralelno su za sve materijale provedena standardizovana ispitivanja mehaničkih osobina, uz termičko kondicioniranje, radi poređenja tih rezultata sa onim dobijenim na osnovu balističkih testiranja. Za projekte je ustanovljeno da se 3D štampani projektili u cijevi ne dezintegrišu, užljebe se i stabilizuju, ali i da skaliranje 1:1 u odnosu na metalni projektil nije dovoljno, već je za zaptivanje potrebno blago uvećanje po eksperimentalno utvrđenom faktoru. U unutrašnjoj balistici je evidentiran znatno niži pritisak za polimernu municiju u odnosu na metalnu. Prelazna balistika je to objasnila: snimanjem bljeska i nezavisnim mjerenjima pokazano je da se uzrok nalazi u nesagorjelom barutnom punjenju i sekundarnom bljesku. U spoljnoj balistici je dokazano da masa dominira, a ne hrapavost površine, pri čemu je faktor usporavanja polimernog projektila devet puta veći nego kod metalnog projektila iste geometrije. U terminalnoj balistici razvijen je empirijski model penetracije u gel ($R^2 = 0,998$ u laboratorijskim uslovima), definisana je granica trajnog zadržavanja projektila u gelu i analizirana veza kinetičke energije i dubine penetracije. Niski pritisci u cijevi imaju i sigurnosnu implikaciju, jer čine realnom izradu oružja bez metalnih dijelova. Kod balističke zaštite je utvrđeno da je geometrija ispune dominantna varijabla. Iako se u kvazi-statičkim ispitivanjima kao najbolji nameće gyroid, za balističku primjenu je osnova honeycomb, što je potvrđeno eksperimentalno i analitičkim modelom koji kvantifikuje uticajne koeficijente. Pri identičnoj geometriji dubina penetracije se među materijalima razlikuje više od tri puta, a najbolji polimer je Strongman. Povoljnija je orijentacija u kojoj projektil presijeca zidove ćelija, dok je gustina ispune značajan, ali nelinearan parametar. Hibridni sendvič panel s karbonom i polimernim jezgrom drastično poboljšava odnos zaštitne moći i utrošenog materijala. Kompozitni filament ne daje višestruko bolji rezultat od ojačanih polimera, iako

je preko deset puta skuplji. Jedan od najvažnijih nalaza proizašao je iz poređenja standardizovanih ispitivanja s balističkim. Rangiranja materijala prema zatezanju, udarnoj žilavosti i balističkoj penetraciji međusobno se ne poklapaju, a balističkom poretku odgovara samo poredak po zateznoj čvrstoći, i to samo po redoslijedu. Nijedan pojedinačni standardizovani test, dakle, ne predviđa balističko ponašanje, što pokazuje da kvazi-statička karakterizacija nije dovoljna za ekstremno dinamički udar. Direktno balističko ispitivanje stoga nije dopuna, već neizostavan dio karakterizacije 3D štampanih materijala, a analitički i numerički modeli vrijede samo unutar eksperimentalno definisanog domena. Disertacija je testiranjem svih postavljenih hipoteza precizirala odgovore i uzroke: kod projektila su razlike u odnosu na metalnu municiju posljedica prvenstveno mase i zaptivanja, dok slojevitost i drugi parametri imaju sekundaran, ali mjerljiv uticaj, a kod zaštite je odnos obrnut, pa dominira geometrija. Naučni doprinos čine prva sistematska, kontrolisana i ponovljiva terminalno-balistička baza podataka za 3D štampane projekte male kalibra i zaštitu, verifikovani modeli s definisanim domenom važenja (empirijski model penetracije u gel i analitički model prodora kroz čelijske mete) te kvantifikovan uticaj parametara aditivne proizvodnje na mehanizme proboja i prenos energije. Stručni doprinos čine smjernice za optimizaciju polimernih projektila i sendvič konfiguracija zaštitnih struktura, izbor materijala na osnovu adekvatnih mjerenja, inicijalna demonstracija koncepta disperzne municije i osnova za razvoj novih proizvoda. Mehanizmi geometrije, orijentacije i gustine posljedica su strukture, a ne polimernog ponašanja, pa se nalazi mogu prenijeti na metale i keramiku. Dalja istraživanja obuhvataju municiju s disperznim dejstvom kao najperspektivniji pravac, druge kalibre, hibridne i gradirane strukture te termičko kondicioniranje u širem opsegu uslova.

Ključne riječi: terminalna balistika, aditivna proizvodnja, polimerni projektili, čelijske strukture, balistička zaštita, model penetracije

Naučna oblast: Mašinsko inženjerstvo

Uža naučna oblast: Vojno mašinstvo – sistemi naoružanja

Analysis and optimization of terminal ballistic performance of 3D-printed projectiles and ballistic protection

Abstract

Additive manufacturing is an increasingly widespread production method in the defence industry, with a recent particular focus on the production of conventional and unconventional projectiles and protective structures. On the other hand, terminal ballistics has historically been developed primarily on homogeneous metallic materials, so its classical models are not adapted to polymers and cellular structures produced by 3D printing. At the same time, systematic and repeatable experimental data for this field are practically absent. In the case of small-calibre ammunition, forensic and legal studies dominate, while for protection, theoretical considerations and simplified numerical simulations prevail. The subject of the dissertation is the experimental, analytical and numerical analysis of the terminal-ballistic performance of 3D-printed small-calibre projectiles, primarily 9×19 mm, and of 3D-printed ballistic protection structures, in projectile–target interactions. The main aim of the work is to expand knowledge and the experimental database and to determine the advantages and limitations of additive manufacturing in this context. Several hypotheses were set and tested concerning the control of effects on the target through the choice of 3D-printing material and the variation of geometry and printing parameters. It was also analysed whether the differences between 3D-printed non-metallic ammunition and conventional metallic ammunition are a consequence of different mass, layering and internal geometry, whether it is possible to design and manufacture 3D-printed structures with measurable and repeatable ballistic resistance, and whether an integrated analytical-experimental approach provides reliable reference data for engineering practice. The research was based on standardised and non-standardised experiments, supplemented by analytical and numerical modelling. For the projectiles, chamber pressure, velocity and muzzle flash, accuracy and precision and, finally, the effect on the target were measured, primarily by measuring penetration depth in ballistic gel. In addition to these comprehensive measurements, a concept for the practical application of 3D-printed projectiles in dispersive anti-drone ammunition of 7,62×39 mm calibre was initially tested. In contrast, the concept of 3D-printed ballistic protection was examined through printed cellular targets, with variation of geometry, orientation, material and infill density, and on hybrid sandwich panels. In parallel, standardised tests of mechanical properties, including thermal conditioning, were carried out for all materials in order to compare those results with those obtained from ballistic testing. For the projectiles, it was established that 3D-printed projectiles do not disintegrate in the barrel, engage the rifling and stabilise, but also that 1:1 scaling relative to the metallic projectile is not sufficient, and that a slight enlargement by an experimentally determined factor is required for sealing. In interior ballistics, a significantly lower pressure was recorded for polymer ammunition compared to metallic ammunition. Intermediate ballistics explained this: flash recordings and independent measurements showed that the cause lies in the unburnt propellant charge and the secondary flash. In exterior ballistics, it was demonstrated that mass dominates, rather than surface roughness, with the deceleration factor of the polymer projectile being nine times higher than that of a metallic projectile of the same geometry. In terminal ballistics, an empirical model of gel penetration was developed ($R^2 = 0,998$ under laboratory conditions), the limit of permanent projectile retention in gel was defined, and the relationship between kinetic energy and penetration depth was analysed. The low barrel pressures also have a safety implication, since they make the production of weapons without metal parts realistic. For ballistic protection, infill geometry was found to be the dominant variable. Although gyroid emerges as the best in quasi-static tests, honeycomb is the basis for ballistic application, which was confirmed both experimentally and by an analytical model that quantifies the influence coefficients. With identical geometry, penetration depth differs by more than a factor of three between materials, with Strongman being the best-performing polymer. The

orientation in which the projectile cuts across the cell walls is more favourable, while infill density is a significant but nonlinear parameter. A hybrid sandwich panel with a carbon layer and a polymer core drastically improves the ratio of protective capability to material used. The composite filament does not give a substantially better result than reinforced polymers, even though it is more than ten times more expensive. One of the most important findings arose from comparing standardised and ballistic tests. The rankings of materials by tensile strength, impact toughness and ballistic penetration do not coincide with each other, and the ballistic order is matched only by the order by tensile strength, and only in ranking. No single standardised test, therefore, predicts ballistic behaviour, which shows that quasi-static characterisation is not sufficient for extreme dynamic impact. Direct ballistic testing is thus not a supplement but an indispensable part of the characterisation of 3D-printed materials, and analytical and numerical models are valid only within the experimentally defined domain. By testing all the hypotheses, the dissertation refined the answers and the causes: for projectiles, the differences relative to metallic ammunition are primarily a consequence of mass and sealing, while layering and other parameters have a secondary but measurable influence, and for protection the relationship is reversed, so geometry dominates. The scientific contribution consists of the first systematic, controlled and repeatable terminal-ballistic database for 3D-printed small-calibre projectiles and protection, verified models with a defined domain of validity (an empirical model of gel penetration and an analytical model of penetration through cellular targets), and a quantified influence of additive manufacturing parameters on penetration mechanisms and energy transfer. The practical contribution consists of guidelines for the optimisation of polymer projectiles and sandwich configurations of protective structures, material selection based on adequate measurements, an initial demonstration of the dispersive ammunition concept, and a basis for the development of new products. The mechanisms of geometry, orientation and density are a consequence of structure rather than polymer behaviour, so the findings can be transferred to metals and ceramics. Further research includes ammunition with dispersive effect as the most promising direction, other calibres, hybrid and graded structures, and thermal conditioning over a wider range of conditions.

Key words: terminal ballistics, additive manufacturing, polymer projectiles, cellular structures, ballistic protection, penetration model

Scientific field: Mechanical Engineering

Scientific subfield: Military Mechanical Engineering – Weapon Systems

Sadržaj

1 Uvod	1
1.1 Osnovni pojmovi iz balistike.....	3
1.1.1 Balistika.....	3
1.1.2 Balistika na cilju	3
1.1.3 Mehanika penetracije.....	4
1.2. Različiti pristupi analizi problema.....	7
1.2.1 Konvencionalne metode	7
1.2.2 Vještačka inteligencija i neuronske mreže	7
1.3 Aditivna proizvodnja	8
1.4 Pregled literature.....	12
2 Projektili izrađeni 3D štampom.....	17
2.1 Izrada i inicijalna testiranja projektila kalibra 9 x 19 mm	17
2.2 Ispitivanje tolerancija i optimizacija dimenzija projektila.....	19
2.3 Parametri unutrašnje balistike	21
2.3.1 Mjerna oprema i standard ispitivanja	22
2.3.2 Ispitni uzorci	23
2.3.3. Obrada mjernih signala.....	23
2.3.4. Rezultati i diskusija	25
2.4 Bljesak na ustima cijevi.....	32
2.4.1 Uvod	32
2.4.2 Materijali i metode.....	32
2.4.3 Rezultati i diskusija	33
2.5 Tačnost, preciznost, aerodinamika i dinamika leta projektila	34
2.5.1 Uvod	34
2.5.2 Materijali i metode.....	36
2.5.3. Rezultati i diskusija – tačnost i preciznost.....	37
2.5.4 Numerička aerodinamička analiza – uticaj visine sloja štampe na koeficijent otpora.....	38
2.5.5 Rezultati i analiza	43
2.6 Penetracija projektila u balistički gel.....	44
2.6.1 Uvod	44
2.6.2 Materijali i metode.....	46
2.6.3 Prvi set mjerenja – kontrolisani laboratorijski uslovi (Igman d.d. Konjic)	47
2.6.4 Rezultati i diskusija eksperimentalnog testiranja u laboratorijskim uslovima.....	49
2.6.5. Empirijski model penetracije u balistički gel za laboratorijske uslove.....	52
2.6.6 Numerička analiza penetracije FMJ i PLA projektila u balistički gel.....	54
2.6.7 Drugi set mjerenja – realni uslovi, civilno streljište (Sarajevo)	58
2.6.8 Rezultati i diskusija eksperimentalnog testiranja pri realnim uslovima	60

2.6.9. Komparacija i diskusija rezultata dobijenih pri laboratorijskim i realnim uslovima	67
2.6.10 Penetracija PLA projektila kalibra 7.62 x 39 mm u balistički gel	69
2.7 Praktične implikacije polimernih 3D štampanih projektila i prijedlog projektila sa disperznim punjenjem	70
2.8. Prijedlozi za optimizaciju 3D štampane polimerne municije	74
2.8.1 Optimizacija kroz povećanje mase	75
2.8.2 Optimizacija kroz povećanje brzine – iskorišćenost barutnog punjenja.....	75
2.8.3 Optimizacija žiroskopske stabilizacije – prijedlog modificirane cijevi.....	76
2.8.4 Sintetički pregled prijedloga optimizacije	77
3 Balistička zaštita zasnovana na 3D štampanim strukturama	78
3.1 Uticaj geometrije ispune na sposobnost zaustavljanja projektila kalibra 9 x 19 mm	78
3.1.1 Dizajn i izrada mete	78
3.1.2 Eksperimentalna mjerenja	81
3.1.3 Numerički i analitički modeli	83
3.2 Uticaj 3D štampanog materijala na sposobnost zaustavljanja projektila.....	86
3.2.1 Materijali i metode.....	86
3.2.2 Rezultati i diskusija	91
3.3 Uticaj orijentacije ispune na sposobnost zaustavljanja projektila	94
3.3.1 Rezultati i diskusija	95
3.4 Uticaj gustine ispune na sposobnost zaustavljanja projektila.....	96
3.4.1 Materijali i metode.....	97
3.4.2 Rezultati i diskusija	99
3.5 Izrada sendvič panela sa optimizovanom 3D štampanom jezgrom.....	101
3.5.1 Materijali i metode.....	102
3.5.2 Rezultati i diskusija	105
3.6 Uticaj temperaturnog kondicioniranja na udarnu žilavost 3D štampanih materijala.....	108
3.6.1 Materijali i metode.....	108
3.6.2 Rezultati i diskusija	109
4 Zaključak	113
5 Literatura	115
Biografija autora.....	128
Изјава о ауторству	129
Изјава о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада.....	130
Изјава о коришћењу	131

Popis slika

Slika 1: Šema rada i glavnih komponenti 3D štampača Bambu Lab X1C	10
Slika 2: Dimenzije projektila 9 x 19 mm (1 – košuljica, 2 – jezgro) [158]	17
Slika 3: Mjerenje mase PLA projektila izrađenog prema usvojenoj skali na analitičkoj vagi	20
Slika 4: a) Rastavljen standardni metak, b) Metak sa 3D štampanim projektilom i standardni metak sa FMJ projektilom [158].....	21
Slika 5: Opitni sto sa etalonskom cijevi i senzorima	22
Slika 6: Filtrirana i nefiltrirana kriva pritisak-vrijeme za izmjereni unutrašnjebalistički ciklus	25
Slika 7: Izgled automatski generisanog izvještaja o mjerenjima unutrašnjo-balističkih parametara	26
Slika 8: Dijagram promjene pritiska u komori sagorijevanja u funkciji vremena za FMJ projektil	27
Slika 9: Dijagram promjene pritiska u komori sagorijevanja u funkciji vremena za PLA projektil	29
Slika 10: Poređenje maksimalnog pritiska i brzina na ustima cijevi za oba tipa municije	30
Slika 11: Bljesak na ustima cijevi, FMJ projektil.....	33
Slika 12: Bljesak na ustima cijevi, PLA projektil.....	33
Slika 13: Nesagorjele čestice baruta pri napuštanju cijevi oružja za slučaj opaljenja PLA municije	34
Slika 14: Tunel za balistička ispitivanja – Igman dd, Konjic	36
Slika 15: Izgled papirne mete nakon testiranja tačnosti i preciznosti.....	37
Slika 16: Projektil sa visinom sloja 0.08 mm, PLA.....	40
Slika 17: Projektil sa visinom sloja 0.2 mm, PLA.....	41
Slika 18: Dio mreže oko dna projektila za projektil izrađen sa visinom sloja štampe od 0,08 mm	41
Slika 19: Polje brzine strujanja za glatki FMJ projektil, kalibar 9 x 19 mm	42
Slika 20: Polje brzine strujanja za projektil sa visinom sloja 0,2 mm, kalibar 9 x 19 mm	43
Slika 21: Polje brzine strujanja za projektil sa visinom sloja 0,08 mm, kalibar 9 x 19 mm	43
Slika 22: Balistički gel NATO 20, Samson Kamnik	46
Slika 23: Pretapanje balističkog gela (priprema i hlađenje)	47
Slika 24: Tunel za balistička ispitivanja sa armirano-betonskom zaštitom – Igman dd, Konjic	48
Slika 25: Blok spreman za testiranje	49
Slika 26: Izgled balističkog bloka nakon testiranja	50
Slika 27: Sve vrijednosti dubine penetracije za FMJ i PLA projekte pri laboratorijskom testiranju	51
Slika 28: Mreža konačnih elemenata za FMJ projektil, Ansys Autodyn.....	55
Slika 29: Mreža konačnih elemenata za PLA projektil, Ansys Autodyn	55
Slika 30: Konfiguracija materijala na kraju simulacije penetracije FMJ projektila	56
Slika 31: Polje brzina na kraju simulacije, FMJ projektil	56
Slika 32: Konfiguracija materijala na kraju simulacije penetracije PLA projektila	56
Slika 33: Polje brzina na kraju simulacije, PLA projektil	57
Slika 34: Priprema za testiranje na civilnom strelištu "Pašino brdo", Sarajevo	59
Slika 35: Penetracija PLA projektila do maksimalne dubine i povratak na konačnu dubinu.....	60
Slika 36: Ulazak PLA projektila do konačne dubine i izlazak iz gela na istu stranu	61
Slika 37: Bljesak na ustima cijevi, penetracija i napuštanje bloka - PLA projektil.....	61
Slika 38: Ostaci nesagorjelih barutnih čestica na površini balističkog gela	62
Slika 39: Položaj PLA projektila nakon gađanja.....	62
Slika 40: Penetracija PLA projektila ispaljenog iz zagrijane pištoljske cijevi u NATO 20% balistički gel ...	63
Slika 41: Penetracija FMJ projektila u balistički gel	64
Slika 42: Izgled FMJ projektila nakon penetracije u balistički gel NATO 20%	65
Slika 43: Sve izmjerene vrijednosti dubine penetracije za različite projekte i različite uslove.....	67
Slika 44: Razlike u izmjerenim specifičnim energijama za različite projekte pri različitim uslovima ispitivanja	68
Slika 45: Municija kalibra 7.62 x 39 mm sa polimernim (lijevo) i metalnim (desno) projektilima.....	69

Slika 46: Udar PLA projektila kalibra 7,62 x 39 mm u balistički gel	70
Slika 47: Idejno rješenje MGS opremljenog 3D štampačem za proizvodnju municije na terenu	72
Slika 48: Municija kalibra 7,62 x 39 mm sa originalnim i sa modifikovanim projektilom.....	72
Slika 49: Testiranje municije sa projektilima sa disperznim punjenjem	73
Slika 50: Izgled mete nakon gađanja jednim projektilom kalibra 7,62 x 39 mm sa disperznim punjenjem (26 kuglica).....	74
Slika 51: Dimenzije kvadra u mm [153]	78
Slika 52: Korišćene geometrije ispune: a) cubic, b) grid, c) gyroid, d) honeycomb [153].....	79
Slika 53: Proces 3D štampe jednog kvadra na Bambu Lab X1C 3D štampaču [153].....	80
Slika 54: Eksperimentalna postavka za testiranje uticaja geometrije ispune [153].....	81
Slika 55: Orijentacija udara projektila u metu u odnosu na geometriju ispune [153]	81
Slika 56: Dimenzije epruveta za ispitivanje prema ISO standardu, a) ISO 527-2; b) ISO 178 [153]	82
Slika 57: Dubina penetracije projektila u 3D štampanu polimernu metu: a) rezultati numeričke simulacije, b) eksperimentalni rezultat na bazi CT snimanja [153]	84
Slika 58: 3D štampane mete od različitih polimera.....	87
Slika 59: 3D štampane epruvete za ispitivanje mehaničkih osobina: a) svi materijali; b) orijentacija i položaj prilikom štampe	88
Slika 60: Municija kalibra 0,22 LR, PTG.....	88
Slika 61: Eksperimentalna postavka za balističko ispitivanje uticaja materijala na opitnom poligonu PTG..	89
Slika 62: Proces eksperimentalnog utvrđivanja zatezne čvrstoće polimera na univerzalnoj mašini za ispitivanje	90
Slika 63: CT snimanje meta nakon balističkog ispitivanja, KCUS	90
Slika 64: CT snimci sa vidljivim zarobljenim projektilima i dubinama penetracije	91
Slika 65: Usporedni prikaz dubina penetracija za različite materijale.....	91
Slika 66: Usporedni prikaz zatezne i savojne čvrstoće ispitanih materijala.....	92
Slika 67: Odnos zatezne čvrstoće materijala i dubine penetracije projektila	93
Slika 68: 3D štampa rotirane mete	94
Slika 69: Šematski prikaz orijentacije: a) projektil presijeca zidove susjednih ćelija; b) projektil putuje duž ose ćelije, okomito na njene zidove.....	95
Slika 70: 3D štampa meta za balistička i epruveta za mehanička ispitivanja od PET CF na Ultimaker S5 Pro	98
Slika 71: Izgled meta od PET CF sa različitim gustinama ispune (vidljive u procentima i masa u gramima)	99
Slika 72: Usporedba prosječno ostvarenih dubina penetracije projektila 0,22 LR u 3D štampanoj meti od PET CF sa različitim gustinama ispune.....	100
Slika 73: Izmjerene dubine penetracije za Strongman (50% honeycomb, lijevo) i PET CF (75% gyroid, desno)	101
Slika 74: Proces 3D štampe ploče za sendvič panel, 50% honeycomb, BL X1C	102
Slika 75: Proces izrade sendvič panela i njegov ilustrativni prikaz sa orijentacijom gađanja.....	103
Slika 76: Pribor potreban za izradu sendvič panela karbon - polimer	104
Slika 77: Postavka sendvič panela za eksperimentalno testiranje (nakon gađanja).....	104
Slika 78: Izgled sendvič panela nakon gađanja i pozicija zaustavljanja projektila kalibra 9 x 19 mm	105
Slika 79: Snimak sa ultrabrze kamere - udar i penetracija projektila 9 x 19 mm u sendvič panel	105
Slika 80: Usporedba dubine penetracije za slučaj čisto polimerne strukture i sendvič panela.....	106
Slika 81: Konceptualna razlika mehanizma odgovora na udar projektila za različite tipove struktura u sendvič panelima	107
Slika 82: Izgled i dimenzioni odnosi epruvete za ispitivanje prema standardu 179-1 [197].....	108
Slika 83: Epruvete 3D štampane prema ISO 179-1 standardu, TPU, Bambu Lab X1C.....	109
Slika 84: Epruvete pozicionirane za ispitivanje i njihovo mjerenje, sobna temperatura (lijevo) i ohlađena (desno)	110
Slika 85: Izgled 3D štampanih epruveta nakon ispitivanja	111

Popis tabela

Tabela 1: Izmjerene vrijednosti karakterističnih parametara pri eksperimentalnom istraživanju funkcionalnosti municije sa polimernim projektilima [158]	18
Tabela 2: Rezultati ispitivanja projektila izrađenih u različitim skalama (osa Z odgovara osi projektila) 3D štampe u odnosu na standardizovane dimenzije.....	20
Tabela 3: Izmjereni i izračunati parametri za FMJ municiju.....	28
Tabela 4: Izmjereni i izračunati parametri za PLA municiju.....	29
Tabela 5: Vrijednosti maksimalnih međusobnih udaljenosti centara rupa prilikom ispitivanja tačnosti i preciznosti.....	37
Tabela 6: Rezultati aerodinamičke analize	44
Tabela 7: Fizikalne osobine balističkog gela proizvođača Samson Kamnik [183]	46
Tabela 8: Dubine penetracije 3D štampanog PLA projektila u NATO 20% balističkom gelu	50
Tabela 9: Dubine penetracije FMJ projektila u NATO 20% balističkom gelu	50
Tabela 10: Zbirna komparativna tabela parametara ispitivanih projektila	51
Tabela 11: Pregled konstitutivnih modela materijala	54
Tabela 12: Validacija numeričkog modela poređenjem s eksperimentalnim rezultatima	57
Tabela 13: Rezultati penetracije PLA projektila ostvarene nakon ispaljivanja iz hladne pištoljske cijevi u NATO 20% balistički gel	63
Tabela 14: Rezultati ostvarene dubine penetracije PLA projektila ispaljenih iz zagrijane pištoljske cijevi u NATO 20% balistički gel	64
Tabela 15: Rezultati penetracije FMJ projektila iz hladne cijevi u NATO 20% balističkom gelu	65
Tabela 16: Odabrani parametri 3D štampe kvadara, korišćeni za sve tipove ispune [153].....	80
Tabela 17: Vrijeme štampe i mase kvadara [153]	80
Tabela 18: Poređenje osobina materijala dobijenih eksperimentalnim putem i navedenih u Bambu Lab TDS [153]	82
Tabela 19: Izmjerene dubine penetracije za svaku metu i prosječne vrijednosti [153]	83
Tabela 20: Odabrani parametri 3D štampe kvadara za sve četiri ispitana materijala.....	87
Tabela 21: Izmjerene dubine penetracije projektila kalibra 0,22 LR za svaki uzorak i prosječne vrijednosti po materijalu.....	91
Tabela 22: Rezultati mehaničkih osobina prema ISO standardima za 3D štampane polimere	92
Tabela 23: Izmjerene dubine penetracije projektila u zavisnosti od orijentacije honeycomb ispune (Strongman, 50% gustina ispune).....	95
Tabela 24: Glavni parametri 3D štampe PET CF na UM S5 Pro.....	98
Tabela 25: Izmjerene dubine penetracije projektila kalibra 0,22 lr u 3D štampane mete izrađene od PET CF sa različitim gustinama ispune.....	99
Tabela 26: Rezultati mehaničkog ispitivanja osobina 3D štampanih epruveta od PET CF	100
Tabela 27: Vrijednosti udarne žilavosti ostvarene pri ispitivanju nakon temperaturnog kondicioniranja materijala	110

Popis skraćenica

Skraćenica	Značenje
2D	dvodimenzionalno (eng. two-dimensional)
3D	trodimenzionalno (eng. three-dimensional)
ABS	akrilonitril-butadien-stiren (eng. acrylonitrile butadiene styrene)
AEP	savezna inženjerska publikacija (eng. Allied Engineering Publication)
AISI	Američki institut za željezo i čelik (eng. American Iron and Steel Institute)
ANSYS	programski paket za numeričke simulacije (Ansys, Inc.)
ASA	akrilonitril-stiren-akrilat (eng. acrylonitrile styrene acrylate)
ASTM	Američko društvo za ispitivanje i materijale (eng. American Society for Testing and Materials)
ARX	tip polimer-bakarnog projektila (Ruger/PolyCase ARX)
BL	Bambu Lab (proizvođač 3D štampača i materijala)
CAD	računarski potpomognuto projektovanje (eng. computer-aided design)
CATIA	programski paket za projektovanje (Dassault Systèmes)
CFD	računarska dinamika fluida (eng. Computational Fluid Dynamics)
CNC	računarsko numeričko upravljanje (eng. computer numerical control)
CNN	konvolucijska neuronska mreža (eng. convolutional neural network)
CT	komputerizovana tomografija (eng. computed tomography)
CV	koeficijent varijacije (eng. coefficient of variation)
DARPA	Agencija za napredne odbrambene istraživačke projekte (eng. Defense Advanced Research Projects Agency)
DBSCAN	metoda grupisanja zasnovana na gustini (eng. density-based spatial clustering of applications with noise)
DED	usmjereno taloženje energije (eng. directed energy deposition)
DEM	metoda diskretnih elemenata (eng. discrete element method)
DLP	digitalna obrada svjetlom (eng. digital light processing)
DMLS	direktno lasersko sinterovanje metala (eng. direct metal laser sintering)
EPVAT	elektronsko mjerenje pritiska, brzine i vremena dejstva (eng. Electronic Pressure, Velocity and Action Time)
FBI	Federalni istražni biro (eng. Federal Bureau of Investigation)
FDM	taloženje topljenog materijala (eng. fused deposition modeling)
FEM	metoda konačnih elemenata (eng. finite element method)
FFF	proizvodnja topljenim filamentom (eng. fused filament fabrication)
FGC-9	model 3D štampane puške (eng. Fuck Gun Control 9 mm)
FMJ	projektil s punom metalnom košuljicom (eng. full metal jacket)
FPS	broj sličica u sekundi (eng. frames per second)
FPV	pogled iz prvog lica (eng. first-person view)
HEAT	protivoklopna kumulativna bojna glava (eng. high-explosive anti-tank)
HEL	Hugoniotova elastična granica (eng. Hugoniot elastic limit)
ISO	Međunarodna organizacija za standardizaciju (eng. International Organization for Standardization)
KCUS	Klinički centar Univerziteta u Sarajevu

Skraćenica	Značenje
LENS	laserski potpomognuto oblikovanje mrežaste geometrije (eng. laser engineered net shaping)
LOM	proizvodnja laminiranjem (eng. laminated object manufacturing)
LR	dugo puščano (kod kalibra .22 LR; eng. long rifle)
MATLAB	programski paket za numeričku obradu (MathWorks)
MGS	mobilna zemaljska stanica (eng. mobile ground station)
NATO	Organizacija Sjevernoatlantskog ugovora (eng. North Atlantic Treaty Organization)
PA	poliamid (komercijalno: najlon)
PC	polikarbonat (eng. polycarbonate)
PCTG	polietilen-tereftalat modifikovan glikolom, cikloheksilenska varijanta
PEEK	polieter-eter-keton (eng. polyether ether ketone)
PET CF	polietilen-tereftalat ojačan ugljeničnim vlaknima (eng. carbon fiber)
PETG	polietilen-tereftalat modifikovan glikolom (eng. polyethylene terephthalate glycol)
PLA	polilaktid, polilaktična kiselina (eng. polylactic acid)
PTG	Pobjeda Technology Goražde (proizvođač municije)
RDX	ciklotrimetilen-trinitramin (eng. Research Department eXplosive)
RNN	rekurentna neuronska mreža (eng. recurrent neural network)
RSD	srpski dinar (valuta)
SEMAR	modul za redukciju metalnih artefakata u CT snimanju (Canon SEMAR)
SLA	stereolitografija (eng. stereolithography)
SLM	selektivno lasersko topljenje (eng. selective laser melting)
SLS	selektivno lasersko sinterovanje (eng. selective laser sintering)
SST	transport smicajnih napona, turbulentni model (eng. shear stress transport)
STANAG	standardizacijski sporazum NATO-a (eng. Standardization Agreement)
SWIR	kratkotalasni infracrveni opseg (eng. short-wavelength infrared)
TDS	tehnički list materijala (eng. technical data sheet)
TPMS	trostruko periodične minimalne površine (eng. triply periodic minimal surfaces)
TPU	termoplastični poliuretan (eng. thermoplastic polyurethane)
TRZ	tehnički remontni zavod
UAS	bespilotni vazduhoplovni sistem (eng. unmanned aircraft system)
UAV	bespilotna letjelica (eng. unmanned aerial vehicle)
UM	Ultimaker (proizvođač 3D štampača i materijala)
UV	ultraljubičasto (zračenje)

Popis oznaka i simbola

Oznaka	Značenje	Jedinica
A	površina poprečnog presjeka (cijevi / projektila / tijela)	m^2
a	ubrzanje	m/s^2
a	brzina zvuka u vazduhu (na 20 °C, $a = 343$)	m/s
C_1	empirijski koeficijent linearnog člana retardirajuće sile	—
C_2	empirijski koeficijent kvadratnog člana retardirajuće sile	—
C_d	bezdimenzionalni koeficijent aerodinamičkog otpora	—
D	prečnik projektila	m
d	dubina penetracije	m (mm)
E_{gas}	ukupna energija oslobođena sagorijevanjem pogonskog goriva	J
E_k	kinetička energija projektila	J
E_{trenje}	energija utrošena na trenje projektila o cijev	J
E_{sag}	kinetička energija gasovitih produkata sagorijevanja	J
E_{gubici}	ostali energetske gubici (toplinska disipacija i sl.)	J
F	rezultantna sila na projektil	N
F_r	retardirajuća (usporavajuća) sila u mediju	N
K	empirijska konstanta modela penetracije	$m \cdot (kg \cdot m^2 \cdot s^{-2})^{-n}$
k	faktor usporavanja u letu	m^{-1}
L/D	odnos dužine i prečnika (referentnog cilindra)	—
Ma	Machov broj	—
m	masa projektila	kg (g)
n	broj mjerenja / bezdimenzionalni eksponent modela	—
P	pritisak gasa u komori sagorijevanja	Pa (bar)
P	dubina penetracije (kod energetskog bilansa)	m
R	prosječna sila otpora mete	N
R^2	koeficijent determinacije	—
Re	Reynoldsov broj	—
r	ekvivalentni radijus projektila	m
t	vrijeme	s
V_{50}	granična balistička brzina (50% vjerovatnoća proboja)	m/s
v	brzina projektila / brzina strujanja	m/s
v_0	početna brzina na ustima cijevi (brzina udara)	m/s
x	pređena udaljenost	m
x_i	pojedinačna izmjerena vrijednost	—
$\bar{x}$	aritmetička sredina mjerenja	—
Y_0	granica tečenja materijala	MPa
σ_{HEL}	Hugoniotova elastična granica	GPa
ρ	gustina (vazduha / fluida / materijala)	kg/m^3
μ	dinamička viskoznost vazduha (na 20 °C, $\mu = 1,81 \cdot 10^{-5}$)	Pa·s

1 Uvod

Na globalnom nivou, vojna industrija predstavlja potencijalno najnapredniju industriju kada je u pitanju istraživanje i razvoj novih tehnologija. Već od samih ljudskih početaka i drevnih civilizacija, što potvrđuju historijska nalazišta i crteži u pećinama, težnja je bila unaprijediti sistem lova, zaštite i napada. To su počeci vojne industrije, gdje su se stvarali obrisi onoga što danas postoji. Razvoj koplja, luka i strijele, katapulta i topova, sve su to preteče i osnovni koncepti funkcionisanja današnjih veoma modernih sistema. Posmatrajući trendove i u drugim industrijama, ponovo je primjetan uzorak da je za skoro svaki veliki tehnološki iskorak odgovorna vojna industrija, koja ga je potom spustila na civilni nivo. Mogu se istaći primjeri mobilnih telefona, mreža i modernih sistema komunikacije nastalih u ratnim dejstvima i mnogih drugih primjera za koje je manje poznato da su primarno razvijeni za potrebe vojske [1,2].

Naravno, svaki izum, pa tako i vojni, ima svoju svrhu i planiranu upotrebu. Primarni cilj oružja i municije je izazivanje nekog efekta na cilju, nezavisno od tipa municije i tipa cilja. Posmatrajući direktno municiju malog, srednjeg i velikog kalibra, dominantno je zajednička uloga isporučivanje destrukcije na metu. S druge strane, paralelno uz razvoj napada razvija se i zaštita, pa tako uz drevna koplja postoje i primjeri drevnih oklopa, štitova, kaciga i drugih zaštitnih struktura. I nakon hiljada godina ni jedna strana nije napravila značajan iskorak u odnosu na drugu, tako da i dalje bilježimo paralelan razvoj napada i odbrane. Koliko god pomenuta municija bila efikasna, u svakom trenutku postoji neki vid zaštite sposoban da joj se suprotstavi [3].

Za analizu ove veoma kompleksne interakcije zadužena je posebna grana balistike - terminalna balistika. S razvojem municije i zaštite razvijala se i sofisticiranost terminalne balistike i njenih mogućnosti. Ipak, imajući u vidu historijski period, trajanje pojedinih faza razvoja, upotrebu materijala i drugo, može se donijeti zaključak da je terminalna balistika razvijana primarno na homogenim metalnim materijalima i konvencionalnim postupcima izrade, gdje široko rasprostranjeni modeli nose upravo te pretpostavke o materijalima. Takvi modeli su se mogli smatrati održivim i validnim za skoro sve probleme terminalne balistike, sve do unazad nekoliko godina. Razlog za to leži u rapidnom razvoju aditivnih tehnologija.

Iako se aditivna proizvodnja začela u civilnom i industrijskom okruženju [4,5], njen rani razvoj i komercijalizaciju u velikoj mjeri su finansirale i usmjeravale odbrambene institucije. Selektivno lasersko sinterovanje (SLS) razvijeno je sredinom 1980-ih pod pokroviteljstvom DARPA-e [6,7], dok je Sandia National Laboratories, kao institucija nacionalne sigurnosti, već u 1980-im koristio aditivne postupke za izradu prototipova odbrambenih i vazduhoplovnih komponenti, da bi sredinom 1990-ih razvio LENS, jednu od prvih tehnologija aditivne proizvodnje metala [6,7]. Iz tog razloga nije ni neočekivano, iako opet djeluje da su države ovo dočekale nespremno, što postoji sve više primjera potpuno funkcionalnog 3D štampanog oružja i municije, kao i prototipa zaštitnih struktura. Slojevitost struktura, kontrolisana unutrašnja arhitektura, varijabilna gustina ispune i drugi kritični parametri aditivne proizvodnje ruše do sada stabilne modele terminalne balistike i iziskuju razvoj novih, kako bi terminalna balistika adekvatno mogla pratiti i opisivati fenomene najsavremenijih tipova oružja i municije, posebno kada je riječ o visoko-dinamičkom opterećenju koje iziskuje posebne modele, u odnosu na ustaljene kvazi-statičke. 3D štampa se samim tim pojavljuje na obje strane balističkog problema - kao izvor projektila i kao način izrade zaštitnih struktura. Zajedničko polazište su parametri štampe, a ne tipovi objekata.

Jedna od glavnih motivacija za ovakvu temu jeste praznina u istraživanjima. Sa stanovišta analize municije i njenih terminalno-balističkih efekata dominiraju forenzički, pravni i trend-radovi, dok sistematska terminalno-balistička analiza malog kalibra praktično izostaje, što će biti još jasnije izraženo kroz pregled literature. S aspekta zaštite, s druge strane, prevladavaju teorijska razmatranja i numeričke simulacije, dok su ispitivanja pod stvarnim udarnim opterećenjem veoma rijetka.

Postojeći klasični modeli ne opisuju pouzdano aditivno proizvedene sisteme, kao što ni jedan pojedinačni standardizovani test materijala (poput zateznog, savojnog ili Charpy) ne predviđa stvarno balističko ponašanje - tvrdnje su to koje su u ovom radu i dokazane različitim eksperimentalnim

metodama. Zbog toga je direktno eksperimentalno balističko ispitivanje smislen pravac i temelj svih daljih istraživanja, jer u ovakvoj situaciji analitički i numerički modeli imaju smisla samo uz eksperimentalnu verifikaciju i validaciju.

Zbog svega navedenog, predmet disertacije kroz dvije cjeline obuhvata eksperimentalnu, analitičku i numeričku analizu terminalne balistike 3D štampane municije malog kalibra i 3D štampanih zaštitnih struktura. Pošto je i dalje riječ o prilično neistraženom području, smisleno je ući kroz standardizovane i poznate kalibre, poput 9×19 mm (NATO) i 7,62×39 mm, koji su razmatrani u prvoj cjelini ovog rada, jer za njih postoji solidna zastupljenost u literaturi.

Hipoteze koje se postavljaju su:

- realna je kontrola ponašanja štampanih projektila kroz materijal, geometriju i parametre štampe, što će olakšati njihovu dalju karakterizaciju i razvoj,
- razlike u odnosu na konvencionalnu metalnu municiju direktna su posljedica različite mase, slojevitosti i unutrašnje geometrije,
- moguće je projektovati štampane strukture sa mjerljivom i ponovljivom balističkom otpornošću,
- integrisani analitičko-eksperimentalni pristup daje pouzdane referentne podatke za inženjersku praksu.

U skladu sa ovim, glavni ciljevi su proširenje znanja i baze eksperimentalnih podataka, kao i identifikacija prednosti i ograničenja aditivne proizvodnje u ovom kontekstu. Ispunjenjem ovih ciljeva može se ostvariti značajan naučni i stručni doprinos, gdje se osim generisanja velikog broja eksperimentalnih podataka dolazi i do referentnog eksperimentalno-analitičkog okvira i modela ograničenog domena važenja, kao i do inženjerski primjenjivih smjernica za projektovanje i poređenje sa konvencionalnim sistemima. Time ova disertacija dobija i praktičan značaj, posebno imajući u vidu okruženje u kojem nastaje, gdje Srbija i Bosna i Hercegovina bilježe porast razvoja i inovacija u polju vojne industrije, tako da je otvoren put ka istraživanju i uvođenju novih proizvoda. Da bi se bolje razumjela tematika, neophodno je prvo detaljnije se uvesti u pojmove vezane za balistiku, konkretno terminalnu balistiku. Nakon toga, imajući u vidu da je to jedan od glavnih alata, potrebno je opisati aditivnu proizvodnju i razmotriti njene suštinske elemente. Kroz pregled literature sveobuhvatno se analiziraju dosadašnja istraživanja na ovim poljima i klasifikuju u različite grupe.

Disertacija je potom podijeljena na dvije tematske cjeline: prvu koja se tiče 3D štampanih projektila i drugu koja se tiče 3D štampane balističke zaštite. Obje cjeline su fundamentalno usko povezane, gdje je aditivna proizvodnja ključ svega, a nastojanje je opisati terminalno-balističke fenomene 3D štampanih materijala u sistemu interakcije napada i odbrane, što bi zasebno posmatrano bilo nepotpuno i nedefinisano.

Za potpunu analizu 3D štampanih projektila, nakon uvodnog razmatranja, izvršeno je sistematsko ispitivanje. Prije svega, ispitana je funkcionalnost sistema i smislenost ovakvog istraživanja. Nakon inicijalnih potvrda, definisan je najbolji pristup izradi. Nakon toga analiza teče hronološki kroz sve faze balističkog procesa, počevši sa analizom unutrašnje-balističkih parametara, nakon toga kroz prelaznu balistiku i bljesak na ustima cijevi, potom se analizira faza leta, da bi se poseban fokus stavio na terminalnu balistiku, kroz serije standardizovanih i nestandardizovanih ispitivanja. Zbog obimnosti i većeg broja eksperimenata, svaka balistička faza je koncipirana kao jedna cjelina, sa uvodom, opisom eksperimentalnih metoda, eksperimentima, rezultatima i diskusijom, a sve u cilju boljeg predstavljanja podataka i njihovog shvatanja. Ovim načinom se omogućava studiozna analiza svakog odrađenog koraka, bez bojazni da će se izazvati konfuzija kod čitaoca. Kako bi se ostvario praktičan cilj disertacije, osim odjeljka sa potencijalnim prijedlozima optimizacije, data je i analiza potpuno novog tipa municije sa disperznim dejstvom.

U drugoj tematskoj cjelini fokus je na identifikaciji ključnih parametara 3D štampe u izradi adekvatne balističke zaštite. Cjelina započinje identifikacijom optimalne geometrije ispune, nakon čega se analiziraju različiti polimerni materijali kao jedina varijabla. Potom se pristupilo potvrđivanju i pronalasku optimalne orijentacije i gustine ispune, a zatim je sve integrisano u izradi i testiranju sendvič panela sa karbonskim vlaknima i polimernom bazom. Praktična nota ove cjeline je, osim izradom balističkih panela, potvrđena i variranjem različitih temperatura i analizom uticaja na

materijal. Sva istraživanja su i u ovoj cjelini podijeljena na zasebne podcjeline, također radi lakše interpretacije podataka i predstavljanja eksperimentalnih metoda. Po završetku obje cjeline dat je i zajednički zaključak, koji se osvrće na sve navedeno.

1.1 Osnovni pojmovi iz balistike

1.1.1 Balistika

Balistika je naučna disciplina koja se bavi proučavanjem kretanja projektila. Njen naziv potiče od grčke riječi *balein* što znači baciti [8]. Neformalno, predmet je izučavanja stoljećima sa ciljem unapređenja djelovanja naoružanja kroz shvatanje i predviđanje kretanja projektila. Zvanično definisanje balistike kao nauke se desilo krajem 19. stoljeća kao rezultat standardizacije projektila i razvoja eksperimentalnih metoda. Danas se balistika izučava sa aspekta primjena u vojsci, medicini, organima reda, proizvodnji oružja i municije i na mnogim drugim mjestima [9].

U zavisnosti od toga koja faza leta projektila se razmatra, kreirana je podjela prema cilju izučavanja na [8,10,11]:

1. Unutrašnja balistika – tretira karakteristike pogonskih materija, metode za proračun pritiska gasa i brzine projektila/raketa u fazi ubrzavanja kao i analizom drugih pogonskih sistema za ubrzavanje projektila ili fragmenata. U slučaju gdje se izučava kretanje projektila, pod ovom fazom se analizira njegovo kretanje u cijevi (nezavisno od toga koji kalibar je u pitanju), dok u slučaju raketnih projektila postoji izvjesna analogija ove faze kretanja sa aktivnom fazom leta raketnog projektila (period leta rakete u kojem radi raketni motor).
2. Prelazna balistika – analizira dinamiku u periodu u kojem projektil napušta cijev, praćen pogonskim gasom koji se također širi iz cijevi. Osim toga, u ovom trenutku se analizira i efekat generisanog nadpritiska na osobe ili strukture koje su u blizini ili kontaktu s oružjem. Veoma značajna faza za kriminalistička i forenzička istraživanja.
3. Spoljna balistika – bavi se različitim metodama proračuna sila koje djeluju na projektil u letu, daje modele za procjenu trajektorije, tretira žiroskopsku stabilizaciju projektila i daje osnov za aerodinamičku optimizaciju projektila.
4. Balistika na cilju (terminalna balistika) – analizira principe dejstva, odnosno interakcije projektila sa ciljem. Tretira mnogo značajnih fenomena za forenzička ispitivanja, bez obzira na tip cilja. Najvažniji vid izučavanja je analiza, opis i predikcija međudjelovanja projektila i cilja od različitih materijala. U literaturi će se često njen naziv zamijeniti i pojmovima „forenzička balistika“ ili „balistika rana“, iako to predstavlja samo podgrupu u analizi balistike na cilju i tretira prodor projektila u živa bića.

1.1.2 Balistika na cilju

Terminalna balistika proučava ponašanje projektila i mete kada dođe do njihove interakcije, analizirajući efekte koje projektil izaziva na meti (proboj, deformaciju, prenos energije...) [12]. Postoji nekoliko ključnih aspekata ove grane balistike:

1. Interakcija projektila i mete – faza u kojoj se analizira dešavanje u trenutku udara, utvrđuje se da li projektil prilikom udara u metu istu probija, odbija se, fragmentira se ili deformiše;
2. Efekti na metu – analiziraju se fizičke promjene na meti – probojno polje, raspršivanje materijala, deformacije i drugi vidovi oštećenja;
3. Prenos energije – proučava se prenos kinetičke energije projektila na metu i njegov uticaj na oštećenje mete;
4. Materijal mete i projektila – razmatra se uticaj osobina materijala na interakciju sistema meta – projektil.

Imajući u vidu prethodno opisano područje istraživanja balistike na cilju, moguće je govoriti o njenom konkretnom značaju u različitim sferama, kao što su:

1. Vojna industrija – analiza učinaka municije, eksplozivnih naprava i zaštitne opreme;
2. Kriminalistika – proučavanje tragova i rana nastalih dejstvom vatrenog oružja;
3. Medicinska forenzika – razumijevanje mehanike povreda za potrebe dijagnostike i sudskih istraga;
4. Inženjering materijala – razvoj jačih i otpornijih materijala za pancirne prsluke, vozila i strukture.

S pravom se može reći da je balistika na cilju ključna za unapređenje sigurnosnih i odbrambenih sistema, kao i za bolji uvid u efekte udara projektila u različite mete [13].

Sa stanovišta fizike, interakcija između projektila i čvrstog tijela je izuzetno složen proces koji se odvija u veoma kratkom vremenskom intervalu uz simultano generisanje velikih sila i pritisaka. U takvom okruženju, materijali najčešće pokazuju drugačije osobine od onih koje inače ispoljavaju u standardnim, relativno sporim procesima. Te osobine su inače definisane na osnovu poznavanja parametara materijala određenih pod statičkim ili kvazi-statičkim uslovima, dok značajno drugačije vrijednosti čvrstoće i otpornosti materijala bivaju izražene za vrijeme dinamičkih procesa. Ovo je umnogome uzrokovano ekstremnom brzinom odvijanja takvih događaja koji materijalu ne dozvoljavaju standardno ponašanje. Dovoljno je pomenuti podatak da proces probijanja pušcanog projektila kroz čeličnu metu traje samo oko 50 μ s. Posljedica ovih promjena u parametrima materijala su česte greške prilikom standardnih projekcija ponašanja tijela prilikom udara. Zbog toga je neophodno detaljno analizirati terminalno-balističke procese uz što više eksperimentalnih testiranja [12]. Analiza procesa proboja, deformacije i prenosa energije je ključna za primjenu u odbrambenoj industriji. Modeliranje ponašanja materijala prilikom udara projektila, visokofrekventni rendgenski snimci i drugi načini bilježenja interakcije projektil – meta, direktno utiču na razvoj otpornijih zaštitnih sistema. Naravno, pošto se u vojnoj industriji jednako brzo razvijaju i napad i odbrana, terminalna balistika doprinosi i unapređenju dizajna municije, kao što je npr. značajan napredak na polju segmentiranih šipki za kinetičke projekte. Na ovaj način optimizovana municija postaje efikasnija, tj. ostvaruje bolje efekte pri različitim udarnim brzinama i uglovima [14].

Također, ova grana balistike se detaljno i svakodnevno izučava u medicini i forenzici. Pojedini autori navode da je forenzička balistika (segment terminalne balistike), jedna od najfascinantnijih naučnih disciplina. Njena uloga je ključna za rekonstrukciju svih fenomena do kojih je došlo prilikom upotrebe vatrenog oružja i njegove identifikacije. Na osnovu nje forenzičari stiču sve potrebne informacije o municiji i oružju. U dosta slučajeva se rezultati forenzičkih analiza mogu primijeniti za modifikacije oružja i punjenja [15]. Još jedan važan podtip balistike na cilju se izučava kroz medicinu – balistika rana. Kroz istraživanja ljudi i životinja se najčešće dijeli na tri područja [16]:

1. Rane nastale pištoljskom municijom;
2. Rane od fragmenata;
3. Rane od dalekometnog oružja.

Podjela je nastala na osnovu razlike u obliku, strukturi i energiji kojom dejstvuje municija. Te razlike direktno utiču na tkivo i formiranje rane [16].

1.1.3 Mehanika penetracije

Pod probijanjem (penetracijom) se podrazumijeva proces koji započinje udarom penetratora u prepreku i nastavlja se njegovim kretanjem kroz strukturu prepreke. Pri tome se pod penetratorom podrazumijeva svako tijelo namijenjeno za probojno dejstvo, dok se preprekom smatra sredina izložena istom dejstvu [8]. Na penetraciju prepreke penetratorom utiču različite varijable, kao što su: osobine materijala, udarna brzina, oblik penetratora, položaj oslonca prepreke, relativne dimenzije penetratora i prepreke itd. [17]. S obzirom na materijal prepreke, najčešće se razmatra proces probijanja sljedećih materijala [8]:

- Metali;
- Betoni;
- Tlo – različiti tipovi zemljišta;
- Keramički materijali i staklo;
- Polimeri i vlaknima ojačani plastični materijali;
- Tkanine i kompozitni vlaknasti materijali.

Penetratorima se najčešće smatraju projektili (malog, srednjeg i velikog kalibra), fragmenti, kumulativni mlaz i slični efekti dejstva različitih tipova municije. U zavisnosti od energije koju generišu prilikom kontakta s preprekom, definiše se i njihova funkcija.

Stvarna perforacija (potpuna penetracija) prepreke može da se ostvari jednim mehanizmom penetracije ili kombinacijom više njih. U osnovi se kao glavni mehanizmi navode: plastično formiranje otvora (*piercing*), povećanje rupa radijalnim tokom, izbacivanje čepa i rascvjetavanje [18]. Različiti mehanizmi deformacije materijala uzrokuju da se perforacija može pojaviti u različitim fazama procesa. Stvarni mehanizam koji se odvija u pojedinoj fazi će zavisiti od prethodno navedenih varijabli prepreke i penetratora. Za razumijevanje i predviđanje procesa je neophodno poznavati kritične parametre materijala penetratora i mete. Dualno, razumijevanje materijala prepreke je bitno da bi se napravila takva zaštita koja će minimalnom gustinom moći zaustaviti projektili, a s druge strane će se dizajnirati projektil koji poznatu prepreku savladava korišćenjem što manje energije. Za određivanje tih parametara se koristi čitav niz metoda o kojima će u nastavku biti riječ [17].

Prije konkretne analize mehaničkih osobina i drugih varijabli, potrebno se dodatno osvrnuti na modove penetracije koji se danas najviše razmatraju. Svaki od njih zavisi od osobina projektila, materijala prepreke i uslova interakcije (npr. udarne brzine i ugla udara). Ključni modovi penetracije za opisivanje različitih mehanizama kojima projektil prodire ili oštećuje ciljni materijal su plastično formiranje otvora (*piercing*), probijanje putem formiranja odsječka/čepa (*plugging*) i erozija.

Plastično formiranje otvora (probijanje) je mod penetracije u kojem projektil prolazi kroz materijal tako što izaziva lokalno plastično deformisanje i cijepanje strukture materijala. Ovaj proces obično prati oštećenje u obliku rupe čija veličina zavisi od oblika i brzine projektila. Karakteristično za ovaj mod je generisanje visoke koncentracije energije na maloj površini i da materijal prepreke ostaje oko ivica penetracione rupe [19].

Probijanje izbacivanjem čepa je mod penetracije u kojem projektil izbacuje segment materijala prepreke u obliku diska ili čepa. Ovaj proces se javlja pri relativno nižim brzinama u odnosu na prethodno objašnjeni i uključuje kombinaciju plastičnog deformisanja i smicanja čepa. Ovakvo ponašanje materijala prepreke prilikom interakcije sa projektilom je često kod homogenih i duktilnih materijala prilikom kvazi-statičkih uslova [20].

Kod erozije, projektil gubi svoj materijal dok prodire kroz materijal prepreke. Riječ je o procesu u kojem dolazi do abrazivnog ili termičkog gubitka mase projektila uslijed visokih brzina udara i intenzivnih sila. Za njega je karakterističan visok stepen trošenja projektila do kojeg dolazi kada je materijal prepreke vrlo tvrd i kada je udarna brzina ekstremno visoka [21]. Ovakav slučaj se u praksi najčešće susreće kod penetracije oklopnih vozila kumulativnim mlazom i kinetičkim potkalibarskim projektilima.

Razlikovanje modova penetracije je neophodno radi suštinskog razumijevanja balističkih interakcija i dizajna efikasnih projektila i materijala otpornih na udare.

Uz penetraciju se vežu i razlikuju četiri osnovna ishoda procesa penetracije, i to [8]:

1. Proboj – prolazak cijelog penetratora kroz prepreku;
2. Prodor – granični slučaj probijanja, za razliku od proboja, kroz otvor prolaze samo dijelovi razbijenog penetratora;
3. Zador – karakteriše zaustavljanje penetratora u prepreci ili njegovo razbijanje tokom probijanja i
4. Rikošet – predstavlja odbijanje penetratora uslijed klizanja po površini prepreke ukoliko je ona nagnuta.

Specifična energija penetracije je odnos kinetičke energije projektila i dubine penetracije. Koristi se za procjenu efikasnosti projektila [22]. Otpornost mete se definiše kao sposobnost materijala mete da se odupre penetraciji. To u suštini zavisi od čvrstoće, tvrdoće i duktilnosti materijala [23].

Udarne brzina projektila je brzina kojom se projektil kreće u trenutku udara u metu. Jedan je od ključnih parametara u balistici na cilju jer njegova vrijednost utiče na mehanička svojstva sudara, kao i na količinu prenijete kinetičke energije. Što je veća brzina u trenutku udara, veći je kapacitet projektila da probije materijale cilja. Od nje značajno zavise efikasnost penetracije, fragmentacije i drugih efekata dejstva projektila. Udarne brzinu je moguće proračunati već u području spoljne balistike na osnovu trajektorije [24, 25, 26].

Pojam koji ne treba miješati sa udarnom brzinom je terminalna brzina projektila. Pod ovim pojmom se misli na maksimalnu brzinu koju projektil postiže prilikom kretanja kroz okolinu (npr. vazduh ili vodu), kada su sile otpora (npr. aerodinamičkog otpora) uravnotežene sa gravitacionom silom koja djeluje na projektil. U kontekstu balistike na cilju, terminalna brzina često označava brzinu projektila neposredno prije udara u cilj. Terminalna brzina može, ali ne mora biti jednaka krajnjoj aerodinamičkoj brzini uslijed dodatnog ubrzanja ili usporenja tokom leta [25, 27, 28].

Iako su i definicijski slični termini i često se poistovjećuju, suštinska razlika je da se terminalna brzina odnosi na ravnotežno stanje tokom leta projektila, dok je udarna brzina trenutna vrijednost neposredno prije kontakta s ciljem. Oba parametra su ključna u analizama, ali imaju različite primjene i značenje u proučavanju ponašanja projektila. Terminalna brzina je ipak dominantno rezervisana za proučavanje kroz aerodinamiku, dok je za balistiku sudara i analizu prenosa energije udarna brzina veoma bitna. Opisano egzaktnim primjerom, udarna brzina projektila pri pogotku u metu zavisi od njegove trajektorije, otpora i udaljenosti, ali ne mora biti njegova maksimalna (terminalna) brzina tokom leta.

Udarne brzina je direktno povezana sa kinetičkom energijom (kvadrira se u jednačini), te se prema nekim istraživanjima smatra da upravo kinetička energija predstavlja primarni parametar za procjenu destruktivnog kapaciteta projektila [29].

Količina kretanja je značajna za analizu prenosa sile tokom kontakta i deformacije mete. Njom se mjeri proizvod mase i brzine (impuls, odnosno količina kretanja) koji projektil prenosi meti pri udaru [25].

Vezano za kinetičku energiju, uvodi se pojam vremenske skale prenosa energije. Definiše se doslovno kao vrijeme trajanja prenosa kinetičke energije na metu; kraće vrijeme prenosa rezultira snažnijim udarnim talasom i većom štetom [25].

Pojam koji se spominje na mnogo mjesta u literaturi i predstavlja značajan parametar je brzina V_{50} . U terminalnoj balistici, brzina V_{50} predstavlja standardizovani parametar koji se koristi za ocjenu otpornosti materijala na udar projektila. Definiše se kao brzina pri kojoj projektili koji udaraju u određeni cilj imaju vjerovatnoću proboja u 50% slučajeva [30]. Drugim riječima, pri brzini V_{50} , polovina ispaljenih projektila probija prepreku, dok druga polovina ne. Ovaj parametar je u standardizovanim ispitivanjima jedan od ključnih za testiranje balističkog nivoa zaštitne opreme, kao što su pancirni prsluci i balističke ploče, jer omogućava procjenu njihove efikasnosti u realnim uslovima.

U zavisnosti od vrste projektila, razlikuju se dva osnovna tipa procesa koje balistika na cilju izučava, a to su [8]:

- Udar inertnih projektila – analiza udara projektila koji djeluju isključivo pretvaranjem kinetičke energije u koristan rad. Proces započinje kontaktom projektila i prepreke i najčešće se analizira njeno probijanje (određuju se ključni parametri procesa probijanja);
- Udar projektila sa eksplozivnim punjenjem – prilikom ovog procesa terminalno-balistička analiza je znatno složenija. Modeliraju se procesi kao što su: detonacija, fragmentacija,

balistika parčadi, formiranje kumulativnog mlaza itd. Za ovu grupu projektila je također karakteristično i rušeće dejstvo koje nastaje kao posljedica detonacije eksplozivnog punjenja.

1.2. Različiti pristupi analizi problema

1.2.1 Konvencionalne metode

Za analizu problema u terminalnoj balistici, koriste se četiri osnovna pristupa:

1. **Analitički pristup** – ova metoda koristi matematičke modele i formule za opisivanje interakcije između projektila i cilja. Analitički modeli omogućavaju predviđanje ponašanja projektila i materijala cilja na osnovu poznatih fizičkih zakona i svojstava materijala. Međutim, zbog složenosti interakcija pri realnim uslovima, analitički modeli često zahtijevaju pojednostavljenja i pretpostavke koje mogu ograničiti njihovu tačnost [31].
2. **Empirijski pristup** – ovaj pristup se oslanja na eksperimentalne podatke i formule izvedene iz tih podataka. Empirijski modeli se razvijaju na osnovu opsežnih testiranja i omogućavaju predviđanja samo za uslove slične uslovima kao što su oni u kojima su podaci prikupljeni. Iako mogu biti vrlo korisni, njihova primjena je često ograničena na specifične scenarije i materijale za koje su razvijeni. Uslijed dinamičnog razvoja sistema koji se proučavaju u polju terminalne balistike (bilo da se radi o projektilu ili materijalu mete), potrebno je konstantno baze podataka osvježavati novim podacima i parametrima, što trenutno nije realno. Zbog toga se empirijski pristup u modernim sistemima naoružanja i odbrane često nastoji odbaciti, ili koristiti samo kao podršku drugim, pouzdanijim metodama [10, 31, 32].
3. **Numeričko modeliranje** – ova metoda koristi numeričke simulacije za modeliranje kompleksnih interakcija između projektila i cilja. Metode poput metode konačnih elemenata (FEM), konačnih zapremina ili diskretnih elemenata (DEM) omogućavaju detaljnu analizu deformacija, naprezanja i drugih fenomena tokom udara. Numerički pristup pruža visoku fleksibilnost i može obuhvatiti složene geometrije i materijale, ali zahtjeva značajne računarske resurse i detaljne ulazne podatke [33].
4. **Eksperimenti** – ovakav pristup podrazumijeva sprovođenje fizičkih testova i mjerenja kako bi se direktno proučilo ponašanje projektila i cilja prilikom udara. Eksperimenti pružaju najpouzdanije podatke, ali su često skupi, vremenski zahtjevni i mogu biti ograničeni u pogledu varijacija koje se mogu testirati [34]. Eksperimenti se najčešće izvode po procedurama propisanim ranije usvojenim standardima (kao što su STANAG, AISI, ISO i slični).

Svi prethodno opisani pristupi imaju svoje prednosti i ograničenja, a često se koriste u kombinaciji kako bi se postiglo što preciznije razumijevanje i predviđanje ponašanja u terminalnoj balistici. Za standardne materijale je česta kombinacija empirijskog i numeričkog modelovanja [35], za nove materijale je dominantno eksperiment polazna osnova radi prikupljanja ulaznih podataka za sve ostale tipove proračuna itd. Jedna od osnovnih ideja upotrebe numeričkih simulacija je smanjenje broja eksperimenata, što rezultira direktnim smanjenjem troškova ispitivanja i razvoja novih produkata.

1.2.2 Vještačka inteligencija i neuronske mreže

Terminalna balistika, kao kompleksno inženjersko polje, zahtjeva složenu sinergiju mehanike i nauke o materijalima. Ranije opisane konvencionalne metode su se pokazale dosta pouzdanim kada se koriste u kombinaciji, ali potreba za preciznijim modelima konstantno postoji, naročito uslijed brzog napredovanja tehnologije. Upotreba mašinskog učenja (ML) i vještačke inteligencije (AI) u ovoj problematici, kao poseban tip empirijskih metoda, se sve više nameće kao obećavajuća tehnika

analize [36]. Primjena mašinskog učenja se smatra izuzetno prikladnom za predikciju izuzetno složenih problema kakvi se susreću u okviru izučavanja problematike u balistici na cilju. U jednom od pionirskih radova na tu temu [37], kombinacijom mašinskog učenja i vještačke inteligencije, kreirana je vještačka neuronska mreža trenirana na bazama podataka iz preko 900 različitih eksperimenata, sa ciljem predviđanja parametara prilikom udara kinetičkog projektila u polubeskonačnu metu. Rezultati su pokazali da je ovakav pristup dao bolje predviđanje od analitičkih i empirijskih modela, iako je na malim brzinama pokazao neke neregularnosti.

Metoda mašinskog učenja u terminalnoj balistici predstavlja inovativan pristup koji omogućava analizu i predikciju kompleksnih ponašanja i interakcija između projektila i cilja na osnovu velikih skupova podataka. U poređenju sa tradicionalnim pristupima, ovo je relativno nova metoda, ali sa sve širom primjenom zbog sve veće dostupnosti podataka i računarske snage. ML algoritmi mogu analizirati velike i složene skupove podataka, uključujući informacije o geometriji projektila, materijalnim osobinama, uslovima udara, rezultatima itd. Takvi algoritmi omogućavaju otkrivanje obrazaca i korelacije koje tradicionalne metode ne mogu lahko identifikovati [38]. ML modeli mogu dosta precizno predvidjeti rezultate udara – probijanje, deformaciju i distribuciju energije, bez potrebe za izvođenjem velikog broja skupih eksperimenata. Na osnovu proračuna se može dobiti dosta kvalitetnih podataka za optimizaciju dizajna projektila i zaštitnih materijala, kombinacijom sa numeričkim simulacijama na osnovu generisanih podataka. Kombinovanjem te dvije metode, drastično se smanjuje broj neophodnih fizičkih testova potrebnih za validaciju modela [39].

Pošto je riječ o relativno novoj metodi, prisutnoj svega desetak godina unazad, bitno je povesti računa o pravilnom korišćenju za konkretnu problematiku. Efikasnost ML modela zavisi od kvaliteta i količine ulaznih podataka, a nepotpuni ili netačni podaci dovode do loših predikcija. Također, modeli obučeni na specifičnim skupovima podataka mogu imati ograničenu sposobnost generalizacije na nove materijale ili scenarije, što je svojstveno nedostacima empirijskih metoda. Treniranje kompleksnih ML modela može biti računski zahtjevno i iziskivati značajne resurse [38, 39].

Najčešće korišćeni algoritmi su regresijski modeli (linearna regresija, Ridge regresija) za predikciju kontinuiranih izlaznih varijabli, neuronske mreže (CNN) i rekurentne neuronske mreže (RNN) za obradu složenih podataka poput slika ili vremenskih nizova, metode grupisanja (K-means i DBSCAN) za klasifikaciju materijala prema balističkim karakteristikama, i tzv. stablo odlučivanja i Random Forest za analizu uticaja različitih faktora na rezultate udara [39, 40].

Na osnovu analize metode i dostupnih radova, evidentno je da je primjena za sada fokusirana na predikciju penetracije (predviđanje dubine i tipa penetracije projektila na osnovu ulaznih parametara), klasifikaciju materijala (prema njihovim performansama radi brže selekcije u dizajnu) i automatsku detekciju anomalija i potencijalnih grešaka kod eksperimentalnih podataka [40]. Mašinsko učenje u balistici nudi ogroman potencijal, ali zahtjeva posvećen interdisciplinarni pristup i kombinaciju specifičnog znanja sa različitim metodama, bazama podataka i algoritmima. U godinama koje slijede će modeli zasigurno napredovati i biti znatno precizniji. Jedan od novijih i detaljnih radova koji je primjenom ML analizirao kinetičku energiju projektila prilikom udara u metu, dobio je procenat greške u odnosu na validacijske podatke od samo 2.7% [41]. Precizno objašnjenje kombinacije ML i AI alata, u kombinaciji sa eksperimentima i numeričkim simulacijama, je dato u radu [42], gdje je sve ranije navedeno primijenjeno kroz standard V_{50} za analizu reakcije balističkih zaštitnih ploča prilikom udara različitim projektilima.

1.3 Aditivna proizvodnja

Aditivna proizvodnja (engl. *additive manufacturing*, AM) je svojim nazivom već dobrim dijelom i definisana - riječ je o grupi postupaka kod kojih se element gradi dodavanjem materijala, za razliku od substraktivne proizvodnje kod koje se do konačnog oblika dolazi uklanjanjem materijala sa obratka. Prema ISO/ASTM 52900, aditivna proizvodnja je proces spajanja materijala radi dobijanja dijela iz podataka trodimenzionalnog (3D) modela, po pravilu sloj po sloj [43, 44]. Upravo taj princip izrade sloj po sloj je i suštinska razlika u odnosu na sve konvencionalne postupke, pa se u praksi za

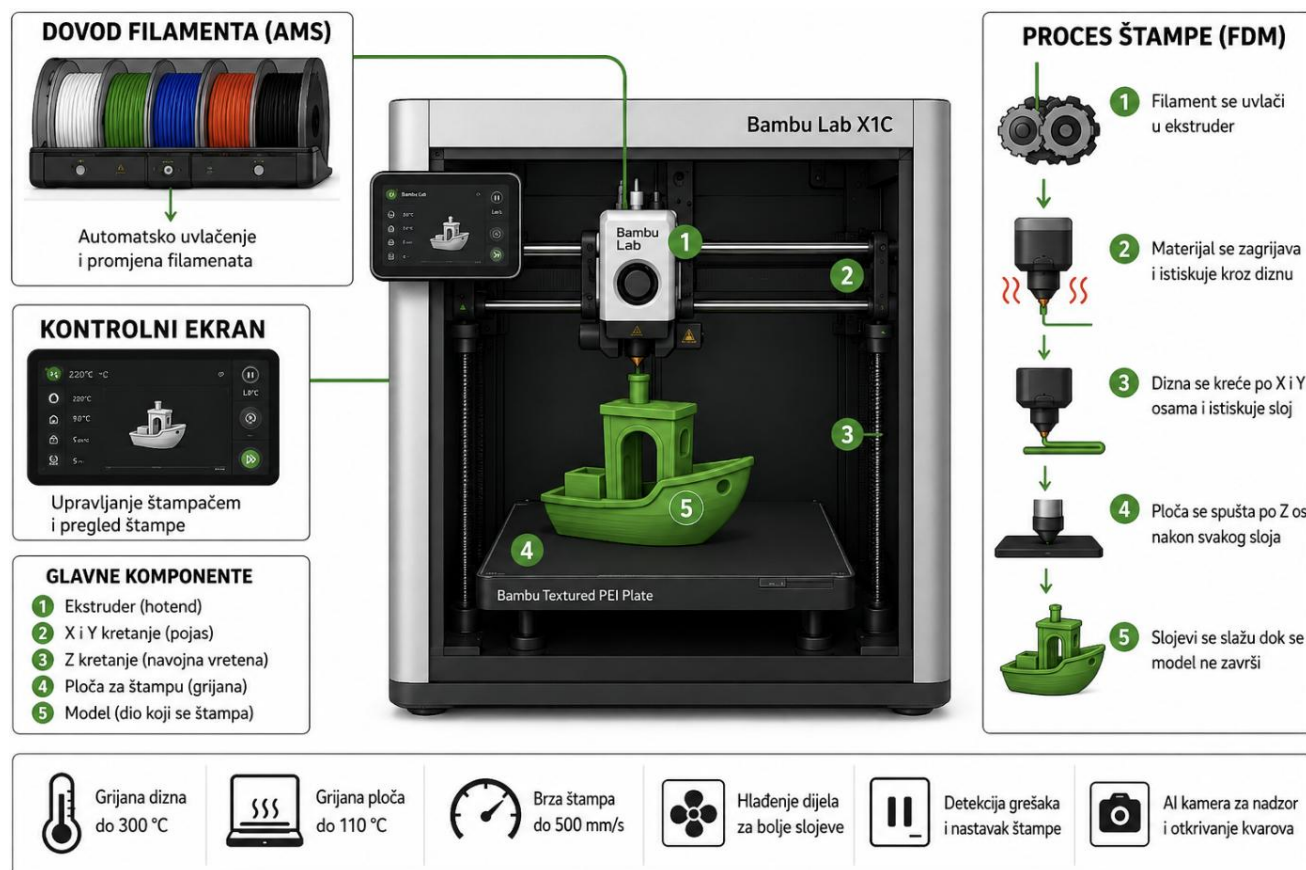
AM najčešće koristi kolokvijalni naziv 3D štampa [45]. U ovom radu aditivna proizvodnja se posmatra prvenstveno kao alat, odnosno kao sredstvo za izradu projektila i zaštitnih struktura čije se terminalno-balističke performanse analiziraju, a ne kao predmet istraživanja, pa je i obim ovog odjeljka prilagođen tome - razrađuje se onoliko koliko je potrebno da se u uvodu natuknuti pojmovi, prije svega slojevitost strukture, kontrolisana unutrašnja arhitektura i varijabilna gustina ispune, dovedu do nivoa na kojem postaju mjerljive i upravljive veličine u eksperimentalnom dijelu rada.

Postoji više podjela aditivne proizvodnje. Najgrublja i najčešće korišćena je podjela na metalnu i nemetalnu, dok se u standardizovanom smislu, prema ASTM F2792, odnosno ISO/ASTM 52900, sve tehnologije svrstavaju u sedam kategorija: ekstruzija materijala, fotopolimerizacija u kadi, spajanje praha u sloju, mlazno nanošenje materijala, mlazno nanošenje veziva, direktno taloženje energijom i laminiranje listova. Najpoznatiji predstavnici, na koje se u literaturi i praksi najčešće nailazi, su FDM (engl. *Fused Deposition Modeling*), koji pripada grupi ekstruzije materijala i kod kojeg se termoplastični filament topi i deponuje kroz grijanu mlaznicu; SLA (engl. *stereolithography*) i srodni DLP (engl. *digital light processing*), koji pripadaju fotopolimerizaciji i kod kojih se tečna smola selektivno umrežava izvorom svjetlosti; SLS (engl. *selective laser sintering*), kod kojeg laser sinteruje polimerni prah u sloju, te njegov metalni pandan SLM/DMLS (engl. *Selective laser melting/direct metal laser sintering*), kod kojeg se metalni prah pretapa laserom; DED (*directed energy deposition*), kod kojeg se materijal dovodi direktno u zonu djelovanja energetskog snopa i koji se prvenstveno koristi za reparaturu i izradu velikih metalnih dijelova; i LOM (*laminated object manufacturing*), zasnovan na spajanju i sječenju slojeva folije ili lista. Svaka od ovih tehnologija ima svoj sasvim jasno definisan opseg materijala, tačnosti, cijene i post-procesnih zahtjeva, što je i osnov za izbor metode u konkretnoj primjeni [46-51].

3D štampa je važan dio razmatranja četvrte industrijske revolucije i u posljednjih petnaestak godina je pronašla put do praktično svih značajnijih industrija na globalnom nivou [52]. Ranija veza aditivne proizvodnje sa odbrambenim institucijama, izložena u uvodnom dijelu, samo je jedna linija tog razvoja; paralelno s njom, ono što je začeto kao metoda za brzu izradu prototipova danas se koristi za izradu funkcionalnih dijelova u vazduhoplovnoj i automobilske industriji, medicini i stomatologiji, veterinarske medicini, arhitekturi i mnogim drugim [53,54]. Karakteristično je da se AM sve više uvodi i u građevinarstvo, kroz velike ekstruzijske mašine koje nanose beton, čime se eliminiše potreba za oplatom i značajno skraćuje vrijeme izgradnje [55,56]. Upravo ta univerzalnost i dostupnost su i razlog zbog kojeg je povratak aditivne proizvodnje u vojni domen, ovaj put bez institucionalne kontrole, postao neizbježan.

Najpopularniji, najrasprostranjeniji i ujedno najdostupniji tip aditivne proizvodnje je FDM, mada je terminološki ispravnije koristiti generički naziv FFF (engl. *fused filament fabrication*), budući da je oznaka FDM zaštićena od strane kompanije Stratasys. Princip rada je relativno jednostavan: filament se sa držača namotaja pogonskim točkicama uvlači u grijanu glavu (ekstruder) 3D štampača, gdje se zagrijava iznad temperature staklastog prelaza, odnosno topljenja, i istiskuje (ekstrudira) kroz mlaznicu različitog prečnika. Materijal se u polutečnom stanju deponuje na radnu, po pravilu grijanu podlogu (od stakla ili drugog materijala), prateći putanju definisanu G-kodom, hladi se i stvrdnjava (uz pomoć ventilatora sa glave ili bez), a spajanje sa susjednim i prethodno položenim slojem se ostvaruje difuzijom polimernih lanaca preko granice sloja. Nakon završetka jednog sloja, glava ili podloga se pomjeraju za visinu sloja i postupak se ponavlja. Baš je taj mehanizam međuslojnog spajanja i razlog zbog kojeg FDM dijelovi ispoljavaju izraženu anizotropiju - čvrstoća u pravcu normalnom na slojeve je po pravilu znatno niža nego u ravni slojeva. To je, u fizičkom smislu, i porijeklo slojevitosti koja je u uvodu identifikovana kao razlog neadekvatnosti klasičnih terminalno-balističkih modela, pa je za balističku primjenu izuzetno bitno i o tome se u ovom radu vodilo računa kroz izbor orijentacije štampe. Iako je metoda u početku bila namijenjena isključivo brzom izradi prototipova, danas je zauzela svoje mjesto i u serijskoj proizvodnji komada, prvenstveno zahvaljujući rapidnom razvoju nove generacije mašina - brzih, pouzdanih, sa novim sistemima kretanja, aktivnom

kompensacijom rezonancije i automatskom kalibracijom [57-61]. Šema rada Bambu Lab X1 Carbon Combo (BL X1C) 3D šampača je data na slici 1.



Slika 1: Šema rada i glavnih komponenti 3D šampača Bambu Lab X1C

Materijali koji se koriste za šampu FDM tehnologijom nazivaju se filamenti i, bez izuzetka, pripadaju grupi termoplasta. Termoplasti su polimeri koji se pri zagrijavanju reverzibilno omekšavaju i mogu se više puta pretapati i ponovo očvršćavati bez promjene hemijske strukture, za razliku od termoseta, kod kojih je umrežavanje ireverzibilno pa se jednom očvršli materijal više ne može vratiti u tečno stanje. Upravo je to i razlog zbog kojeg su termoseti vezani za SLA i srodne tehnologije, a termoplasti za FDM [62,63]. Broj proizvođača filamenata je danas veoma velik, kao i broj dostupnih materijala, a najpoznatiji predstavnici čisto polimernih filamenata su PLA (polilaktid), PETG (polietilen-tereftalat modifikovan glikolom) i njemu srodni PCTG (policikloheksilendimetilen-tereftalat modifikovan glikolom), ABS (akrilonitril-butadien-stiren) i mješavine tipa PC/ABS, PC (polikarbonat), PA (poliamid, komercijalno nylon) i TPU (termoplastični poliuretan) kao elastomer. Za zahtjevnije primjene koriste se i visokotemperaturni polimeri poput PEEK-a (polieter-eter-keton). Osim čisto polimernih, posljednjih godina se izuzetno brzo razvija i spektar kompozitnih filamenata, kod kojih se u polimernu matricu unose kratka karbonska (CF), staklena (GF), drvena ili metalna vlakna i razni dodaci radi ojačanja strukture, čime se postiže značajan skok krutosti i dimenzione stabilnosti. Cijena tog dobika je izražena abrazivnost takvih filamenata, koja obavezno zahtijeva kaljenu ili karbidnu mlaznicu, jer standardna mesingana mlaznica biva istrošena nakon svega nekoliko stotina grama materijala [64-68].

Aditivna proizvodnja u odnosu na konvencionalne postupke nudi brojne prednosti, ali i nosi jasne nedostatke. Kao glavne prednosti izdvajaju se [69-74]:

- sloboda geometrije, jer se izrađuju oblici koji su substraktivnim putem teško ostvarivi ili potpuno neostvarivi (unutrašnji kanali, rešetkaste i ćelijske strukture, promjenljiva gustina materijala unutar istog komada),
- izrada bez alata, čime otpada trošak i vrijeme izrade kalupa i pribora,

- proizvodnja po zahtjevu (engl. *on-demand*), koja direktno smanjuje ili u potpunosti eliminiše potrebu za fizičkim skladištem, budući da se skladište svodi na digitalnu bazu modela,
- konsolidacija sklopa, gdje se više dijelova zamjenjuje jednim, čime se uklanjaju spojevi kao potencijalna mjesta otkaza,
- brza izmjena dizajna, koja omogućava da se izmjena geometrije verifikuje u roku od nekoliko sati,
- mobilnost proizvodnje, odnosno mogućnost izrade na licu mjesta i van proizvodnog pogona,
- manji otpad materijala i povoljniji ekološki bilans,
- masovna personalizacija, koja se uklapa u principe *lean* proizvodnje i koja predstavlja jasan most ka konceptu Industrije 5.0, sa naglaskom na prilagođavanje čovjeku, otpornost lanca snabdijevanja i održivost.

Sa druge strane, nedostaci su takođe realni i moraju se navesti [70-74]:

- cijena po komadu ostaje visoka kod velikih serija i AM postaje ekonomski neisplativ iznad tačke preloma u odnosu na brizganje;
- pomenuta anizotropija i ograničena međuslojna adhezija,
- poroznost i varijabilnost od komada do komada, koja se u eksperimentima sa projektilima direktno manifestovala kroz rasipanje mase i početne brzine,
- kvalitet obrađene površine,
- ograničenje dimenzija radnim prostorom mašine,
- veliki broj procesnih parametara koji utiču na svojstva, pri čemu optimalna kombinacija nije univerzalna nego se razlikuje od dijela do dijela,
- nedovoljno razvijeni standardi za ispitivanje 3D štampanih materijala, zbog čega se i u ovom radu, kao i u većini srodnih istraživanja, pribjeglo standardima namijenjenim klasičnim plastičnim materijalima.

Imajući u vidu sve navedeno, za potrebe ovog istraživanja je odabran FDM, i to iz razloga koji su za dvije eksperimentalne cjeline rada donekle različiti. Kada je riječ o projektilima, potrebno je razjasniti zašto se pribjeglo štampi umjesto brizganju, koje je uobičajen postupak za serijsku izradu polimernih dijelova ovakvih dimenzija i koje je, uostalom, i korišćeno kod komercijalnih rješenja poput polimerbakarnih projektila Ruger/PolyCase ARX [75]. Odgovor je prije svega ekonomski i razvojni. Brizganje podrazumijeva izradu kalupa, čiji trošak i vrijeme izrade višestruko premašuju trošak kompletnog eksperimenta sprovedenog u ovom radu, a kalup ima smisla izrađivati tek onda kada je geometrija potpuno definisana. U ovoj fazi istraživanja geometrija i procesni parametri su upravo predmet variranja, radi se o razvojnoj i verifikacionoj fazi u kojoj se provjerava funkcionalnost koncepta, a serije su male, reda veličine jedinica do desetina komada, dakle daleko ispod tačke ekonomskog preloma između aditivne proizvodnje i brizganja. Tome treba dodati i aspekt proizvodnje po zahtjevu i mobilnosti, koji su za razmatrani scenario od suštinskog značaja. Zbog toga se aditivna proizvodnja ovdje i ne predlaže kao konkurent brizganju u serijskoj proizvodnji, nego kao razvojna metoda koja verifikuje koncept i koja, kao rezultat, brizganju predaje pripremljen i validiran ulazni podatak - geometriju, izbor materijala i procesne parametre, kao naredni korak industrijalizacije.

Kod balističke zaštite je logika izbora drugačija. Parametri koji su u uvodnom dijelu navedeni kao uzrok raspada ustaljenih modela - slojevitost, kontrolisana unutrašnja arhitektura i varijabilna gustina ispune, nisu apstraktne karakteristike aditivne proizvodnje uopšte, nego su vezani za konkretnu tehnologiju, i to onu kod koje su dostupni kao neposredno upravljive veličine. Cilj tog dijela istraživanja nije bio da se uporede različite tehnologije, nego da se, uz konstantan postupak izrade, sistematski mijenjaju materijal, tip ispune, gustina ispune, orijentacija ispune u odnosu na pravac dejstva projektila i, konačno, hibridizacija sa kompozitnim slojem. FDM je jedina od navedenih tehnologija koja sve te veličine nudi kao nezavisno upravljive procesne parametre. Kod SLA i DLP tehnologija materijal je termoset, dijelovi su izrazito kruti, podložni starenju pod dejstvom svjetlosti, a unutrašnja struktura se svodi na izbor pun ili šupalj dio. Dakle, koncept ispune u smislu u kojem se

on ovdje istražuje jednostavno ne postoji, što tu grupu tehnologija čini neupotrebljivom za ovu vrstu studije. Kod SLS-a se dobijaju gušći i izotropniji dijelovi sa dobrom ponovljivošću, ali ni tu ne postoji ispuna u FDM smislu, pa nema ni slobodnog izbora šablona i gustine; uz to, oprema i prah su skupi, neophodan je post-procesni tretman uklanjanja nesinterovanog praha, a čitav postupak nije prenosiv i nije izvodljiv na terenu. SLS, dakle, nudi bolju konzistentnost, ali značajno manji broj upravljivih projektantskih stepeni slobode, a upravo su ti stepeni slobode predmet ovog rada [76]. Nasuprot tome, FDM omogućava manipulaciju sastavom materijala i modifikaciju samog filameta, veliki broj upravljivih parametara, jednostavnost rukovanja, izuzetnu dostupnost i nisku cijenu materijala i opreme, mogućnost rada na terenu i u mobilnim proizvodnim stanicama, kao i visok stepen popularnosti koji direktno znači i mogućnost da drugi istraživači rezultate ovog rada reprodukuju bez posebne infrastrukture. Time se izbor FDM-a poklapa i sa polazištem postavljenim u uvodu, gdje su parametri štampe, a ne tipovi objekata, definisani kao zajednički imenitelj obje tematske cjeline. Konačno, FDM je i ona metoda koja je dostupna svakome, pa je i sa stanovišta scenarija zloupotrebe, koji je jedan od motiva ovog rada, njen izbor najadekvatnija simulacija realnih uslova.

Za potrebe ovog rada, a u skladu sa dostupnim resursima, korišćena su dva tipa uređaja: Bambu Lab X1 Carbon Combo i Ultimaker S5 Pro (UM S5 Pro). BL X1C je mašina nove generacije, sa CoreXY kinematikom, zatvorenom komorom, aktivnom kompenzacijom rezonancije, automatskom kalibracijom prvog sloja i sistemom za automatsku izmjenu materijala, a opremljen je karbonskom mlaznicom prečnika 0,4 mm, što je preduslov za rad sa abrazivnim kompozitnim filamentima. UM S5 Pro je starija ali robusnija mašina, sa dvostrukim ekstruderom, zatvorenom komorom i staklenom radnom pločom. Materijali korišćeni u eksperimentima su Bambu PLA Basic, kao referentni i najrasprostranjeniji FDM materijal, biorazgradiv i jednostavan za štampu, ali relativno krh i sa niskom temperaturnom otpornošću, AzureFilm Strongman PLA, modifikovani PLA povećane žilavosti i udarne otpornosti, PCTG, kao žilav i hemijski otporan materijal iz PET grupe sa boljom obradivošću u odnosu na PETG, PC/ABS, mješavina koja spaja krutost i temperaturnu otpornost polikarbonata sa obradivošću ABS-a, Flex 98A (TPU), elastomer za apsorpciju energije, te Ultimaker PET CF, kompozit sa kratkim karbonskim vlaknima [77-82]. Budući da se izrada odvija sloj po sloj, a mašina u suštini predstavlja CNC uređaj koji izvršava G-kod, neophodno je 3D model prethodno raslojiti, zbog čega se koriste programi popularno nazvani *slicer*-i, od engleskog *slice* - rezati na kriške, odnosno slojeve. Za rad sa BL X1C korišćen je Bambu Studio 2.1.1, a za UM S5 Pro Ultimaker Cura 5.10.2. Cijene su pri tome indikativne za pristupačnost čitavog lanca: filamenti (polimerni) su u rangu od 1800 do 6000 RSD po kilogramu, BL X1C košta oko 176.000 RSD, dok je UM S5 Pro u rangu od oko 900.000 RSD, a 750 grama UM PET CF oko 47.000 RSD, uz obaveznu nabavku UM CC mlaznice od 42.000 RSD. Dakle, sa izuzetkom profesionalne linije, cjelokupna oprema i materijal pripadaju rangu široke potrošnje.

Na kraju, treba istaći da je budućnost slobodne nabavke i upotrebe 3D štampača danas prilično neizvjesna. Mogućnosti ovih uređaja rastu brže nego što ih regulativa prati, a paralelno raste i trend zloupotrebe, prije svega u domenu vojne primjene, gdje su posljedice najozbiljnije [83]. Konkretni primjeri takve primjene, zajedno sa pregledom dosadašnjih istraživanja u ovoj oblasti i klasifikacijom te literature u grupe najavljene u uvodnom dijelu, dati su u narednom odjeljku.

1.4 Pregled literature

Sa eksponencijalnim razvojem primjene aditivne proizvodnje u vojnoj industriji tokom prethodnih godina, društvene mreže, mediji i portali preplavljeni su različitim konceptima i izvještajima. Aplikacijama poput Telegrama konstantno kruže snimci upotrebe, pa čak i uputstva za izradu 3D štampanog oružja i municije. Deep i dark web takođe pružaju obimne baze različitih rješenja, posebno elemenata za prepravku oružja, poput tzv. Glock sklopki (eng. *Glock switch*), koje bilo koji poluautomatski pištolj ove marke pretvaraju u automatski. Osim izolovanih slučajeva iz prošlosti, rat u Ukrajini je na velika vrata uveo 3D štampu u vojnu industriju, i to direktno kroz izradu

nestandardnih 3D štampanih projektila, najčešće namijenjenih dronovima i oblikovanih po uzoru na minobacačke projekte. Pored toga, popularizovana je i 3D štampa improvizovanih dronova kamikaza i druge municije. Ipak, uprkos širokoj dostupnosti materijala na ovim platformama, takvi izvori mogu poslužiti kao inspiracija za razvoj i istraživanje, ali ne i kao ozbiljna literatura za ovu disertaciju. Zbog toga je pregled literature ograničen dominantno na recenzirane publikacije, uz svega nekoliko izuzetaka u kojima su analizirani članci sa reputabilnih portala ili zvanični vladini izvještaji. Konkretna polazna osnova za studiozan izvor podataka i stvaranje šire slike o ovoj tematici svakako je analiza preglednih radova koji razmatraju aditivnu proizvodnju u vojnoj industriji kroz konkretne slučajeve upotrebe.

Jedan od takvih radova razmatra tehnološki pomak i primjene 3D štampe u odbrani i vazduhoplovstvu [84]. U detaljnom pregledu, fokusiranom primarno na vazduhoplovstvo, autori ističu brojne prednosti 3D štampe u odbrambenim sistemima, njihovu pouzdanost i način na koji mijenjaju tradicionalnu proizvodnu paradigmu. Autori navode da razvoj materijala za štampu igra ključnu ulogu u rasprostranjenosti i primjeni tehnologije. Osim dijelova za letjelice, poput brizgaljki goriva i standardnih dijelova motora i šasije, rad navodi i primjere izrade oružja, zaštitne opreme i personalizovanih dodataka za vojnike [84]. Revolucija koju je ulazak 3D štampe u vojnu industriju donio, posebno u Ukrajini i Mijanmaru, istaknuta je u radu [85], gdje autori analiziraju globalni uticaj aditivne proizvodnje na odbrambenu industriju, sa fokusom na decentralizaciju proizvodnje i skraćivanje lanaca snabdijevanja. Rad koji je na svojevrsan način trasirao put ka ovoj disertaciji jeste pregledni rad [86], koji daje detaljan pregled napretka vojne industrije i usvajanja 3D štampe kroz konkretne slučajeve - od štampanih projektila i bespilotnih letjelica, do rezervnih dijelova i zaštitnih struktura. Ovaj rad predstavlja direktno polazište za način klasifikacije literature u ovoj disertaciji. Sličan sveobuhvatan rad je i [87], u kojem autori kroz opis i primjere 3D štampanog vatrenog oružja, balistički otpornih struktura i bioinspirisanih koncepata, eksplicitno konstatuju nedostatak standardizovane regulative i ispitnih procedura za aditivnu proizvodnju u vojnom kontekstu. U kontekstu ove disertacije važan je i rad [88], fokusiran direktno na FDM tehnologiju u vojnim primjenama, u kojem se analiziraju dostupni materijali i njihova ograničenja, sa implikacijama za terensku upotrebu i logistiku. Kao istorijska referentna tačka za sagledavanje napretka oblasti interesantan je rani industrijski osvrt [89], posvećen izazovima vojnih projekata 3D štampe - certifikaciji, kvalifikaciji materijala i pouzdanosti. Poređenje 3D štampanih i komercijalnih komponenti za vojnu upotrebu česta je tema razmatranja, a u posljednje vrijeme poseban naglasak stavlja se na mobilne proizvodne kapacitete. Kroz analizu primjene aditivne proizvodnje u tehnološki vodećim armijama uočava se izražena potreba za rezervnim dijelovima starije opreme i podrškom operacijama udaljenim od izvora snabdijevanja, gdje odgovor leži upravo u 3D štampi. Značaj 3D štampe u vojnoj tehnologiji dodatno se ističe kroz primjere vojno-medicinske primjene, senzora za vojni monitoring i drugih funkcionalnih sistema, a sve u pravcu redukcije mase i troškova [90–95]. Očekivano, uporedo sa razvojem i širenjem primjene 3D štampe, raste i broj sigurnosno-političkih studija o rizicima ove tehnologije po međunarodnu bezbjednost, kao i o kvalifikacionim izazovima, posebno u uslovima prekinutih lanaca snabdijevanja [96–98].

Da je bojazan opravdana, potvrđuju publikacije koje dokumentuju uspješnu 3D štampu energetskih materija. U njima se opisuju tehnike i formulacije 3D štampe baruta, eksploziva i pirotehnike, uz konstataciju autora da se aditivna proizvodnja u municiji ne zaustavlja na inertnim komponentama [99]. Eksperimentalno je demonstrirana SLA štampa barutnog punjenja sa približno 50% RDX-a, čime je dokazana funkcionalnost štampanih pogonskih punjenja, a zabilježen je i uspjeh u razvoju SLM štampanih kumulativnih umetaka sa performansama bliskim konvencionalno izrađenim [100, 101]. Konačno, u kontekstu proizvodnje na licu mjesta kao operativne prednosti u vojnim scenarijima, dat je i pregled kompozitnih filamenata za dijelove bespilotnih letjelica, koje sve češće dobijaju i ulogu dronova kamikaza [102].

Mnogi primjeri predstavljeni u preglednim radovima često su tek na nivou koncepta ili prototipa, pri čemu za dio njih nije razjašnjeno da li su u svakodnevnoj upotrebi. Prava mogućnost 3D štampanog oružja, municije i dodataka jasno se vidi kroz zabilježene primjere upotrebe u svijetu, posebno

zloupotrebe. U ovom kontekstu postoje veoma kvalitetne publikacije koje analiziraju dokumentovane i provjerene slučajeve iz medija i policijskih izvještaja te globalno sagledavaju trendove rasta upotrebe 3D štampanog oružja, uključujući regionalne obrasce, aktere i regulatorne odgovore [103, 104]. Pomenuti radovi navode brojne slučajeve u kojima je sredstvo izvršenja djela bilo potpuno funkcionalno 3D štampano oružje. Pri tome je neophodno napraviti razliku, jer se 3D štampanim oružjem često naziva bilo koje oružje koje sadrži pojedine komponente izrađene na 3D štampaču, posebno nemetalne. Takvo oružje je po pravilu hibridno, dok bi se 3D štampanim oružjem u pravom smislu smatralo samo ono kod kojeg je velika većina dijelova izrađena na 3D štampaču, od polimera ili kompozitnih materijala [103, 104]. U radovima se tako pominju potpuno funkcionalne puške, komponente za prepravku poput Glock sklopki, prepravljeni pištolji i slično. Posebna pažnja posvećena je tematici zloupotrebe 3D štampe u ekstremističkim i terorističkim aktivnostima. Anonimnost, dostupnost i fleksibilnost tehnologije otvaraju opravdanu bojazan o njenoj upotrebi za proizvodnju oružja, posebno imajući u vidu izvještaje prema kojima se procenat nemetalnih komponenti u hibridnim oružjima drastično uvećao tokom prethodnih godina, što naročito koriste izolovane terorističke ćelije širom svijeta i veće gerilske grupe u nerazvijenim zemljama. U jednom izvještaju dokumentovano je čak 35 incidenata u čijem je središtu 3D štampano oružje [105, 106].

Osim dokumenata koji potvrđuju upotrebu 3D štampanih sredstava u kriminalne svrhe, potpuniji opis situacije i mogućnosti daju radovi koji su ovakve proizvode tretirali eksperimentalno. U radu [107] ultrabrzom kamerom snimljen je trenutak opaljenja najpoznatijeg primjerka 3D štampanog oružja, tzv. Liberatora, kalibra 0.22 LR. Snimanjem je ustanovljeno da se cijev Liberatora, izrađena isključivo štampanjem od polimera, lomi dok je projektil još u njoj, ali da ispaljeni projektil zadržava potencijal opasnog ranjavanja. Uprkos funkcionalnosti, rad predstavlja dokaz materijalnih ograničenja štampanih polimera pod balističkim pritiscima. Upravo se u tom kontekstu, u okviru ove disertacije, javlja ideja da je realno iz polimerne cijevi ispaliti polimerni projektil. Rad [108] analizira, s druge strane, potpuno štampanu PLA cijev za 0.22 LR koja je izdržala čak 65 opaljenja prije otkaza, pri čemu je ožljebljenje ostalo funkcionalno prvih dvadesetak gađanja. Numerički i eksperimentalno je dokazan značaj kalibra za mogućnosti izrade cijevi, pa je tako kod poznatog primjerka 3D štampane funkcionalne puške FGC-9 predložen hibridni dizajn koji materijalna ograničenja polimera rješava ciljanom ugradnjom metalnih komponenti, dok se za 0.22 LR predlaže upotreba ABS-a [109, 110].

Trenutno najznačajniji doprinos opisivanju terminalno-balističkih parametara 3D štampanog oružja i municije ostvaren je kroz forenziku i medicinu, konkretno balistiku rana. Nastavak rada [107] dokumentuje tragove polimera na elementima municije, deformacije čahura i karakteristične fragmente oružja kao forenzičke indikatore upotrebe štampanog oružja [111]. Ispitivanje tragova opaljenja za različite štampane modele oružja identifikuje ponovljive obrasce oštećenja i ostatke polimera upotrebljive u vještačenjima. Analize su u mogućnosti povezati barutne ostatke, štampano oružje i povrede, stvarajući nove forenzičke okvire za tumačenje eksperimentalnih rezultata. Uz to, hemijska karakterizacija filamenata korišćenih za štampu oružja danas olakšava povezivanje polimernih fragmenata sa mjestima događaja sa vrstom, pa i izvorom materijala i štampačem [112-114]. I sa forenzičke strane postoji izražen pritisak uslijed ekspanzionizacije rasta upotrebe aditivne proizvodnje u industriji naoružanja, pa je identifikovana velika potreba za proširenjem klasičnih metodologija na specifičnosti štampanog oružja i municije, sa akcentom na slojevitost, odsustvo serijskih brojeva i slično, a sve u cilju identifikacije izvora ovakvih komada. Posebna perspektiva vidi se u unapređenjima metoda poput mikro-kompjuterizovane tomografije (CT) za nedestruktivna forenzička vještačenja štampanog oružja [115-117].

Za 3D štampane projekte ispaljene iz konvencionalnog oružja dokazano je da preuzimaju klasne i individualne tragove ožljebljenja, ali su ti tragovi oslabljeni topljenjem noseće površine pri opaljenju, što je moguće poboljšati izradom odlivka projektila. Uz to, identifikovane su i forenzičke implikacije komercijalnih hibridnih projektila (polimersko-bakarnih) [118, 119]. Ovakvi radovi ujedno potvrđuju

da se radi na razvoju polimerne municije, konkretno projektila, ali uz površinski pristup analizi sa stanovišta balističkih ciklusa.

Konkretni primjeri razvoja i eksperimentalnih ispitivanja 3D štampanih projektila i dalje su veoma rijetki te su obrađeni kroz nekoliko referentnih radova. Metodološki je posebno interesantan rad [120], u kojem su analizirane terminalne performanse bezolovnih pištoljskih projektila uz upotrebu balističkog gela, kvantifikovane analizom sile usporenja iz visokobrzinskog videa. Direktan primjer primjene dat je u radu [121], gdje se u humanom kontekstu razvija biodegradabilni polimerni štampani projektil malog kalibra kao nosač ljekovitih supstanci za divlje životinje. Radi se o konceptu projektila sa funkcionalnim punjenjem, što 3D štampa posebno omogućava u odnosu na konvencionalne tehnologije proizvodnje. Rad koji se bavi ispitivanjem penetracione moći 3D štampanih nestandardnih projektila od različitih polimera [122] ujedno je jedan od temeljnih stubova ove disertacije, odnosno glavni pokretač ideje za razvoj standardizovanih 3D štampanih projektila. Balistička sposobnost nestandardizovanih projektila razmatranih u njemu otkrivena je slučajno, kada su za metalne kuglice izrađivani PLA saboti, koji su i sami ostvarili penetraciju na cilju, uprkos nepraktičnom obliku i drugim nepovoljnim okolnostima [122]. Osim polimernih štampanih projektila, moć aditivne proizvodnje dokazana je i analizom SLM štampanih čeličnih cilindričnih projektila, čije su balističke performanse samo oko 8% slabije od konvencionalnih, što se dodatno može poboljšati različitim koracima optimizacije [123, 124]. Budući da je upotreba aditivne proizvodnje izuzetno pogodna za razvoj municije sa preformiranim fragmentima ili sa kumulativnim punjenjem, dolazi i do razvoja i testiranja 3D štampanih bojevih glava. Prema zvaničnom izvještaju američke vojske [125], iz štampanog bacača koji predstavlja modifikaciju M203 uspješno su ispaljene štampane trenažne granate, sa brzinama unutar 5% od serijske M781 municije.

Za razliku od razvoja 3D štampane municije, gdje razlike u parametrima štampe ne igraju krucijalnu ulogu, što je kasnije dokazano kroz ovu disertaciju, za razvoj balističke zaštite uticaj materijala i parametara štampe je suštinski. Prije svega, kao važan korak nameće se karakterizacija 3D štampanog materijala, u cilju generisanja polaznih osobina neophodnih pri svakoj selekciji materijala za vojnu upotrebu. Razvoj materijala za aditivnu proizvodnju ide korak ispred razvoja standardizovanih metoda ispitivanja, pa se nerijetko pristupa i nestandardizovanim metodama. Prvu grupu redovnih testiranja čine kvazi-statička ispitivanja, kojima se najčešće nastoji odgonetnuti i definisati uticaj parametara štampe na mehaničke osobine dijelova. Zatezna čvrstoća je osobina za koju je eksperimentalno dokazano da za različite materijale zavisi od geometrije ispune, orijentacije i unutrašnje strukture, pri čemu su u dosta slučajeva parametri štampe važniji od izbora materijala [126, 127]. Gustina ispune se u više radova navodi kao najuticajniji parametar, što se posebno izražava kod PLA. Kombinovani uticaj gustine i geometrije ispune daje najpovoljnije osobine, te su ovakvi nalazi direktno diktirali metodologiju ispitivanja balističke zaštite u ovoj disertaciji, sa posebnim akcentom na to da se variranje gustine najčešće vrši do 90% [128, 129]. Posebno važna osobina za karakterizaciju 3D štampanih materijala je udarna žilavost, koja se dominantno određuje prema Charpy/Izod metodama. Pomoću njih se kvantifikuje uticaj gustine, uzorka ispune, visine sloja i orijentacije, gdje se ponovo gustina ispune nameće kao najuticajniji faktor, ali ovaj put sa optimalnom vrijednošću od 100% [130-133]. Ovo je svakako jedan vid dinamičke karakterizacije materijala, ali nedovoljno povezan sa balističkim odgovorom pri ekstremnim dinamičkim udarima, što će biti pokazano kroz disertaciju.

Vrlo važan efekat koji se često zanemaruje pri projektovanju 3D štampanih dijelova za vojnu industriju jeste efekat temperature i termičke obrade. Eksperimentalno je utvrđeno da kontrolisana termička obrada povećava zateznu čvrstoću i udarnu otpornost PLA, ali i da dugotrajno i nekontrolisano izlaganje visokim temperaturama i UV zračenju direktno šteti mnogim polimerima, naročito PLA [134-137]. Eksperimentalna ispitivanja pokazuju i koliko su FDM materijali osjetljivi na brzinu deformacije, što je u direktnoj korelaciji sa tvrdnjom disertacije da se kvazi-statički podaci

ne mogu direktno ekstrapolirati na balističke uslove. Odziv materijala zavisi od gustine ispune, topologije ispune i brzine deformacije [138, 139].

Nastojanje da se poboljša otpornost 3D štampanih struktura na dinamičke udare rezultiralo je snažnim razvojem na polju variranja unutrašnje arhitekture elemenata. Balistička ispitivanja PLA struktura sa specifičnim tipovima arhitekture pokazuju da su mehanizmi loma ćelijskog PLA suštinski drugačiji od onih kod gustog materijala. Elementi iste gustine ali različite prostorne raspodjele dodatno izoluju i ističu značaj unutrašnje geometrije. Novi tipovi struktura, poput TPMS (eng. *Triply Periodic Minimal Surfaces*), pokazuju znatno bolje ponašanje pri udarima male brzine - kroz apsorpciju energije i dubinu utiskivanja, u odnosu na konvencionalne geometrije ispune [140-142]. Poseban potencijal nameće se kroz razvoj auksetičnih struktura, odnosno struktura sa negativnim Poissonovim koeficijentom, koje pokazuju odlična svojstva za zaštitu od udara velikih brzina. Istraživanja mehanizama za poboljšanje apsorpcije energije, koja povezuju materijale, arhitekture i režime opterećenja, ističu perspektivu aditivne proizvodnje u izradi struktura otpornih na dinamičke udare. FDM tehnologija omogućava i pristup sa više materijala u jednoj strukturi, što je izazov praktično neizvodljiv konvencionalnim tehnologijama, posebno uz uvođenje bioinspirisanih koncepata [143-146].

S obzirom na to da polimeri sami po sebi nisu dovoljni, u upotrebu se uvode kompozitne i vlaknima ojačane štampane strukture, u vidu štampanih kompozitnih materijala ili oblaganja polimera. Udarne ispitivanja 3D štampanog materijala ojačanog kontinualnim Kevlar vlaknima iz 2018. godine predstavljaju ranu demonstraciju štampanih balistički relevantnih kompozita [147]. Upotreba kompozita sa Kevlarom, uz procentualni udio vlakana do 30%, daje najbolju kombinaciju i postavlja balističke granice, čime je detaljno kvantifikovan sinergijski efekat Kevlara na udarnu otpornost [148, 149]. Ovakav iskorak u nauci o materijalima i razumijevanju 3D štampanih struktura direktno je uveo ovu metodu u vojnu industriju i razvoj balističke zaštite. Balistička ispitivanja pravom municijom ili ekstremnim dinamičkim udarom sve se više koriste unazad nekoliko godina. Tako se u radu [150] gasnim topom, pri tri brzine udara, ispituje optimalna geometrija jezgra, a kao najpovoljnija se nametnula kubna. Uticaj unutrašnje geometrije ispune i njena kontrola mehanizma apsorpcije energije potvrđeni su balističkim ispitivanjima i kod ojačanih materijala [151]. Nalazi o geometriji ispune za 3D štampane strukture direktno su iskorišćeni i testirani kroz keramički sačasti kompozit i analizu njegove potencijalne upotrebe u oklopnim sistemima [152]. Uticaj geometrije ispune na balističku otpornost štampanih polimernih struktura na udar municije 9×19 mm, opisan u radu [153], predstavlja eksperimentalno jezgro i prvi dio ove disertacije kada je riječ o ispitivanju balističke zaštite i uticajnih parametara.

Sve veći napredak bilježi se i na polju razvoja sendvič panela koji uključuju 3D štampane strukture, metalne ili polimerne. Takve strukture pokazuju odličnu otpornost i sposobnost zaustavljanja projektila poput 9×19 mm unutar dozvoljenih granica. Za jezgra sendvič panela biraju se optimalne vrijednosti glavnih uticajnih parametara, pa ih je zato potrebno detaljno istražiti u odnosu na željeni efekat. Važni su nalazi da balistička ispitivanja 3D štampanih sendvič panela u nekim slučajevima pokazuju praktično identične rezultate kao konvencionalna zaštita. Modifikacijama mikrostrukture materijala poput titanijuma, 3D štampane ploče postaju održiva alternativa za lake oklope [154-157].

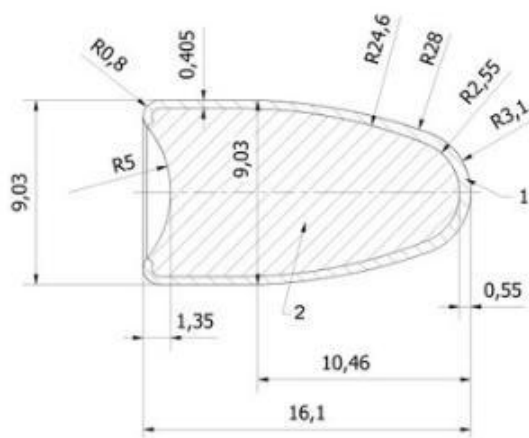
2 Projektili izrađeni 3D štampom

Konvencionalna municija malog kalibra i danas se proizvodi tehnološkim postupcima koji su ostali gotovo nepromijenjeni više od jednog vijeka. Međutim, ubrzana modernizacija odbrambenih tehnologija, potreba za mobilnim proizvodnim kapacitetima i zahtjevi za specijalizovanom municijom otvorili su prostor za primjenu aditivnih tehnologija u ovoj oblasti. Među kalibrima koji se razmatraju za ovakva istraživanja, 9×19 mm nameće se kao prirodan izbor iz više razloga. Radi se o NATO standardizovanom kalibru (STANAG 4090 / AEP-97), što garantuje međuzamjenjivost i dobro definisane performansne granice. Pored toga, radi se o kalibru koji je najzastupljeniji u modernim forenzičkim i balističkim istraživanjima, što rezultate čini direktno uporedivim sa postojećom literaturom. Sa stanovišta aditivne proizvodnje, dimenzije projektila kalibra 9×19 mm predstavljaju prihvatljiv kompromis - dovoljno su male da štampa bude brza i jeftina, a dovoljno velike da FDM proces može reproducirati ključne geometrijske karakteristike. Masa projektila od približno 1 grama, ostvarena štampom sa 100% gustinom ispune, osigurava koncentraciju mase u relativno malom volumenu, što je bitna pretpostavka za postizanje adekvatne kinetičke energije pri datim brzinama.

2.1 Izrada i inicijalna testiranja projektila kalibra 9 x 19 mm

Nakon usvajanja kalibra 9×19 mm kao optimalnog za izradu metodom 3D štampe, pristupljeno je određivanju parametara štampe i izradi uzoraka, definisanju količine barutnog punjenja, te provjeri opravdanosti daljeg istraživanja polimernih projektila ovog tipa. Inicijalni test obuhvatio je ispitivanje osnovne funkcionalnosti oružja, međusobne interakcije u sistemima projektil–cijev i projektil–meta, kao i validnost faze leta projektila. Kroz sve navedene faze eksperimenta analizirano je da li dolazi do dezintegracije projektila u fazi lansiranja, da li projektil ostvaruje mjerljive efekte na cilju, te da li je faza leta konzistentna sa ponašanjem projektila ispaljenih iz oružja sa ožljebljenom cijevi.

Navedeni aspekti detaljno su analizirani u istraživanju [158], gdje je analiziran 3D štampani polimerni projektil kalibra 9×19 mm, dimenziono identičan standardnom FMJ projektilu, sa geometrijom prikazanoj na slici 2.



Slika 2: Dimenzije projektila 9 x 19 mm (1 – košuljica, 2 – jezgro) [158]

Projektili su izrađeni od PLA materijala sa gustinom ispune od 100% i visinom sloja od 0,2 mm, čime je osigurana homogena struktura i maksimalna moguća masa za dati volumen. Temperatura ekstruzije za izradu projektila od PLA je podešena na 205°C, temperatura podloge na 60°C, dok je brzina štampe 200 mm/s za vanjske, odnosno 300 mm/s za unutrašnje zidove. Masa ovakvog projektila iznosi približno 1 gram. Analiza je urađena u nekoliko faza, sa finalnim ciljem da se jedina modifikacija vezana za municiju odnosi isključivo na projektil, odnosno da u kompletnom sklopu metka

zamijenjen bude samo FMJ projektil i to 3D štampanim polimernim projektilom, dok čahura, kapisla i barutno punjenje ostaju nepromijenjeni.

Eksperiment je proveden u dvije faze, pri čemu je kao oružje korišćen pištolj CZ Shadow, dužine cijevi 117 mm. U prvoj fazi varirano je barutno punjenje u rasponu od 0,065 g do 0,13 g, s primarnim ciljem provjere bezbjednosti postupka i funkcionisanja oružja, bez mjerenja brzine projektila. Ukupno je u ovoj fazi ispaljeno 6 projektila, pri čemu je potvrđena bezbjednost korišćenja i prolaz projektila kroz sve faze balističkog ciklusa. Važno zapažanje odnosi se na izostanak izbacivanja čahure, što je pripisano nedovoljnoj energiji gasa za aktiviranje mehanizma za izbacivanje. U drugoj fazi korišćeno je punjenje od 0,26 g, nešto manje od standardnog punjenja za FMJ projekte, a rastojanje između usta cijevi i mete fiksirano je na 3 metra. Prvobitno je ispaljeno 5 projektila čiji se parametri nisu mjerili, već je izvršeno testiranje funkcionalnosti oružja i mjernog uređaja, a zatim 5 testnih uzoraka u fazi mjerenja penetracije, uz korišćenje hronografa ProChrono DLX za mjerenje brzine. Meta je bila daska od jelove drvene građe debljine 25,4 mm (1 inč), što predstavlja standardizovanu metu koja se u literaturi redovno koristi kao zamjena za skupi balistički gel [158]. Izmjerene brzine na ustima cijevi kretale su se u rasponu od 231,3 m/s do 287,1 m/s, sa prosječnom vrijednošću od 254,6 m/s i standardnom devijacijom od 26,2 m/s. Dubina penetracije varirala je od 12,8 mm do potpunog prolaska kroz dasku (25,4 mm), sa prosječnom dubinom od 18 mm. Dubina penetracije, brzina na ustima cijevi i kinetička energija su navedeni u tabeli 1.

Tabela 1: Izmjerene vrijednosti karakterističnih parametara pri eksperimentalnom istraživanju funkcionalnosti municije sa polimernim projektilima [158]

Broj uzorka	Brzina na ustima cijevi (m/s)	Kinetička energija (J)	Dubina penetracije (mm)
1	231,3	26,74	16,0
2	237,1	28,11	12,8
3	278,9	38,91	25,4 (puna)
4	287,1	41,23	20,0
5	238,7	28,49	15,8
Prosjeck	254,62	32,67	18

Disperzija rezultata unutar ove serije od pet uzoraka prije svega proizilazi iz razlika u samom procesu unutrašnje balistike, odnosno iz same početne brzine projektila na izlasku iz cijevi. Iako pojedinačna masa svakog projektila i tačna masa barutnog punjenja nisu zasebno mjerene za svaki uzorak, male varijacije u ova dva parametra, inherentne procesu ručnog punjenja municije u malim serijama, kao i neizbježnim tolerancijama FDM 3D štampe pri izradi projektila mase svega oko 1 g, predstavljaju najvjerovatniji dominantan izvor rasipanja izmjerene brzine, dodatno praćen mogućim gubicima energije usljed nepotpunog sagorijevanja baruta. Manje izražene razlike u poroznosti, mikrostrukturi i centriranju projektila unutar cijevi mogu dodatno, ali u znatno manjoj mjeri, doprinijeti ukupnoj varijabilnosti izmjerenih dubina penetracije. Pored toga, drvena meta kao materijal s izraženom anizotropijom i heterogenošću u određenoj mjeri doprinosi varijabilnosti izmjerenih dubina penetracije, što je jedan od argumenata za primjenu standardizovanih meta u narednim fazama istraživanja. Osim toga, na otvorenim poligonima postoji i efekat vjetrova koji može uticati na rezultate i na samo 3 metra leta.

Važan nalaz koji zaslužuje posebnu pažnju jeste da nijedan od ispaljenih projektila nije doživio strukturalnu dezintegraciju tokom prolaska kroz cijev, uprkos ekstremnim termičkim i mehaničkim uslovima koji vladaju u toj fazi. Projektili su zadržali svoju geometriju i nakon udara u metu, a na površini su vidljivi otisci žljebova cijevi, što potvrđuje da je došlo do pravilnog žljebovanja i stabilizacije projektila tokom leta.

Sa stanovišta terminalne balistike, prosječna dubina penetracije od 18 mm u jelovu građu ne zadovoljava V_{50} kriterij za klasifikaciju projektila kao konzistentno smrtonosnog. Ipak, jedan projektil je ostvario puni prolaz kroz dasku debljine 25,4 mm, što ukazuje da pod određenim uslovima

ovakav projektil može biti potencijalno smrtonosan. Ova kombinacija rezultata jasno svrstava ovakve 3D štampane PLA projekte u kategoriju opasnih, ali nekonzistentnih projektila čiji terminalno-balistički učinak zavisi od niza varijabli koje je u ovoj fazi istraživanja bilo nemoguće u potpunosti kontrolisati [158].

Pored toga, uočeno je i značajno odstupanje izmjerenih brzina od brzina karakterističnih za standardne FMJ projekte kalibra 9×19 mm, koje se u literaturi navode u rasponu od 320 do 390 m/s [159,160]. Ovo odstupanje ukazuje na gubitke energije koji su vjerovatno posljedica nedovoljnog zaptivanja između polimernog projektila i stijenke cijevi, što je direktna posljedica dimenzionalnih razlika između polimernog i metalnog projektila iste nominalne veličine. Ovaj zaključak predstavlja polaznu tačku za istraživanje opisano u narednom odjeljku.

Navedeni rezultati poslužili su kao ključna potvrda opravdanosti daljeg istraživanja. Inicijalni test je ispunio svoju svrhu: dokazano je da polimerni projektil izrađen metodom FDM 3D štampe može biti funkcionalan, da prolazi kroz sve faze balističkog ciklusa bez oštećenja oružja i bez dezintegracije, te da ostvaruje mjerljive efekte na cilju. Ciljano se u ovoj fazi nije pribjeglo upotrebi etalonskih cijevi ni EPVAT standardizovanom mjerenju unutrašnjebalističkih parametara, budući da u odsustvu potvrde bazične funkcionalnosti takav pristup ne bi bio opravdan ni sa naučnog ni sa ekonomskog stanovišta.

2.2 Ispitivanje tolerancija i optimizacija dimenzija projektila

Imajući u vidu specifičnost metode 3D štampe i tolerancija koje su svojstvene ovom procesu, finalnu dimenziju projektila nije moguće jednoznačno definisati na osnovu nominalnih mjera standardnog metalnog projektila. Plastika i metal posjeduju značajno različite mehaničke osobine, što ima direktan uticaj na dimenzionisanje polimernog projektila. U slučaju izrade projektila identičnih dimenzija kao kod FMJ projektila, može doći do gubitka materijala već u fazi pertlovanja, u kojoj trenje između polimernog projektila i mesingane čahure izaziva kidanje i smanjenje debljine polimernog sloja. Takva pojava direktno uzrokuje slabije zaptivanje, što vodi ka gubicima produkata sagorijevanja, smanjenju brzine projektila na ustima cijevi i potencijalnom narušavanju pravilnosti balističkog ciklusa. Pored navedenog, u fazi skladištenja postoji realna mogućnost rastavljanja sklopa metka uslijed nedovoljne sile pertlovanja, što bi rezultiralo prosipanjem barutnog punjenja.

Priroda FDM procesa štampe ne dopušta generalizovanu preciznost izrade kakva je uobičajena kod konvencionalnih CNC mašina. Na tačnost finalnih dimenzija FDM otiska utiče niz faktora: vrsta materijala koji se štampa, geometrija i oblik proizvoda, veličina modela, broj elemenata koji se istovremeno izrađuju, parametri hlađenja slojeva, kao i temperatura ekstruzije i drugi uticajni faktori [57]. U slučaju projektila za municiju kalibra 9×19 mm, koji je relativno mali za štampu pomoću FDM štampača i karakteriziran zaobljenom geometrijom, ovi uticaji su posebno izraženi. Zbog toga je eksperimentalnim putem neophodno odrediti optimalnu skalu i tolerancije koje minimiziraju gubitke i omogućavaju postizanje maksimalne moguće brzine na ustima cijevi, uz zadržavanje ključnih geometrijskih karakteristika i pouzdane funkcionalnosti oružja.

S obzirom na to da je inicijalni test opisan u prethodnom odjeljku ukazao na neadekvatnu dimenziju projektila u razmjeri 1:1 (zaključak na osnovu značajnog odstupanja u vrijednostima brzina na ustima cijevi), pristupilo se sistematskom uvećanju modela u programskom okruženju Bambu Studio. Testirano je pet različitih kombinacija skaliranja po osama, a izmjerene brzine na ustima cijevi korišćene su kao primarni kriterij ocjene kvaliteta zaptivanja i dimenzionalne usklađenosti. Za

eksperimentalno mjerenje je korišćen isti pištolj i hronograf kao u prethodnom odjeljku. Barutno punjenje je bilo u originalnoj količini. Rezultati ispitivanja prikazani su u tabeli 2.

Tabela 2: Rezultati ispitivanja projektila izrađenih u različitim skalama (osa Z odgovara osi projektila) 3D štampe u odnosu na standardizovane dimenzije

Skaliranje (X/Y/Z)	Brzina na ustima cijevi [m/s]	Napomena
100%/100%/100%	231,3 – 287,1	Osnovna dimenzija, inicijalni test
101,25%/101,25%/104,65%	376,0 – 387,9	Projektil prevelik, otežan ulaz u komoru
100,8%/100,8%/100,8%	271,9 – 301,9	Ispod referentnog opsega
100,46% / 100,46% / 100,46%	173,8 – 212,5	Najniže izmjerene brzine, odbacuje se
101%/101%/101%	292,0 – 328,3	Prihvatljiv opseg, blizu donje granice
101,1% / 101,1% / 104,6%	378,7 – 413,6	Optimalne brzine, prihvatljiva funkcionalnost

Na osnovu prikazanih rezultata, kao optimalna dimenzija usvaja se skaliranje od 101,1% po X i Y osi i 104,6% po Z osi, u odnosu na originalne dimenzije. Ova kombinacija omogućava postizanje brzina koje odgovaraju referentnom opsegu standardne FMJ municije, uz nesmetano funkcionisanje oružja i prolaz kroz sve faze balističkog ciklusa (izostanak izbačaja čahure je i dalje prisutan, bez obzira na količinu barutnog punjenja). Visina je povećana radi dodavanja mase. Ovako definisane dimenzije primjenjuju se u svim narednim eksperimentima opisanim u ovoj disertaciji, sa visinom sloja pri izradi od 0,08 mm, čime je osigurana konzistentnost uzoraka i uporedivost rezultata između različitih faza istraživanja. Projektili u ovoj veličini imaju masu od tačno 1 gram, slika 3.



Slika 3: Mjerenje mase PLA projektila izrađenog prema usvojenoj skali na analitičkoj vagi

Sjedinjenje projektila sa ostatkom metka (pertlovanje), vršilo se priručnim stegama za pertlovanje. Sve komponente su originalne, uz izmjenu isključivo projektila, slika 3. Vađenje FMJ projektila iz čahure, bez oštećenja, rađeno je uz korišćenje kinetičkog čekića, vidljivog također na slici 4 (a).



a) b)

2.3 Parametri unutrašnje balistike

Mogućnost praktične primjene 3D štampanih projektila u standardnoj municiji ne zavisi isključivo od terminalno-balističkih performansi, već u jednakoj mjeri i od parametara koji vladaju unutar sistema cijevi u toku opaljenja. Unutrašnja balistika obuhvata analizu procesa koji se odvijaju od inicijacije kapisle do trenutka kada projektil izlazi iz usta cijevi, a pritisak koji se razvija u komori sagorijevanja predstavlja jedan od najkritičnijih parametara koji se pri tome razmatraju [161]. S jedne strane, nedovoljan pritisak rezultira neadekvatnom brzinom projektila i nepouzdanim funkcionisanjem oružja, dok s druge strane prekoračenje dozvoljenih granica pritiska direktno ugrožava strukturalni integritet oružja i bezbjednost korisnika. Imajući u vidu da je komora sagorijevanja element oružja koji je izložen najvećim mehaničkim i termičkim naprezanjima u eksploataciji, određivanje unutrašnjebalističkih parametara polimernog projektila postaje neophodan korak u sveobuhvatnoj analizi sistema [162].

Pritisak u komori sagorijevanja P direktno je vezan za kinetičku energiju koju projektil stiče prolaskom kroz cijev. Veza između pritiska pogonskog gasa, sile koja djeluje na projektil i rezultujućeg ubrzanja opisana je Njutnovim drugim zakonom primijenjenim na sistem projektil-gas:

$$F = P \cdot A = m \cdot a \quad (1)$$

gdje je F rezultantna sila na projektil [N], P pritisak gasa u komori [Pa], A površina poprečnog presjeka cijevi [m²], m masa projektila [kg], a a ubrzanje projektila [m/s²]. Iz navedene relacije direktno slijedi da je za projektil manje mase, kakav je polimerni projektil od svega 1 grama u poređenju sa 8 grama teškim FMJ projektilom, ubrzanje pri istom pritisku proporcionalno veće. Kinetička energija projektila na ustima cijevi izračunava se prema izrazu:

$$E_k = \frac{1}{2} m \cdot v^2 \quad (2)$$

Uzimajući u obzir da energija pogonskog gasa mora savladati trenje projektila o cijev, aerodinamički otpor unutar cijevi te ubrzati masu projektila, ukupni energetski bilans unutrašnjebalističkog ciklusa može se opisati relacijom:

$$E_{gas} = E_k + E_{trenje} + E_{sag} + E_{gubici} \quad (3)$$

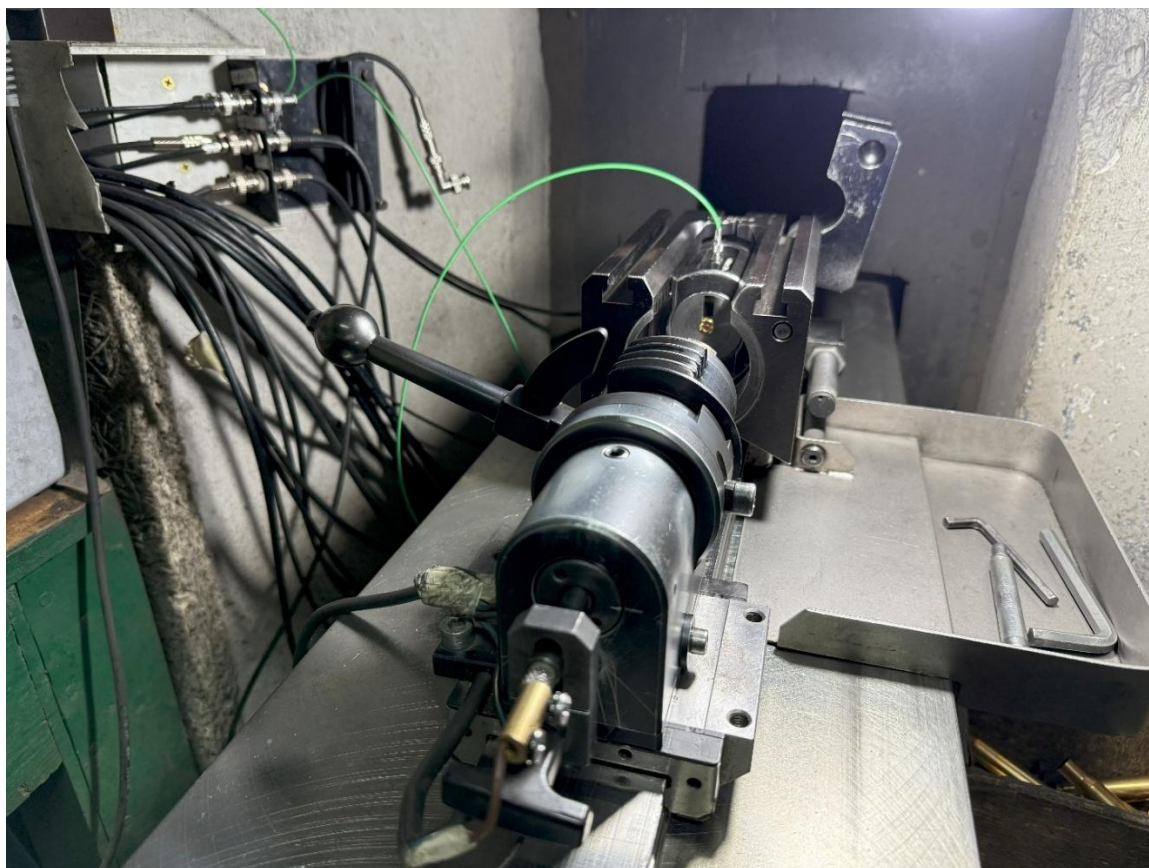
gdje E_{gas} predstavlja ukupnu energiju oslobođenu sagorijevanjem pogonskog goriva, E_k kinetičku energiju projektila, E_{trenje} energiju utrošenu na savladavanje trenja između projektila i stijenki cijevi, E_{sag} kinetičku energiju gasovitih produkata sagorijevanja iza projektila, a E_{gubici} ostale gubitke

(toplinska disipacija i sl.) [163]. Za procjenu maksimalnog pritiska u komori koristi se i empirijska veza s brzinom projektila poznata iz unutrašnjebalističke teorije, gdje veći pritisak pri manjoj masi projektila u pravilu rezultira višom brzinom na ustima cijevi, uz uslov zadovoljavajućeg zaptivanja [164].

2.3.1 Mjerna oprema i standard ispitivanja

Mjerenja unutrašnjebalističkih parametara provedena su u opitnoj laboratoriji kompanije Igman d.d. Konjic, u laboratorijskim prostorima posebno namijenjenim za standardizovana ispitivanja municije. Ispitivanje je provedeno u skladu s EPVAT standardom (*Electronic Pressure, Velocity and Action Time*), koji predstavlja NATO standardizovanu metodu za mjerenje pritisaka produkata sagorijevanja i brzine projektila u malokalibarnoj municiji [165]. EPVAT standard propisuje precizne uslove ispitivanja, karakteristike opitne cijevi, poziciju mjernog senzora, kao i postupak obrade i interpretacije rezultata, čime se osigurava ponovljivost i međunarodna uporedivost dobivenih podataka.

U skladu s navedenim standardom, za ispitivanje je korišćena EPVAT opitna cijev broj 6672, dužine 200 mm, unutrašnjeg prečnika 9 mm. Opitna cijev je precizno izrađen mjerni instrument koji zamjenjuje standardnu cijev oružja i čija je primarna svrha eliminacija varijabilnosti koja bi mogla biti uzrokovana razlikama između pojedinih primjeraka oružja. Korišćenjem opitne cijevi umjesto standardnog pištolja osigurava se isključivo mjerenje karakteristika municije, a ne kombinovanog uticaja municije i oružja (pod uslovom fiksnog postavljanja na opitnom stolu). Mjerni senzor za pritisak postavlja se na za to predviđeni otvor na opitnoj cijevi, prema EPVAT standardu, na precizno definisanoj poziciji u odnosu na čelo zatvarača, čime se osigurava mjerenje referentnog pritiska komore P1 u fazi maksimalnog razvoja pritiska pogonskog gasa. Laboratorijska postavka je prikazana na slici 5.



Slika 5: Opitni sto sa etalonskom cijevi i senzorima

Zelena žica na slici 4 predstavlja konektor senzora sa akvizicijom. Na osnovu fotografije je vidljivo da je senzor pozicioniran neposredno ispred projektila u komori sagorijevanja.

Za mjerenje pritiska u komori sagorijevanja korišćen je piezoelektrični senzor Kistler 6215, serijski broj 5863502, sa faktorom osjetljivosti 1,432 pC/bar. Senzor Kistler 6215 karakteriše mjerni opseg do 6000 bara, osjetljivost od približno 1,4 pC/bar, linearnost u granicama $\pm 0,3\%$ punog opsega, te operativni temperaturni opseg od -196°C do $+350^{\circ}\text{C}$ [166]. Upravo ovaj senzor je zvanično prihvaćen u standardu [165]. Navedene karakteristike čine ga jednim od referentnih instrumenata za primjenu u balističkim laboratorijama i ispitivanjima municije prema NATO standardima. Princip rada zasniva se na piezoelektričnom efektu, pri čemu mehaničko naprezanje uzrokovano promjenom pritiska generiše električni naboj proporcionalan primijenjenoj sili. Senzor je u stanju da precizno bilježi pritiske visokih amplituda s vremenskom rezolucijom u mikrosekundnom opsegu, što ga čini posebno pogodnim za snimanje karakteristične krive pritiska–vrijeme tokom unutrašnjebalističkog ciklusa.

Za mjerenje brzine projektila korišćen je sistem svjetlosne barijere Kistler 2521A, pri čemu je start signal generisan na kanalu CH4, a stop signal na kanalu CH5, na udaljenosti 16 metara od usta cijevi. Princip rada Kistler svjetlosnih barijera zasniva se na prekidu svjetlosnog snopa između predajnika i prijemnika u trenutku prolaska projektila, pri čemu se preciznim mjerenjem vremena između prekida na dvjema kapijama i poznatom baznom dužinom između njih izračunava brzina projektila u datoj tački leta. Vremenski marker napuštanja usta cijevi bilježen je senzorima Kistler 603CAA, serijski broj 5655401. Akvizicija podataka vršena je simultano na svim kanalima uz visoku frekvenciju uzorkovanja, čime je osigurana dovoljna vremenska rezolucija za tačno određivanje trenutka i amplitude maksimalnog pritiska.

Atmosferski uslovi za vrijeme ispitivanja bili su sljedeći: temperatura okoline 21°C , temperatura municije 21°C , atmosferski pritisak 900 mbar i relativna vlažnost 40%. Svi navedeni parametri su u skladu s referentnim uslovima propisanim EPVAT standardom i nisu zahtijevali korekciju izmjerenih vrijednosti.

2.3.2 Ispitni uzorci

U okviru mjerenja unutrašnjebalističkih parametara ispitane su dvije grupe municije. Prvu grupu čini etalonska municija proizvođača Igman d.d. Konjic, serija BA LOT 12IK25, kalibra 9×19 mm sa FMJ projektilom mase 8 grama i masom goriva od oko 0,36 g. Ova grupa služi kao referentna vrijednost i omogućava provjeru ispravnosti mjernog sistema, ali i direktno poređenje unutrašnjebalističkih parametara standardnog metalnog i polimernog projektila. Drugu grupu čini municija sa 3D štampanim PLA projektilima, izrađenim prema ranije navedenoj skali u odnosu na standardni FMJ projektil, mase projektila 1 gram, identičnog barutnog punjenja i čahure kao etalonska municija.

Bitno je naglasiti da sklop metka s polimernim projektilom nije izrađen mašinskim pertlovanjem, kakvo se primjenjuje u industrijskoj proizvodnji municije, već ručnim pertlovanjem standardnim alatima koji se koriste za ručne operacije. Ovim pristupom namjerno su simulirani uslovi sklapanja municije na terenu ili u otežanim uslovima, bez pristupa specijalizovanoj industrijskoj opremi, što je ujedno jedan od scenarija primjene koji se razmatra u kontekstu aditivne proizvodnje u odbrambenoj industriji. Ovakav način pertlovanja za posljedicu ima određenu varijabilnost u sili pertlovanja između pojedinih primjeraka, što se može odraziti na konzistentnost unutrašnjebalističkog ciklusa i predstavlja jednu od varijabli koja će biti razmatrana u analizi rezultata.

2.3.3. Obrada mjernih signala

Sirovi signali pritiska dobijeni mjerenjem za municiju sa polimernim projektilima uvezeni su u programski paket MATLAB radi naknadne obrade i analize. Budući da neobrađeni signal sadrži visokofrekventne oscilacije karakteristične za dinamička mjerna okruženja, nastale kao posljedica elektronskih smetnji, osjetljivosti mjerne opreme i same dinamičke prirode eksperimenta, neophodno je provesti odgovarajuću obradu signala prije interpretacije rezultata. Oscilacije su posebno izražene

u slučaju mjerenja pritiska kod ovakvog tipa municije, prvenstveno jer su vrijednosti znatno manje od očekivanih vrijednosti prema kojim je oprema kalibrisana, ali i zbog više uticajnih faktora svojstvenih za ovakav tip municije (manja sila pertlovanja, manja masa projektila i dr.) Glavni oblik signala, odnosno porast pritiska, dostizanje maksimuma i opadanje, predstavlja korisnu informaciju o unutrašnjebalističkom procesu. Nasuprot tome, male i vrlo brze oscilacije uglavnom ne predstavljaju dominantnu fizičku pojavu, već neželjene komponente koje otežavaju interpretaciju rezultata. Zbog toga je za naknadnu obradu primijenjen digitalni niskopropusni (*low-pass*) filter, čiji je zadatak da zadrži sporije, fizikalno relevantne komponente signala, a da priguši visokofrekventni šum.

Na osnovu učitanih podataka iz .csv datoteke određen je period uzorkovanja kao razlika između uzastopnih vremenskih uzoraka:

$$T_s = t_{k+1} - t_k \quad (4)$$

a zatim i frekvencija uzorkovanja prema izrazu:

$$F_s = \frac{1}{T_s} \quad (5)$$

U konkretnom slučaju ustanovljeno je da je period uzorkovanja približno $T_s = 1$ ms, iz čega slijedi da frekvencija uzorkovanja iznosi $F_s = 1$ kHz. Ova vrijednost odnosi se isključivo na rezoluciju konačnog, eksportovanog signala nakon internog usrednjavanja/decimacije od strane akvizicionog sistema, dok sama mjerna oprema (Kistler akvizicioni lanac) tokom snimanja radi na znatno višoj stvarnoj frekvenciji uzorkovanja, iznad 200 kHz, neophodnoj za tačno hvatanje oštrog porasta pritiska u komori. Frekvencija od 1 kHz, dobijena iz izvezenih podataka, predstavlja veličinu relevantnu isključivo za projektovanje digitalnog filtera u ovoj fazi obrade, budući da pogrešno određivanje frekvencije uzorkovanja može dovesti do neadekvatnog postavljanja frekvencijskih parametara filtera i time do neispravne obrade signala. Za filtriranje je korišćen Butterworth niskopropusni filter prvog reda. Butterworth filter spada u grupu digitalnih filtera s maksimalno ravnom amplitudnom karakteristikom u propusnom opsegu, što znači da ne uvodi neravnomjernosti u oblasti frekvencija koje propušta. U odnosu na filtere višeg reda, pristup s filterom prvog reda uvodi blaže zaglađivanje i manju vjerovatnoću narušavanja karakterističnih tačaka odziva, zbog čega se pokazao kao najpogodniji za obradu eksperimentalnih balističkih signala. Matematički, digitalni filter opisuje se prenosnom funkcijom u z-domeni:

$$H(z) = \frac{b_0 + b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2} + \dots}{a_0 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2} + \dots} \quad (6)$$

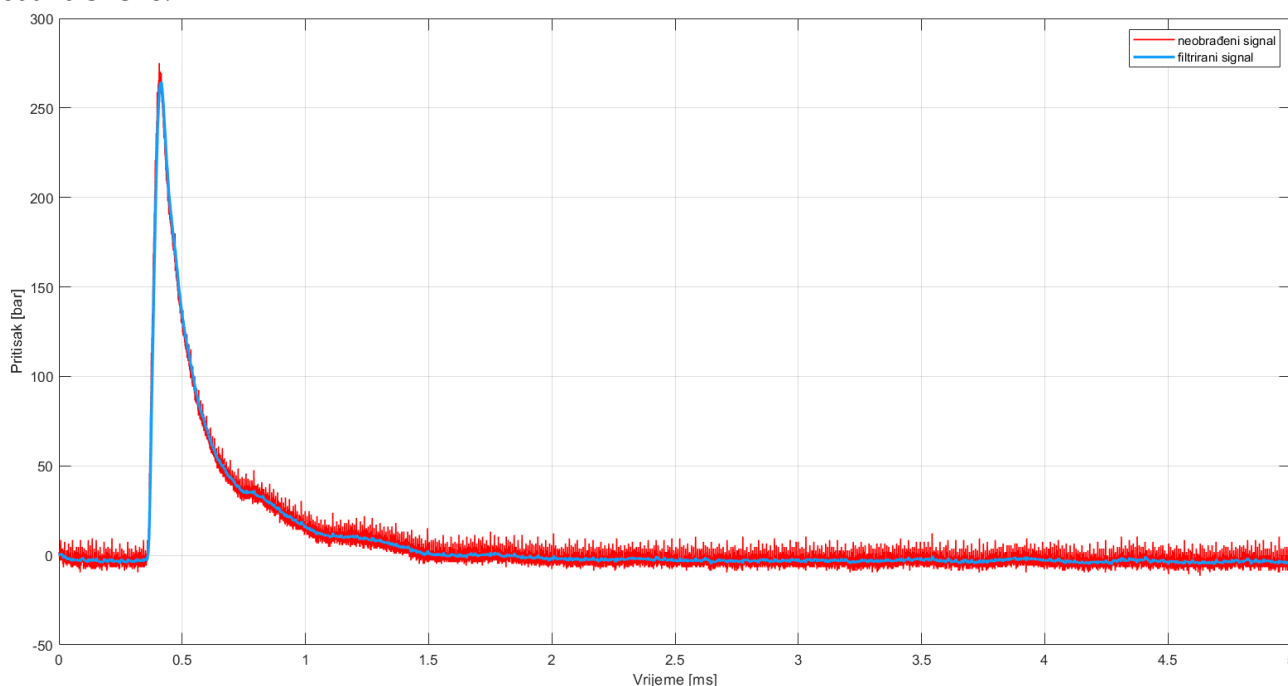
gdje koeficijenti b određuju dio koji množi ulazni signal, a koeficijenti a određuju dio koji koristi prethodne izlaze filtera. Granična frekvencija filtera f_c nije određena strogo teorijski, već iterativnom metodom empirijskog podešavanja; isprobano je više vrijednosti granične frekvencije, a odabrana je ona koja daje najbolji kompromis između smanjenja šuma i očuvanja stvarnog oblika odziva. Nakon više pokušaja utvrđeno je da vrijednost $f_c = 40$ Hz daje filtrirani signal koji je najbliži izvornom mjerenom signalu, ali istovremeno sa značajno smanjenim visokofrekventnim oscilacijama. Manja vrijednost granične frekvencije dovodila je do pretjeranog udaljavanja od sirovog signala, dok veća vrijednost nije davala zadovoljavajuće potiskivanje šuma.

Prije primjene filtera određena je normalizovana granična frekvencija ω_n , budući da funkcija za projektovanje Butterworth filtera ne koristi direktno vrijednost granične frekvencije izraženu u hercima, već zahtijeva njen odnos prema Nyquistovoj frekvenciji. Nyquistova frekvencija jednaka je polovini frekvencije uzorkovanja, $F_s/2$, pa je normalizovana granična frekvencija izračunata prema izrazu:

$$W_n = \frac{f_c}{\frac{F_s}{2}} \quad (7)$$

Filtriranje je provedeno u oba smjera; naprijed i nazad, čime je izbjegnuta fazna pomak koji bi inače nastao pri jednosmjernoj primjeni filtera. Očuvanje tačnog vremenskog položaja maksimuma i ostalih karakterističnih tačaka signala od posebne je važnosti za precizno određivanje maksimalnog pritiska u komori sagorijevanja, jer i mali fazni pomak može dovesti do pogrešne interpretacije trenutka dostizanja vršnog pritiska i time narušiti valjanost unutrašnjebalističke analize.

Poređenjem neobrađenog i filtriranog signala za sve ispitivane uzorke utvrđeno je da primijenjena obrada nije izmijenila osnovni karakter unutrašnjebalističkog ciklusa, već je isključivo poboljšala čitljivost rezultata uklanjanjem neželjenih oscilacija, čime je osigurana pouzdana osnova za dalju diskusiju unutrašnjebalističkog ponašanja ispitivanih uzoraka. Provjera rezultata je pokazala zanemarivo odstupanje između filtriranog i neobrađenog maksimuma, te da filtrirani signal daje pouzdaniji i ponovljiviji rezultat eliminacijom mjernog šuma. U skladu s tim, za referentne vrijednosti su odabrane filtrirani maksimumi. Primjer krive pritisak-vrijeme za filtriran i nefiltriran dijagram je dat na slici 6.

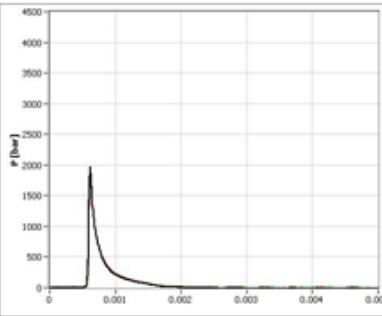


Slika 6: Filtrirana i nefiltrirana kriva pritisak-vrijeme za izmjereni unutrašnjebalistički ciklus

2.3.4. Rezultati i diskusija

Radi direktnog poređenja unutrašnjebalističkih parametara, u okviru iste mjerne postavke i pri identičnim uslovima akvizicije podataka, ispitane su dvije grupe municije: etalonska municija s FMJ projektilom i municija s 3D štampanim PLA projektilom, pri čemu su svi ostali dijelovi metka bili identični. Za FMJ grupu ispaljena su 3 projektila, a za polimernu grupu 4 projektila. Rezultati se zasnivaju na direktnoj usporedbi maksimalnih pritisaka određenih iz obrađenih signala i brzina projektila izmjerenih na udaljenosti od 16 metara od usta cijevi. Pored zbirnih tabela izmjerenih vrijednosti, za svaku grupu municije prikazan je i reprezentativni filtrirani dijagram krive pritisak-vrijeme.

Izmjerene vrijednosti za municiju s FMJ projektilima direktno su registrovane i obrađene u sistemu za akviziciju podataka Kistler, koji automatski generiše izvještaj s izmjerenim brzinama i maksimalnim pritiscima za svaki projektil. Iz tog razloga za FMJ grupu nije provedena naknadna obrada u MATLAB-u, već su vrijednosti preuzete direktno iz automatski generisanog izvještaja mjernog sistema. Na slici 7 prikazan je izvještaj iz sistema za akviziciju sa svim relevantnim parametrima ispitivanja i automatski generisanim dijagramom.

		IZVJEŠTAJ o ispitivanju pritiska produkata sagorijevanja, brzine projektila i karakterističnih vremena			Datum: 20.12.2025 Broj izvještaja: Broj popratnog lista:	
Municija		Oružje		Uslovi ispitivanja		
Kalibar municije:	9 x 19 mm FMJ	Optina cijev:	EPVAT	Temp. municije [°C]:	21	
Model municije		Broj cijevi:	6672	Temp. okoline [°C]:	21	
Broj serije municije:				Cisak osoline [mbar]:	900	
Masa projektila [g]:				Relativna vlažnost [%]:	40	
Gorivo:				Referentne vrijednosti		
Broj serije goriva:		Tip testa:	Standard	P _{1 REF} [bar]:		
Masa goriva [g]:		Senzori:		P _{2 REF} [bar]:		
Kapsla:		Tip:	Kistler 6215	V _{REF} [m/s]:		
Broj serije kapsle:		Serijski broj:	6264305	Baza [m]:	16	
Svrha testa:		Etalon BA LOT 12IK25				
Dijagram promjene pritiska u komori sagorijevanja u funkciji vremena		Broj testa	P _{1max} [bar]	P _{2max} [bar]	V [m/s]	t _{sp} [ms]
		1.	1970		371.1	
		2.	1845		364.9	
		3.	1875		369.0	
		4.				
		5.				
		6.				
		7.				
		8.				
		9.				
		10.				
		11.				
		12.				
		13.				
		14.				
		15.				
		16.				
		17.				
		18.				
		19.				
		20.				
		21.				
		22.				
		23.				
		24.				
		25.				
		26.				
		27.				
		28.				
		29.				
		30.				
Dijagram promjene pritiska na povratniku gasova u funkciji vremena						
Srednja vrijednost:		1897		368.3		
Maksimalna vrijednost:		1970		371.1		
Minimalna vrijednost:		1845		364.9		
Razlika:		125		6.2		
Standardna devijacija:		65		3.1		

Slika 7: Izgled automatski generisanog izvještaja o mjerenjima unutrašnje-balističkih parametara

Brzine su mjerene na 16 metara (FMJ i PLA) i 25 metara (PLA) od usta cijevi, uslijed fizičkih nemogućnosti za postavljanje barijera direktno na usta cijevi. Kako bi se te brzine mogle koristiti za poređenje s vrijednostima karakterističnim za datu municiju, te kako bi se mogla kvantifikovati razlika u balističkim performansama FMJ i polimernog projektila, izmjerene brzine su svedene na usta cijevi primjenom analitičkog modela eksponencijalnog pada brzine, jednačinom:

$$v(x) = v_0 \cdot e^{-k \cdot x} \quad (8)$$

inverzno se dobija brzina na ustima cijevi v_0 :

$$v_0 = v(x) \cdot e^{k \cdot x} \quad (9)$$

gdje je k faktor usporavanja koji zavisi od karakteristika projektila i vazduha:

$$k = \frac{\rho \cdot C_d \cdot A}{2m} \quad (10)$$

Za standardne atmosferske uslove pri kojima je provedeno ispitivanje, gustina vazduha iznosi $\rho = 1,204 \text{ kg/m}^3$. Površina poprečnog presjeka projektila kalibra $9 \times 19 \text{ mm}$:

$$A = \frac{\pi \cdot D^2}{4} = \frac{\pi \cdot (0,009)^2}{4} = 6,362 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2 \quad (11)$$

Za FMJ projektil, uz usvajanje koeficijenta otpora ($m = 0,008 \text{ kg}$, $C_d = 0,29$):

$$k_{FMJ} = \frac{1,204 \cdot 0,29 \cdot 6,362 \cdot 10^{-5}}{2 \cdot 0,008} = \frac{2,22 \cdot 10^{-5}}{0,016} = 1,388 \cdot 10^{-3} \text{ m}^{-1} \quad (12)$$

Za PLA projektil sa visinom sloja $0,08 \text{ mm}$ ($m = 0,001 \text{ kg}$, $C_d = 0,329$):

$$k_{PLA} = \frac{1,204 \cdot 0,329 \cdot 6,362 \cdot 10^{-5}}{2 \cdot 0,001} = \frac{2,52 \cdot 10^{-5}}{0,002} = 1,26 \cdot 10^{-2} \text{ m}^{-1} \quad (13)$$

Već iz samih faktora usporavanja vidljivo je da je k_{PLA} skoro devet puta veći od k_{FMJ} , što kvantitativno potvrđuje znatno brže usporavanje polimernog projektila male mase tokom leta.

Svođenje brzine na usta cijevi za FMJ projektil:

$$v_{0,FMJ} = v(16) \cdot e^{1,388 \cdot 10^{-3} \cdot 16} = v(16)e^{0,0222} = v(16) \cdot 1,02246 \quad (14)$$

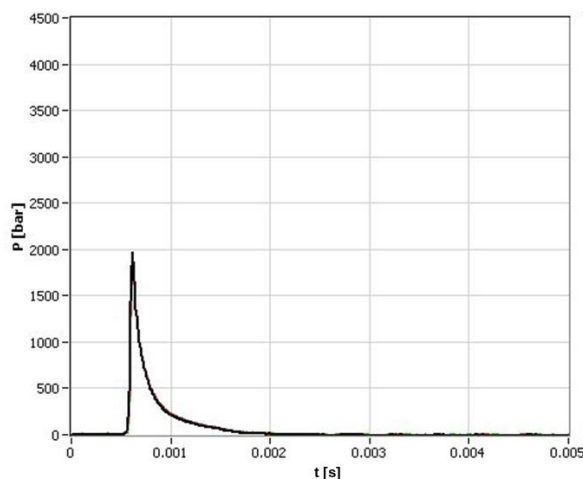
Svođenje brzine na usta cijevi za PLA projektil sa 16 m :

$$v_{0,PLA} = v(16) \cdot e^{1,260 \cdot 10^{-2} \cdot 16} = v(16)e^{0,2016} = v(16) \cdot 1,2234 \quad (15)$$

Svođenje brzine na usta cijevi za PLA projektil sa 25 m :

$$v_{0,PLA} = v(25) \cdot e^{1,260 \cdot 10^{-2} \cdot 25} = v(25)e^{0,3150} = v(25) \cdot 1,3703 \quad (16)$$

Kada je riječ o izmjerenim vrijednostima za etalonsku municiju sa FMJ projektilima, na dijagramu na slici 8 je vidljiv karakteristični oblik krive pritisak-vrijeme unutrašnjebalističkog ciklusa, karakterisan naglim porastom pritiska poslije inicijacije i sagorijevanja barutnog punjenja, dostizanja oštrog maksimuma, te postepeno opadanje pritiska kako projektil ubrzava i napušta cijev.



Slika 8: Dijagram promjene pritiska u komori sagorijevanja u funkciji vremena za FMJ projektil

Izmjerene vrijednosti maksimalnog pritiska i brzine na 16 metara, kao i izračunate brzine na ustima cijevi, prikazane su u tabeli 3.

Tabela 3: Izmjereni i izračunati parametri za FMJ municiju

Projektil	Maksimalni pritisak [bar]	Brzina na 16 m [m/s]	v ₀ na ustima cijevi [m/s]
1	1970	371,1	379,4
2	1845	364,9	373,0
3	1875	369,0	377,2
Prosjeck	1897	368,3	376,5
St. dev.	65,5	3,17	3,24

Standardna devijacija izračunata je prema standardnom izrazu:

$$SD = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}} \quad (17)$$

gdje je x_i pojedinačna izmjerena vrijednost, $\bar{x}$ aritmetička sredina svih mjerenja, a n broj mjerenja. Za pritisak:

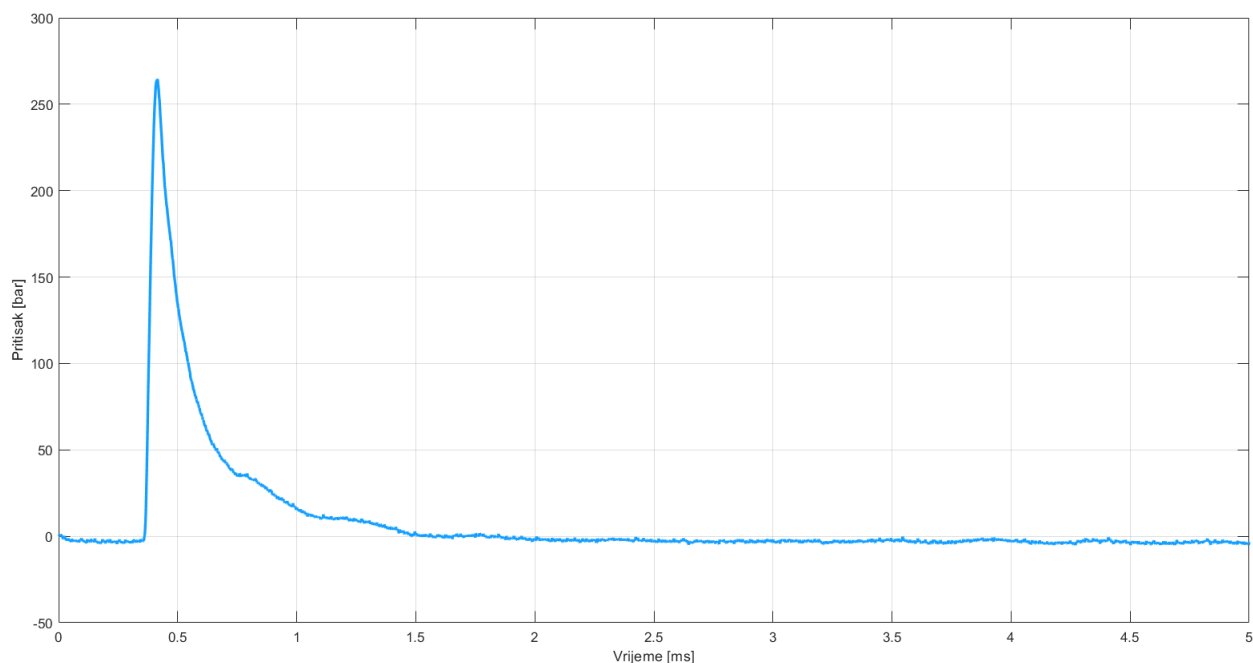
$$\bar{x}_p = \frac{1970 + 1845 + 1875}{3} = \frac{5690}{3} = 1896,7 \text{ bar} \quad (18)$$

$$SD_p = \sqrt{\frac{(1970 - 1896,7)^2 + (1845 - 1896,7)^2 + (1875 - 1896,7)^2}{3 - 1}} = \sqrt{4290,25} = 65,5 \quad (19)$$

Analogno je izračunata standardna devijacija za brzinu na 16 m i za izvedenu brzinu na ustima cijevi. Isti postupak primijenjen je i za PLA grupu.

Rezultati pokazuju visok stepen konzistentnosti između projektila – standardna devijacija pritiska iznosi 65,5 bara što predstavlja svega 3,5% prosječne vrijednosti, dok je standardna devijacija brzine na 16 m samo 3,17 m/s, odnosno 0,86% prosječne vrijednosti. Ovakva konzistentnost potvrđuje da je etalonska FMJ municija Igman d.d. visokokvalitetna i da su uslovi ispitivanja bili stabilni i ponovljivi.

Što se tiče municije sa PLA projektilima, kriva pritisak-vrijeme (slika 9) pokazuje isti opšti oblik kao i FMJ, karakterisan naglim porastom, maksimumom i postepenim opadanjem, ali sa značajno nižim vrijednostima pritiska.



Slika 9: Dijagram promjene pritiska u komori sagorijevanja u funkciji vremena za PLA projektil

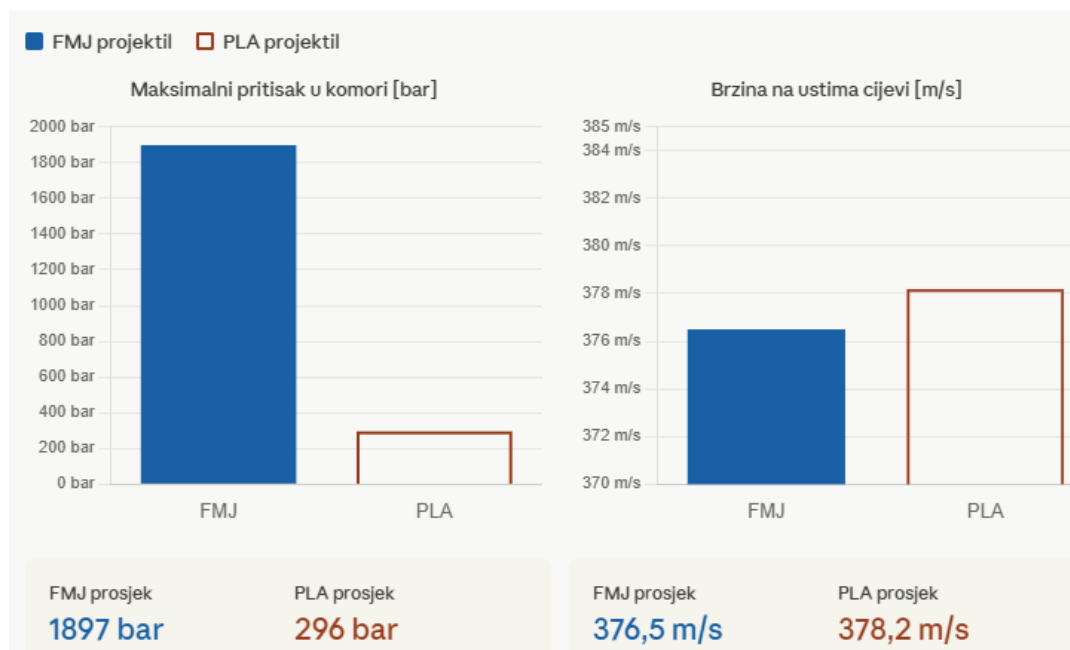
Izmjerene i izračunate vrijednosti za municiju sa PLA projektilom su date u tabeli 4.

Tabela 4: Izmjereni i izračunati parametri za PLA municiju

Projektil	Maksimalni pritisak [bar]	Brzina na 16 m [m/s]	Brzina na 25 m [m/s]	v_0 na osnovu 16 m [m/s]	v_0 na osnovu 25 m [m/s]
1	267	300,5	230,0	367,5	315,2
2	336	317,5	280,0	388,3	383,7
3	294	309,8	274,9	378,9	376,7
4	287	309,2	274,6	378,2	376,3
Prosjeak	296	309,3	264,9	378,2	363,0
St. dev.	28,5	7,04	23,6	8,61	32,3

Zbog specifičnosti projektila, vrijednosti brzine na ustima cijevi određene svođenjem sa 16 m smatraju se pouzdanijima i uzimaju se kao referentne u daljoj analizi. Svođenje sa 25 m daje određena odstupanja, naročito izražena kod projektila 1 gdje razlika između v_0 izvedenog sa 16 m i sa 25 m iznosi 52,3 m/s. Fizikalna logika potvrđuje ovu procjenu – pad brzine od 367,5 m/s na 300,5 m/s na prvih 16 metara konzistentan je s očekivanim ponašanjem projektila male mase, dok bi scenario u kojem projektil kreće sa 315,2 m/s i pada na 300,5 m/s na 16 m, a zatim pada na 230,0 m/s na narednih 9 metara, bio fizikalno nekonzistentan jer bi ukazivao na dramatično ubrzanje pada brzine na kraćem rastojanju. Navedena vrijednost se može smatrati izuzetkom (*outlier*), te je moguće da je za vrijeme leta došlo do gubitka stabilnosti projektila ili nekih drugih anomalija.

Na slici 10 su prikazani komparativni rezultati za oba tipa municije.



Slika 10: Poređenje maksimalnog pritiska i brzina na ustima cijevi za oba tipa municije

Posmatrajući dobijene rezultate, maksimalna izmjerena vrijednost pritiska za municiju s FMJ projektilom iznosi 1970 bara, s prosječnom vrijednošću od 1897 bara, dok je za PLA projektil najveća izmjerena vrijednost 336 bara, s prosječnom vrijednošću od 296 bara. Iako je apsolutna standardna devijacija pritiska manja za PLA grupu (28,5 bara) u odnosu na FMJ grupu (65,5 bara), ovakvo poređenje apsolutnih vrijednosti nije prikladno s obzirom na to da se nivoi pritiska između dvije grupe razlikuju za red veličine. Relevantnije je posmatrati relativnu standardnu devijaciju, odnosno koeficijent varijacije, izražen kao odnos standardne devijacije i srednje vrijednosti. Za FMJ grupu ovaj odnos iznosi svega 3,5%, dok za PLA grupu iznosi približno 9,6%, odnosno gotovo tri puta više. Ovo pokazuje da je, relativno gledano, konzistentnost pritiska unutar FMJ grupe zapravo veća nego kod PLA grupe, što je i očekivano imajući u vidu dugogodišnju proizvodnu tradiciju i strožiju kontrolu kvaliteta industrijske FMJ municije u odnosu na ručno sklopljene 3D štampane polimerne projekte. Poređenjem izmjerenih vrijednosti pritiska u komori sagorijevanja između dvije grupe municije, uočava se da su dobijeni rezultati u direktnoj proporciji s razlikom u masi projektila. Naime, iz jednačine kretanja projektila u cijevi:

$$F = P \cdot A = m \cdot a \quad (20)$$

slijedi da je za isti pritisak P i istu površinu presjeka A ubrzanje projektila obrnuto proporcionalno njegovoj masi m . Projektil manje mase, prema teoriji unutrašnje balistike, pri istom pogonskom punjenju preuzima proporcionalno manji dio ukupne energije dostupne sagorijevanjem baruta, budući da se, usljed znatno manje inercije, brže ubrzava i napušta cijev u kraćem vremenskom periodu, ostavljajući gasu manje vremena da pritisak u komori izgradi do pune vrijednosti koju bi inače dostigao. Ova veza se može precizno kvantifikovati preko impulsa sile koja djeluje na projektil tokom njegovog boravka u cijevi, koji je, prema impulsno-momentnoj teoremi, jednak proizvodu mase projektila i njegove brzine na izlasku iz cijevi ($J = m \cdot v$). Budući da su izmjerene brzine na ustima cijevi za oba tipa municije gotovo identične (376,5 m/s za FMJ, odnosno 378,2 m/s za PLA), odnos impulsa direktno odgovara odnosu masa projektila, odnosno iznosi približno 8:1 u korist FMJ projektila. Drugim riječima, PLA projektil, uprkos osjetno nižem pritisku u komori, zahtijeva svega osminu impulsa FMJ projektila da bi dostigao praktično istu početnu brzinu, a upravo kombinacija nižeg pritiska i kraćeg vremena njegovog djelovanja tokom unutrašnjebalističkog ciklusa daje impulsni odnos koji tačno odgovara ovom teorijskom očekivanju. Time se objašnjava naizgled paradoksalan nalaz da drastično niži pritisak u komori sagorijevanja za PLA projektil ipak rezultira praktično identičnom početnom brzinom u odnosu na FMJ projektil. Ovo je fundamentalni razlog zašto pritisak za PLA projektil mase 1 gram iznosi svega oko 15% pritiska izmjerenog za FMJ projektil mase 8 grama pri identičnom barutnom punjenju.

Pored mase, niži pritisak za PLA projektil može biti djelimično posljedica i drugačijeg međukontakta između polimernog projektila i mesingane čahure. Prilikom djelovanja produkata sagorijevanja, PLA polimer i mesing imaju drugačiji koeficijent trenja nego mesing i olovo s tombak oplatom kakav je FMJ projektil, pri čemu je vjerovatno da polimerni projektil nailazi na manje trenje pri napuštanju čahure, čime brže oslobađa čahuru i dodatno doprinosi nižim vrijednostima pritiska. Uz to, zbog ranije opisane problematike pri izradi 3D štampanih projektila, izvjesno je da se javljaju i određeni gubici usljed nesavršenosti štampane geometrije, potencijalne ekscentričnosti i grublje površinske strukture, što sve zajedno utiče na kvalitet zaptivanja i posljedično na ostvareni pritisak.

Kada je riječ o izmjerenim brzinama, vrijednosti svedene na usta cijevi imaju orijentacioni karakter, budući da se zasnivaju na analitičkom modelu s pretpostavkom konstantnog koeficijenta aerodinamičkog otpora tokom cijelog leta, što u stvarnosti nije u potpunosti ispunjeno, posebno za projektil male mase koji može mijenjati orijentaciju i stabilnost tokom leta. Uz navedeno, primijetno je da FMJ projektil ostvaruje neznatno manju početnu brzinu na ustima cijevi (376,5 m/s) u odnosu na PLA projektil (378,2 m/s), ali i značajno manje usporenje tokom leta – pad od svega 8,2 m/s na 16 metara u odnosu na pad od 68,9 m/s za polimerni projektil na istoj udaljenosti. Ovo je direktna posljedica osam puta veće mase FMJ projektila i s tim povezanog balističkog koeficijenta, što je i teorijski elaborirano u nastavku rada.

Vrijednosti brzine svedene na usta cijevi iz mjerenja na 25 metara generalno se slažu s vrijednostima dobijenim svođenjem sa 16 metara, uz izuzetak projektila 1 gdje postoji odstupanje od 52,3 m/s između te dvije procjene. Ova ekstremna vrijednost najvjerovatnije je posljedica nestabilnosti leta konkretnog projektila, gdje pri masi od svega 1 grama i relativno niskom momentu inercije, već mala devijacija u početnoj orijentaciji ili asimetrija u geometriji projektila može uzrokovati pojavu precesije ili nutacije tokom leta, što efektivno povećava aerodinamički otpor i dovodi do strmijeg pada brzine na dužem rastojanju. Ovo nije greška mjerenja nego fizikalna pojava karakteristična za lake projekte, i upravo je jedan od razloga zašto su vrijednosti svedene sa 16 metara odabrane kao referentne. Kraće rastojanje znači manje akumulisane greške i manje prostora za razvoj nestabilnosti leta.

Posebno je interesantan podatak o brzinama na ustima cijevi – razlika od svega 1,7 m/s između FMJ (376,5 m/s) i PLA projektila (378,2 m/s) ukazuje na gotovo identične početne brzine uprkos drastično različitim pritiscima u komori sagorijevanja. Ovakav rezultat nije bio jednoznačno predvidiv unaprijed. S jedne strane, moglo se očekivati veće usporenje polimernog projektila usljed gubitka pritiska pri naglom napuštanju ležišta i potencijalno drugačijeg trenja između PLA polimera i stijenki cijevi. S druge strane, znatno manja masa polimernog projektila znači i manju inerciju, što pri istom pogonskom punjenju rezultira intenzivnijim ubrzavanjem i kraćim vremenom provedenim u cijevi, čime se kompenzuju eventualni gubici. Činjenica da su ova dva suprotstavljena efekta rezultirala gotovo identičnom brzinom na ustima cijevi predstavlja samo po sebi zanimljiv nalaz koji zaslužuje detaljniju analizu. Naredni eksperimenti s različitim dužinama cijevi nastojat će utvrditi koji od navedenih uticajnih parametara ima dominantnu ulogu u određivanju početne brzine polimernog projektila, o čemu će biti više riječi u sekcijama koja slijede.

Iako je fokus ove disertacije na terminalnoj balistici i njenim parametrima, analiza unutrašnjebalističkih parametara od velike je važnosti za razumijevanje kompletnog balističkog procesa. Posebno značajnu ulogu imat će u narednim sekcijama vezanim za optimizaciju i praktičnu primjenu ovakvog tipa municije. Iz tog razloga, a i zbog ograničenih resursa u pogledu raspoložive municije, ovdje je primijenjen manji statistički skup uzoraka (3 projektila za FMJ i 4 projektila za PLA), koji je i dalje validan za analizu i donošenje određenih zaključaka, ali koji svakako treba imati na umu pri interpretaciji iznesenih nalaza.

Dodatnu potvrdu navedenih razlika u unutrašnjebalističkim parametrima moguće je posredno dobiti i kroz analizu fenomena prelazne balistike. Neiskorišćeno barutno punjenje i gubici pogonskog gasa koji prate polimernu municiju direktno se manifestuju u intenzitetu i karakteru bljeska na ustima cijevi, što čini analizu tog fenomena logičnim nastavkom i prirodnom dopunom kompletnog opisa balističkog ciklusa za ovaj tip municije.

2.4 Bljesak na ustima cijevi

2.4.1 Uvod

Fenomen bljeska na ustima cijevi jedna je od karakterističnih pratećih pojava opaljenja vatrenog oružja i direktna je posljedica procesa koji se odvijaju u fazi prelazne balistike, u kratkom periodu u kome projektil napušta usta cijevi, dok pogonski gasovi ekspandiraju u okolni vazduh. Poznato je da se samo oko 30% hemijske energije oslobođene sagorijevanjem barutnog punjenja pretvara u kinetičku energiju projektila, dok ostatak energije najvećim dijelom ostaje sadržan u smješi pogonskog gasa i čestica koja izlazi iz usta cijevi u prvih nekoliko milisekundi [167]. Nagli izlazak te smješe uzrokuje formiranje udarnog talasa usljed brzog pomjeranja vazduha koji okružuje oružje. Pored toga, ovi gasovi su generalno bogati gorivom i turbulentno se miješaju sa vazduhom iz okoline, pri čemu sagorijevanje ove smješe uzrokuje karakteristični bljesak na ustima cijevi, koji je često praćen formiranjem sekundarnog udarnog talasa [167].

Izučavanje ovog fenomena ima višestruki značaj u vojnoj i forenzičkoj primjeni. Sa taktičkog stanovišta, bljesak na ustima cijevi jedan je od najvažnijih pokazatelja koji otkrivaju lokaciju strijelca u uslovima bliskih borbi. Razvijene su različite metode za detekciju i lokalizaciju strijelca na osnovu bljeska, uključujući akustičke senzorske mreže za detekciju udarnih talasa, radarske sisteme za praćenje projektila u letu, te elektro-optičke sisteme za direktnu detekciju bljeska u različitim spektralnim opsezima [168]. Posebno se ističe kratkotalasni infracrveni spektralni opseg (SWIR) kao pogodan za elektro-optička osmatranja bljeska, a kombinacija elektro-optičkih i akustičkih senzora omogućava i određivanje udaljenosti strijelca uz značajno smanjenje lažnih alarma [168]. Upravo zbog ove taktičke dimenzije, smanjenje bljeska na ustima cijevi predstavlja jedan od primarnih zahtjeva pri dizajnu modernog pješadijskog naoružanja.

Karakteristika oružja s kratkim cijevima, poput pištolja, jeste razvoj naročito izraženog bljeska, koji najčešće nastaje kao posljedica reakcije nesagorjelog barutnog punjenja s vazduhom pri izlasku iz cijevi, budući da kratka cijev ne pruža dovoljno prostora i vremena za potpuno sagorijevanje pogonskog goriva [169]. Osim taktičkog aspekta otkrivanja lokacije strijelca, u uslovima noćnog gađanja ovaj fenomen može uzrokovati privremeno zaslepljivanje strijelca i negativno uticati na termalne nišanske sprave postavljene na oružje. Upravo iz tog razloga razvijaju se različite konstrukcije gasnih kočnica i prigušivača bljeska namijenjenih smanjenju ovog efekta [169].

Pored navedenih taktičkih razloga, analiza bljeska na ustima cijevi od posebnog je značaja u kontekstu ocjene praktične primjene 3D štampane municije. Intenzitet bljeska direktno je u korelaciji s pritiskom koji se razvija u komori sagorijevanja i količinom nesagorjelog baruta koje izlazi iz cijevi. Dakle, bljesak predstavlja indirektnu vizuelnu mjeru unutrašnjebalističkih parametara opisanih u odjeljku 2.3. Poređenjem bljeska pri opaljenju standardnom FMJ i polimernom municijom moguće je vizuelno potvrditi razlike u pritiscima izmjenjenim u tom odjeljku, ali i dobiti uvid u specifičnosti sagorijevanja goriva u slučaju polimernog projektila. Pored toga, polimerna municija nameće se kao potencijalni kandidat za primjenu u improvizovanom i specijalizovanom oružju izrađenom od nemetalnih materijala, gdje je smanjenje termičkih i mehaničkih opterećenja od posebne važnosti, što ovakvo poređenje čini još relevantnijim.

2.4.2 Materijali i metode

Zbog sporedne važnosti ovog ispitivanja u odnosu na ostale eksperimentalne cjeline rada, kao i ograničenih resursa, pristupilo se isključivo optičkoj metodi posmatranja i mjerenja, koja podrazumijeva direktno snimanje usta cijevi ultrabrzom kamerom i neposredno vizuelno poređenje

registrovanih pojava. Korišćena je ultrabrza kamera Chronos 1.4 s objektivom Computar C-Mount u opsegu žarišnih dužina 12,5–75 mm i svjetlosnom snagom f/1,2, detaljnije opisana u odjeljku 2.6, s frekvencijom snimanja od 8986 sličica u sekundi. Kamera je bila usmjerena direktno prema ustima cijevi pištolja Sig Sauer P320 X-Five Legion.

Pored samog bljeska na ustima cijevi, snimanje je registrovalo i trzaj oružja pri opaljenju, što predstavlja dodatnu korisnu informaciju za opisivanje uslova gađanja iz pištolja različitim tipovima municije i posredno govori o razlikama u unutrašnjebalističkim parametrima između FMJ i polimernog projektila. Snimljeni materijal analiziran je kadar po kadar, a rezultati analize s pratećim snimcima prikazani su u odjeljku s rezultatima i diskusijom.

2.4.3 Rezultati i diskusija

Za svaki tip municije izdvojeni su reprezentativni kadrovi koji prikazuju razvoj bljeska, a rezultati su prikazani u nastavku.

Kao što je i očekivano na osnovu analize pritisaka u komori sagorijevanja opisane u odjeljku 2.3, razlike u fenomenu bljeska na ustima cijevi između dva tipa municije su evidentne. U slučaju korišćenja standardne municije s FMJ projektilima, dolazi do umjerenog razvoja bljeska narandžaste boje, slika 11a) i generisanja veće količine dima na ustima cijevi kao posljedice sagorijevanja barutnog punjenja, slika 11b).

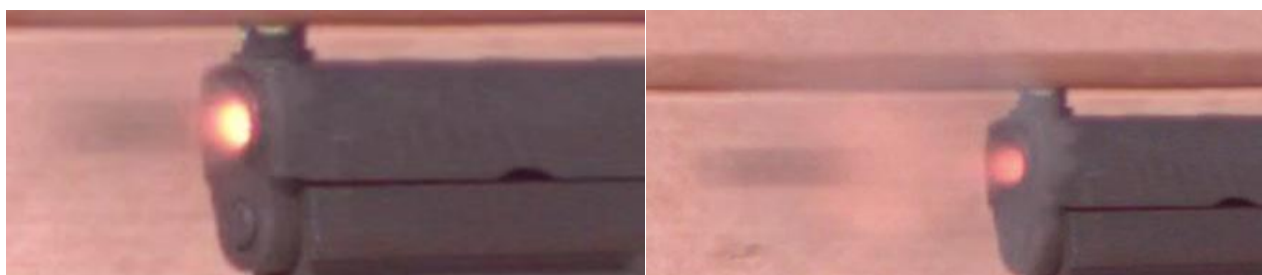


a) Bljesak

b) Dim

Slika 11: Bljesak na ustima cijevi, FMJ projektil

S druge strane, prilikom opaljenja municije s PLA 3D štampanim projektilom, evidentan je razvoj intenzivnijeg bljeska jarko žute boje na ustima cijevi, uz odsustvo karakteristične količine dima, slika 12a). Pored toga, zabilježen je i sekundarni bljesak iza projektila, u trenutku kada je projektil već napustio cijev, slika 12b). Dakle, sagorijevanje pogonskih gasova odvija se dominantno i izvan cijevi, a ne unutar nje kao što je to slučaj kod FMJ municije.



a) Bljesak

b) Sekundarni bljesak

Slika 12: Bljesak na ustima cijevi, PLA projektil

Ovakvo ponašanje u potpunosti je konzistentno s opisom fenomena bljeska datim u uvodu ovog odjeljka, gdje se navodi da bljesak nastaje kao posljedica kontakta vrućih pogonskih gasova bogatih gorivom s kisikom iz okolnog vazduha. U slučaju PLA municije, niski pritisak u komori sagorijevanja, koji je detaljno analiziran u odjeljku 2.3, direktna je posljedica nepotpunog sagorijevanja barutnog punjenja unutar cijevi. Nesagorjele čestice barutnog punjenja napuštaju cijev velikom brzinom nakon projektila i tek tada, u kontaktu s kisikom iz okoline, dolazi do njihovog sagorijevanja i formiranja karakterističnog sekundarnog bljeska. Ovaj fenomen se slikovito može opisati kao kratki, intenzivni prasak na ustima cijevi koji nastaje iznenada i nestaje gotovo trenutno, za razliku od postepeno razvijajućeg oblaka dima karakterističnog za FMJ municiju. Nesagorjele čestice barutnog punjenja koje napuštaju cijev vidljive su na slici 13.



Slika 13: Nesagorjele čestice baruta pri napuštanju cijevi oružja za slučaj opaljenja PLA municije

Osim razvoja bljeska na ustima cijevi, tokom snimanja je primijećeno i da je pištolj pri opaljenju PLA municije ostao u istom položaju, bez pomjeranja zatvarača i ostalih pokretnih dijelova, dok to nije slučaj kod standardne FMJ municije gdje je trzaj i cikliranje zatvarača jasno vidljivo. Ova pojava direktna je posljedica nedovoljnog pritiska u komori sagorijevanja za aktiviranje mehanizma za automatsko punjenje, što ima značajne praktične implikacije za primjenu ovakvog tipa municije. Konkretno, jedna od pretpostavki je da bi polimerna municija bila funkcionalna isključivo u jednostreljačkim ili ručno punjenim oružanim sistemima, ili pak u specijalizovanim konstrukcijama prilagođenim nižim pritiscima opaljenja. Sa druge strane, nizak pritisak i izostanak trzaja ukazuju na to da bi se komora sagorijevanja mogla izrađivati i od nemetala, a da bi cijevi iz kojih se gađa ovim tipom municije mogle postavljati i na dron i slične sisteme, bez bojazni da će opaljenje izazvati poremećaj ravnoteže.

Konačno, činjenica da se sagorijevanje barutnog punjenja u značajnoj mjeri odvija izvan cijevi otvara važna pitanja za dalju optimizaciju ovog tipa municije. Modifikacija količine ili tipa barutnog punjenja, kao i eventualna primjena punjenja s drugačijim karakteristikama sagorijevanja, mogli bi rezultirati potpunijim sagorijevanjem unutar cijevi, čime bi se povećao pritisak u komori, poboljšala početna brzina projektila i smanjio sekundarni bljesak. Ovi pravci optimizacije bit će razmatrani u narednim odjeljcima posvećenim praktičnoj primjeni i razvoju specijalizovane municije.

2.5 Tačnost, preciznost, aerodinamika i dinamika leta projektila

2.5.1 Uvod

Tačnost i preciznost predstavljaju dvije distinktnе, ali međusobno komplementarne karakteristike municije i oružanog sistema čije je razumijevanje neophodno za potpunu ocjenu upotrebne vrijednosti bilo kojeg projektila. Pod pojmom tačnosti u kontekstu gađanja municijom malog kalibra podrazumijeva se mjera bliskosti pogotka s namjeravanom tačkom gađanja. Dakle, posmatra se koliko su udarna mjesta projektila bliska ciljnoj tački [170]. Preciznost, s druge strane, opisuje ponovljivost rezultata, odnosno sposobnost municije da dosljedno grupiše pogotke u što manjem rasponu bez obzira na to da li je ta grupa centrirana na ciljnoj tački ili nije [171]. U idealnom slučaju, municija treba posjedovati obje osobine. Tačnost bez preciznosti znači da su pogoci prosječno blizu

cilja ali rasuti, dok preciznost bez tačnosti znači da su pogoci grupisani ali sistematski pomjereni od namjeravane tačke gađanja. Obje osobine spadaju među glavne faktore koji određuju realnu upotrebnu vrijednost municije u praktičnim uslovima primjene.

Ispitivanje tačnosti i preciznosti preporučljivo je provoditi u kontrolisanim laboratorijskim uslovima, u kojima je osigurano da etalonska cijev bude konstantno u istom položaju bez trzaja, a na projektil ne utiču spoljni faktori poput strujanja vazduha ili promjenjivih atmosferskih uslova. Ovaj zahtjev je posebno izražen u slučaju polimernih projektila mase svega 1 gram, koji su zbog iznimno male mase znatno osjetljiviji na spoljne poremećaje u odnosu na standardni FMJ projektil iste nominalne veličine koji ima masu 8 grama.

Da bi se razumjelo zašto razlika u masi od osam puta ima tako značajne posljedice na balistički učinak projektila tokom leta, neophodno je razmotriti nekoliko ključnih fizikalnih veličina. Prva od njih je balistički koeficijent, koji predstavlja mjeru sposobnosti projektila da savlada otpor vazduha i zadrži brzinu tokom leta. Definiše se izrazom:

$$BC = \frac{m}{C_d \cdot A} \quad (21)$$

gdje je m masa projektila [kg], C_d bezdimenzionalni koeficijent aerodinamičkog otpora, a A površina poprečnog presjeka projektila [m²]. Iz navedenog izraza direktno je vidljivo da je balistički koeficijent proporcionalan masi projektila – pri identičnoj geometriji i identičnom koeficijentu otpora, polimerni projektil mase 1 g imaće balistički koeficijent osam puta manji od FMJ projektila mase 8 g. Posljedica toga je znatno brže usporavanje polimernog projektila tokom leta, što se matematički opisuje eksponencijalnim padom brzine s pređenom udaljenošću, ranije navedenom u odjeljku 2.3:

$$v(x) = v_0 \cdot e^{-\frac{\rho \cdot C_d \cdot A}{2m} \cdot x} \quad (22)$$

gdje je v_0 početna brzina na ustima cijevi [m/s], ρ gustina vazduha [kg/m³], a x pređena udaljenost [m]. I ovdje je masa m u nazivniku eksponenta, što znači da manji m direktno rezultira strmijim padom brzine s udaljenošću. Kombinovanjem ovog izraza s jednačinom kinetičke energije:

$$E_k(x) = \frac{1}{2} m \cdot v(x)^2 = \frac{1}{2} m \cdot v_0^2 \cdot e^{-\frac{\rho \cdot C_d \cdot A}{m} \cdot x} \quad (23)$$

dobija se potpuna slika o tome koliko energije svaki projektil zadržava na nekoj udaljenosti od usta cijevi. Na osnovu izmjerenih brzina na 16 i 25 metara, koje su dobijene u eksperimentu opisanom u 2.3, moguće je verifikovati navedene teoretske relacije i direktno porediti energetske gubitke FMJ i polimernog projektila tokom leta, o čemu će biti više riječi u odjeljku s rezultatima i diskusijom.

Pored gubitka brzine i energije, mala masa polimernog projektila ima direktan uticaj i na njegovu žiroskopsku stabilizaciju tokom leta. Projektili ispaljivani iz oružja s ožljebljenom cijevi stabilizuju se rotacijom oko uzdužne ose, a mjera otpornosti na promjenu tog rotacionog stanja definisana je aksijalnim momentom inercije, formulom za idealni puni cilindar sa radijusom r , koja je u ovom slučaju samo približna i glasi:

$$I = \frac{m \cdot r^2}{2} \quad (24)$$

gdje je r ekvivalentni radijus projektila [m]. Manji moment inercije, koji je direktna posljedica manje mase pri istom poluprečniku, znači da projektil posjeduje manju žiroskopsku stabilnost, odnosno da

je osjetljiviji na poremećaje koji mogu uzrokovati precesiju ili nutaciju tokom leta, što se direktno odražava na preciznost. Ova teorijska pretpostavka čini osnovu za eksperimentalnu analizu tačnosti i preciznosti opisanu u nastavku, a njene posljedice bit će kvantifikovane i diskutovane na osnovu izmjerenih odstupanja pogodaka na meti.

Municija kalibra 9×19 mm u literaturi se generalno smatra efikasnom do udaljenosti od oko 50 metara, pri čemu se za standardne operativne scenarije udaljenost od 25 metara uzima kao reprezentativna vrijednost za ocjenu terminalno-balističke efikasnosti i preciznosti pištoljske municije [160]. Upravo ta udaljenost odabrana je i za potrebe ovog ispitivanja, budući da predstavlja kompromis između realnog operativnog dometa i laboratorijske izvodljivosti, a ujedno je dovoljno zahtjevana da razlike u tačnosti i preciznosti između FMJ i polimernog projektila budu mjerljive i statistički relevantne.

2.5.2 Materijali i metode

Ispitivanje tačnosti i preciznosti provedeno je u istoj opitnoj laboratoriji kompanije Igman d.d. Konjic gdje su vršena i mjerenja unutrašnje balistike opisana u odjeljku 2.3. Atmosferski uslovi pri ispitivanju bili su identični onima navedenim u tom odjeljku (temperatura okoline 21°C, atmosferski pritisak 900 mbar i relativna vlažnost 40%). Ispitivanje je provedeno u zatvorenom balističkom tunelu, čime je u potpunosti eliminisan uticaj strujanja vazduha i vjetra na let projektila, što je od posebne važnosti s obzirom na iznimno malu masu polimernog projektila i njegovu povećanu osjetljivost na spoljne poremećaje tokom leta. Korišćena je također etalonska cijev oznake UZ-2002, serijski broj 6161, namijenjena za kalibar 9×19 mm NATO. Na slici 14 je prikazan izgled laboratorije sa položajem cijevi i mete u tunelu.



Slika 14: Tunel za balistička ispitivanja – Igman dd, Konjic

Kao meta je korišćena standardna papirna meta na udaljenosti od 25 metara. Ispaljeno je po 3 FMJ projektila i 3 polimerna PLA projektila, pri čemu su svi projektili ispaljivani iz istog položaja uz nepromijenjenu postavku etalonske cijevi između serija. Mjereno je odstupanje pogodaka na meti u horizontalnoj i vertikalnoj osi u odnosu na namjeravanu tačku gađanja, kao i međusobna udaljenost pogodaka unutar svake serije kao mjera preciznosti.

2.5.3. Rezultati i diskusija – tačnost i preciznost

Na slici 15 je prikazan izgled papirne mete nakon gađanja. Crvenom bojom su označeni prolazi PLA projektila, dok su plavom bojom označeni prolazi FMJ projektila.



Slika 15: Izgled papirne mete nakon testiranja tačnosti i preciznosti

Već na prvi pogled se primjećuje konzistentnost u gađanju FMJ projektilima, te je vidljivo da su čak 2 projektila praktično penetrirala kroz isto mjesto na meti. Sa druge strane, evidentno je rasipanje za PLA projekte.

U tabeli 5 su navedene vrijednosti maksimalnih odstupanja centara rupa (x-osa je horizontalna, y-osa vertikalna).

Tabela 5: Vrijednosti maksimalnih međusobnih udaljenosti centara rupa prilikom ispitivanja tačnosti i preciznosti

Projektil (tip)	Maks. Rastojanje po x-osi [mm]	Maks. Rastojanje po y-osi [mm]	Maks. Dijagonalno rastojanje [mm]
PLA	174	200	265
FMJ	6	3	6,71

Na osnovu analize rezultata prikazanih u tabeli, razlika u tačnosti i preciznosti između dva tipa municije je očekivana i jasno vidljiva. FMJ municija pokazuje izuzetnu preciznost, te izmjereno maksimalno dijagonalno rastojanje između pogodaka iznosi svega 6,71 mm, a dva od tri projektila praktično su penetrirala kroz isto mjesto na meti. Za PLA projekte uočljivo je znatno veće rasipanje, gdje su sva tri pogotka smještena unutar pravougaonika dimenzija 174×200 mm, s maksimalnim dijagonalnim rastojanjem od 265 mm. Međutim, ono što je ovdje zapravo bitno, osim rasipanja samog po sebi, su oblik i prečnik prolaza na meti koji su identični za sve projekte, bez obzira na materijal. Okrugli, pravilni prolazi govore da polimerni projektil na 25 metara leti stabilno, bez tumbanja, što je pomalo neočekivano i iznenađujući nalaz za projektil mase svega 1 grama. Rasipanje je dakle posljedica nedovoljne žiroskopske stabilizacije koja unosi varijabilnost između projektila, a ne nestabilnosti leta u okviru svakog pojedinog projektila, što predstavlja bitnu razliku. Sa stanovišta tačnosti i preciznosti, polimerni projektil u trenutnoj konfiguraciji ne zadovoljava operativne zahtjeve standardne municije, ali stabilan let na 25 metara je solidan polazni rezultat. Osim rasipanja pogodaka

unutar svake serije, važno je razmotriti i tačnost, odnosno položaj centra svake grupe pogodaka u odnosu na namjeravanu tačku gađanja, definisanu položajem nišana/lasera prema kojem su ispaljena sva tri FMJ, odnosno sva tri PLA projektila. Kod FMJ municije, dva od tri projektila pogodila su praktično identičnu tačku koja odgovara samoj tački gađanja, dok je treći odstupio svega oko 6 mm po x-osi i 3 mm po y-osi. Centar grupe FMJ pogodaka na osnovu toga odstupa od namjeravane tačke gađanja za samo približno 2,2 mm, što potvrđuje da FMJ municija posjeduje izuzetnu tačnost, uz već utvrđenu izuzetnu preciznost. Drugim riječima, kod FMJ municije se centar grupisanja pogodaka gotovo u potpunosti poklapa sa namjeravanom tačkom gađanja.

Kod PLA projektila situacija je bitno drugačija. Prvi projektil je po horizontalnoj osi pogodio metu praktično na istoj vertikali kao i tačka gađanja, ali je vertikalno odstupio prema dole za približno 15 mm. Druga dva projektila, međutim, odstupila su znatno više, i to oba u istom, gornje-lijevom kvadrantu u odnosu na tačku gađanja – jedan za približno 20 mm lijevo i 180 mm gore, a drugi za približno 174 mm lijevo i 190 mm gore. Centar cijele grupe PLA pogodaka, na osnovu ovih vrijednosti, odstupa od namjeravane tačke gađanja za približno 135 mm, pretežno u gornje-lijevom pravcu.

Ovakav obrazac odstupanja zaslužuje posebnu pažnju, s obzirom na to da dva od tri projektila odstupaju prema istom, dominantno gornje-lijevom pravcu, umjesto da budu nasumično raspoređeni oko tačke gađanja u svim pravcima podjednako. Ovo ukazuje na to da rasipanje PLA projektila vjerovatno nije isključivo posljedica čisto slučajne, nesistematske nestabilnosti leta, već da mu djelimično doprinosi i određena sistematska komponenta. S obzirom na znatno manji balistički koeficijent PLA projektila i posljedično brži pad brzine tokom leta, inicijalno bi se očekivalo da projektil na 25 metara padne ispod tačke gađanja usljed izraženijeg djelovanja gravitacije, slično prvom projektilu iz serije. Činjenica da su preostala dva projektila, naprotiv, pogodila metu iznad tačke gađanja, ukazuje na to da klasičan balistički pad usljed gravitacije ovdje nije dominantan efekat, već da vjerovatno dolazi do izraženijih aerodinamičkih pojava povezanih s ranije diskutovanom nedovoljnom žiroskopskom stabilizacijom projektila – poput ugla napada (*yaw of repose*) ili srodnih efekata koji mogu izazvati sistematsko vertikalno i bočno skretanje putanje, pored same slučajne komponente rasipanja. Poboljšanje i tačnosti i preciznosti direktno je vezano za povećanje momenta inercije, o čemu će više biti diskutovano u nastavku rada.

2.5.4 Numerička aerodinamička analiza – uticaj visine sloja štampe na koeficijent otpora

Jedna od specifičnosti projektila izrađenih FDM metodom 3D štampe u odnosu na konvencionalne metalne projekte jeste karakteristična površinska tekstura koja nastaje kao inherentna posljedica slojevite prirode procesa štampe. Svaki položen sloj materijala ostavlja trag na spoljnoj površini projektila u vidu diskretnih stepenastih prelaza čija veličina direktno zavisi od odabrane visine sloja štampe. Za razliku od mašinski izrađenih metalnih projektila čija je površina praktično glatka, FDM projektili imaju površinsku hrapavost koja je geometrijski definisana i ponovljiva, ali se mijenja s parametrima štampe. Ova karakteristika nameće pitanje od direktnog praktičnog značaja: da li i u kojoj mjeri odabrana visina sloja štampe utiče na aerodinamičke karakteristike projektila, a time i na njegovu preciznost i domet?

S obzirom na to da je koeficijent aerodinamičkog otpora C_d direktno uvršten u izraze za balistički koeficijent i zadržavanje brzine tokom leta uvedene u odjeljku 2.3, kvantifikacija razlika u C_d između projektila različitih visina sloja štampe predstavlja logičan i neophodan korak u analizi. Upravo tome je posvećena numerička aerodinamička analiza opisana u ovoj sekciji, provedena metodom računarske dinamike fluida (CFD – Computational Fluid Dynamics) u programskom paketu ANSYS Fluent 2025 R2.

2.5.4.1 Teorijska osnova i relevantne veličine

Osnovna veličina koja opisuje aerodinamički otpor tijela u struji fluida je sila otpora F_d , definisana izrazom:

$$F_d = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot C_d \cdot A \quad (25)$$

gdje je ρ gustina fluida [kg/m^3], v brzina strujanja [m/s], C_d bezdimenzionalni koeficijent aerodinamičkog otpora, a A referentna površina poprečnog presjeka tijela [m^2]. Iz ovog izraza direktno slijedi da je moguće, poznavajući numerički izračunatu silu otpora F_d i ostale veličine, odrediti koeficijent otpora za svaki analizirani model:

$$C_d = \frac{2 \cdot F_d}{\rho \cdot v^2 \cdot A} \quad (26)$$

Za projektil kalibra 9×19 mm, referentna površina poprečnog presjeka iznosi:

$$A = \frac{\pi \cdot D^2}{4} = \frac{\pi \cdot (0,009)^2}{4} = 6,362 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2 \quad (27)$$

Gustina vazduha na standardnim uslovima (20°C , 1 bar) iznosi $\rho = 1,204 \text{ kg/m}^3$, a za odabranu brzinu strujanja od $v = 350 \text{ m/s}$, dinamički pritisak iznosi:

$$q = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 = \frac{1}{2} \cdot 1,204 \cdot 350^2 = 73745 \text{ Pa} \quad (28)$$

Priroda strujanja oko projektila određena je Reynoldsovim brojem, koji predstavlja odnos inercijskih i viskoznih sila u fluidu:

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot D}{\mu} \quad (29)$$

gdje je D prečnik projektila; $D = 0,009 \text{ m}$, a μ dinamička viskoznost vazduha na 20°C koja iznosi $\mu = 1,81 \cdot 10^{-5} \text{ Pa}\cdot\text{s}$. Uvrštavanjem konkretnih vrijednosti:

$$Re = \frac{1,204 \cdot 350 \cdot 0,009}{1,81 \cdot 10^{-5}} = \frac{3,793}{1,81 \cdot 10^{-5}} \approx 2,09 \cdot 10^5 \quad (30)$$

Dobijeni Reynoldsov broj od $Re \approx 2,09 \cdot 10^5$ potvrđuje turbulentni karakter strujanja, što je direktno relevantno za odabir odgovarajućeg turbulentnog modela u CFD analizi. Machov broj za odabranu brzinu strujanja iznosi:

$$Ma = \frac{v}{a} = \frac{350}{343} \approx 1,02 \quad (31)$$

gdje je $a = 343 \text{ m/s}$ brzina zvuka u vazduhu na 20°C . Dobijeni Machov broj $Ma \approx 1,02$ svrstava strujanje u transsonični režim, što je relevantno za odabir turbulentnog modela i interpretaciju rezultata. SST $k-\omega$ model koji je odabran za ovu analizu pouzdan je i robustan kako za subsonični tako i za transsonični režim strujanja, što ga čini posebno prikladnim za ovaj slučaj [172].

Za potrebe validacije numeričkog modela, pored četiri modela projektila analiziran je i referentni cilindar dimenzija jednakih projektilu. Na osnovu izračunatog Reynoldsovog broja i odnosa dužine i prečnika cilindra L/D , teorijska vrijednost koeficijenta otpora cilindra iz literature iznosi $C_{d,cil} \in [0,8; 1,0]$ [173], što je potvrđeno i numeričkim rezultatima, čime je validirana ispravnost postavljenog modela.

2.5.4.2 Numerički model i postavke analize

Za potrebe analize kreirana su četiri geometrijska modela projektila kalibra 9×19 mm. Prvi model predstavlja idealizovanu glatku konturu realnog FMJ projektila i služi kao referentna vrijednost. Preostala tri modela izvedena su iz iste bazne geometrije, s tim da je površina modificirana tako da simulira karakteristični stepenasti profil koji nastaje 3D štampom pri visinama sloja od 0,08 mm, 0,2 mm i 0,4 mm. Visina sloja 0,4 mm predstavlja grube postavke štampe s izraženom površinskom hrapavošću, visina sloja 0,2 mm odgovara najčešće korišćenim standardnim postavkama FDM štampača, dok visina sloja 0,08 mm predstavlja fino podešavanje koje je još uvijek pouzdano ponovljivo bez pojave artefakata karakterističnih za FDM tehnologiju. Na slici 16 je prikazan polimerni projektil izrađen visinom sloja 0,08 mm, koji je ujedno korišćen za testiranja u ovom radu, dok je na slici 17 fotografija projektila izrađenog sa visinom sloja od 0,2 mm, koji je korišćen u radu opisanom u 2.1. Projektili su fotografisani nakon ispaljivanja u mete, tako da su evidentni i tragovi nastali prilikom ožljebljenja u cijevi, kao i trag od prese nastao u postupku pertlovanja.

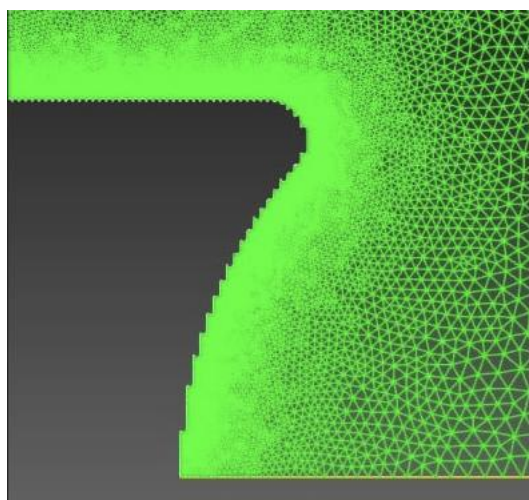


Slika 16: Projektil sa visinom sloja 0.08 mm, PLA



Slika 17: Projektil sa visinom sloja 0.2 mm, PLA

Budući da je primarni cilj analize bio odrediti međusobni odnos koeficijenata otpora između navedenih modela, a ne dobiti apsolutne vrijednosti koje bi direktno odgovarale stvarnim trodimenzionalnim uslovima leta, odabrana je 2D osnosimetrična analiza umjesto pune 3D simulacije. Ovakav pristup predstavlja svjesno i opravdano metodološko pojednostavljivanje: 2D osnosimetrična analiza daje pouzdane relativne odnose između modela uz znatno manje računarske resurse, ali apsolutne vrijednosti C_d iz nje ne mogu se sa stopostotnom sigurnošću direktno porediti s eksperimentalnim mjerenjima ili 3D simulacijama. Ovo ograničenje uzima se u obzir pri interpretaciji rezultata. Naročit razlog za odabir 2D analize bila je složenost geometrije modela s visinom sloja 0,08 mm, gdje su razmaci između susjednih površinskih tangenti iznimno mali i zahtijevaju izrazito fino usitnjavanu mrežu u tim zonama, što bi u 3D prostoru rezultiralo nepraktično velikim brojem elemenata. Na slici 18 je prikaz mreže generisane za projektil sa visinom sloja štampe od 0,08 mm.

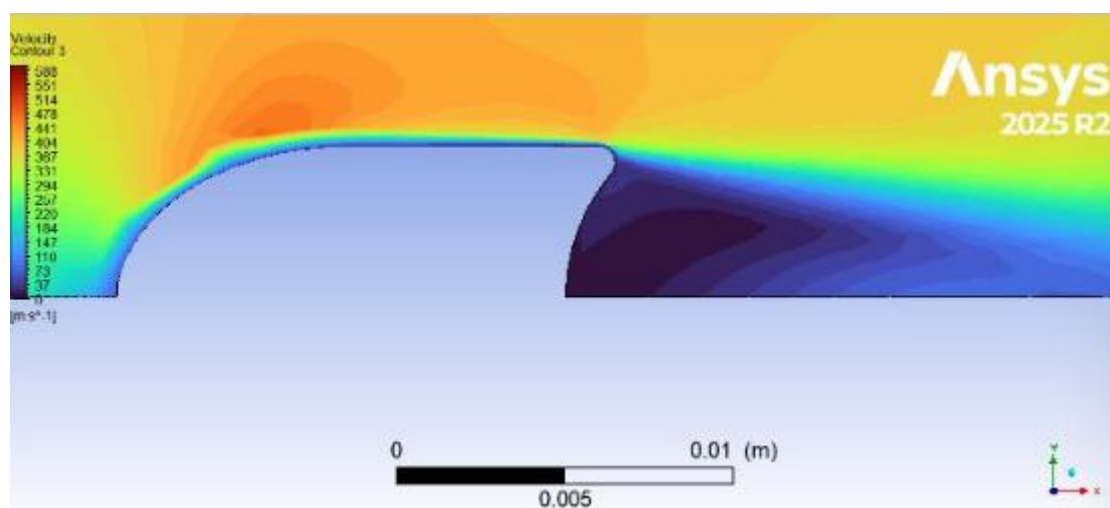


Slika 18: Dio mreže oko dna projektila za projektil izrađen sa visinom sloja štampe od 0,08 mm

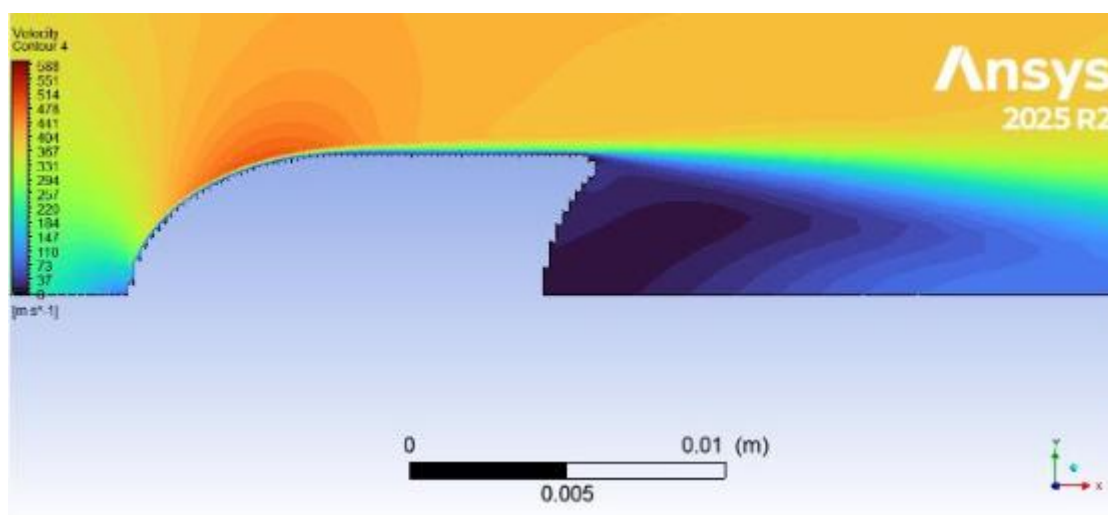
Kontura projektila postavljena je simetrično u ravni XY, a dimenzije računarske domene iznose 100 mm visine i 200 mm dužine, s predviđenim prostorom od 35,18 mm ispred čela projektila. Mreža za proračun generisana je sa standardnom minimalnom dimenzijom elementa, koeficijentom rasta dimenzije 1,05 i normalnim uglom zakrivljenosti 18° , što osigurava dovoljnu rezoluciju u graničnom sloju oko površine projektila. Ukupan broj elemenata u mreži iznosio je 100.000. Rubni uslovi postavljeni su na sljedeći način: na ulazu (*inlet*) definisana je brzina strujanja od 350 m/s duž x-ose, na izlazu (*outlet*) pritisak od 1 bar, površina projektila tretirana je kao nepropusna stijenka bez klizanja (*no-slip condition*), a simetrijska osa definisana je duž x-ose. Fluid koji opstrujava projektil modeliran je kao vazduh standardnog pritiska na temperaturi 20°C .

Za turbulentni model odabran je SST k- ω model (Shear Stress Transport k-omega), koji kombinuje prednosti k- ω modela u blizini stijenke s prednostima k- ϵ modela u slobodnom strujanju daleko od stijenke [172]. Ovaj model se u literaturi posebno preporučuje za aerodinamičke analize tijela s izraženom površinskom hrapavošću i pri strujanjima gdje dolazi do separacije graničnog sloja, a njegova robustnost u transsoničnom režimu čini ga posebno prikladnim za uslove ove analize [174]. Kriteriji konvergencije postavljeni su na 0,0001 za komponente brzine u x i y smjeru, kinetičku energiju turbulencije k i specifičnu stopu disipacije ω , te 0,005 za jednačinu kontinuiteta. Svi modeli dostigli su konvergenciju do 70. iteracije proračuna, što potvrđuje numeričku stabilnost postavljenog modela za sve analizirane geometrije.

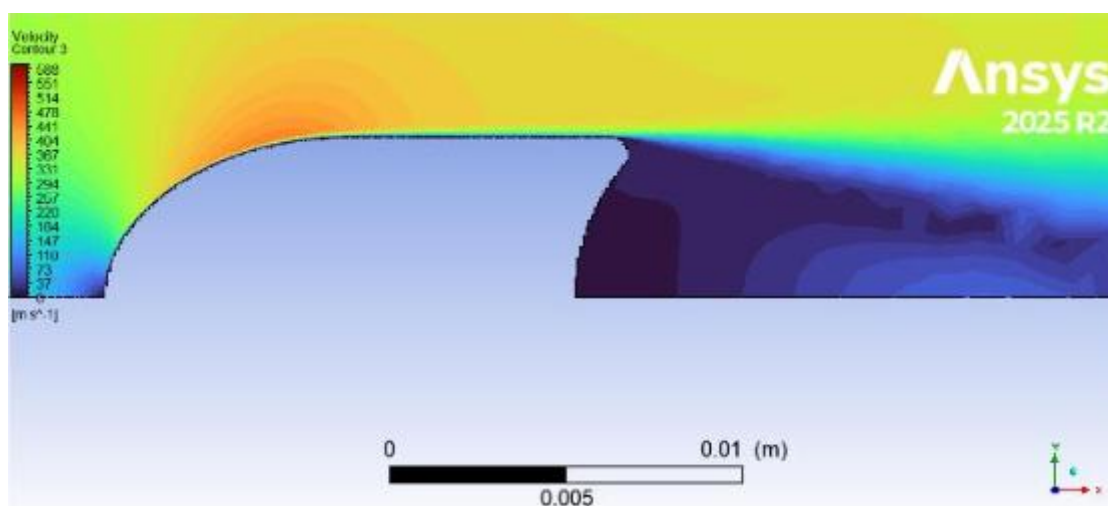
Na slikama 19, 20 i 21 prikazana su polja brzine strujanja oko projektila za reprezentativne slučajeve.



Slika 19: Polje brzine strujanja za glatki FMJ projektil, kalibar 9 x 19 mm



Slika 20: Polje brzine strujanja za projektil sa visinom sloja 0,2 mm, kalibar 9 x 19 mm



Slika 21: Polje brzine strujanja za projektil sa visinom sloja 0,08 mm, kalibar 9 x 19 mm

Jasno je vidljivo formiranje graničnog sloja uz površinu projektila i ubrzavanje strujanja u blizini maksimalnog prečnika, pri čemu FDM projektil pokazuje nešto intenzivniju perturbaciju strujanja u zoni stepenastih prelaza. Po istom principu su generisana i analizirana polja turbulentne kinetičke energije, koja kvantifikuju intenzitet turbulencije generisane u graničnom sloju – zone povećane turbulentne kinetičke energije koje su u direktnoj korelaciji s povećanjem lokalnog otpora. Također generisana su i polja pritiska, gdje se jasno uočava zona povišenog pritiska na čeonj površini projektila i zona sniženog pritiska na repnoj strani, a razlika između ova dva područja direktno određuje rezultantnu silu otpora.

2.5.5 Rezultati i analiza

Prema literaturi, često korišćena i srednja vrijednost koeficijenta otpora za standardni FMJ projektil kalibra 9×19 mm iznosi $C_d = 0,29$ [175-177] te se u ovom slučaju ona usvaja kao referentna, a iz omjera numerički izračunatih sila otpora određeni su procijenjeni koeficijenti otpora za sve analizirane modele. Rezultati su prikazani u tabeli 6:

Tabela 6: Rezultati aerodinamičke analize

Model	Odnos sile otpora prema FMJ [%]	Procijenjeni C_d
FMJ referentni (glatka kontura)	100%	0,290
3D štampa – visina sloja 0.4 mm	129%	0,375
3D štampa – visina sloja 0.2 mm	116%	0,337
3D štampa – visina sloja 0.08 mm	113%	0,329
Cilindar (validacija)	294%	0,852

Rezultati pokazuju da postoji zavisnost između visine sloja štampe i koeficijenta aerodinamičkog otpora. Uzimajući u obzir da razlika u procijenjenoj vrijednosti C_d između visine sloja 0,08 mm ($C_d = 0,329$) i standardne visine sloja 0,2 mm ($C_d = 0,337$) iznosi svega 2,4%, te da primjena visine sloja 0,08 mm također nosi sa sobom rizik pojave artefakata poput vidljivih šavova na mjestima susreta početka i kraja sloja (seam) i smanjene konzistentnosti rubnih površina kritičnih za zaptivanje projektila unutar cijevi, može se zaključiti da i standardna visina sloja od 0,2 mm predstavlja optimalan kompromis između aerodinamičkih performansi i pouzdanosti procesa štampe, te da značajna razlika u visini sloja u ovom slučaju ne postoji.

Konačno, i sa stanovišta balističkog koeficijenta najvažnije, budući da je masa FMJ projektila kalibra 9×19 mm osam puta veća od mase 3D štampanog PLA projektila, a balistički koeficijent direktno proporcionalan masi, može se zaključiti da će razlika u masi imati neuporedivo veći uticaj na domet i stabilnost leta polimernog projektila nego eventualni dodatni aerodinamički otpor uzrokovan površinskom teksturom FDM štampe. Ovo se može i kvantifikovati: povećanje C_d od 16% za standardni sloj 0,2 mm smanjuje balistički koeficijent za istu vrijednost, dok osmostruka razlika u masi smanjuje balistički koeficijent za 87,5% u odnosu na FMJ projektil iste geometrije. Dominantnost uticaja mase nad uticajem površinske hrapavosti nesumnjiva je i u redu veličine za faktor 5 do 6. Ovi zaključci bit će kvantifikovani u okviru opšte diskusije rezultata, gdje će izmjerene brzine na 16 i 25 metara biti korišćene za eksperimentalnu verifikaciju navedenih teorijskih predviđanja.

2.6 Penetracija projektila u balistički gel

2.6.1 Uvod

Dejstvo projektila na cilju predstavlja osnovu terminalne balistike i ujedno najneposredniju mjeru praktične učinkovitosti municije. Dok unutrašnja balistika opisuje procese koji se odvijaju u cijevi, a vanjska balistika trajektoriju projektila u letu, terminalna balistika se bavi onim što se događa u trenutku i nakon kontakta projektila s metom - prenosom kinetičke energije, formiranjem kavitacija i dubinom penetracije. Od svih parametara koji se razmatraju u terminalnoj balistici malog kalibra, dubina penetracije u standardizovani medij predstavlja najšire prihvaćenu i najčešće korišćenu mjeru terminalno-balističkih performansi [8].

Da bi mjerenje dubine penetracije imalo naučnu i praktičnu vrijednost, neophodno je koristiti medij koji doslijedno i ponovljivo simulira osobine živog tkiva. Upravo za tu svrhu, već decenijama se u istraživačkim, forenzičkim i vojnim laboratorijama koristi balistički gel, materijal čija je gustina, elastičnost i otpornost na prodiranje definisana i kalibrisana tako da odgovara mehaničkim osobinama ljudskog mišićnog tkiva [178]. Primjena balističkog gela kao standardne mete omogućava direktnu uporedivost rezultata između različitih istraživanja, laboratorija i zemalja, što bi u slučaju

nehomogenih meta poput drveta ili gline bilo nemoguće. Pored toga, transparentnost gela omogućava vizuelnu analizu trajektorije projektila unutar medija, što je od posebnog značaja za analizu kavitacija koje projektil formira tokom prodiranja [179].

U terminalnoj balistici razlikuju se dva osnovna tipa kavitacija. Permanentna kavitacija označava trajni kanal koji projektil formira prolaskom kroz medij, odnosno onaj dio tkiva ili gela koji je fizički istisnut ili razoren i koji ostaje vidljiv nakon zaustavljanja projektila. Privremena kavitacija je znatno veća po obimu i nastaje kao posljedica radijalne ekspanzije medija uzrokovane brzim prenosom kinetičke energije, gdje se medij privremeno rasteže daleko izvan dimenzija trajnog kanala, a zatim se parcijalno vraća u prvobitni položaj. Privremena kavitacija traje svega nekoliko stotina mikrosekundi i nije vidljiva prostim okom ni na standardnim fotografijama, zbog čega je za njenu analizu neophodna ultra-brza kamera s dovoljno visokom frekvencijom snimanja [179, 180]. Transparentnost sintetičkog balističkog gela koji je korišćen u ovim ispitivanjima posebno je pogodna za ovu vrstu analize, budući da omogućava neometano praćenje razvoja i kolapsa privremene kavitacije na snimcima. Detaljnija analiza oba tipa kavitacija bit će provedena u odjeljku s rezultatima i diskusijom, gdje će snimci ultrabrzom kamerom biti korišćeni kao primarni izvor podataka za tu analizu.

U kontekstu normizacije, postoje dva dominantna protokola za ispitivanje balističkih performansi u gelu. FBI protokol koristi gel koncentracije 10% koncentrat i 90% voda, koji je namijenjen ispitivanju ekspanzivne municije i municije za civilnu i policijsku primjenu, dok NATO protokol propisuje gel koncentracije 20%, koji je znatno čvršći i gušći medij prilagođen ispitivanju FMJ municije koja se dominantno koristi u vojnoj primjeni [181]. Razlika u koncentraciji nije zanemariva jer čvršći gel pruža veći otpor prodiranju, što rezultuje manjim izmjerenim dubinama penetracije pri istim uslovima, te je stoga od ključne važnosti pri poređenju rezultata uvijek navoditi koji je protokol i koja je koncentracija gela korišćena.

Sa fizikalnog stanovišta, kretanje projektila kroz viskozno-elastični medij kakav je balistički gel može se opisati jednačinom retardirajuće sile, koja zavisi od brzine projektila, njegovog poprečnog presjeka i koeficijenta otpora medija. Opšti oblik jednačine kretanja projektila kroz medij glasi:

$$m \cdot \frac{dv}{dt} = -F_r(v) \quad (32)$$

gdje je m masa projektila [kg], v brzina projektila u mediju [m/s], t vrijeme [s], a F_r retardirajuća sila [N]. Za viskozno-elastične medije, retardirajuća sila se modelira kao kombinacija linearnog i kvadratnog člana brzine [38]:

$$F_r = C_1 v + C_2 v^2 \quad (33)$$

gdje su C_1 i C_2 empirijski koeficijenti koji zavise od osobina medija i geometrije projektila. Integracijom jednačine kretanja dobija se veza između početne brzine udara v_0 , mase i geometrije projektila, te ukupne dubine penetracije d :

$$d = \frac{m}{C_2} \ln \left(1 + \frac{C_2 v_0}{C_1} \right) \quad (34)$$

Navedena relacija ima poseban praktični značaj u kontekstu ovog istraživanja: kada su poznate masa i geometrija projektila te karakteristike medija kroz koji se kreće, moguće je na osnovu izmjerene dubine penetracije inverzno odrediti brzinu udara projektila, i obratno. Ovakav pristup je posebno vrijedan u situacijama kada direktno mjerenje brzine nije izvodivo ili kada je potrebna verifikacija konzistentnosti između različitih setova mjerenja [182].

Dubina penetracije u balistički gel ujedno je i osnova za procjenu borbene učinkovitosti municije i polazišna tačka za analizu balistike rana. U tom smislu, mjerenje penetracije u gel nije samo tehnički parametar, već ono neposredno govori o potencijalnoj letalnosti, odnosno stepenu onesposobljavanja cilja i borbenom značaju ispitivane municije. Za 3D štampane polimerne projekte mase svega 1 grama, čija je kinetička energija višestruko manja od standardnog FMJ projektila, upravo ova mjerenja daju najkonkretniji odgovor na pitanje da li ovakva municija ima operativni smisao i kakvu stvarnu prijetnju predstavlja.

2.6.2 Materijali i metode

Kao standardni medij za ispitivanje penetracije u svim eksperimentima opisanim u ovom odjeljku korišćen je sintetički balistički gel slovenačkog proizvođača Samson Kamnik d.o.o. iz Kamnika, poznat u literaturi kao uljani balistički gel koncentracije 20%, što odgovara NATO standardu za ispitivanje FMJ municije [181]. Radi se o transparentnom, sintetičkom, termoreversibilnom supstitutu za balistički gel, zasnovanom na smješi sintetičkog polimera i mineralnog ulja, bez organske želatine. Izgled i fabrička pakovanja su prikazana na slici 22.



Slika 22: Balistički gel NATO 20, Samson Kamnik

Za razliku od tradicionalnog organskog balističkog gela koji zahtijeva preciznu temperaturnu kontrolu i hlađenje, ovaj materijal ne podliježe biološkoj razgradnji, a performanse ostaju kalibrisane i nakon višekratne upotrebe, što direktno garantuje konzistentnost mehaničkih osobina medija između pojedinih mjernih serija. Materijal je u potpunosti ponovo upotrebljiv, bez mirisa i netoksičan. Gel zadovoljava i FBI i NATO protokol za kalibraciju želatina, čime je osigurana njegova referentna vrijednost i uporedivost s rezultatima iz međunarodne literature [183]. Ključne fizikalne osobine gela prema deklaraciji proizvođača prikazane su u tabeli 7.

Tabela 7: Fizikalne osobine balističkog gela proizvođača Samson Kamnik [183]

Osobina	Vrijednost
Gustina	1,03 – 1,07 g/cm ³
Tačka topljenja	93 – 132°C (optimalno 100 – 120°C)
Temperatura skladištenja	Ispod 45°C
Broj ponovnih upotreba	8 – 10 ciklusa
Rok trajanja	neograničen

Materijal je potpuno transparentan, što uz primjenu ultrabrze kamere omogućava vizuelnu i fotografsku analizu trajektorije projektila unutar bloka, uključujući razvoj i kolaps privremene

kavitacije. Za ispitivanje su korišćeni standardni blokovi dimenzija $150 \times 150 \times 400$ mm. Postavljena su po dva bloka jedan iza drugog, s udarnom površinom dimenzija 150×150 mm okrenutom prema osi gađanja. Ovakva konfiguracija osigurava ukupnu dubinu medija od 800 mm duž ose projektila, što je višestruko veće od očekivane dubine penetracije za obje ispitivane vrste municije i eliminiše grešku mjerenja koja bi nastala prolazom projektila kroz cijeli blok. Gel je unaprijed pripremljen od strane proizvođača, te je takav korišćen za prvi set mjerenja. Nakon što je u prvom setu mjerenja gel iskorišćen, za potrebe narednih mjerenja iz gela su eliminisana sva strana tijela, nakon čega je očišćen, opran i osušen. Nakon toga, gel je izrezan u komade radi bržeg i ravnomjernijeg topljenja, ubačen u namjenski izrađen kalup od pocinčanog lima (premazan WD 40 radi lakšeg odvajanja), dimenzija $150 \times 150 \times 400$ mm, a zatim ubačen u peć zagrijanu na 120°C . Nakon 4 sata topljenja, gel u kalupu se ohladio na sobnoj temperaturi, nakon čega je ponovo spreman za korišćenje. Izgled gela prije i poslije pretapanja prikazan je na slici 23.



a) gel spreman za pretapanje

b) ohlađen gel

Slika 23: Pretapanje balističkog gela (priprema i hlađenje)

U pogledu kalibracije gela standardnom metodom, u ovom istraživanju ona nije provedena. Naime, standardna kalibracija balističkog gela podrazumijeva ispaljenje čelične sačme kalibra 4,5 mm pri definisanoj brzini i provjeru dubine penetracije kao potvrde da gel odgovara referentnim mehaničkim osobinama [184]. Međutim, cilj ovog ispitivanja nije apsolutna komparacija izmjerenih dubina s referentnim vrijednostima iz literature, već direktno poređenje FMJ i polimernog projektila u identičnim uslovima i u identičnom bloku gela. U takvom eksperimentalnom dizajnu eventualna sistemska odstupanja gela od referentnih vrijednosti jednako djeluju na obje ispitivane vrste municije, te ne utiču na valjanost međusobnog poređenja. Kalibracija bi bila neophodna isključivo u slučaju da se rezultati uspoređuju s apsolutnim referentnim vrijednostima iz literature ili s rezultatima dobijenim u drugoj laboratoriji; u ovom kontekstu, ona nije metodološki neophodna niti bi doprinijela kvalitetu zaključaka.

Mjerenja penetracije provedena su u dvije odvojene eksperimentalne postavke, pri čemu je svaka od njih dizajnirana da odgovori na zasebno istraživačko pitanje, te da zajedno daju cjelovitu sliku terminalno-balističkih performansi polimernog projektila u kontrolisanim i realnim uslovima.

2.6.3 Prvi set mjerenja – kontrolisani laboratorijski uslovi (Igman d.d. Konjic)

Provođenje prvog seta mjerenja u kontrolisanim laboratorijskim uslovima odabrano je prvenstveno zbog reproducibilnosti i pouzdanosti eksperimenta. Korišćenje EPVAT opitne cijevi fiksiranog položaja, poznate i konzistentne brzine projektila te standardizovanih atmosferskih uslova osigurava

visok stepen ponovljivosti rezultata koji bi u realnim uslovima bio znatno teže dostižan. Pored toga, važan motiv za odabir ovakve postavke bio je i bezbjednosne prirode. Budući da je interakcija polimernog projektila s balističkim gelom bila nepoznanica u ovoj fazi istraživanja, postojala je realna pretpostavka da bi projektil mogao rikošetirati od površine ili iz unutrašnjosti gela uz zadržavanje dovoljne kinetičke energije za nanošenje ozbiljnih povreda, zbog čega je ispitivanje provedeno u armirano-betonskoj balističkoj tunelskoj prostoriji s daljinskim opaljanjem iz zaštićenog položaja. Dakle, ovaj set mjerenja imao je za cilj provjeru osnovne hipoteze – da polimerni projektil posjeduje dovoljno kinetičke energije za penetraciju u standardni balistički gel, što je preduslov za sve daljnje analize terminalne balistike. Mjerenja su provedena u opitnoj laboratoriji kompanije Igman d.d. Konjic, u armirano-betonskoj balističkoj tunelskoj prostoriji s proširenim poprečnim presjekom, opremljenoj osmatračnicom s armiranim staklom iza koje su se nalazili operater i mjerna oprema. Opaljenje je vršeno daljinski iz zaštićenog položaja. Korišćena je ista EPVAT opitna cijev broj 6672 i isti tip municije kao u mjerenjima unutrašnjobalističkih parametara opisanim u odjeljku 2.3 – etalonska FMJ municija Igman d.d. serije BA LOT 12IK25 s projektilom mase 8 grama i barutnim punjenjem mase od oko 0,36 g, te skalirani polimerni PLA projektili mase 1 grama, izrađeni FDM metodom sa 100% gustinom ispune i visinom sloja 0,08 mm, čime je postignuta gotovo potpuno kompaktna i glatka struktura projektila. Na slici 24 prikazan je tunel u kojem je izvršeno ispitivanje.



Slika 24: Tunel za balistička ispitivanja sa armirano-betonskom zaštitom – Igman dd, Konjic

Sva gađanja izvršena su u ranije opisanim standardnim laboratorijskim atmosferskim uslovima. Blok balističkog gela postavljen je na udaljenosti od 3 metra od usta opitne cijevi, pri čemu je blok bio oslonjen isključivo na donjoj strani na fiksnom postolju, dok su bočne i zadnja strana bile slobodne. Ovakav način oslanjanja treba uzeti u obzir pri interpretaciji izmjerenih dubina penetracije, budući da slobodne bočne i zadnja površina bloka mogu u određenoj mjeri uticati na rubne efekte pri prodiranju projektila. Ispitivanje je dokumentovano profesionalnom fotografskom kamerom jer primjena ultrabrzih kamera nije bila izvodiva zbog specifičnih nepovoljnih uslova osvjetljenja u tunelu koji nisu bili kompatibilni s dostupnom visokobrzinskom opremom. Postavka bloka je prikazana na slici 25.

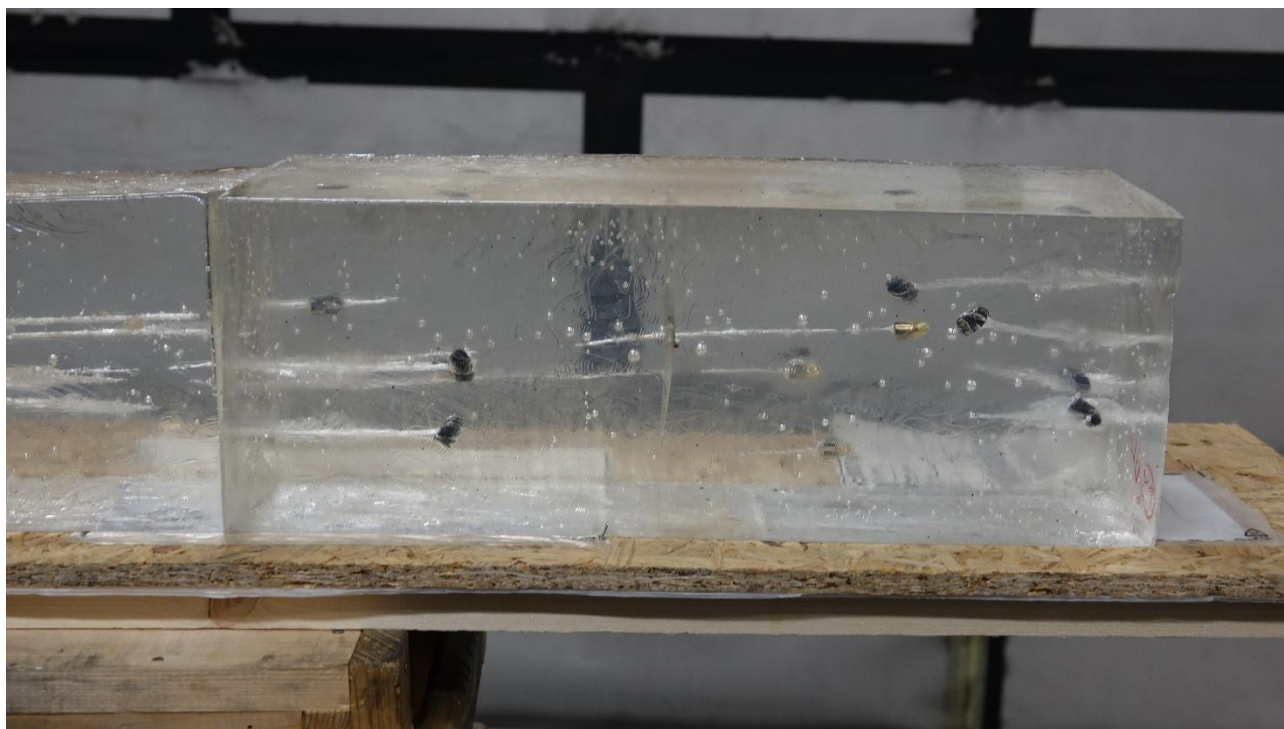


Slika 25: Blok spreman za testiranje

Brzina projektila nije mjerena neposredno tokom penetracionih opaljenja, te brzina udara ne može biti direktno sparena s pojedinačnom izmjerenom dubinom penetracije. Budući da su za oba seta mjerenja korišćene identične serije municije i identična oprema za sklapanje, kao referentne vrijednosti udarne brzine uzete su prosječne brzine na ustima cijevi dobijene svođenjem sa 16 metara u odjeljku 2.3. Za polimernu PLA municiju ta vrijednost iznosi 378,2 m/s, a za etalonsku FMJ municiju 376,5 m/s. S obzirom na to da je rastojanje između usta cijevi i prednje površine gela svega 3 metra, gubitak brzine tokom tog leta je zanemariv, te se navedene brzine uzimaju kao reprezentativne vrijednosti udarne brzine za potrebe ove analize. Radi fotografija koje su predstavljene u narednim sekcijama, bitno je napomenuti da je u blokove balističkog gela gađano sa obje strane, kako bi se izbjegla greška pri mjerenju u slučaju da npr. projektil naiđe na isti kanal kojim je drugi projektil već prošao.

2.6.4 Rezultati i diskusija eksperimentalnog testiranja u laboratorijskim uslovima

U okviru prvog seta mjerenja mjerene su dubine penetracije za ukupno osam referentnih projektila; pet polimernih (PLA) i tri etalonska (FMJ), pri identičnim uslovima eksperimentalne postavke opisanim u prethodnom odjeljku. Svi projektili su ostali u blokovima, što je vidljivo na slici 26. Na slici 26 je vidljivo i nekoliko projektila koji nisu obuhvaćeni analizom.



Slika 26: Izgled balističkog bloka nakon testiranja

Za svaki referentni projektil izmjerena je dubina penetracije u bloku balističkog gela, a rezultati i osnovne veličine deskriptivne statistike su prikazani u tabelama 8 i 9.

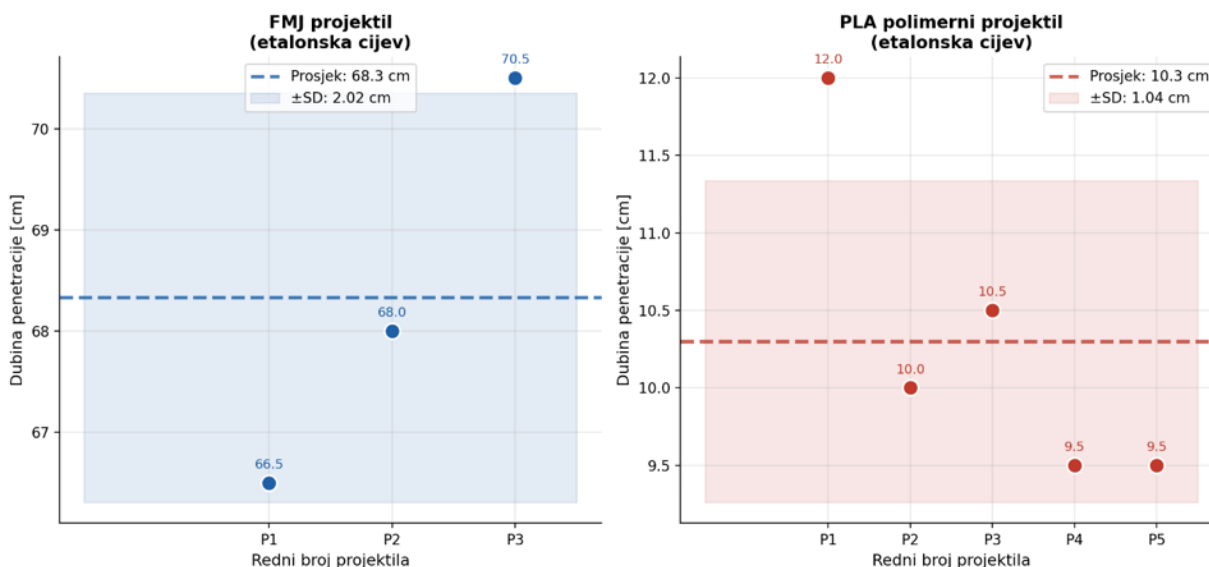
Tabela 8: Dubine penetracije 3D štampanog PLA projektila u NATO 20% balističkom gelu

Projektil br.	Dubina penetracije [cm]	Napomena
1	12,0	Maksimalna vrijednost
2	10,0	-
3	10,5	-
4	9,5	Minimalna vrijednost
5	9,5	Minimalna vrijednost
Prosjek	10,3	St. Devijacija = 1,04 cm
Raspon	9,5 – 12,0	Razlika 2,5 cm

Tabela 9: Dubine penetracije FMJ projektila u NATO 20% balističkom gelu

Projektil br.	Dubina penetracije [cm]	Napomena
1	66,5	Minimalna vrijednost
2	68,0	-
3	70,5	Maksimalna vrijednost
Prosjek	68,3	St. dev. = 2,02 cm
Raspon	66,5 – 70,5	Razlika = 4,0 cm

FMJ projektil zaustavio se unutar drugog bloka gela, na prosječnoj dubini od 68,3 cm od ulazne površine prvog bloka, od ukupnih 80 cm raspoložive dubine medija. Polimerni PLA projektil zaustavio se unutar prvog bloka, na prosječnoj dubini od 10,3 cm. Zbirni prikaz balističkih i terminalno-balističkih parametara oba tipa municije dat je na slici 27 i u tabeli 10.



Slika 27: Sve vrijednosti dubine penetracije za FMJ i PLA projekte pri laboratorijskom testiranju

Tabela 10: Zbirna komparativna tabela parametara ispitivanih projektila

Veličina	PLA projektil	FMJ projektil	Omjer PLA/FMJ
Masa projektila [g]	1	8	0,13
Srednja brzina na ustima cijevi [m/s]	378,2	376,5	0,99
Kinetička energija na ustima cijevi [J]	71,5	567	0,126
Srednja dubina penetracije [cm]	10,3	68,3	0,15
Raspon penetracije [cm]	9,5 – 12,0	66,5 – 70,5	-

Analizom rezultata prikazanih u tabelama 8 i 9 moguće je izvući nekoliko važnih zaključaka o terminalno-balističkim performansama polimernog i FMJ projektila u kontrolisanim laboratorijskim uslovima.

Kada je riječ o konzistentnosti rezultata, FMJ municija pokazuje izuzetno visok stepen ponovljivosti – koeficijent varijacije dubine penetracije iznosi svega 2,96%, a raspon od 4,0 cm predstavlja samo 5,9% prosječne vrijednosti. Ovakva konzistentnost karakteristična je za industrijsku municiju izrađenu prema strogim tolerancijama i potvrđuje da su uslovi ispitivanja bili stabilni i ponovljivi. Nasuprot tome, polimerni PLA projektil pokazuje znatno veću relativnu varijabilnost – koeficijent varijacije iznosi 10,07%, a raspon od 2,5 cm predstavlja čak 24,3% prosječne vrijednosti penetracije. Iako je apsolutni raspon PLA rezultata manji od FMJ raspona, relativna varijabilnost je višestruko veća, što je direktna posljedica inherentnih nesavršenosti FDM procesa štampe opisanih u prethodnim odjeljcima – razlike u poroznosti, centriranju i geometriji između pojedinih uzoraka direktno se odražavaju na konzistentnost terminalno-balističkih performansi.

Vizuelnom analizom kanala penetracije u gelu uočljivo je da PLA projektili nisu prodirali po pravolinijskoj putanji karakterističnoj za FMJ projekte, već su pokazivali devijaciju trajektorije unutar medija. Pored toga, kao što će biti opisano u nastavku u odjeljku s rezultatima drugog seta mjerenja, snimci i fizička analiza gela potvrđuju da je dio projektila dolazio do određene maksimalne dubine te se elastičnim povratom medija vraćao nazad, što je u pojedinim slučajevima rezultiralo izbacivanjem projektila iz gela. Ovakvo ponašanje konzistentno je s teorijskim razmatranjima

iznesenim u odjeljku 2.5.1 – polimerni projektil mase 1 gram posjeduje osam puta manji aksijalni moment inercije od FMJ projektila, što znači značajno slabiju žiroskopsku stabilizaciju i povećanu osjetljivost na perturbacije pri ulasku u viskozni medij. Devijacija trajektorije direktno uzrokuje povećanje efektivne udarne površine, što povećava retardirajuću silu gela i doprinosi varijabilnosti izmjerenih dubina penetracije.

Posebno značajan nalaz odnosi se na vezu između brzine, mase i dubine penetracije. Kako je pokazano u odjeljku 2.3, razlika u brzinama na ustima cijevi između PLA i FMJ projektila iznosi svega 1,7 m/s, odnosno 0,45% – što je praktično zanemarljivo i znači da oba projektila udaraju u gel gotovo jednakim brzinama. Uprkos tome, FMJ projektil prodire 6,63 puta dublje od polimernog projektila. Ovaj rezultat u potpunosti je objašnjiv razlikom u masi – omjer masa FMJ/PLA iznosi 8,0, omjer kinetičkih energija iznosi 7,93, a omjer dubina penetracije iznosi 6,63. Sva tri omjera su međusobno konzistentna i potvrđuju da je masa dominantni parametar koji određuje dubinu penetracije pri praktično jednakim brzinama udara. Blago odstupanje omjera penetracija (6,63) od omjera masa (8,0) može se objasniti nelinearnom prirodom retardirajuće sile gela opisanom empirijskim modelom u odjeljku 2.5.1, kao i već pomenutom devijacijom trajektorije polimernog projektila koja efektivno povećava otpor medija.

Zanimljiv je i parametar penetracije po jedinici mase projektila. Za PLA projektil ona iznosi 10,30 cm/g, dok za FMJ iznosi 8,54 cm/g – dakle polimerni projektil ostvaruje 20,6% veću penetraciju po gramu mase. Ova naizgled kontraintuitivna pojava posljedica je niže gustine PLA materijala u poređenju s olovnom jezgrom FMJ projektila. Pri identičnoj geometriji, lakši projektil posjeduje manju sekcionu gustinu (masu po jedinici površine poprečnog presjeka), ali pritom nailazi i na proporcionalno manji otpor medija po jedinici sopstvene mase, što u konačnici rezultira nešto efikasnijim iskorišćenjem mase za penetraciju. Ovaj nalaz ima praktičan značaj za razmatranje mogućnosti povećanja mase polimernog projektila dodavanjem uloška od gušćeg materijala u tijelo projektila, što je jedan od pravaca optimizacije koji će biti razmatran u kasnijim sekcijama.

Uzimajući u obzir sve navedeno, rezultati prvog seta mjerenja jasno potvrđuju da polimerni PLA projektil postiže mjerljivu i ponovljivu, ali znatno manju penetraciju od standardnog FMJ projektila pri gotovo identičnoj brzini udara. Dominantni faktor koji određuje ovu razliku je masa projektila, a ne brzina, što je u potpunosti konzistentno s teorijskim modelom penetracije i empirijskim koeficijentima određenim u prethodnom odjeljku.

2.6.5. Empirijski model penetracije u balistički gel za laboratorijske uslove

Na osnovu eksperimentalnih podataka dobijenih u kontrolisanim laboratorijskim uslovima, razvijen je empirijski model koji opisuje vezu između balističkih parametara projektila i dubine penetracije u NATO 20% balistički gel. Upravo laboratorijski uslovi (fiksirana etalonska cijev, poznate i konzistentne brzine projektila, standardizovana atmosfera) čine ove podatke pogodnom osnovom za kalibraciju modela, budući da je varijabilnost između mjerenja minimalna i u potpunosti pripisiva karakteristikama samih projektila, a ne uslovima ispitivanja.

Pretpostavlja se da dubina penetracije d zavisi od produkta mase projektila i kvadrata brzine udara prema izrazu:

$$d = K \cdot (m \cdot v_0^2)^n \quad (35)$$

gdje je d dubina penetracije [m], m masa projektila [kg], v_0 brzina udara [m/s], K empirijska konstanta dimenzija $[m \cdot (kg \cdot m^2 \cdot s^{-2})^n]$, a n bezdimenzionalni eksponent koji opisuje nelinearnost veze između energetske parametara projektila i dubine penetracije u mediju.

Uvrstivši izmjerene prosječne vrijednosti za oba tipa projektila dobija se sistem od dvije jednačine s dvije nepoznate K i n :

$$0,103 = K \cdot (0,001 \cdot 378,2^2)^n = K \cdot (143,04)^n \quad (36)$$

$$0,683 = K \cdot (0,008 \cdot 376,5^2)^n = K \cdot (1134,02)^n \quad (37)$$

Dijeljenjem ovih jednačina eliminiše se konstanta K :

$$\frac{0,683}{0,103} = \left(\frac{1134,02}{143,04} \right)^n \quad (38)$$

$$6,631 = (7,928)^n \quad (39)$$

Logaritmiranjem obje strane dobija se:

$$n = \frac{\ln(6,631)}{\ln(7,928)} = \frac{1,8918}{2,0704} = 0,914 \quad (40)$$

Uvrštavanjem n u prvu jednačinu dobija se konstanta K :

$$K = \frac{0,103}{(143,04)^{0,914}} = \frac{0,103}{93,21} = 1,105 \cdot 10^{-3} \quad (41)$$

Konačni oblik empirijskog modela penetracije za NATO 20% balistički gel glasi:

$$d = 1,105 \cdot 10^{-3} \cdot (m \cdot v_0^2)^{0,914} \quad (42)$$

Eksponent $n = 0,914$ blizak je jedinici, što ukazuje da je veza između produkta mase i kvadrata brzine i dubine penetracije gotovo linearna u ispitivanom opsegu parametara. Blago odstupanje od linearne zavisnosti ($n < 1$) fizikalno je konzistentno s činjenicom da pri višim energijama retardirajuća sila gela raste nešto brže od linearne zavisnosti, usljed dominacije kvadratnog člana $C_2 v^2$ u modelu retardirajuće sile uvedenom u odjeljku 2.6.1.

Kvalitet modela provjeren je računanjem koeficijenta determinacije R^2 na osnovu svih 8 individualnih mjerenja – 5 PLA i 3 FMJ:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^8 (d_{model,i} - d_{izm,i})^2}{\sum_{i=1}^8 (d_{izm,i} - \bar{d})^2} = 0,998 \quad (43)$$

Vrijednost $R^2 = 0,998$ ukazuje da model objašnjava 99,8% varijabilnosti izmjerenih podataka u laboratorijskim uslovima, što potvrđuje njegovu visoku prediktivnu moć za projekte ispitivane u kontrolisanim uslovima etalonske cijevi. Prediktivna vrijednost modela leži u mogućnosti procjene dubine penetracije za različite kombinacije mase i brzine projektila u istom gelu, pod uslovom da su uslovi ispitivanja konzistentni s onima u kojima je model kalibrisan.

2.6.6 Numerička analiza penetracije FMJ i PLA projektila u balistički gel

Pored empirijskog modela penetracije razvijenog u prethodnom odjeljku, provedena je i numerička simulacija interakcije projektila s balističkim gelom metodom konačnih elemenata. Cilj ove analize nije verifikacija numeričkog softvera – ANSYS Autodyn je komercijalni eksplisitni hidrokod s verifikovanom numeričkom matematikom – već validacija uspostavljenog modela, odnosno provjera da li odabrani konstitutivni modeli materijala i postavka simulacije vjerno reproduciraju eksperimentalno izmjerene dubine penetracije. Simulacije su provedene korišćenjem Lagranževe formulacije u kojoj je proračunska mreža vezana za materijal i deformiše se zajedno s njim, što je pogodno za analizu penetracije projektila u meku, gotovo nestišljivu sredinu pri umjerenim brzinama udara i omogućava direktno praćenje geometrije projektila i razvoja kanala penetracije tokom cijelog procesa.

Analizirana su dva slučaja penetracije u okviru istog modela – konvencionalni FMJ projektil kalibra 9×19 mm i polimerni PLA projektil istog kalibra – koji dijele osnosimetričnu idealizaciju i postavku rubnih uslova, ali se razlikuju u dimenzijama domene, strategiji definisanja mreže, udarnoj brzini i potrebnom vremenu simulacije, što odražava značajno različite dubine penetracije dvaju projektila.

Za svaki od materijala prisutnih u simulaciji definisani su odgovarajući konstitutivni modeli koji opisuju volumetrijsku i devijatornu komponentu odgovora materijala, kao i kriterij za uklanjanje elemenata pri prekomjernoj distorziji mreže. Pregled usvojenih modela dat je u tabeli 11.

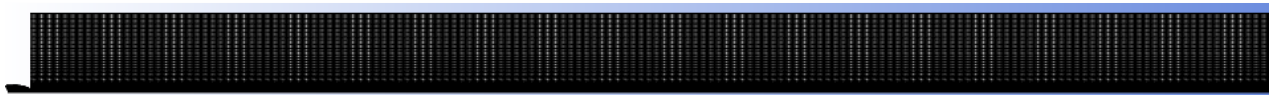
Tabela 11: Pregled konstitutivnih modela materijala

Materijal	Model jednačine stanja	Model čvrstoće	Kriterij erozije (geometrijska deformacija ϵ)
Balistički gel (20%)	Polinomijalni	Bilinearno ojačanje	0,9
Bakar (omotač FMJ)	Mie-Grüneisen (udarni talas)	Steinberg – Guinan	1,5
Olovo (jezgra FMJ)	Mie-Grüneisen (udarni talas)	Bilinearno ojačanje	1,5
PLA	Polinomijalni (Mie-Grüneisen tip)	Bilinearno ojačanje	1,0

Za balistički gel korišćen je polinomijalni model jednačine stanja koji opisuje kubičnu vezu između pritiska i omjera kompresije, u kombinaciji s bilinearnim modelom ojačanja – elastičan do granice tečenja, a potom linearno plastičan s konstantnim tangentnim modulom. Ključne referentne vrijednosti materijala su gustina $\rho_0 = 1,060 \text{ g/cm}^3$ i modul $K \approx 2380 \text{ MPa}$, što potvrđuje da je gel modeliran kao gotovo nestišljiva sredina, s obzirom na to da izuzetno visok odnos zapreminskog i modula smicanja ($K/G \approx 8,4 \times 10^3$, gdje G predstavlja modul smicanja, odnosno mjeru otpornosti materijala na promjenu oblika pri konstantnoj zapremini) ukazuje na ponašanje bliže tečnosti nego čvrstom tijelu, uz zanemarljiv otpor na smicanje u poređenju s otporom na kompresiju. Za bakarni omotač i olovnu jezgru FMJ projektila korišćeni su modeli iz standardne biblioteke materijala ANSYS Autodyn. Za PLA materijal korišćena je polinomijalna jednačina stanja s nenultim koeficijentima energetske sprezanja ($B_0 = B_1 = 0,870$) koji osiguravaju Mie-Grüneisenov tip veze između pritiska i unutrašnje energije, kalibrisan prema eksperimentalnim podacima o dinamičkom odgovoru 3D štampanog PLA pri brzinama udara 200–1000 m/s dobijenim metodom pločastog udara [185]. Početna granica tečenja PLA iznosi $Y_0 = 720 \text{ MPa}$, što odgovara Hugoniotovoj elastičnoj granici $\sigma_{\text{HEL}} \approx 0,90 \text{ GPa}$ iz tog istraživanja. Vrijedi napomenuti da je vrijednost $Y_0 = 720 \text{ MPa}$, iako na prvi pogled znatno viša od uobičajene kvazi-statičke granice tečenja PLA (reda veličine 50–70

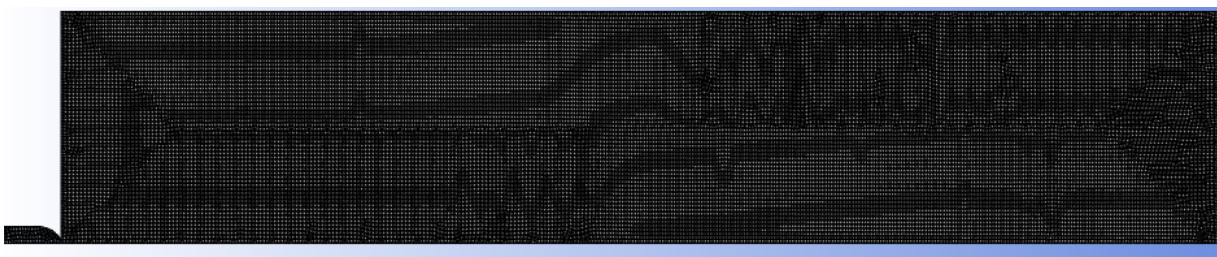
MPa), fizikalno opravdana s obzirom na to da Hugoniotova elastična granica predstavlja veličinu izmjerenu pod uslovima jednoosne deformacije tokom prolaska udarnog talasa, gdje bočno ograničenje materijala umjetno povećava prividnu granicu tečenja u odnosu na standardno, nekonfinovano zatežno ispitivanje. Ovakva razlika između kvazi-statičke i granice tečenja pri udarnom oštećenju dobro je dokumentovana pojava kod polimernih materijala izloženih udarnom opterećenju [185], te je stoga usvojena vrijednost u skladu s očekivanim fizikalnim ponašanjem materijala u ovom režimu opterećenja, a ne s greškom u kalibraciji modela. Treba naglasiti da je uklanjanje elemenata pri prekomjernoj geometrijskoj distorziji mreže tretirano kao isključivo numerička mjera stabilnosti simulacije, a ne kao fizikalni model loma materijala.

Penetracija FMJ projektila modelirana je kao dvodimenzionalni osnosimetrični problem. Cilindričan blok gela dimenzija prečnika 100 mm i dužine 800 mm bio je oslonjen nepomično na gornjoj udarnoj površini, a ishodište koordinatnog sistema postavljeno je na toj površini kako bi aksijalna koordinata vrha projektila direktno odgovarala trenutnoj dubini penetracije. Dužina bloka od 800 mm namjerno je odabrana tako da premašuje očekivanu dubinu penetracije i eliminiše uticaj zadnje granice na terminalno ponašanje projektila. Mreža je lokalno usitnjena uz osu penetracije – elementi veličine 0,4 mm na projektilu, 30 radijalnih segmenata s faktorom usitnjavanja 5 ka osi, te uniformna aksijalna podjela na 800 segmenata dužine ~1 mm. Ukupan broj elemenata iznosi 23.692. Projektilu je dodijeljena početna brzina od 376,5 m/s, što odgovara prosječnoj izmjerenoj udarnoj brzini FMJ projektila, a ukupno simulirano vrijeme iznosi 5 ms – dovoljno da projektil bude zaustavljan u meti. Na slici 28 prikazana je aksijalno-simetrična mreža konačnih elemenata za FMJ slučaj.



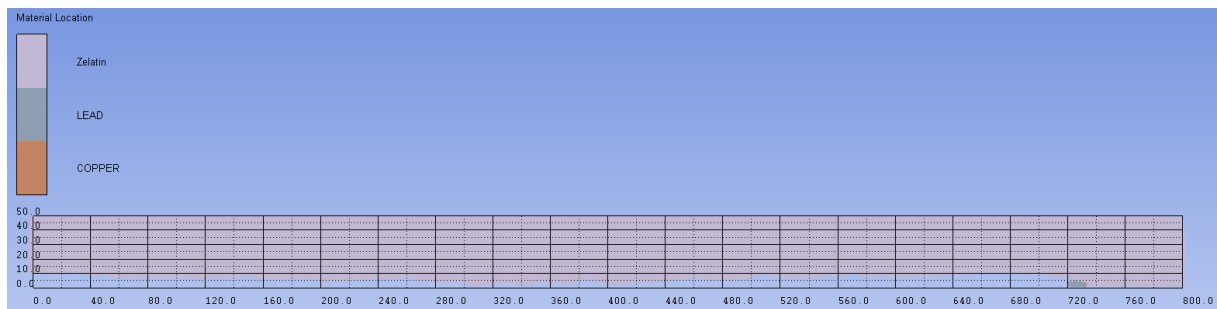
Slika 28: Mreža konačnih elemenata za FMJ projektil, Ansys Autodyn

Zbog znatno manje dubine penetracije polimernog projektila dimenzije domene su prilagođene – cilindričan blok gela prečnika 120 mm i dužine 300 mm – a korišćena je uniformna mreža elemenata veličine 0,5 mm bez radijalnog zgušnjavanja, što je rezultiralo sa 65.684 elemenata. Veći broj elemenata u poređenju s FMJ modelom, uprkos kraćem bloku, direktna je posljedica fine uniformne rezolucije primijenjene po cijelom poprečnom presjeku šireg bloka. Početna brzina PLA projektila postavljena je na 378,2 m/s – gotovo identično brzini FMJ projektila, čime je osigurano da razlika u dubini penetracije između dva slučaja proistječe isključivo iz karakteristika samih projektila, a ne iz razlike u udarnoj brzini. Ukupno simulirano vrijeme iznosi 1 ms. Na slici 29 prikazana je uniformna aksijalno-simetrična mreža za PLA slučaj.

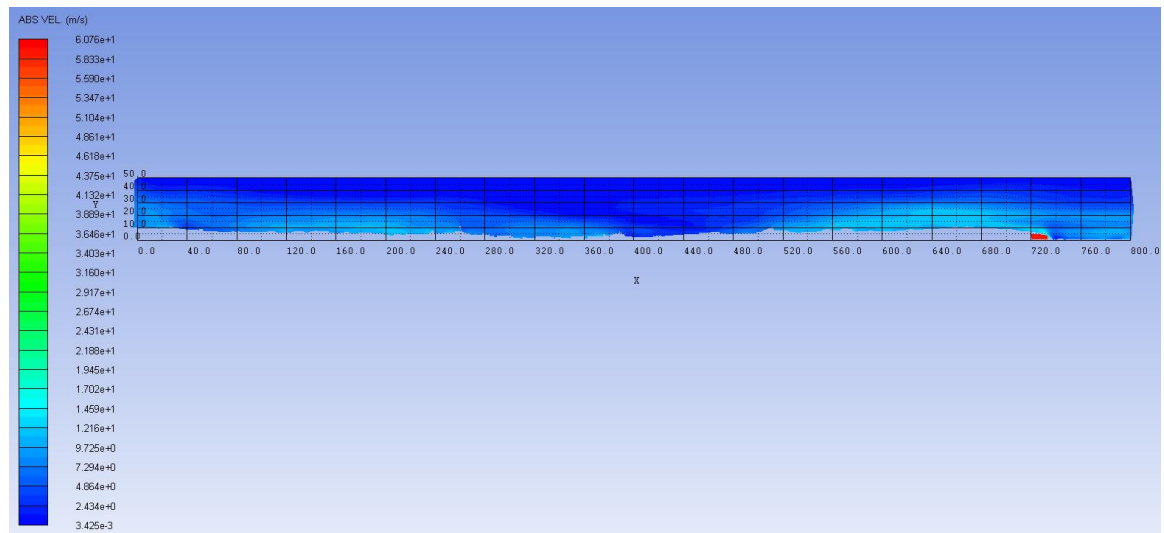


Slika 29: Mreža konačnih elemenata za PLA projektil, Ansys Autodyn

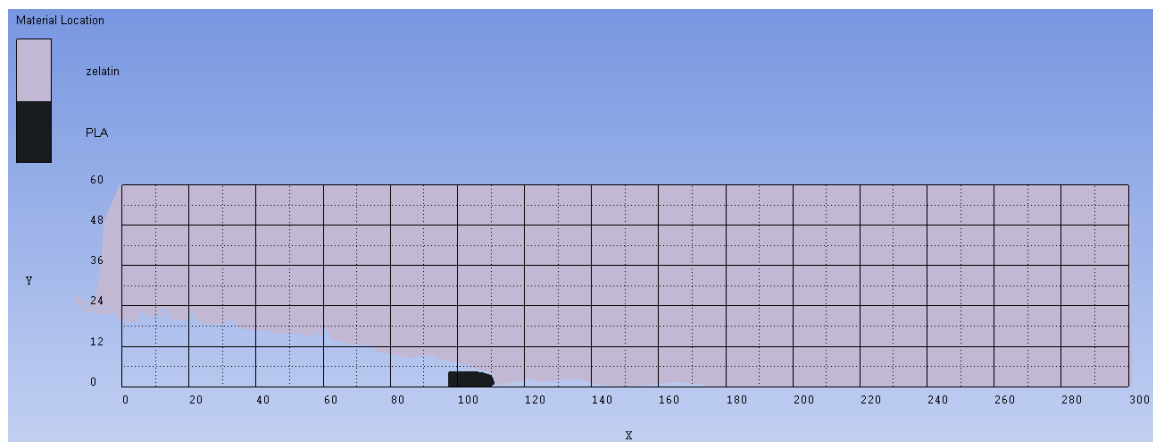
Na slikama 30, 31, 32 i 33 prikazane su simulirane konfiguracije materijala i polja brzina za oba projektila na kraju simulacije.



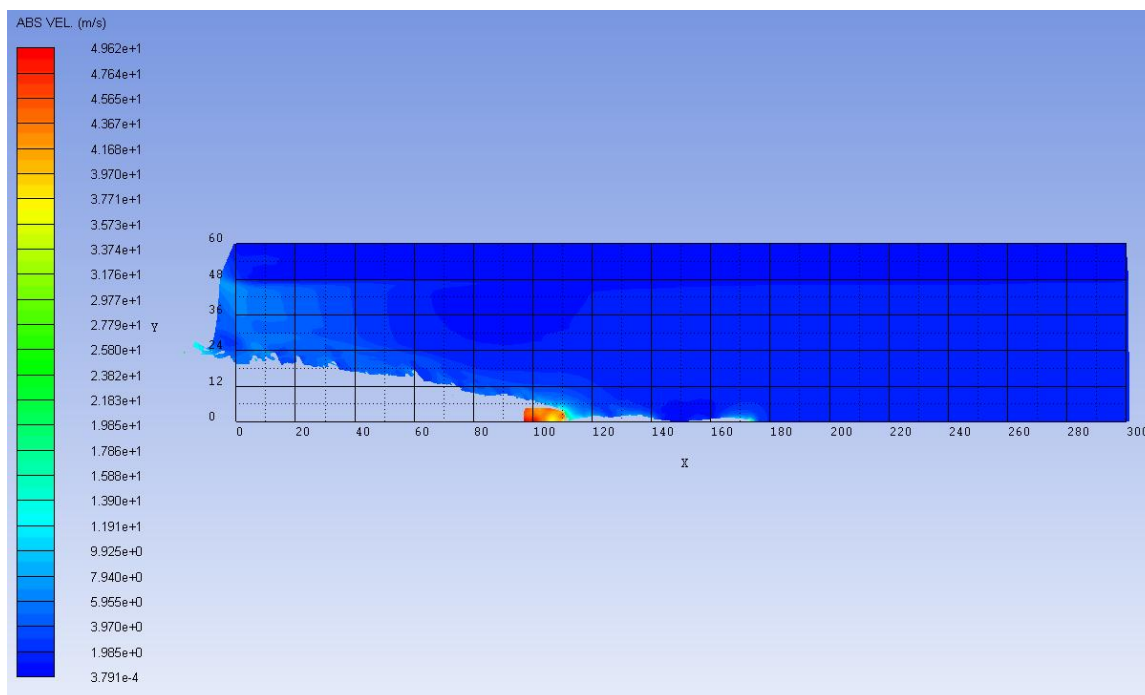
Slika 30: Konfiguracija materijala na kraju simulacije penetracije FMJ projektila



Slika 31: Polje brzina na kraju simulacije, FMJ projektil



Slika 32: Konfiguracija materijala na kraju simulacije penetracije PLA projektila



Slika 33: Polje brzina na kraju simulacije, PLA projektil

Vezano za polja brzina prikazana na slikama 31 i 33, treba napomenuti da oznaka "kraj simulacije" ne podrazumijeva da je brzina projektila u tom trenutku jednaka nuli, već da simulacija dostiže unaprijed definisano vrijeme trajanja proračuna. Naime, iz polja brzina je vidljivo da projektil na kraju simulacije zadržava malu, ali nezanemarljivu preostalu brzinu. Ovo je očekivano i fizikalno smisleno, s obzirom na to da se proces penetracije, odnosno stvarno napredovanje i širenje kanala kroz gel, efektivno okončava znatno ranije od formalnog kraja simulacije – u trenutku kada preostala kinetička energija projektila padne ispod praga potrebnog da se savlada otpor materijala i dalje uveća kanal penetracije. Nakon tog trenutka, projektil se i dalje kreće kroz već formirani kanal malom, opadajućom brzinom, bez daljeg značajnijeg rada na deformaciji okolnog materijala, sve dok se u konačnici ne zaustavi usljed preostalog trenja i otpora sredine. Ova pojava je konzistentno zabilježena kod oba tipa projektila, s tim da je kod PLA projektila, usljed znatno manje sektorske gustine i bržeg gubitka energije, ovaj efekat izraženiji već na manjim dubinama penetracije u odnosu na FMJ projektil.

U tabeli 12 su prikazani rezultati dobijeni nakon numeričke analize i eksperimentalno izmjereni rezultati dubina penetracije za oba tipa projektila.

Tabela 12: Validacija numeričkog modela poređenjem s eksperimentalnim rezultatima

Veličina	FMJ projektil	PLA projektil
Udarana brzina [m/s]	376,5	378,2
Dubina penetracije – numerička simulacija [mm]	731	110
Dubina penetracije – eksperimentalno testiranje [mm]	683,8	103
Relativna greška [%]	6,9	6,8
Faktor smanjenja brzine	7,5	7,8
Prečnik ulaznog otvora [mm]	10	18

Relativna razlika između simuliranih i eksperimentalnih vrijednosti iznosi 6,9% za FMJ i 6,8% za PLA, čime je potvrđena validnost numeričkog modela u oba penetracijska režima. Simulirane konfiguracije kanala penetracije kvalitativno su konzistentne s eksperimentalnim nalazima – uski i duboki kanal FMJ projektila nasuprot plitkoj ali široj kavitaciji polimernog projektila, što je vidljivo i pri analizi blokova balističkog gela.

Posebno zanimljiv nalaz koji proističe iz numeričke simulacije jeste razlika u prečniku ulaznog otvora – otvor PLA projektila (~18 mm) gotovo je dvostruko veći od otvora FMJ projektila (~10 mm), uprkos drastično manjoj dubini penetracije. Ovaj specifični rezultat konzistentan je s fizikalnim mehanizmom elaboriranim u odjeljku 2.6.4 – polimerni projektil male sektorske gustine brzo predaje svoju kinetičku energiju meti u neposrednoj blizini ulaznog otvora, što rezultira velikom radijalnom silom i širom privremenom kavitacijom, dok FMJ projektil svoju energiju raspoređuje duž cijele dužine kanala. Oba projektila ostaju strukturalno nepromijenjena tokom prodiranja u gel, što je konzistentno s opažanjima na snimcima ultrabrzom kamerom i fizičkim nalazima opisanim u prethodnim i narednim sekcijama.

2.6.7 Drugi set mjerenja – realni uslovi, civilno streljište (Sarajevo)

Kao što je ranije pomenuto, ispitivanjima u laboratorijskim uslovima se pristupilo radi eliminacije uticaja pomjeranja cijevi i spoljašnje sredine, ali realni uslovi su neizbježni za potpuno validno opisivanje svih fenomena. Drugi razlog za provođenje odvojenog seta mjerenja proizlazi iz rezultata objavljenog istraživanja opisanog u odjeljku 2.1, gdje je uočena razlika u izmjerenim brzinama između ispitivanja provedenih s pravim pištoljem i vrijednosti dobijenih iz opitne cijevi dužine 200 mm. Ova razlika nameće pitanje da li dužina cijevi, koja se između standardnog pištolja i EPVAT opitne cijevi razlikuje, ima mjerljiv uticaj na brzinu projektila i posljedično na dubinu penetracije u gel. Drugi set mjerenja dizajniran je upravo da odgovori na ovo pitanje, poređenjem rezultata penetracije dobijenih u identičnim uslovima gela, ali s realnim oružjem standardne dužine cijevi. Pored toga, ovaj set mjerenja obuhvatio je i ispitivanje uticaja temperature cijevi na terminalno-balističke performanse polimernog projektila. S obzirom na to da PLA kao termoplastični materijal posjeduje relativno nisku temperaturu omekšavanja u poređenju s metalnim projektilima, zagrijavanje cijevi usljed uzastopnog gađanja može potencijalno uticati na geometriju i zaptivanje polimernog projektila koji boravi u zagrijanoj komori, što bi se moglo odraziti na brzinu i dubinu penetracije. Ova problematika nije u dovoljnoj mjeri razmatrana u dostupnoj literaturi, što je bio dodatni motiv za uključivanje ovog ispitivanja u eksperimentalni plan.

Mjerenja su provedena na civilnom strelištu u Sarajevu, 7. marta 2026. godine, u vremenskom periodu od 11:00 do 13:00 sati. Atmosferski uslovi za vrijeme ispitivanja bili su povoljni – temperatura okoline 18°C, bez vjetrova, atmosferski pritisak oko 1013 mbar i relativna vlažnost oko 60%, što odgovara prosječnim vrijednostima za Sarajevo u tom periodu godine. Ispitivanje je provedeno u djelimično zaklonjenoj poziciji, a potpuno sunčan dan osigurao je izvrsne uslove osvjetljenja za snimanje ultrabrzom kamerom, što je od posebne važnosti s obzirom na visoke zahtjeve visokobrzinskog snimanja u pogledu količine svjetlosti. Na slici 34 prikazano je okruženje i priprema postavke eksperimenta.



Slika 34: Priprema za testiranje na civilnom strelištu "Pašino brdo", Sarajevo

Korišćen je pištolj Sig Sauer P320 X-Five Legion s dužinom cijevi od 5 inča (127 mm) i kapacitetom od 17+1 metaka. Kao standardna municija korišćena je Maxx Tech FMJ municija kalibra 9×19 mm s projektilom mase 8 grama, dok su polimerni PLA projektili izrađeni na osnovu iste čahure, inicijalne kapisle i barutnog punjenja, uz zamjenu isključivo projektila polimernim uzorkom mase 1 grama, prema skali usvojenoj u odjeljku 2.2. Blok balističkog gela transportovan je do strelišta u zaštitnim termo-kutijama i pri ispitivanju je bio temperature 4°C, identično kao u prvom setu mjerenja, čime je osigurana konzistentnost mehaničkih osobina medija između dva seta. Pištolj je za vrijeme ispitivanja bio pričvršćen na stativ, a blok balističkog gela postavljen je na udaljenosti od 3 metra od usta cijevi. Blokovi su postavljeni kao u prethodnom testiranju; oslonjeni na donju stranu, slobodni sa drugih. Brzine na ustima cijevi mjerene su hronografom QWORK Speed Meter, mjernog opsega od 1 do 2000 m/s, s deklarisanom greškom manjom od 1%, opremljenim dualnim infracrvenim tahometrom. Validacija hronografa izvršena je poređenjem izmjerenih vrijednosti s deklarisanim balističkim karakteristikama korišćene municije, pri čemu je potvrđeno da izmjerene vrijednosti odstupaju od deklarisanih u granicama navedene greške instrumenta.

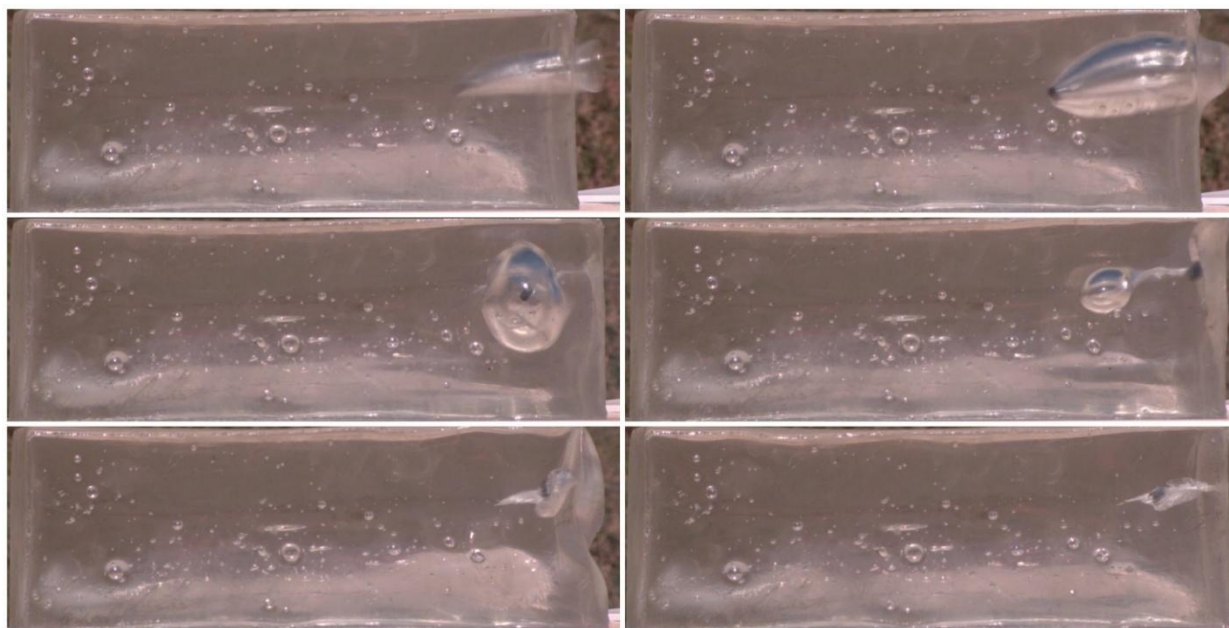
Referentna mjerenja provedena su s pauzom od najmanje 3 minute između projektila radi hlađenja cijevi, čime je osigurano da svaki projektil bude ispaljen iz hladne cijevi. Pored referentnih mjerenja, provedena su i mjerenja s prethodno zagrijanom cijevi, gdje je zagrijavanje vršeno uzastopnim opaljenjima 17 FMJ metaka bez pauze, iskorišćavajući puni kapacitet okvira, nakon čega je kao 18. metak ispaljen polimerni PLA projektil iz maksimalno zagrijane cijevi. Ovaj postupak ponavljan je tri puta.

Ispitivanje je snimano ultrabrzom kamerom Chronos 1.4, s montiranim objektivom Computar C-Mount u opsegu žarišnih dužina 12,5–75 mm i svjetlosnom snagom f/1,2. Kamera je bila postavljena bočno u odnosu na osu gađanja, na udaljenosti od 3 metra od bloka gela, okomito na pravac leta projektila, čime je osiguran optimalan ugao za snimanje kavitacija i trajektorije projektila unutar

transparentnog gela. Rezolucija i broj sličica po sekundi varirani su u zavisnosti od zahtjeva pojedinih snimaka (od 4530 FPS do 8986 FPS).

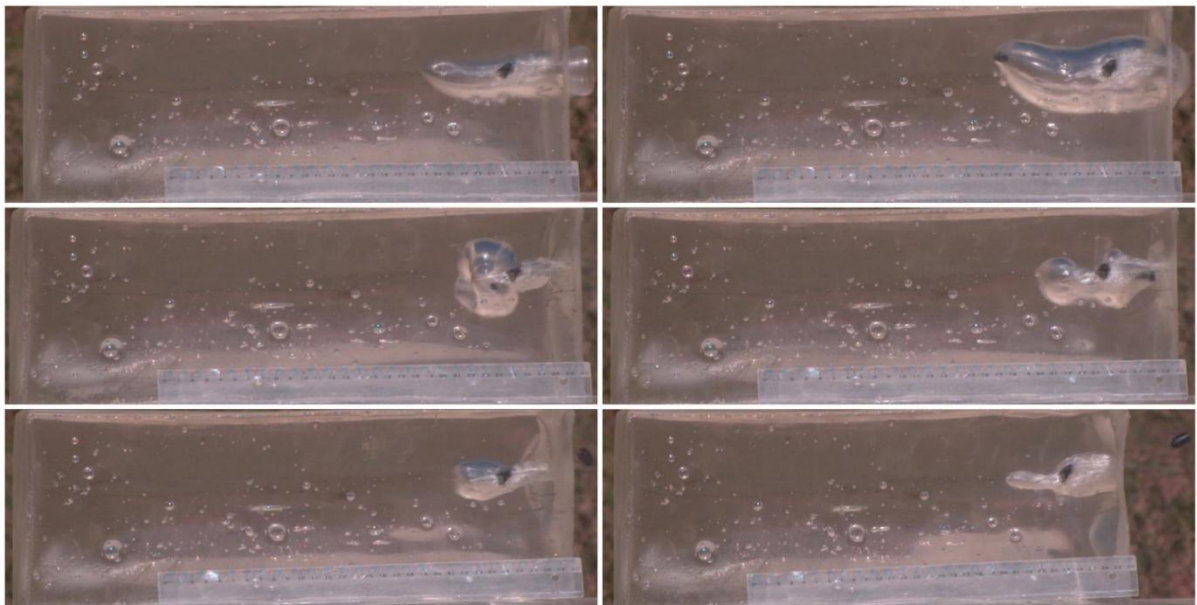
2.6.8 Rezultati i diskusija eksperimentalnog testiranja pri realnim uslovima

Za ispitivanje PLA projektila ispaljeno je ukupno 8 projektila. Od tog broja, 4 projektila su ostala u gelu i za njih je izmjerena finalna dubina zaustavljanja, dok su ostali nakon prodiranja do određene dubine elastičnim povratom medija vraćeni nazad i nisu pogodni za mjerenje. Analizom snimaka ultrabrzom kamerom za projekte koji su ostali u gelu evidentna je sekvenca u kojoj projektil dođe do određene maksimalne dubine, zatim se uslijed elastičnih sila gela djelimično vrati i zadrži na nešto manjoj finalnoj dubini. Na slici 35 prikazana je takva sekvenca.



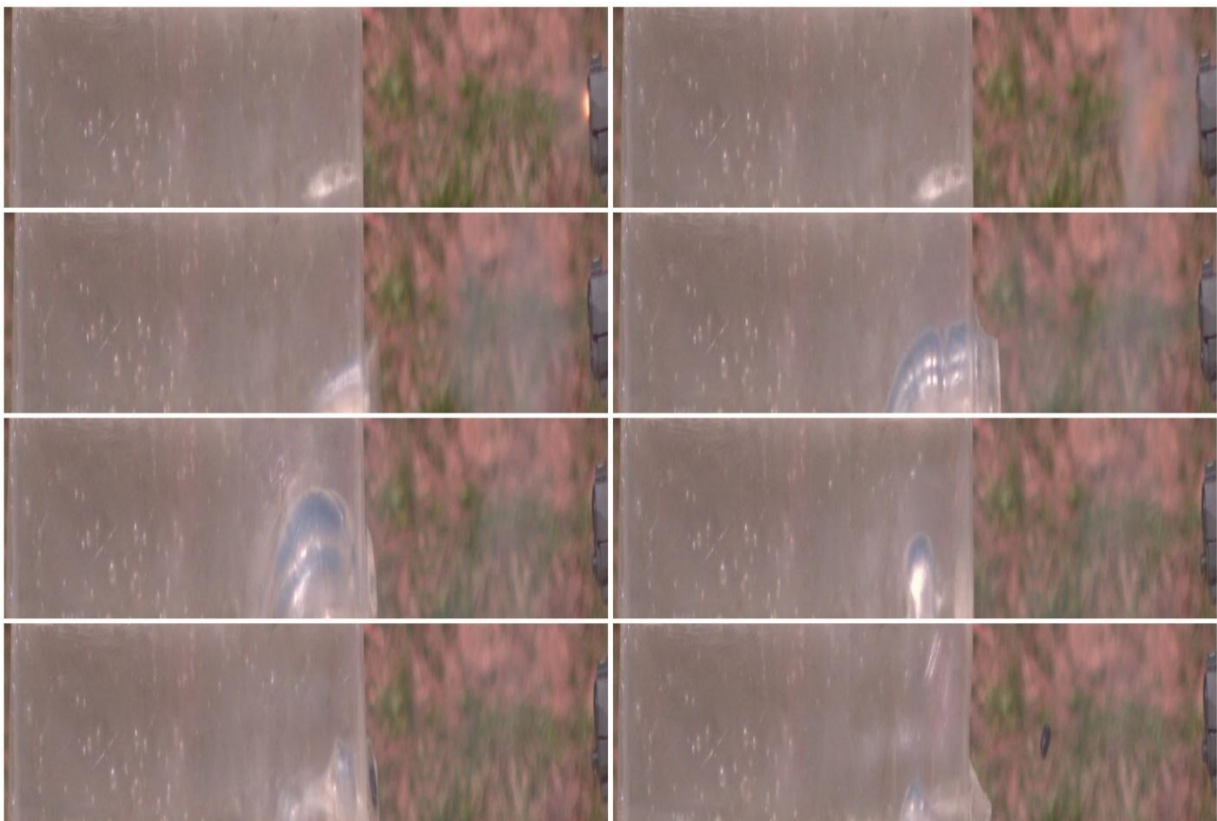
Slika 35: Penetracija PLA projektila do maksimalne dubine i povratak na konačnu dubinu

Pored navedenog, tokom ispitivanja zabilježeno je nekoliko slučajeva u kojima projektil nakon prodiranja do maksimalne dubine od oko 12 cm nije ostao u gelu, već je elastičnim povratom medija izbačen nazad kroz ulazni otvor. U tim slučajevima finalna dubina zaustavljanja nije mjerljiva te ovi projektili nisu uvršteni u statističku analizu. Ovakvo ponašanje direktna je posljedica visoke elastičnosti sintetičkog gela na bazi mineralnog ulja i relativno male kinetičke energije polimernog projektila, koji u određenim slučajevima nije u stanju trajno savladati elastične povratne sile medija. Sekvenca ovog fenomena prikazana je na slici 36.



Slika 36: Ulazak PLA projektila do konačne dubine i izlazak iz gela na istu stranu

Isti fenomen je snimljen i gađanjem u gel iz neposredne blizine, kako bi se zabilježilo više faza balističkog ciklusa. Sekvenca je prikazana na slici 37.



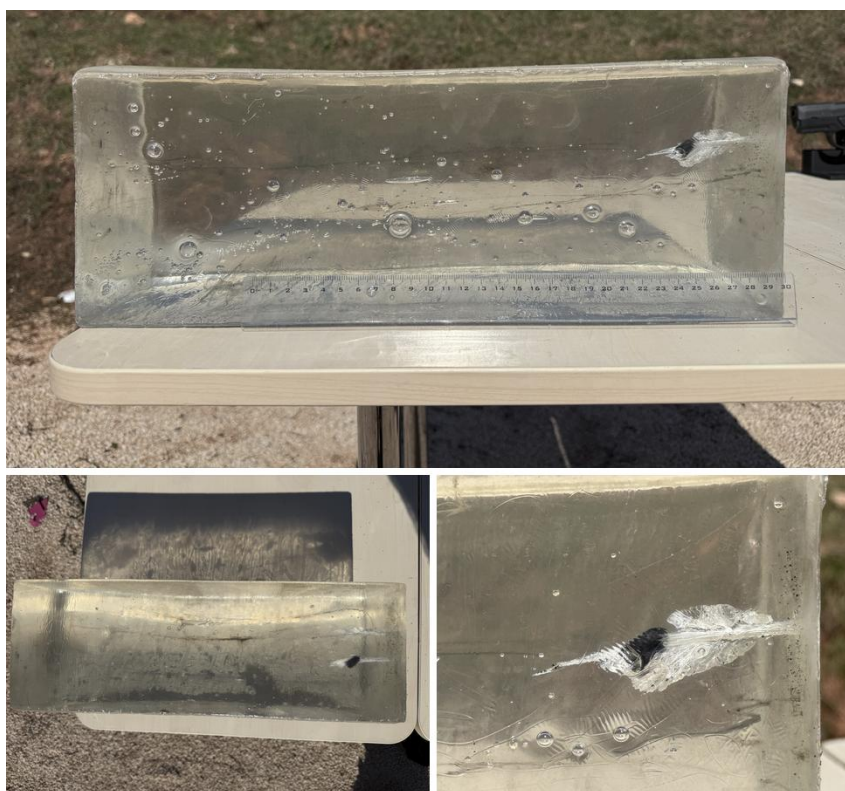
Slika 37: Bljesak na ustima cijevi, penetracija i napuštanje bloka - PLA projektil

Nakon gađanja u blok iz neposredne blizine, na bloku su primijećeni i ostaci barutnog punjenja, što dodatno potvrđuje činjenicu da je značajan procenat nesagorjelih čestica, koji su i uzročnici sekundarnog bljeska, vidljivog i na slici 37. Površina bloka sa česticama je prikazana na slici 38.



Slika 38: Ostaci nesagorjelih barutnih čestica na površini balističkog gela

S obzirom na to da je korišćeni balistički gel proziran medij, dubinu penetracije projektila i analizu kanala je moguće izvršiti bez razaranja bloka, direktnim mjerenjem šupljine u gelu ili digitalnom analizom snimaka sa ultra-brze kamere. Položaj projektila 1 – PLA, prikazan je na slici 39.



Slika 39: Položaj PLA projektila nakon gađanja

Rezultati mjerenja za PLA projekte koji su ostali u gelu prikazani su u tabeli 13.

Tabela 13: Rezultati penetracije PLA projektila ostvarene nakon ispaljivanja iz hladne pištoljske cijevi u NATO 20% balistički gel

Projektil br.	Brzina [m/s]	E_k [J]	Dubina penetracije [cm]	Napomena
1	366,4	67,12	6,0	-
2	256,0	32,77	3,0	Neregularan eksperiment
3	390,0	76,05	6,5	-
4	372,6	69,42	7,0	-
Prosjek	376,3	70,86	6,5	Bez outliera
St. dev.	12,33	-	0,5	Bez outliera

Projektil broj 2 s izmjerenom brzinom od 256,0 m/s isključen je iz statističke analize kao atipična vrijednost. Brzina ovog projektila odstupa za 120,3 m/s od prosjeka preostalih projektila, što daleko premašuje uobičajenu varijabilnost i ukazuje na neispravno punjenje konkretnog uzorka, a ne na karakteristično ponašanje polimernog projektila. Projektil je ipak prikazan u tabeli radi transparentnosti i potpunosti prikaza eksperimentalnih podataka.

S obzirom na pretpostavku da temperatura zagrijane cijevi može uticati na geometriju i zaptivanje PLA projektila, što bi se moglo odraziti na brzinu i dubinu penetracije, pristupilo se mjerenjima iz zagrijane cijevi. Cijev je zagrijavana uzastopnim opaljenjima 17 FMJ metaka bez pauze, iskorišćavajući puni kapacitet punjača, nakon čega je kao 18. metak ispaljen polimerni PLA projektil iz maksimalno zagrijane cijevi. Postupak je ponovljen tri puta. Sekvenca prodora polimernog projektila iz zagrijane cijevi prikazana je na slici 40.



Slika 40: Penetracija PLA projektila ispaljenog iz zagrijane pištoljske cijevi u NATO 20% balistički gel

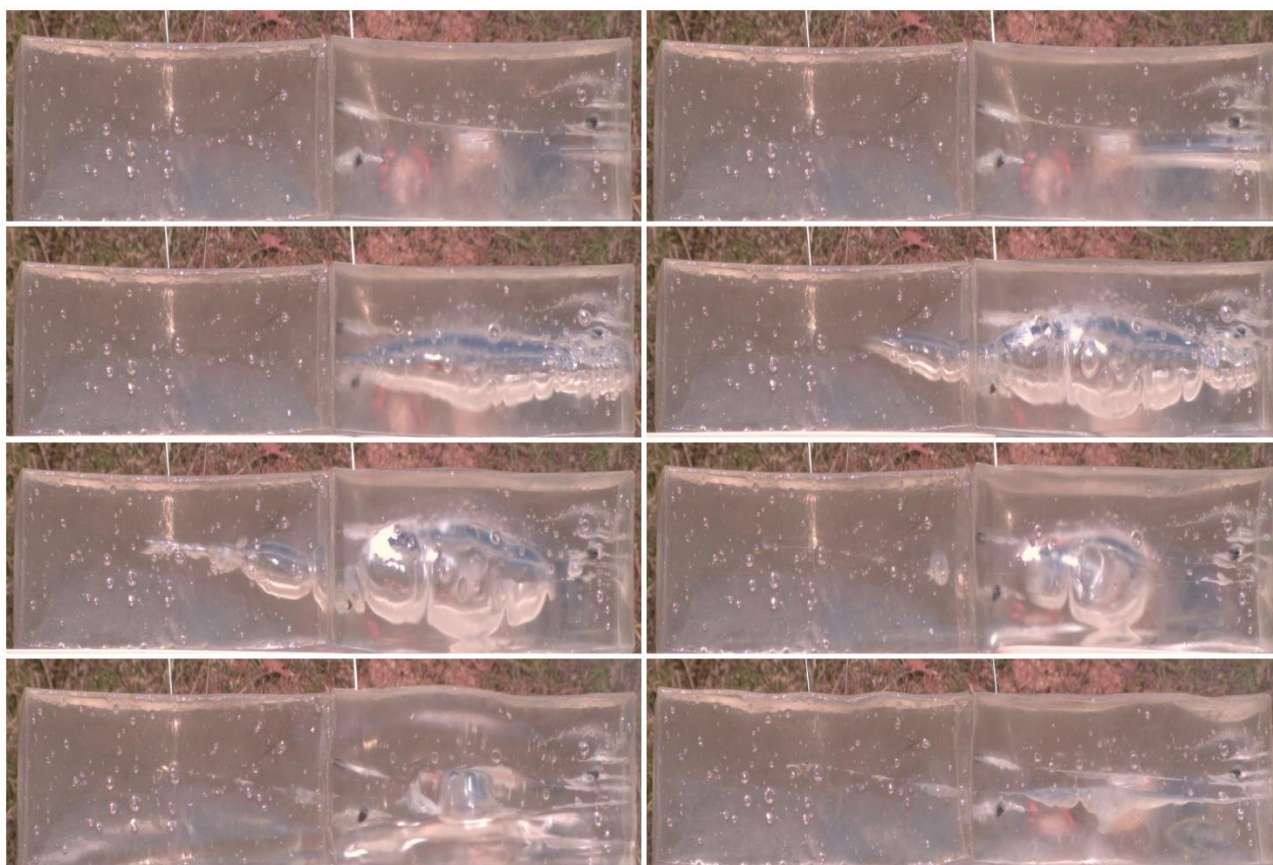
U tabeli 14 su dati rezultati penetracije za ovaj slučaj.

Tabela 14: Rezultati ostvarene dubine penetracije PLA projektila ispaljenih iz zagrijane pištoljske cijevi u NATO 20% balistički gel

Projektil br.	Brzina [m/s]	E_k [J]	Dubina penetracije [cm]	Napomena
1	462,5	106,95	8,0	-
2	455,0	103,51	8,0	-
3	451,8	102,06	7,5	-
Prosjek	456,4	104,17	7,83	-
St. dev.	5,49	-	0,29	-

Rezultati pokazuju konzistentno veće brzine projektila u zagrijanom stanju – prosječna izmjerena brzina iznosi 456,4 m/s u odnosu na 376,3 m/s za hladno stanje, što predstavlja povećanje od 80,1 m/s odnosno 21,3%. Dubina penetracije u zagrijanom stanju iznosi prosječno 7,83 cm u odnosu na 6,50 cm za hladno stanje, povećanje od 1,33 cm odnosno 20,5%. Standardna devijacija dubine penetracije u zagrijanom stanju iznosi svega 0,29 cm, što ukazuje na izuzetno visoku konzistentnost ovih rezultata u poređenju s hladnim stanjem.

Za ispitivanje FMJ projektila korišćena su dva bloka gela postavljena jedan iza drugog, ukupne raspoložive dubine medija od 800 mm. Ispaljeno je 3 FMJ projektila. Sekvenca prolaska i zaustavljanja FMJ projektila u gelu prikazana je na slici 41, a rezultati za sve projekte su navedeni u tabeli 15.



Slika 41: Penetracija FMJ projektila u balistički gel

Tabela 15: Rezultati penetracije FMJ projektila iz hladne cijevi u NATO 20% balističkom gelu

Projektil br.	Brzina [m/s]	Ek [J]	Dubina penetracije [cm]	Napomena
1	359,3	516,39	62,0	-
2	350,9	492,52	60,0	-
3	362,9	526,79	62,5	-
Prosjek	357,7	511,9	61,5	-
St. dev.	6,16	-	1,32	-

Za sve tri FMJ projektila ostvarena je potpuna penetracija kroz prvi blok gela, a projektili su se zaustavili unutar drugog bloka.

Nakon vađenja projektila iz gela, ali i analizom snimaka ultra-brze kamere na kojima se vide PLA projektili koji su elastično izbačeni iz gela, evidentno je da PLA projektili nisu deformisani, dok je kod jednog od 3 FMJ projektila primijećena deformacija, slika 42. Slaganje rezultata za FMJ projekte u laboratorijskim i realnim uslovima ukazuje na to da je gel uprkos pretapanju zadržao svoje osobine.



Slika 42: Izgled FMJ projektila nakon penetracije u balistički gel NATO 20%

Rezultati penetracije polimernog projektila ispaljivanog iz hladne cijevi pokazuju određeni stepen konzistentnosti u tri od četiri mjerenja – vrijednosti od 6,0, 6,5 i 7,0 cm grupišu se u relativno uskom opsegu, dok projektil broj 2 s izmjerenom brzinom od 256,0 m/s i penetracijom od 3,0 cm predstavlja atipičnu vrijednost isključenu iz analize kao posljedicu neispravnog punjenja. Bez ove vrijednosti, koeficijent varijacije dubine penetracije iznosi 7,7%, što je prihvatljivo za municiju sklopljenu ručno bez industrijskih alata za pertlovanje.

Na snimcima ultrabrzom kamerom, kao i na osnovu analize oblika kanala penetracije i finalnog položaja projektila u gelu, vidljivo je da PLA projektili pri ulasku u medij pokazuju tumbanje, odnosno devijaciju od osi prodiranja. Ovakvo ponašanje konzistentno je s teorijskim razmatranjima iznesenim u odjeljku 2.6.1 – mali moment inercije projektila mase 1 grama rezultira slabijom žiroskopskom stabilizacijom, a pri ulasku u viskozni medij čak i mala početna devijacija uzrokuje rotaciju projektila oko poprečne ose, što efektivno povećava udarnu površinu i time retardirajuću silu gela. Ovo je jedan od ključnih faktora koji smanjuju finalnu dubinu zaustavljanja polimernog projektila u poređenju s onim što bi se očekivalo na osnovu same kinetičke energije.

Pored tumbanja, zabilježeno je nekoliko slučajeva u kojima projektil nakon prodiranja do maksimalne dubine nije ostao u gelu, već se elastičnim povratom medija vratio i izašao kroz ulazni otvor. Ovaj

fenomen elaboriran je u odjeljku s rezultatima i direktna je posljedica kombinacije dvaju faktora – visoke elastičnosti sintetičkog gela na bazi mineralnog ulja i relativno male kinetičke energije polimernog projektila. Naime, pri penetraciji projektil komprimuje medij oko trajektorije, pohranjujući dio energije u elastičnu deformaciju gela. Ukoliko kinetička energija projektila nije dovoljna da trajno savlada otpornost medija, elastično pohranjena energija postaje dominantna i medij potiskuje projektil nazad. Ovakav ishod nije zabilježen ni u jednom slučaju pri ispitivanju FMJ projektila, što potvrđuje da je granična energija za trajno zadržavanje projektila u ovom gelu između kinetičke energije PLA (~71 J) i FMJ (~567 J) projektila.

Rezultati ispitivanja iz zagrijane cijevi pokazuju izuzetnu konzistentnost – standardna devijacija dubine penetracije iznosi svega 0,29 cm, što je najniža vrijednost zabilježena u svim setovima mjerenja. Prosječna izmjerena brzina iznosi 456,4 m/s, što predstavlja povećanje od 80,1 m/s odnosno 21,3% u odnosu na prosječnu brzinu iz hladne cijevi (376,3 m/s). Dubina penetracije u zagrijanom stanju iznosi prosječno 7,83 cm u odnosu na 6,50 cm za hladno stanje, povećanje od 1,33 cm odnosno 20,5%.

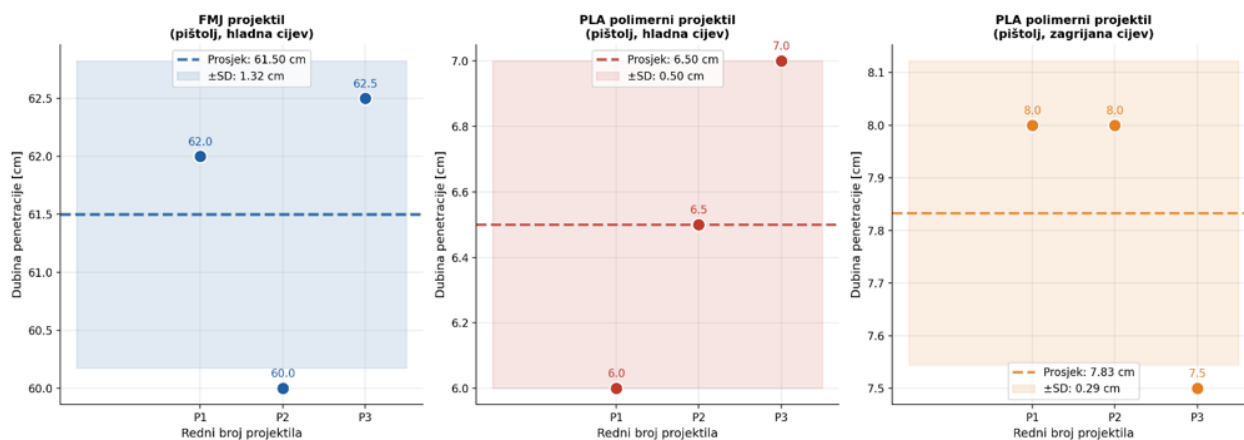
Povećanje brzine projektila ispaljivanog iz zagrijane cijevi fizikalno je realno i može se objasniti termičkim ponašanjem PLA materijala u uslovima zagrijane komore. PLA posjeduje temperaturni koeficijent termičke ekspanzije od oko $68 \mu\text{m}/(\text{m}\cdot\text{K})$ [186], a temperatura staklastog prelaza PLA iznosi između 60°C i 65°C , pri kojoj materijal počinje gubiti krutost i postaje gumoliki [138]. U uslovima zagrijane cijevi, projektil koji boravi u komori sagorijevanja zagrijanoj na povišenu temperaturu usljed uzastopnih opaljenja doživljava termičku ekspanziju, što rezultira povećanjem dimenzija projektila i boljim zaptivanjem između projektila i stijenki cijevi. Bolje zaptivanje direktno znači manje gubitaka pogonskog gasa pri ubrzavanju projektila kroz cijev, što se manifestuje kao viša izmjerena brzina na ustima cijevi. Ovaj mehanizam je analogan poznatoj pojavi u industrijskoj municiji gdje polimerne komponente čahure pri povišenim temperaturama pružaju bolje brtvljenje od metalnih [187], s tom razlikom da je ovdje u pitanju sam projektil a ne čahura.

Treba napomenuti da povećanje brzine od 21,3% i povećanje penetracije od 20,5% pokazuju gotovo identičan postotak, što se slaže s empirijskim modelom penetracije uvedenim u odjeljku 2.6.5 gdje penetracija raste približno proporcionalno s kinetičkom energijom. Dakle zagrijavanje cijevi ne mijenja fizikalni model interakcije projektila s gelom – samo mijenja ulazne parametre u smjeru povoljnijem za penetraciju.

FMJ projektili ispaljivani iz pištolja pokazuju visoku konzistentnost – koeficijent varijacije dubine penetracije iznosi 2,15%, a raspon od 2,5 cm predstavlja 4,1% prosječne vrijednosti. Kao i u laboratorijskim uslovima, projektili su prodirali stabilnom putanjom bez vidljivih devijacija trajektorije, što je direktna posljedica znatno većeg momenta inercije i samim tim bolje žiroskopske stabilizacije FMJ projektila. Za sva tri projektila zabilježena je potpuna penetracija kroz prvi blok gela, a projektili su se zaustavili unutar drugog bloka na prosječnoj dubini od 61,5 cm.

Nalazi ispitivanja iz zagrijane cijevi imaju direktne implikacije za praktičnu primjenu polimernih projektila u operativnim uslovima. Naime, u realnom scenariju korišćenja oružja, svaki naredni projektil se ispaljuje iz cijevi koja je u određenoj mjeri zagrijana od prethodnog opaljenja. Rezultati ovog ispitivanja sugerišu da polimerni projektil u takvim uslovima ostvaruje konzistentno bolje performanse od prvog hladnog projektila – viša brzina i veća dubina penetracije, uz izuzetno nisku standardnu devijaciju, ukazuju na to da je zagrijana cijev zapravo povoljno stanje za polimernu municiju. Ovo je suprotno intuitivnom očekivanju da bi zagrijavanje moglo narušiti integritet PLA projektila, a umjesto toga potvrđuje da termička ekspanzija PLA u uslovima zagrijane cijevi poboljšava zaptivanje i time povoljno djeluje na unutrašnjobalističke parametre. U praktičnom smislu, to znači da svaki naredni projektil polimerne municije ispaljen nakon inicijalnog zagrijavanja cijevi može biti nešto pouzdaniji i učinkovitiji od prvog – što je relevantan podatak za scenarije

višestrukog gađanja. Ipak, treba biti svjestan ograničenja da PLA ima relativno nisku tačku topljenja, te da je vrijeme zadržavanja projektila u vreloj komori ograničeno, kako ne bi došlo do deformacije. Na slici 43 su vizuelno predstavljene izmjerene vrijednosti za 3 prethodno analizirana slučaja (FMJ projektil, PLA iz hladne cijevi i PLA iz zagrijane cijevi).



Slika 43: Sve izmjerene vrijednosti dubine penetracije za različite projekte i različite uslove

2.6.9. Komparacija i diskusija rezultata dobijenih pri laboratorijskim i realnim uslovima

Dva seta mjerenja opisana u sekcijama 2.6.3 i 2.6.7 dizajnirana su da zajedno daju cjelovitu sliku terminalno-balističkih performansi ispitivane municije, pri čemu svaki set odgovara na zasebno istraživačko pitanje. U ovom odjeljku provodi se direktno poređenje rezultata između dva seta, s ciljem kvantifikacije uticaja dužine cijevi na brzinu i penetraciju, analize primjenjivosti empirijskog modela razvijenog na laboratorijskim podacima na rezultate iz realnih uslova, te procjene ukupne ponovljivosti i međusobne konzistentnosti eksperimentalnih podataka.

Kada je riječ o FMJ municiji, razlika između prosječnih brzina iz etalonske cijevi (376,5 m/s) i pištolja (357,7 m/s) iznosi 18,8 m/s, odnosno 4,99%. Ovo je u potpunosti u skladu s poznatom fizikalnom zakonitošću da kraća cijev daje nižu početnu brzinu projektila, što je eksperimentalno potvrđeno i u literaturi [188]. Etalonska cijev dužine 200 mm je za 73 mm, odnosno 36,5% duža od pištolja (127 mm), što znači da pogonski gas ima više prostora i vremena za ubrzavanje metalnog projektila, čime se postiže veća brzina na ustima cijevi.

Za PLA projektil ispaljivan iz hladne cijevi situacija je drugačija – razlika između etalonske cijevi (378,2 m/s) i pištolja (376,3 m/s) iznosi svega 1,9 m/s, odnosno 0,50%, što je praktično zanemarivo. Ovo je iznenađujući nalaz koji ukazuje na to da dužina cijevi za polimerni projektil, za razliku od FMJ, nema mjerljiv uticaj na brzinu u hladnom stanju. Moguće objašnjenje leži u drugačijoj prirodi interakcije polimernog projektila s cijevima različitih dužina – PLA projektil u dužoj etalonskoj cijevi prolazi veću dužinu uz trenje između polimernog tijela i metalne stijenke cijevi, što djelimično kompenzuje prednost duže cijevi. Naime, koeficijent trenja između PLA polimera i čelika je znatno viši nego između tombak oplata FMJ projektila i čelika, što znači da PLA gubi relativno više energije na trenje po jedinici dužine cijevi. Za kratku cijev pištolja ovi gubici su manji, što kompenzuje kraće ubrzavanje i rezultira gotovo identičnom brzinom na ustima cijevi. Ovaj nalaz ima važne implikacije za optimizaciju polimernih projektila – smanjenje trenja između projektila i cijevi, npr. modifikacijom površinskog sloja filamentom s nižim koeficijentom trenja ili dodavanjem maziva, moglo bi značajno povećati brzinu na ustima cijevi bez promjene dužine cijevi ili barutnog punjenja.

Kada se u prosjek PLA brzina iz pištolja uključe i mjerenja iz zagrijane cijevi (456,4 m/s), prosječna brzina svih PLA projektila iz pištolja iznosi 410,6 m/s, što je za 32,4 m/s, odnosno 8,6% više od brzine iz etalonske cijevi. Ovo potvrđuje da u realnim operativnim uslovima, gdje cijev nije uvijek hladna, polimerni projektil ispaljivan iz kraće cijevi može ostvariti brzinu jednaku ili veću od one iz duže etalonske cijevi. Najzanimljiviji i najvažniji nalaz komparativne analize jeste da PLA projektil ispaljivan iz pištolja pri gotovo identičnoj brzini (376,3 m/s) ostvaruje dubinu penetracije od samo 6,50 cm, dok isti projektil iz etalonske cijevi pri brzini od 378,2 m/s postiže 10,30 cm – dakle 36,9% dublje pri praktično jednakoj brzini. Za FMJ su razlike konzistentne i u skladu s očekivanjima – manja brzina iz pištolja (357,7 m/s, pad od 4,99%) daje manju penetraciju (61,50 cm, pad od 10,0%).

Upravo ovdje empirijski model penetracije razvijen u odjeljku 2.6.5 daje ključni doprinos razumijevanju ovog nalaza. Primjenom modela:

$$d = 1,105 \cdot 10^{-3} \cdot (m \cdot v_0^2)^{0,914} \quad (44)$$

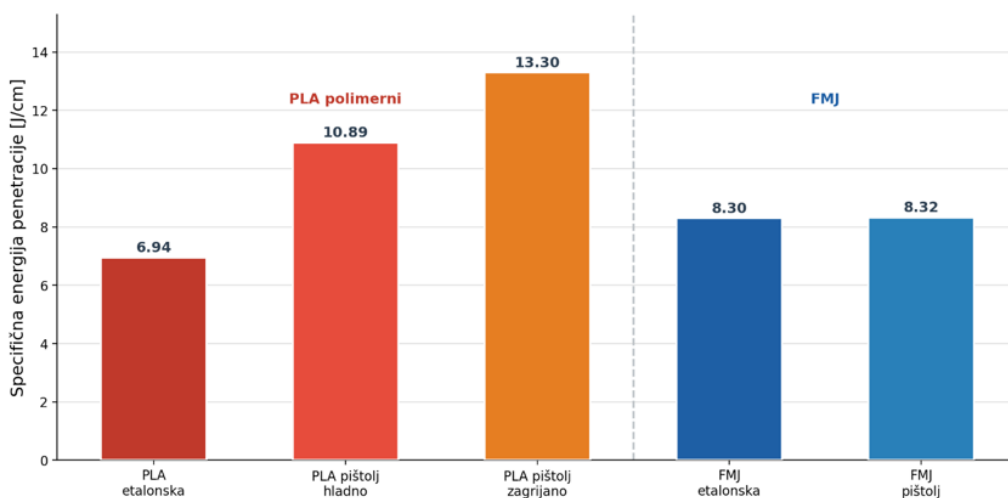
na izmjerene brzine iz realnog ispitivanja, za PLA projektil iz hladne cijevi pištolja pri brzini 376,3 m/s dobija se:

$$d = 1,105 \cdot 10^{-3} \cdot (0,001 \cdot 376,3^2)^{0,914} = 10,21 \text{ cm} \quad (45)$$

Izmjerena prosječna dubina penetracije iznosi svega 6,50 cm – model predviđa 57% veću penetraciju od stvarno izmjerene. Za FMJ projektil iz pištolja pri brzini 357,7 m/s model predviđa:

$$d = 1,105 \cdot 10^{-3} \cdot (0,008 \cdot 357,7^2)^{0,914} = 62,7 \text{ cm} \quad (46)$$

Izmjerena prosječna dubina za FMJ iznosi 61,50 cm – odstupanje od svega 1,9%, što je unutar granica eksperimentalne greške. Ovaj kontrast između predviđanja modela za PLA (odstupanje 57%) i FMJ (odstupanje 1,9%) nije slučajna i direktno upućuje na fizikalni mehanizam koji model nije u stanju predvidjeti – tumbanje polimernog projektila. Specifična energija penetracije daje ključ za razumijevanje ovog paradoksa. Za PLA iz etalonske cijevi ona iznosi 6,94 J/cm, dok za PLA iz pištolja iznosi 10,89 J/cm – dakle gel pruža skoro 57% veći otpor pri prodiranju projektila ispaljivanog iz pištolja nego iz etalonske cijevi, pri gotovo identičnoj kinetičkoj energiji projektila. Za FMJ ovaj parametar je gotovo identičan između dva seta (8,30 vs 8,32 J/cm), što potvrđuje da FMJ projektil ulazi u gel pod jednakim uslovima bez obzira na izvor opaljenja. Na slici 44 su vizuelno prikazane razlike u specifičnim energijama pri različitim mjerenjima.



Slika 44: Razlike u izmjerenim specifičnim energijama za različite projekte pri različitim uslovima ispitivanja

Najvjerojatnije objašnjenje razlike u specifičnoj energiji penetracije za PLA ne leži u razlici u vremenu potrebnom za uspostavljanje rotacije, s obzirom na to da je ugaona brzina projektila na izlasku iz cijevi, pri konstantnom koraku uvijanja žljebova, u principu proporcionalna translatornoj brzini v_0 i praktično neovisna o dužini same cijevi, pod pretpostavkom idealnog, bezproklizavajućeg kretanja projektila duž žljebova. Vjerovatnije objašnjenje leži u razlici u kvalitetu urezivanja mekšeg PLA materijala u žljebove dvije različite cijevi. Etalonska cijev, kao precizno izrađen mjerni instrument izrađen prema strogim EPVAT tolerancijama, može obezbijediti tačnije, potpunije urezivanje polimernog projektila u žljebove i posljedično manje proklizavanje tokom prolaska kroz cijev. Cijev standardnog pištolja, s druge strane, može odstupati od nominalnih dimenzija usljed proizvodnih tolerancija ili istrošenosti od prethodne upotrebe, što bi kod mekšeg, lakše deformabilnog PLA projektila moglo rezultirati djelomičnim proklizavanjem po žljebovima i posljedično nešto nižom stvarno ostvarenom ugaonom brzinom u odnosu na teorijski očekivanu vrijednost za datu translatornu brzinu. Ovakvo objašnjenje se slaže s opažanjima iz oba seta mjerenja – vizuelni tragovi tumbanja u gelu bili su izraženiji za projektele ispaljene iz pištolja nego iz etalonske cijevi. Tumbanje efektivno povećava udarnu površinu i s tim retardirajuću silu medija, što se u rezultatima manifestuje kao viša specifična energija penetracije i manja finalna dubina zaustavljanja. Za FMJ projektil ovaj efekat nije prisutan, budući da metalna košuljica projektila znatno veće čvrstoće obezbjeđuje pouzdano, konzistentno urezivanje u žljebove nezavisno od manjih dimenzionalnih razlika između dvije cijevi, što potvrđuju gotovo identične specifične energije penetracije između dva seta mjerenja. Posmatrajući oba seta mjerenja u cjelini, može se konstatovati da su rezultati međusobno konzistentni i fizikalno koherentni. FMJ municija pokazuje visoku konzistentnost u oba seta, što je odlika industrijski izrađene municije. Polimerna municija pokazuje veću relativnu varijabilnost, ali su trendovi između setova jasni i ponovljivi – tumbanje, elastični povrat i ovisnost performansi o temperaturnoj istoriji cijevi konzistentno se javljaju u oba seta.

2.6.10 Penetracija PLA projektila kalibra 7.62 x 39 mm u balistički gel

Na početku drugog odjeljka navedeno je da je kalibar 9×19 mm odabran kao optimalan za izradu polimernog projektila, između ostalog zbog povoljnog rasporeda mase koji je karakterističan za ovaj kalibar. Međutim, takvu tezu je potrebno eksperimentalno potvrditi – preciznije, utvrditi da li bi polimerni projektil drugog kalibra, posebno onog koji je karakterisan probojnim dejstvom, ostvario veću dubinu penetracije u balističkom gelu.

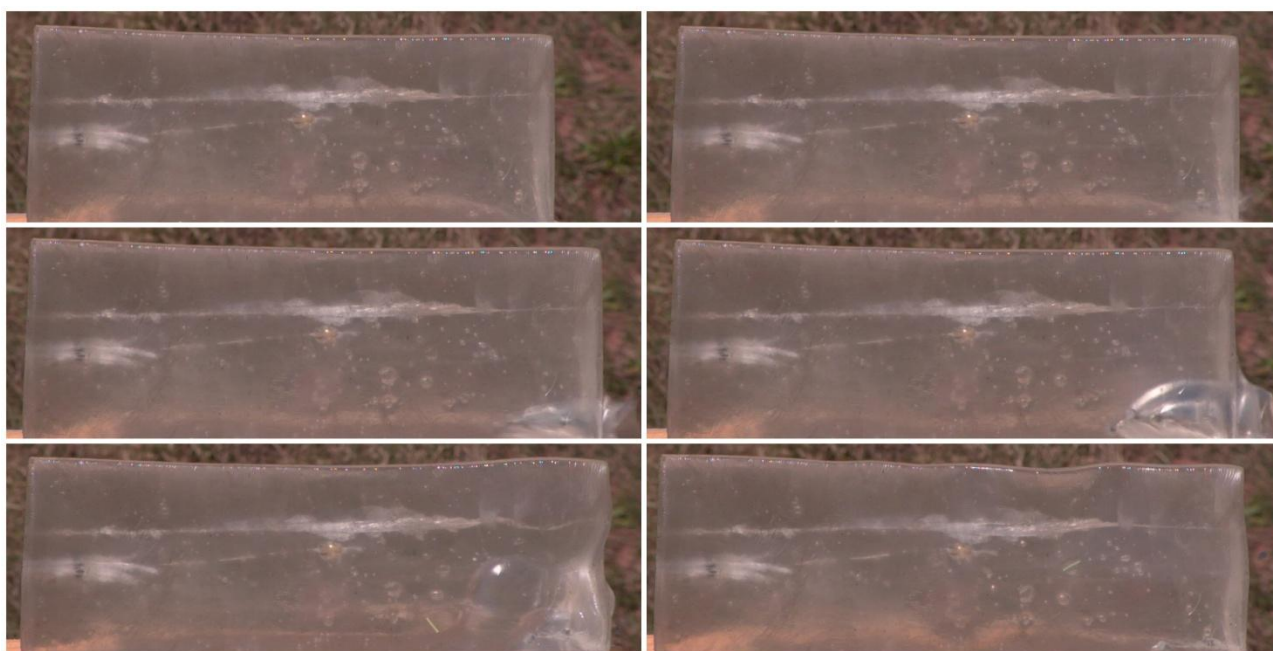
U tu svrhu konstruisan je i 3D štampan polimerni projektil za standardizovanu municiju kalibra 7,62×39 mm, mase 1 gram. Kao i u slučaju projektila kalibra 9×19 mm, i ovaj metak je sklopljen na način da je jedino metalni projektil zamijenjen polimernim, uz očuvanje svih ostalih komponenti i nivoa barutnog punjenja – konkretno, korišćena je municija kompanije Igman d.d. Konjic. Na slici 45 prikazani su originalni metak s metalnim projektilom i metak s PLA projektilom.



Slika 45: Municija kalibra 7.62 x 39 mm sa polimernim (lijevo) i metalnim (desno) projektilima

Za gađanje je korišćena puška odgovarajućeg kalibra, a meta je bio balistički gel postavljen na udaljenosti od 10 metara od usta cijevi. Gađanje je snimano ultrabrzom kamerom, a rezultati sva tri pokušaja pokazali su identičan ishod – ni jedan od ispaljivanih projektila nije ostvario adekvatno terminalno dejstvo na cilju, uprkos prosječnoj početnoj brzini od 732 m/s.

Kao što je vidljivo na slici 46, polimerni projektil pri udaru u gel fragmentira, pri čemu samo pojedini fragmenti prodiru u medij, u maksimalnom izmjerenom slučaju do dubine od 8 cm. Ova vrijednost je u okviru dubina penetracije izmjerenih za polimerni projektil kalibra 9×19 mm, ali on u gel prodire kao cjelina, zadržavajući svoju geometriju i čitavom svojom masom ostvarujući penetraciju koja u pojedinim slučajevima premašuje tu vrijednost.



Slika 46: Udar PLA projektila kalibra 7,62 x 39 mm u balistički gel

Ovim ispitivanjem eksperimentalno je potvrđeno da je kalibar 9×19 mm optimalniji izbor za izradu potpuno polimernog FDM projektila. Veća brzina projektila kalibra 7,62×39 mm ne kompenzuje gubitke uzrokovane fragmentacijom pri udaru – naprotiv, upravo visoka brzina rezultira prekoračenjem mehaničkih granica PLA materijala u trenutku kontakta s gelom, što dovodi do dezintegracije projektila i drastičnog pada terminalne efikasnosti. Kalibar 9×19 mm, s nižom brzinom i povoljnijim omjerom mase i geometrije, omogućava projektilu da preživi kontakt s medijem kao cjelina i ostvari mjerljivu i ponovljivu penetraciju. Pretpostavka je da bi isti slučaj bio i sa drugim kalibrima koji imaju slična svojstva kao kalibar 7,62 x 39 mm.

2.7 Praktične implikacije polimernih 3D štampanih projektila i prijedlog projektila sa disperznim punjenjem

Analizirajući prethodne odjeljke, u kojima je razmatrano i eksperimentalno ispitivano ponašanje 3D štampanih projektila od PLA kalibra 9×19 mm, nameće se nekoliko pravaca realnih praktičnih implikacija koje ovoj disertaciji daju konačan smisao i odgovor na pitanje zbog čega se pristupilo studioznoj analizi ovog elementa metka, izrađenog na nekonvencionalan način od nemetalnih materijala.

Prvo i neposredno područje primjene jeste izrada nesmrtonosnih projektila potpuno kontrolisanog efekta na cilju. Razmatrajući tradicionalne gumene nesmrtonosne projekte, njihov način proizvodnje i dejstvo, evidentna je ogromna razlika u odnosu na polimerne 3D štampane projekte. Konvencionalni gumeni projektili najčešće su mase do 0,7 grama i konstruisani su s namjerom da se izrazito deformišu pri udaru u metu, pri čemu se kinetička energija disperzira kroz plastičnu deformaciju projektila, a ne kroz prodiranje u cilj. Ipak, uprkos nesmrtonosnoj namjeni, u literaturi je zabilježen značajan broj slučajeva ozbiljnih povreda, pa čak i smrtnih ishoda pri pogotku osoba ovakvom municijom, posebno pri pogocima u glavu, vrat ili torzo s male udaljenosti [189-191]. Ovakvi ishodi uglavnom su posljedica nedovoljne predvidivosti efekta, koji ovisi o udaljenosti, uglu pogotka i individualnim anatomskim karakteristikama mete, što je inherentna slabost konvencionalnog pristupa izradi nesmrtonosnih projektila.

Korišćenje FDM 3D štampe u izradi nesmrtonosnih projektila posebne namjene donosi ključnu prednost – mogućnost brze i precizne kontrole geometrije, mase i mehaničkih svojstava kroz variranje parametara štampe, primarno gustine ispune. Smanjenjem gustine ispune moguće je direktno smanjiti masu projektila i uvesti kontrolisanu strukturalnu slabu tačku koja diktira ponašanje projektila pri udaru. Pritom projektil i dalje ostaje dovoljno kompaktan da preživi unutrašnjebalističku i spoljašnjebalističku fazu, ispunjavajući sve faze balističkog ciklusa, dok se terminalni efekt može precizno podešavati za specifičan scenarij primjene. Ovakav pristup omogućava i izuzetno brzu iteraciju dizajna, što je posebno relevantno u operativnim uslovima gdje su zahtjevi varijabilni i vremenski osjetljivi.

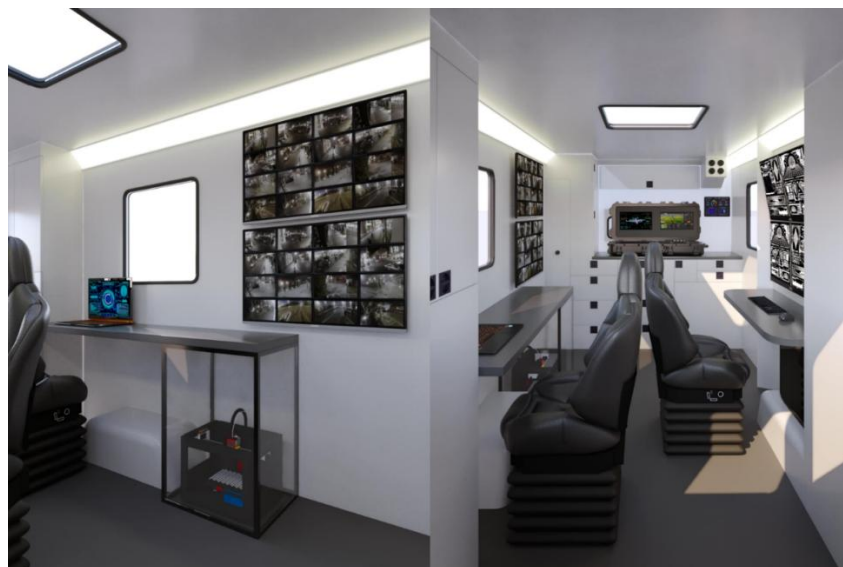
Drugi pravac praktične primjene direktno se nameće iz analize unutrašnjebalističkog ciklusa provedene u odjeljku 2.3, gdje je konstatovan veoma mali pritisak u komori sagorijevanja u poređenju sa FMJ projektilima, pri gotovo jednakom vremenskom intervalu. Razmatrajući širu sliku, a posebno imajući u vidu sveprisutan trend izrade hibridnog i potpuno polimernog oružja metodom 3D štampe [107-110], dolazi se do zaključka da bi uz upotrebu ove municije bio moguć razvoj 3D štampanog pištolja bez metalnih dijelova, koji bi bez problema izdržao više opaljenja, zadržavajući pri tome vlastiti puni strukturalni integritet. Primarna ograničenja konvencionalne municije za plastično oružje leže upravo u pritiscima koji se razvijaju u komori sagorijevanja – pritisci tipični za FMJ municiju premašuju mehaničke granice polimernih materijala dostupnih za FDM štampanje, dok pritisci izmjereni za polimernu municiju opisanu u ovoj disertaciji ostaju znatno ispod tih granica.

Ovakav sistem bio bi posebno pogodan za primjenu na bespilotnim letjelicama različitih veličina i nosivosti. Polimerna municija generisala bi praktično zanemariv trzaj pri opaljenju, čime bi platforma iz koje se ispaljuje ostala u ravnotežnom položaju bez značajne destabilizacije, a istovremeno bi isporučivala potencijalno smrtonosan napad ili projektil namijenjen zaustavljanju ili ometanju nekog drugog sistema.

S obzirom na to da je moguće u potpunosti manipulirati sastavom i geometrijom ovakve municije, za potrebe ovog rada pristupljeno je izradi jedne specijalne hibridne varijante – municije s disperznim punjenjem nalik sačmarici, ali za pušku kalibra 7,62×39 mm. Radi se o konceptu o kojem se intenzivno raspravlja u stručnoj i vojnoj zajednici, naročito u kontekstu razvoja anti-dron municije. Ideja leži u tome da je trenutno jedino oružje koje pruža efikasno odstranjivanje neposrednih prijetnji od FPV dronova sačmarica, upravo zahvaljujući disperznom karakteru njene municije [192]. Međutim, nije realno očekivati da vojnik u svom standardnom borbenom setu pored jurišne puške nosi i sačmaricu, što nameće potrebu za kompromisnim rješenjem koje zadržava kalibarske prednosti standardnog pješadijskog naoružanja uz disperzni terminalni efekt.

Moguće rješenje leži upravo u primjeni 3D štampanih projektila s disperznim punjenjem za municiju automatskih pušaka kalibra 7,62×39 mm ili srodnih kalibara. Kalibar 7,62×39 mm je odabran jer je predviđen za jurišne puške efektivnog dometa od nekoliko stotina metara [193], što odgovara tipičnim

scenarijima prijetnje od FPV dronova u borbenim uslovima, za razliku od pištolja i kratkih cijevi koji su dominantno predviđeni za blisku borbu. Naravno, fizički je izvodiva i varijanta za kalibar 9×19 mm, ali ona za ovaj specifičan scenarij primjene nije razmatrana upravo zbog tog ograničenja dometa. Posmatrajući savremenu geopolitičku i industrijsku situaciju – narušene lance isporuke i proizvodnje, uticaj Industrije 4.0 i 5.0, važnost *on-demand* proizvodnje i logistike na terenu – aditivna proizvodnja nameće se kao idealno rješenje i u ovom slučaju. Vojnici bi direktno na terenu mogli birati između konvencionalne i specijalizovane municije i vršiti izradu novih uzoraka prema trenutnoj potrebi, npr. u mobilnim zemaljskim stanicama (MGS) izrađenim po uzoru na koncepte prikazane na slici 47, razvijene za potrebe ovog rada.



Slika 47: Idejno rješenje MGS opremljenog 3D štampačem za proizvodnju municije na terenu

Za potrebe testiranja koncepta, razvojnih i proizvodnih mogućnosti, odabrana je municija kalibra 7,62×39 mm kompanije Igman d.d. Konjic, oznake BALL M67, BA LOT 16 IK 21. U programskom okruženju CATIA, prema standardizovanim dimenzijama, kreiran je projektil za ovu municiju u obliku košuljice izrađene od dva dijela i dna projektila kao trećeg dijela, koji zajedno formiraju šuplji omotač namijenjen punjenju disperznim elementima. Za 3D štampu pomoću BL X1C sve komponente su skalirane na 101% i izrađene FDM metodom. Nakon toga, u tri projektila slobodno je nasuto po 26 kuglica prečnika 2,4 mm, a u preostala tri projektila po 3 kuglice prečnika 5 mm te po jedna kuglica prečnika 3,5 mm i 2,4 mm, prema konfiguraciji prikazanoj na slici 48.



Slika 48: Municija kalibra 7,62 x 39 mm sa originalnim i sa modifikovanim projektilom

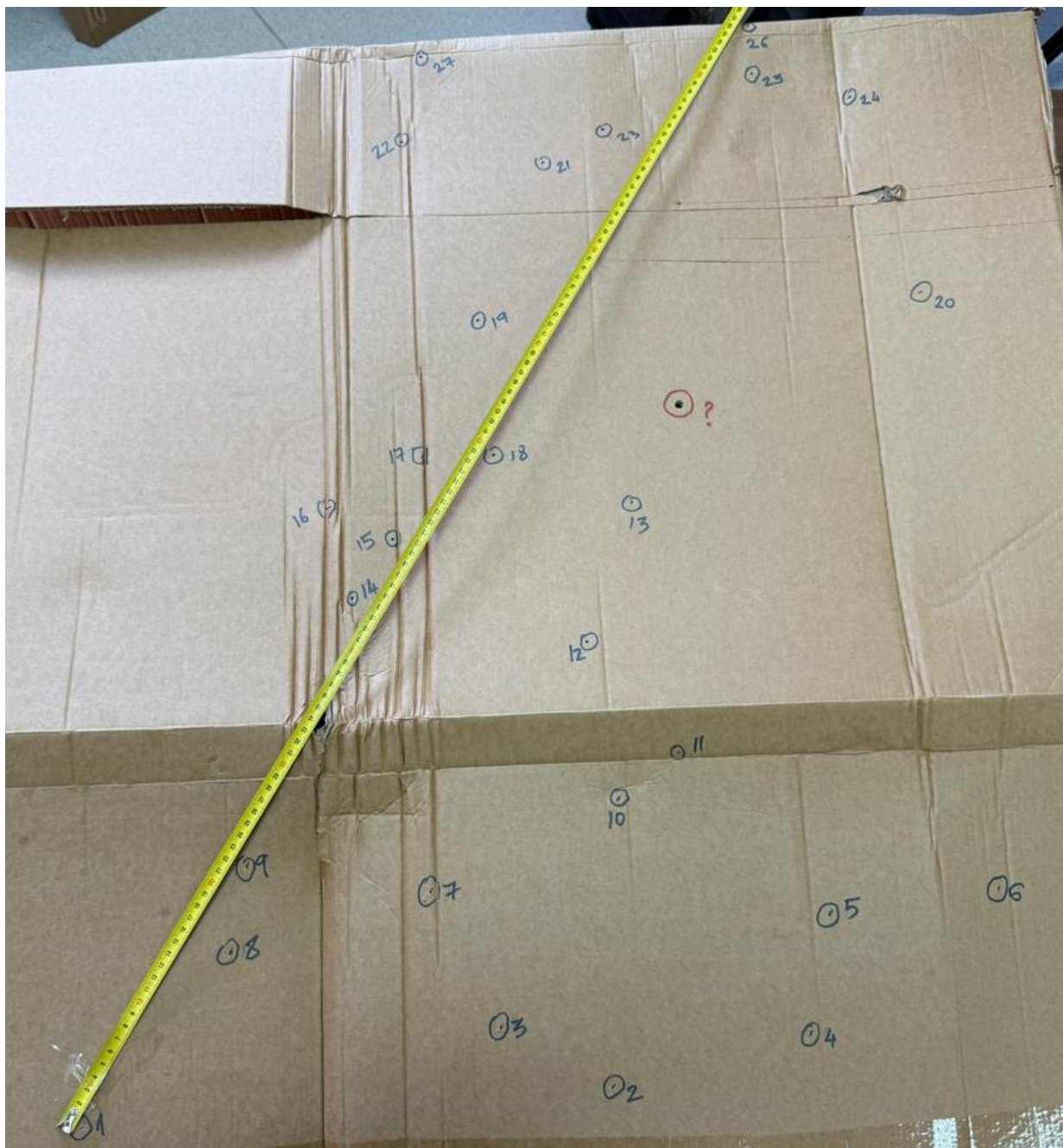
Ovako izrađeni projektili ručno su pertlovani i sjedinjeni s ostatkom metka, pri čemu se dobija sklop prikazan također na slici 48.

Na civilnom strelištu u Sarajevu, u istom danu kao i ispitivanja opisana u prethodnim sekcijama, za ispitivanje ove municije korišćena je puška CZ Bren 2Ms kalibra 7,62×39 mm. Meta je bila kartonska podloga postavljena na udaljenosti od 10 metara od usta cijevi, a pored toga gađano je i u balistički gel kako bi se izmjerila dubina penetracije kuglica i odredila njihova kinetička energija (slika 49). Ultrabrzom kamerom snimana je sekvenca izlaska projektila iz usta cijevi s ciljem dokumentovanja otvaranja projektila i disperzije kuglica pri izlasku iz cijevi.



Slika 49: Testiranje municije sa projektilima sa disperznim punjenjem

Nakon gađanja pristupljeno je analizi gela i kartonskih meta kako bi se utvrdile energija i disperzija kuglica na cilju. Rezultati su izuzetno interesantni – na udaljenosti od 10 metara, na dijagonalnoj udaljenosti između najudaljenijih pogodaka od 109 cm, registrovani su pogoci svih 26 kuglica. Ovakvi rezultati ukazuju na ogroman potencijal 3D štampane municije s disperznim punjenjem i potvrđuju opravdanost daljeg istraživanja ovog koncepta koji, iako nije bio primarni cilj ove disertacije, na jednostavan i reproducibilan način demonstrira da se aditivna proizvodnja može primijeniti za kreiranje specijalizovane municije s potpuno novim terminalnim karakteristikama. Izgled jedne od meta je prikazan na slici 50.



Slika 50: Izgled mete nakon gađanja jednim projektilom kalibra 7,62 x 39 mm sa disperznim punjenjem (26 kuglica)

2.8. Prijedlozi za optimizaciju 3D štampane polimerne municije

Rezultati eksperimentalnih ispitivanja opisanih u prethodnim sekcijama pružaju solidnu osnovu za definisanje konkretnih pravaca optimizacije polimernih projektila izrađenih FDM metodom. Svi prijedlozi koji slijede zasnovani su isključivo na teorijskim razmatranjima potkrepljenima eksperimentalnim podacima prikupljenim u ovom istraživanju, a njihova eksperimentalna validacija predstavlja logičan nastavak i predmet budućih istraživanja.

Polazna tačka za sva razmatranja jeste jednačina kinetičke energije:

$$E_k = \frac{1}{2} m \cdot v^2 \quad (47)$$

Iz ovog izraza jasno je da su masa i kvadrat brzine jedini parametri koji određuju kinetičku energiju projektila pri datim uslovima. Uticaj mase je linearan, dok uticaj brzine raste kvadratno - povećanje

brzine za faktor $\sqrt{2} \approx 1,41$ udvostručuje kinetičku energiju, dok je za isti efekt putem mase potrebno udvostručenje mase. Optimizacijske mjere stoga se prirodno dijele na one koje ciljaju povećanje mase i one koje ciljaju povećanje brzine projektila.

2.8.1 Optimizacija kroz povećanje mase

Dimenzije projektila kalibra 9×19 mm strogo su određene NATO standardom STANAG 4090, što znači da povećanje mase nije moguće ostvariti promjenom geometrije nego isključivo povećanjem gustine materijala od kojeg je projektil izrađen. Aproximativni volumen projektila kalibra 9×19 mm, modeliran kao kombinacija cilindra i konusa standardnih dimenzija, iznosi:

$$V = V_{cil} + V_{kon} = \pi \cdot R^2 \cdot L_{cil} + \frac{1}{3} \cdot \pi \cdot R^2 \cdot L_{kon} \quad (48)$$

$$V = \pi \cdot (4,515)^2 \cdot 10,46 + \frac{1}{3} \cdot \pi \cdot (4,515)^2 \cdot 5,64 = 790,3 \text{ mm}^3 = 0,790 \text{ cm}^3 \quad (49)$$

Gustina PLA iznosi $\rho_{PLA} = 1,24 \text{ g/cm}^3$, što pri 100% gustine ispune daje masu od:

$$m_{PLA} = \rho_{PLA} \cdot V = 1,24 \cdot 0,790 = 0,980 \text{ g} \quad (50)$$

što je konzistentno s izmjerenom masom od 1 grama (treba imati u vidu skalu usvojenu na početku, pri kojoj je geometrija neznatno uvećana, a masa zaokružena na 1 gram). Zadržavajući izmjerenu prosječnu brzinu od 378,2 m/s, kinetička energija PLA projektila iznosi 71,52 J.

Jedan od direktnih prijedloga jeste upotreba volfram kompozitnog filameta – konkretno Prusament PETG Tungsten sa 75% udjelom volframovog praha, čija je specifična gustina u opsegu 3,0–4,0 g/cm³ [194]. Masa projektila izrađenog ovim filamentom pri istim dimenzijama iznosila bi:

$$m_{PETGW} = \rho_{PETGW} \cdot V = 3 \cdot 0,790 = 2,37 \text{ g} \quad (51)$$

što pri uslovno pretpostavljenoj istoj početnoj brzini daje kinetičku energiju od:

$$E_{k,PETGW} = \frac{1}{2} \cdot 0,00237 \cdot 378,2^2 = 169,6 \text{ J}. \quad (52)$$

To je 2,37 puta veća kinetička energija od PLA projektila, uz zadržavanje identičnih geometrijskih karakteristika. Procjenom gustine od 4,0 g/cm³ ova vrijednost raste na 226,1 J, odnosno 3,16 puta više od baznog PLA projektila.

U slučaju kada se želi zadržati lako dostupni i jeftini PLA filament, moguće je povećati efektivnu masu projektila dodavanjem metalnih umetaka unutar tijela projektila tokom procesa štampe. Ova metoda zahtijeva poseban dizajn projektila s namjenski ostavljenim šupljim prostorom za umetak koji se precizno pozicionira na izračunato mjesto centra mase, čime se osigurava konzistentna žiroskopska stabilizacija u letu. Variranjem veličine i broja metalnih kuglica ili umetaka, te proporcionalnim podešavanjem gustine ispune ostatka projektila, moguće je fino podešavati ukupnu masu uz zadržavanje dimenzionalnih ograničenja. Ključna prednost ovog pristupa je što ne zahtijeva specijalizovani filament i može se provesti na terenu s minimalnom opremom, što je direktno konzistentno s konceptom on-demand proizvodnje razmatranim u prethodnom odjeljku.

2.8.2 Optimizacija kroz povećanje brzine – iskorišćenost barutnog punjenja

Iz rezultata mjerenja unutrašnjebalističkih parametara provedenih u odjeljku 2.3, vidljivo je da polimerni projektil iskorišćava samo mali dio energije barutnog punjenja. Procijenjena teoretska energija standardnog barutnog punjenja od 0,36 g nitroceluloze iznosi oko 1620 J, od čega FMJ projektil pretvara u kinetičku energiju 35,0%, dok PLA projektil pretvara svega 4,4%. Razlog za ovako nisku iskorišćenost leži u tome što projektil male mase napušta čahuru i ubrzava se daleko brže nego metalni projektil, što znači da sagorijevanje baruta nije završeno u trenutku kada projektil

napušta usta cijevi – znatna količina pogonskog goriva sagorijeva u fazi prelazne balistike, što je eksperimentalno potvrđeno opažanjem intenzivnog sekundarnog bljeska opisanog u odjeljku 2.4. Jedan od načina poboljšanja iskorišćenosti punjenja jeste primjena snažnijeg mašinskog pertlovanja projektila u čahuru. Veća sila pertlovanja povećava početnu silu koju projektil mora savladati pri pokretanju, čime se produžava faza ubrzavanja u cijevi i daje više vremena barutu da sagori unutar komore prije nego projektil napusti čahuru. Kvantitativno, ukoliko bi se silom pertlovanja povećala vrijednost polaznog pritiska i dijela energije gasovitih produkata sagorijevanja koja se predaje projektilu za npr. 20%, pri istom punjenju moglo bi se očekivati proporcionalno povećanje prenijete energije. Ova mjera ne zahtijeva promjenu projektila niti punjenja, već isključivo modifikaciju procesa sklapanja municije, ali zahtijeva industrijsku proizvodnju.

2.8.3 Optimizacija žiroskopske stabilizacije – prijedlog modificirane cijevi

Posebno zanimljiv pravac optimizacije, koji se neposredno nameće iz analize balističkih karakteristika polimernog projektila, odnosi se na modificiranje ugla uvijanja žljebova cijevi. Standardni pištolji kalibra 9×19 mm najčešće imaju korak uvijanja (*twist rate*) od 1:250 mm, što znači jedan puni okret projektila na svakih 250 mm dužine cijevi. Pri izmjerenoj prosječnoj brzini od 378,2 m/s, to odgovara brzini rotacije od:

$$n = \frac{v}{t} = \frac{v \cdot 1000}{\text{twist}} \cdot 60 = \frac{378200}{250} \cdot 60 = 90768 \text{ rpm} \quad (53)$$

S obzirom na to da polimerni projektil ima gotovo osam puta manji moment inercije od FMJ projektila iste nominalne veličine, jer je:

$$I = \frac{mr^2}{2} \quad (54)$$

postoji opravdana pretpostavka da standardna rotaciona brzina nije dovoljna za adekvatnu žiroskopsku stabilizaciju lakog polimernog projektila. Agresivniji korak uvijanja, npr. 1:150 mm ili 1:100 mm – pri istoj brzini projektila dao bi znatno višu rotacionu brzinu.

Pored bolje stabilizacije, treba imati u vidu da agresivniji korak uvijanja nosi sa sobom i određeni kompromis po pitanju translatorne brzine projektila. Veći ugao uvijanja žljebova zahtijeva da projektil, na istoj dužini cijevi, postigne veću ugaonu brzinu, što povećava tangencijalnu silu trenja između projektila i žljebova tokom urezivanja i prolaska kroz cijev. Dio energije pogonskog gasa koji bi se pri standardnom koraku uvijanja pretvorio u translatornu kinetičku energiju projektila, kod agresivnijeg koraka uvijanja se dijelom preusmjerava na savladavanje ovog povećanog otpora i na uspostavljanje veće rotacione kinetičke energije projektila, što bi teorijski trebalo rezultirati nešto nižom brzinom na ustima cijevi u odnosu na standardni twist rate, pri inače nepromijenjenim ostalim parametrima. Ovaj efekat je neophodno uzeti u obzir prilikom optimizacije, budući da poboljšanje žiroskopske stabilizacije putem agresivnijeg koraka uvijanja dolazi uz blagi kompromis u pogledu translatorne brzine projektila, pa bi konačan izbor koraka trebalo posmatrati kao balans između ova dva suprotstavljena efekta, a ne kao istovremeni dobitak po oba parametra. Kvantitativna analiza ovog efekta zahtijeva posebnu eksperimentalnu provjeru s cijevima različitih koraka uvijanja, što je identifikovano kao jedan od prioritetnih pravaca budućeg istraživanja. Vrijedi podsjetiti da je u odjeljku 2.6.9 empirijski utvrđeno da kraća cijev standardnog pištolja, za razliku od uobičajenog ponašanja kod konvencionalne municije, daje gotovo identičnu ili čak nešto višu brzinu polimernog projektila u odnosu na dužu EPVAT etalonsku cijev, vjerovatno usljed toga što projektil ovako male mase i niske sekcijske gustine dostiže veći dio svoje moguće brzine rano u cijevi, nakon čega dodatna dužina uglavnom doprinosi samo gubicima usljed trenja. Ovaj nalaz otvara mogućnost da se skraćivanje cijevi i agresivniji korak uvijanja posmatraju kao komplementarne, a ne konkurentske mjere optimizacije – skraćivanje cijevi bi kod ovog projektila moglo nadomjestiti, barem djelimično, blagi gubitak translatorne brzine uzrokovan agresivnijim korakom uvijanja, dok bi se istovremeno ostvarila i poboljšana žiroskopska stabilizacija.

2.8.4 Sintetički pregled prijedloga optimizacije

Uzimajući u obzir sve navedeno, moguće je rangirati predložene mjere optimizacije prema potencijalnom uticaju na kinetičku energiju projektila. Supstitucija materijala volfram kompozitnim filamentom nudi linearan dobitak proporcionalan omjeru gustina – potencijalno $\times 2,4$ do $\times 3,2$ u kinetičkoj energiji bez ikakve promjene geometrije ili procesa sklapanja. Poboljšanje iskorišćenosti barutnog punjenja kroz snažnije pertlovanje nudi umjeren ali realan potencijal uz niske troškove implementacije. Modifikovani korak uvijanja kraće cijevi nudi potencijalno efektivan kompromis – bolja stabilizacija smanjuje varijabilnost penetracije, ali uz gubitak brzine na ustima cijevi. Kombinacija svih triju mjera mogla bi teorijski dovesti polimernu municiju na nivo kinetičke energije koji je višestruko viši od trenutno izmjerene, uz zadržavanje svih prednosti koje je ova disertacija identificirala kao ključne – niska masa, nizak pritisak u komori, mogućnost on-demand proizvodnje i prilagodljivost parametara.

3 Balistička zaštita zasnovana na 3D štampanim strukturama

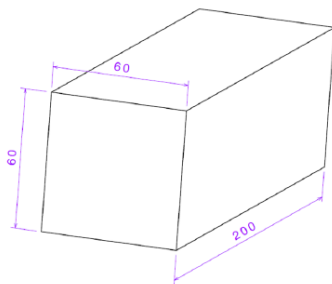
Analiza rezultata eksperimentalnog ispitivanja terminalno-balističkih parametara 3D štampane municije iznijela je jedan podatak vrijedan posebne pažnje: kod PLA projektila nije zabilježena deformacija ni u fazi opaljenja i leta, ni pri udaru u drvene mete i balistički gel. Takvo ponašanje prirodno otvara pitanje kako bi se polimerne strukture ponašale u obrnutom slučaju, kada u njih udara projektil izrađen od konvencionalnog materijala. Pitanje dobija dodatnu težinu ako se sagleda trenutno stanje u oblasti klasične zaštite, koja je često robusna, teška i skupa, čime nameće niz ograničenja i otvara potrebu za razvojem novih, sofisticiranijih struktura. Proizvodne metode kojima se standardna balistička zaštita izrađuje nose sa sobom i niz fizičkih ograničenja, naročito kod oblikovanja unutrašnjih struktura. Upravo zbog toga se aditivna proizvodnja i ovdje izdvaja kao ozbiljan kandidat, prije svega u fazi razvoja specijalizovanih rješenja i njihovog ispitivanja, sa ciljem dobijanja novih eksperimentalnih rezultata i podataka značajnih za dalje unapređenje zaštite. Njena primjena otvara sasvim nov pristup izradi balističke zaštite, sa namjenski oblikovanim unutrašnjim strukturama, ojačanjima, te hibridnim i sendvič konfiguracijama. Na sve širu upotrebu ove tehnologije u narednom periodu direktno ukazuje i ubrzan razvoj materijala za 3D štampu, koji u posljednje vrijeme pokazuju izvanredne mehaničke osobine [150-157]. Ipak, razvoj materijala ostaje prevashodno zadatak hemijske i srodnih industrija, pa je primarni fokus ovog rada usmjeren na definisanje i analizu najvažnijih uticajnih parametara pri izradi balističke zaštite, poput geometrije, gustine ispune i drugih, dok se materijali porede samo u mjeri potrebnoj da se uspostavi veza između njihovih osobina i pogodnosti za primjenu u balističkoj zaštiti, sa svim prednostima i nedostacima. Zbog međusobne povezanosti uticajnih parametara, analiza je sprovedena u fazama, korak po korak, pri čemu je u svakoj fazi razmatrana samo jedna varijabla. Iskustveno, ali i u skladu sa aktuelnim trendovima, za prvu varijablu izabrana je geometrija ispune, koja je detaljno opisana u nastavku.

3.1 Uticaj geometrije ispune na sposobnost zaustavljanja projektila kalibra 9 x 19 mm

Nakon što je za prvu varijablu usvojen tip geometrije ispune, primarno je potrebno eksperimentalno validirati i ocijeniti hipotezu o smislenosti ovakvog istraživanja. Inicijalni test je u skladu s tim podrazumijevao dizajn 3D štampane mete, izradu od istog materijala u različitim verzijama geometrije, eksperimentalno testiranje, analizu rezultata i numeričke simulacije. Sve ovo je opisano u radu [153], koji je detaljno analizirao kompletnu tematiku. Cilj je bio utvrditi koja geometrija ispune pruža najveći otpor prodiranju projektila.

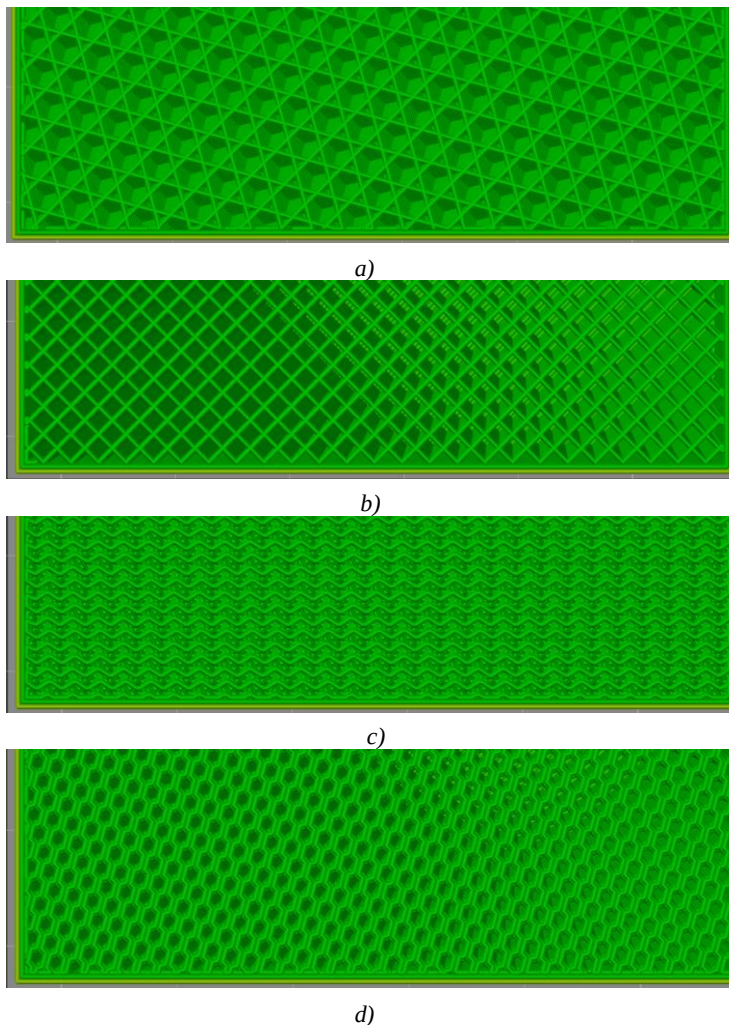
3.1.1 Dizajn i izrada mete

Dizajniran je kvadar, sa dimenzijama $60 \times 60 \times 200$ mm, kao na slici 51. Debljina od 200 mm je ciljano definisana kao maksimalna smislena debljina za koju ima smisla govoriti u kontekstu sposobnosti zaustavljanja projektila.



Slika 51: Dimenzije kvadra u mm [153]

Na osnovu opisanih izvora literature u radu [153] i najčešće primijenjenih tipova geometrijske ispune za elemente koji su izloženi mehaničkom opterećenju, odabrana su 4 tipa ispune, u aditivnoj proizvodnji najpoznatija po svojim engleskim nazivima: cubic, grid, gyroid i honeycomb, prikazani na slici 52. Savremeni slajseri nude i niz drugih ispuna, poput *rectilinear*, *triangular*, *concentric*, *lightning* i drugih, ali su za ovo istraživanje izdvojena upravo ova četiri tipa, kao predstavnici geometrijski različitih familija - od pravilnih rešetkastih struktura (grid, cubic), preko zatvorenih ćelijskih (honeycomb), do kontinualnih zakrivljenih površina (gyroid), čime se pri istoj gustini obuhvata širok raspon strukturnih odziva. Odabrani tipovi se razlikuju i po pogodnosti za štampu i mehaničkom ponašanju: grid je najjednostavniji i najbrži za štampu, ali pruža ograničenu otpornost izvan svoje ravni; cubic raspoređuje materijal u tri pravca i daje ujednačeniju višesmjernu otpornost uz sličnu jednostavnost izrade; gyroid je izotropan i cijenjen zbog povoljnog odnosa krutosti i mase, ali znatno sporiji za štampu zbog složene putanje mlaznice; dok honeycomb, sa zatvorenim šestougaonim ćelijama, pruža najveću otpornost na pritisak i najveću masu materijala pri istoj gustini, uz najduže vrijeme štampe.



Slika 52: Korišćene geometrije ispune: a) cubic, b) grid, c) gyroid, d) honeycomb [153]

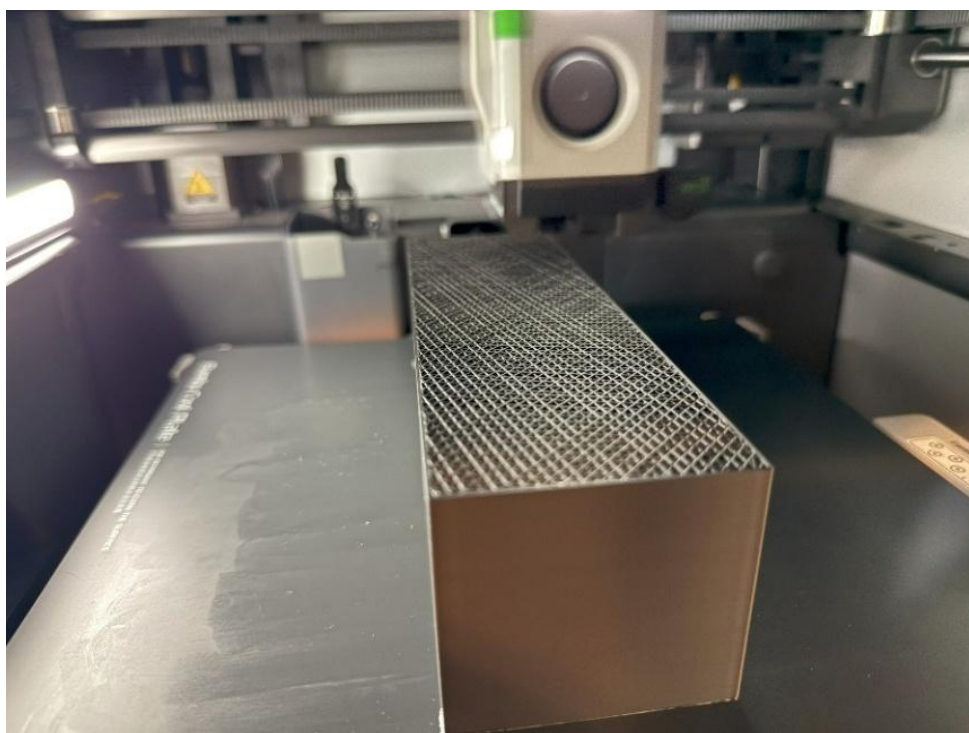
Postavljena je hipoteza da bar jedna geometrija ispune pri 50% gustine ispune zaustavlja projektil 9×19 mm unutar mete debljine 200 mm. Gustina od 50% predstavlja uravnoteženu srednju vrijednost, dovoljno visoku da meta pruži mjerljiv otpor prodiranju, a dovoljno nisku da geometrija ispune ostane jasno izražena i da se razlike među tipovima ne izgube kao pri gustinama bliskim punom materijalu. Osim toga, 50% predstavlja i praktičan kompromis sa stanovišta krajnje primjene, budući da je cilj postići zadovoljavajuću zaštitu uz što manju masu, pa ispitivanje na umjerenoj gustini ima veću

inženjersku vrijednost od ispitivanja na punom materijalu. Sve mete su izrađene pri istim postavkama, datim u tabeli 16, od PLA, na 3D štampaču Bambu Lab X1C.

Tabela 16: Odabrani parametri 3D štampe kvadara, korišćeni za sve tipove ispune [153]

Parametar štampe	Vrijednost
Prečnik mlaznice	0,4 mm
Visina sloja	0,2 mm
Debljina zida	0,45 mm unutrašnji / 0,42 mm vanjski
Gustina ispune	50%
Temperatura štampe	220°C
Brzina štampe	200 mm/s vanjski zid / 300 mm/s unutrašnji zid
Temperatura podloge	35°C

Proces štampe je prikazan na slici 53.



Slika 53: Proces 3D štampe jednog kvadra na Bambu Lab X1C 3D štampaču [153]

Prosječno vrijeme štampe i mase kvadara su navedeni u tabeli 17.

Tabela 17. Vrijeme štampe i mase kvadara [153]

Tip ispune	Vrijeme štampe [min]	Masa [g]
Cubic	377	474,74
Grid	371	472,26
Gyroid	1267	448,45
Honeycomb	1707	545,78

Razlika u masama je rezultat različitog kretanja mlaznice, broja zidova i njihovog rasporeda, što u ovom slučaju nije relevantno jer je ključni parametar zajednička gustina ispune od 50%.

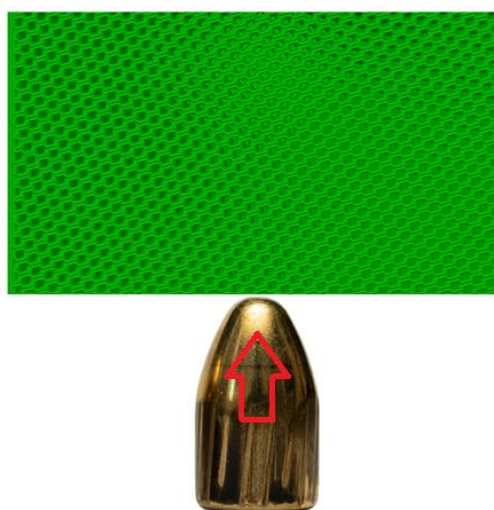
3.1.2 Eksperimentalna mjerenja

Na civilnom strelištu u Sarajevu, ranije opisanom u poglavlju 2, izvršeno je gađanje pri temperaturi od 18 °C i oblačnom vremenu, što je relevantno za ispravan rad hronografa. Postavka eksperimenta osmišljena je tako da osigura punu ponovljivost. Meta je fiksirana metalnim stalkom usidrenim u tlo, sa produženim krakom, a za njega je pričvršćena sa dva sloja standardne ljepljive trake. Ispred stalka i mete postavljen je hronograf, koji brzinu projektila određuje mjerenjem vremena prolaska projektila između dva optička senzora na poznatom rastojanju, dok je ispred hronografa smješteno fiksno postolje sa oružjem. Rastojanje između usta cijevi i mete iznosilo je 1 m. Korišćen je pištolj Sig Sauer P320 X-Five Legion sa cijevi dužine 5 inča, postavljen na pomenuto fiksno postolje, i municija 9 × 19 mm proizvođača PTG sa projektilima mase 8 g. Prosječna izmjerena brzina iznosila je 355 m/s. Izrađeno je ukupno 12 meta, po tri uzorka za svaki tip ispune, pri čemu je svaka meta pogođena sa po jednim projektilom. Eksperimentalna postavka je prikazana na slici 54.



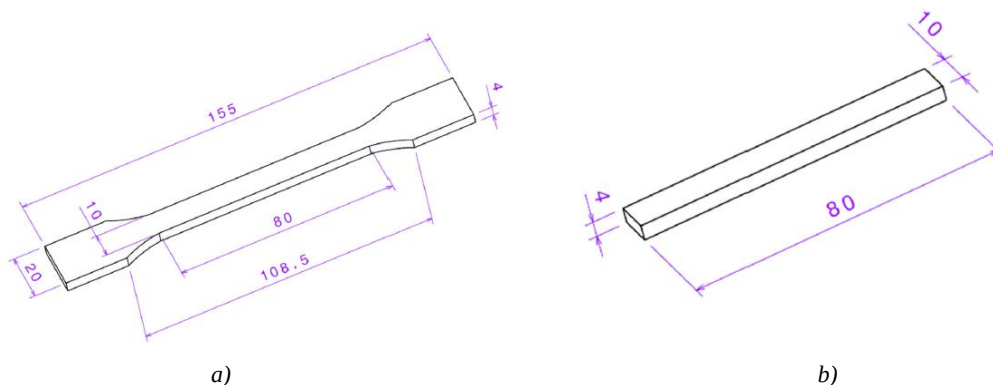
Slika 54: Eksperimentalna postavka za testiranje uticaja geometrije ispune [153]

Ključna je postavka orijentacije, gdje projektil putuje kroz zidove ispune, a ne udara okomito na njih, što znači da geometrija ispune zaista utiče na odgovor mete. Pravac kretanja projektila u odnosu na geometriju ispune je prikazan na slici 55.



Slika 55: Orijentacija udara projektila u metu u odnosu na geometriju ispune [153]

Osim eksperimentalnog gađanja, za potrebe opisivanja materijala pristupilo se i mehaničkom ispitivanju materijala. Epruvete za zatežno ispitivanje projektovane su prema standardu ISO 527-2, a epruvete za savojno ispitivanje prema standardu ISO 178, u oba slučaja od istog PLA materijala i pri istim parametrima štampe kao i kvadri, uz izmjenu gustine ispune na 100%, sa dimenzijama kao na slici 56. Sve epruvete su izrađene na Bambu Lab X1C.



Slika 56: Dimenzije epruveta za ispitivanje prema ISO standardu, a) ISO 527-2; b) ISO 178 [153]

Ispitivanje je izvršeno na univerzalnoj mašini za ispitivanje (kidalici) Shimadzu AGS-X, nazivnog kapaciteta 10 kN, pri čemu je savojno ispitivanje sprovedeno metodom savijanja u tri tačke u skladu sa ISO 178. Na osnovu standarda i preliminarnih ispitivanja, usvojena je brzina ispitivanja od 5 mm/min, a za svaki tip ispitivanja testirano je po pet epruveta. Zatezne i savojne osobine mjerene su i evidentirane u softveru Shimadzu Trapezium-X, a prikazane vrijednosti u tabeli 18 predstavljaju prosjek pet ispitanih epruveta. Izmjerene vrijednosti su upoređene sa podacima iz tehničke specifikacije proizvođača (TDS), pri čemu je utvrđeno dobro slaganje. Rezultati su dati u tabeli 18.

Tabela 18: Poređenje osobina materijala dobijenih eksperimentalnim putem i navedenih u Bambu Lab TDS [153]

Mehaničke osobine	Izmjerene vrijednosti	Vrijednosti iz Bambu Lab TDS
Zatezna čvrstoća [MPa]	34,1	35 ± 4
Modul elastičnosti pri zatezanju [MPa]	2600	2580 ± 220
Izduženje pri kidanju [%]	8,8	12,2 ± 1,8
Savojna čvrstoća [MPa]	78	76 ± 5

Nakon gađanja, u Kliničkom centru Univerziteta u Sarajevu, izvršeno je snimanje uzoraka kompjuterskom tomografijom (CT). Nedestruktivno ispitivanje je odabrano kako bi se snimila tačna pozicija projektila zaostalih u meti, jer bi bilo koji drugi pristup mogao narušiti tačnost rezultata zbog nelinearnih putanja i mogućeg pomjeranja projektila prilikom destrukcije mete. Snimanje je obavljeno uređajem Canon CT Prime sa 160 rezova, pri čemu su parametri akvizicije podešeni za redukciju metalnih artefakata i jasnu vizuelizaciju kanala prodora. Snimanje je izvršeno pri naponu cijevi od 120 kV uz modulisanu jačinu struje, budući da je automatska kontrola ekspozicije bila dovoljna za prikaz visokokontrastnih putanja prodora. Primijenjen je SEMAR modul (eng. *Single-Energy Metal Artifact Reduction*) za redukciju metalnih artefakata, čime su umanjene otvrdnjavanje snopa i pojava pruga uzrokovanih metalnim projektilom, što je omogućilo tačniju procjenu granice projektil–materijal i dubine prodora. Rekonstrukcija slike izvršena je sa debljinom reza od 0,5 mm radi visoke prostorne rezolucije i preciznog mjerenja. Radi maksimalne tačnosti, korišćene su i koronarna i sagitalna višeravanska rekonstrukcija, kako bi se odredila tačna pozicija projektila i izmjerila maksimalna dubina prodora. Ovakav dvoravanski pristup osigurava da mjerenje obuhvata stvarnu putanju prodora, nezavisno od eventualnog odstupanja od okomice. Dubina prodora mjerena je od ulazne površine do najdublje tačke prodiranja projektila. Ovakva metodologija omogućila je

nedestruktivnu unutrašnju analizu uzoraka uz očuvanje njihove strukturne cjelovitosti za dalja ispitivanja. Izmjerene dubine penetracije za svaku metu i prosječne vrijednosti predstavljene su u tabeli 19.

Tabela 19: Izmjerene dubine penetracije za svaku metu i prosječne vrijednosti [153]

Tip ispune	Uzorak 1 [mm]	Uzorak 2 [mm]	Uzorak 3 [mm]	Prosječna dubina [mm]
Cubic	161,64	162,41	160,50	161,51
Grid	167,95	169,12	170,55	169,20
Gyroid	>200	>200	>200	>200
Honeycomb	110,74	110,19	111,25	110,72

Tri uzorka po svakom tipu ispune dala su vrlo bliske vrijednosti, dok su razlike između različitih tipova izražene, što pokazuje da je geometrija ispune smisljena varijabla, a ne šum. Najbolji rezultat ostvario je honeycomb, sa prosječnom dubinom prodora od 110,72 mm, dok gyroid nije zaustavio projektil ni u jednoj meti, iako se u literaturi često navodi kao izuzetno efikasan u sendvič strukturama. Cubic i grid dali su solidne i međusobno bliske rezultate, što je očekivano s obzirom na njihovu geometrijsku sličnost.

3.1.3 Numerički i analitički modeli

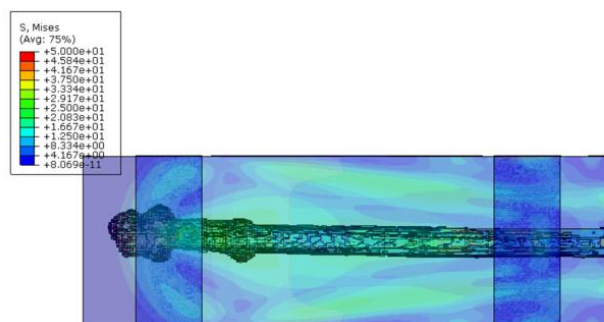
Pored eksperimenta, razvijeni su numerički i analitički modeli, sa ciljem da se provjeri u kojoj mjeri pristupačni proračunski alati mogu reprodukovati izmjereno ponašanje i time smanjiti broj potrebnih eksperimenata u kasnijim fazama istraživanja. Numerički model razvijen je u programskom paketu Abaqus/Explicit i simulira udar projektila kalibra 9×19 mm u PLA blok. PLA meta je modelovana kao ortotropan, elasto-plastičan materijal sa progresivnim oštećenjem i lomom, čime su obuhvaćeni anizotropija koja nastaje procesom štampanja i otkazivanje pri visokim brzinama deformacije, dok je projektil (čelično obložen sa olovnom jezgrom) tretiran kao savršeno kruto tijelo odgovarajuće mase i inercije. Ključne pretpostavke uključivale su tretiranje projektila i čeličnog oslonca kao savršeno krutih, bez apsorpcije energije kroz sopstvenu deformaciju, te zanemarivanje gravitacije, s obzirom na to da udar traje manje od jedne milisekunde. Elastične konstante materijala preuzete su iz podataka proizvođača za štampani PLA i kalibrisane zateznim ispitivanjima štampanih uzoraka, pri čemu su moduli u ravni štampe (E_x , $E_z \approx 2580$ MPa) viši od modula okomitog na slojeve ($E_y \approx 2060$ MPa), što odražava slabije vezivanje na granicama slojeva.

Iako su zatezna ispitivanja Bambu Lab PLA materijala pokazala plastično tečenje pri približno 35 MPa, u numeričkom modelu je usvojena viša granica tečenja od 50 MPa. Ova razlika opravdava se uticajem veličine uzorka i osjetljivošću PLA na brzinu deformacije: pri udarnim uslovima veći uzorci pokazuju povišenu granicu tečenja usljed višeosnog naponskog stanja i očvršćavanja izazvanog brzinom deformacije, što su dobro dokumentovane pojave u literaturi o deformaciji polimera [153]. Primijenjen je duktilni kriterijum oštećenja, sa inicijacijom pri ekvivalentnoj plastičnoj deformaciji od približno 5%, što predstavlja početak mikroprrslina u materijalu. Nakon inicijacije, primijenjen je linearni zakon evolucije oštećenja sa energijom loma reda $2,5 \text{ kJ/m}^2$, čime je osigurano da energija otkazivanja ne zavisi od veličine mreže, dok je potpuno oštećenje vodilo brisanju (eroziji) elemenata radi modeliranja razdvajanja materijala. Za diskretizaciju su korišćeni osmočvorni heksaedarski elementi sa redukovanom integracijom (C3D8R).

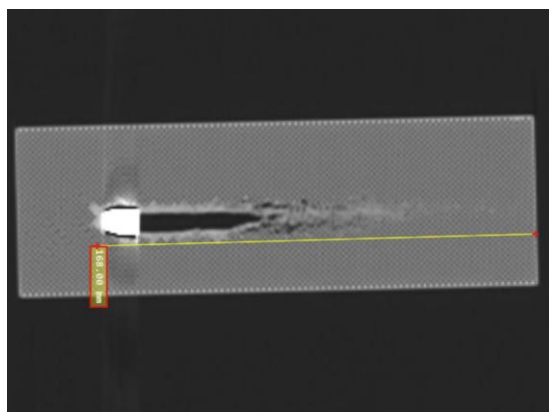
Ljepljiva traka kojom je meta bila pričvršćena modelovana je kao zaseban elasto-plastičan materijal umjerene duktilnosti, radi vjernog prikaza načina pridržavanja bloka. Iako zanemarive debljine, traka je eksplicitno modelovana zapreminskim elementima kako bi se obuhvatila njena uloga u disipaciji energije i sprečavanju razdvajanja slojeva. Stvarna geometrija ispune nije eksplicitno modelovana,

već je meta predstavljena kao ortotropno tijelo sa svojstvima kalibrisanim na osnovu eksperimentalnih podataka i specifikacije proizvođača, budući da bi vjerno modeliranje unutrašnje strukture pri 50% ispune zahtijevalo izuzetno velik računski trošak, vjerovatno iznad mogućnosti standardnih računarskih sistema. Blok dimenzija $200 \times 60 \times 60$ mm diskretizovan je strukturisanom mrežom sa progušćenjem duž ose prodiranja, oko 1 mm u zoni udara, radi obuhvatanja strmih gradijenata napona i oštećenja, i grubljih oko 2 mm u vanjskim područjima, što je dalo ukupno oko 2.787.600 elemenata uz razuman računski trošak. Projektilu je zadata početna brzina od 355 m/s duž ose udara, čelični oslonac je potpuno uklješten, a meta je vezana za oslonac preko trake, čime je onemogućeno njeno pomjeranje. Za interakciju projektil–meta primijenjena je hibridna formulacija kontakta, sa penalizacijskim kontaktom površina-na-površinu pri početnom dodiru i opštim kontaktom tokom prodora, uz koeficijent trenja od 0,35, dok je traka vezana za metu i oslonac tie-vezama, čime je simulirano ljepljivo spajanje bez otkazivanja.

Simulacija je dala dubinu prodora od približno 184 mm, što odstupa za oko 9% od eksperimentalne vrijednosti za grid pattern (168 mm). Blago precjenjivanje prodora posljedica je pretpostavke o savršeno krutom projektilu, koji u modelu ne troši energiju na vlastitu deformaciju niti fragmentaciju, pa veći dio energije ostaje za oštećenje mete; dodatni doprinos daje i izostanak osjetljivosti na brzinu deformacije u usvojenom materijalnom modelu, zbog čega bi stvarni PLA pri visokim brzinama udara mogao biti nešto žilaviji. Model je pored dubine prodora dobro reprodukovao i karakter oštećenja, sa čistim ulaznim otvorom prečnika oko 9 mm, uskim kanalom u prvom dijelu prodora (dužine oko 100 mm) i proširenjem pri kraju, gdje projektil usporava i prelazi sa probijanja na radijalno deformisanje materijala, slika 57. Dijagram pomjeranja projektila u vremenu pokazao je glatko usporavanje bez oscilacija i naglih padova, što ukazuje na stabilnu i ravnomjerno raspoređenu apsorpciju energije, bez značajnog odskoka ili nestabilnosti kontakta.



a)



b)

Slika 57: Dubina penetracije projektila u 3D štampanu polimernu metu: a) rezultati numeričke simulacije, b) eksperimentalni rezultat na bazi CT snimanja [153]

Analitički model zasnovan je na bilansu energije, uz pretpostavku da se, s obzirom na duktilnu prirodu mete i njenu znatno nižu čvrstoću u odnosu na projektil, prodiranje odvija u režimu duktilnog formiranja otvora, pri čemu se kinetička energija projektila u potpunosti troši na plastičnu deformaciju mete:

$$\frac{1}{2} m \cdot v^2 = R \cdot P \quad (55)$$

gdje su m i v masa i brzina projektila, R prosječna sila otpora mete, a P dubina penetracije. Prosječna sila otpora izražena je kao:

$$R = k_i \cdot k_p \cdot k_d \cdot Y_t \cdot A \quad (56)$$

pri čemu k_i , k_p i k_d predstavljaju uticaj gustine ispune, tipa ispune i dinamičkih efekata, Y_t je kvazistatička pritisna čvrstoća materijala, a A površina poprečnog presjeka projektila. Uvrštavanjem u bilans energije dobija se izraz za dubinu penetracije:

$$P = \frac{m \cdot v^2}{2k_i \cdot k_p \cdot k_d \cdot Y_t A} \quad (57)$$

Za usvojene i literaturno poznate vrijednosti: masu projektila $m = 0,008$ kg, prečnik $d = 0,009$ m i brzinu $v = 355$ m/s, koeficijent gustine ispune $k_i = 0,5$, nominalni koeficijent tipa ispune $k_p = 1,0$, tipično povećanje čvrstoće usljed brzine deformacije $k_d = 1,5$, te prosječnu kvazistatičku pritisnu čvrstoću PLA $Y_t = 68$ MPa, procijenjena dubina prodora iznosi približno 155 mm, što dobro odgovara eksperimentalnim vrijednostima za cubic i grid, sa odstupanjima od 4,3% i 7,7%. Za honeycomb i gyroid odstupanja su znatno veća (približno 40% odnosno najmanje 23%), čime se dodatno potvrđuje da geometrija ispune ima dominantan uticaj koji jednostavan model sa konstantnom silom otpora ne može u potpunosti obuhvatiti, budući da ne uzima u obzir progresivno drobljenje, termičko omekšavanje ni očvršćavanje materijala. Ova razlika može se izraziti i preko efektivnih vrijednosti koeficijenta k_i , koje su, dobijene iz izmjerenih dubina prodora, iznosile približno 1,40 za honeycomb, 0,96 za cubic, 0,92 za grid i manje od 0,78 za gyroid. Vrijednost znatno veća od jedinice kod honeycomba direktno potvrđuje njegov nadprosječan doprinos otporu, dok vrijednost ispod jedinice kod gyroida odražava njegovu slabu sposobnost zaustavljanja. I pored svojih ograničenja, analitički model za pojedine tipove ispune daje upotrebljivu procjenu i može poslužiti kao alat za preliminarni inženjerski proračun.

Razlika u ponašanju pojedinih geometrija može se objasniti načinom na koji projektil prolazi kroz unutrašnju strukturu. Honeycomb se sastoji od niza zatvorenih šestougaonih ćelija čiji zidovi stoje poprečno na pravac kretanja projektila, pa projektil na svom putu presijeca veliki broj takvih zidova jedan za drugim. Svaki od njih troši dio energije kroz lokalno lomljenje i plastičnu deformaciju, a zbir tih pojedinačnih otpora daje visok ukupni otpor prodoru. Tome u prilog ide i podatak da honeycomb meta, pri istoj gustini ispune od 50%, sadrži najveću masu materijala od svih ispitanih tipova, što znači i najveću masu zidova raspoređenih duž putanje projektila. Nasuprot tome, gyroid čini kontinuirana, glatko zakrivljena površina bez oštih granica, pa projektil kroz nju prolazi uz postepeno razdvajanje materijala umjesto niza prekida. Takva struktura pruža slab otpor prodoru u pravcu udara, uprkos tome što se u literaturi visoko vrednuje zbog povoljnog odnosa krutosti i mase pri statičkom i udarnom opterećenju raspoređenom po površini. Cubic i grid nalaze se između ova dva slučaja, sa pravilnom rešetkastom strukturom čiji zidovi djelimično stoje u pravcu prodora, čime pružaju umjeren, ali doslijedan otpor.

Uzeti zajedno, sva tri pristupa (eksperiment, numerička simulacija i analitički proračun) daju međusobno saglasne rezultate, čime se potvrđuje da je ponašanje 3D štampanih polimernih meta pri balističkom udaru ponovljivo i predvidivo, te da se pristupačnim proračunskim alatima može pouzdano opisati u granicama njihovih pretpostavki. Time su stvoreni preduslovi za dalje faze istraživanja, u kojima se broj potrebnih eksperimenata može smanjiti oslanjanjem na validirane modele [153].

3.2 Uticaj 3D štampanog materijala na sposobnost zaustavljanja projektila

Sljedeći pristup najavljen na početku ovog odjeljka, u kojem je geometrija ispune usvojena kao prva varijabla i, na osnovu rezultata iznesenih u sekciji 3.1, fiksirana na honeycomb tip ispune, u ovoj fazi istraživanja kao sljedeća varijabla uvodi se tip materijala. Kao što je ranije u radu više puta napomenuto, ekspanzija industrije aditivne proizvodnje sa sobom donosi i rapidan razvoj materijala za 3D štampu, sa posebnim akcentom na FDM tehnologiju. U skladu s tim, na tržištu je sve dostupniji širok spektar polimernih materijala koji sa sobom nose mehaničke osobine izmjerene u impresivnim brojkama. U zavisnosti od krajnjeg cilja upotrebe bira se i adekvatan materijal, pri čemu svaki od njih nosi određene prednosti i nedostatke za krajnju eksploataciju.

Veliki problem vezan za značajan broj dosadašnjih istraživanja, navedenih u pregledu literature, je u tome što se standardna ispitivanja mehaničkih osobina polimera, poput zatezne i savojne čvrstoće, sprovode pri kvazi-statičkim uslovima opterećenja i relativno niskim brzinama deformacije, dok je odgovor materijala pri udaru projektila brzine i preko 300 m/s suštinski drugačiji fenomen. Pri ekstremnom dinamičkom udaru dolazi do lokalizovanog i izrazito brzog porasta naprezanja i deformacije u uskoj zoni oko putanje projektila. Iz tog razloga se podaci iz tehničkih specifikacija proizvođača (TDS) u praksi često ne mogu direktno koristiti kao pouzdan pokazatelj balističkog ponašanja materijala, već isključivo kao orijentacioni parametar. Pošto je na osnovu standardizovanih i nestandardizovanih metoda ispitivanja materijala veoma teško, gotovo i nemoguće predvidjeti ponašanje 3D štampanih materijala prilikom ekstremnog dinamičkog udara, kao što je udar projektila različitog kalibra, dostupni izvori literature gotovo da i ne pružaju bilo kakve konkretne podatke o ovoj tematici.

Imajući u vidu da je jedan od glavnih naučnih doprinosa ove disertacije upravo obogaćivanje literature novim setovima eksperimentalnih podataka, u ovom odjeljku je opisan proces ispitivanja čak četiri različita polimerna materijala, od kojih su pojedini dostupni na tržištu tek od 2025. godine, pri identičnoj, već usvojenoj honeycomb geometriji ispune. Ispitivanja su sprovedena kako bi se moglo definisati koji su materijali najpogodniji za ovu primjenu, odnosno kako bi se pokušalo doći do zaključka koja grupa mehaničkih osobina (zatezna čvrstoća, savojna čvrstoća, krutost ili izduženje pri kidanju) predstavlja ključni uticajni parametar prilikom projektovanja 3D štampane balističke zaštite.

3.2.1 Materijali i metode

Nakon što je u odjeljku 3.1 eksperimentalno dokazano da honeycomb ispuna sa 50% gustine bilježi niže vrijednosti prosječnih dubina penetracije koje projektil ostvari, sve mete u ovom odjeljku su izrađene također sa 50% honeycomb ispunom. Radi konzistentnosti i ponovljivosti, sva četiri materijala, prečnika žice 1,75 mm, proizvedena su od strane slovenačkog proizvođača Azurefilm. Odabrani materijali su Strongman (ojačani PLA), PC/ABS, PCTG (varijacija PETG-a) i FLEX 98A (TPU).

Na štampaču Bambu Lab X1C izrađene su mete istog oblika kao i u prethodnom slučaju, dimenzija $60 \times 60 \times 160$ mm, uz zaobljenje ivica radijusom od 5 mm. Zaobljenje je dodano jer je, za razliku od PLA, prilikom 3D štampe pomenutih materijala moguća pojava krivljenja ivica na podlozi, uslijed naglih promjena smjera kretanja mlaznice na oštrim ivicama modela. Zaobljena geometrija garantuje skladnije, kontinuiranije kretanje alata, a samim tim i bolje prijanjanje na podlogu tokom cijelog procesa štampe. Dubina kvadra je smanjena sa 200 na 160 mm, jer je već u prvoj iteraciji testiranja pokazano da PLA sa honeycomb ispunom zaustavlja projektil 9×19 mm na dubini manjoj od 120 mm, pa dimenzija od 200 mm za ovu fazu istraživanja više nije bila neophodna.

Osnovni parametri štampe i masa kvadara (različita za sve materijale zbog različitih specifičnih gustina) za sva četiri materijala dati su u tabeli 20.

Tabela 20: Odabrani parametri 3D štampe kvadara za sve četiri ispitana materijala

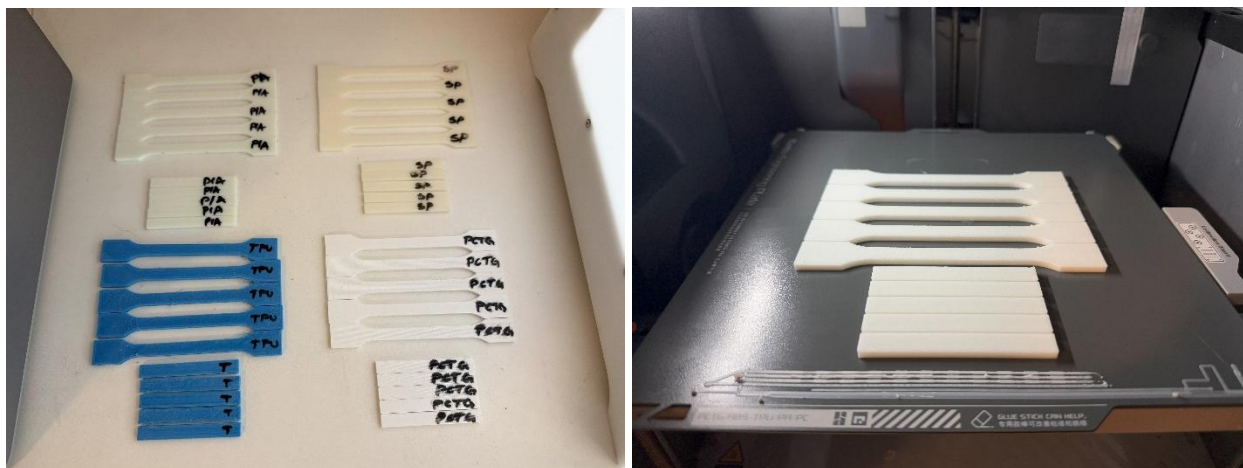
Parametar štampe	Strongman	PCTG	PC/ABS	TPU
Prečnik mlaznice	0,4 mm	0,4 mm	0,4 mm	0,4 mm
Visina sloja	0,2 mm	0,2 mm	0,2 mm	0,2 mm
Tip ispune	honeycomb	honeycomb	honeycomb	honeycomb
Gustina ispune	50%	50%	50%	50%
Temperatura štampe	220°C	260°C	280°C	250°C
Brzina štampe (vanjski zid/unutrašnji zid)	50 mm/s	40 mm/s	40 mm/s	100 mm/s
	80 mm/s	70 mm/s	70 mm/s	200 mm/s
Temperatura podloge	55°C	75°C	110°C	30°C
Masa kvadra	431 g	401 g	351 g	354 g

Na slici 58 prikazane su sve pripremljene mete, po tri komada za svaki materijal, radi statistički validnog eksperimenta.



Slika 58: 3D štampane mete od različitih polimera

Osim kvadara, od sva četiri materijala izrađene su i epruvete za ispitivanje na zatezanje i savijanje, u skladu sa dimenzijama prema standardima ISO 527-2 i ISO 178, po 5 komada, prikazane na slici 59.



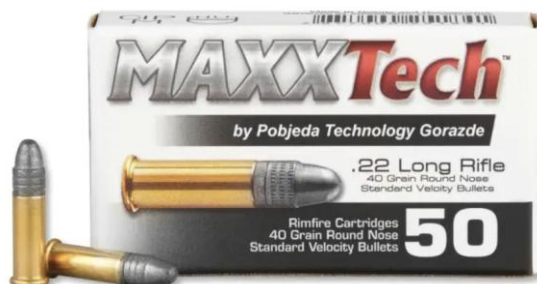
a)

b)

Slika 59: 3D štampane epruvete za ispitivanje mehaničkih osobina: a) svi materijali; b) orijentacija i položaj prilikom štampe

I u ovom slučaju je ispitivanje mehaničkih osobina sprovedeno kako bi se izvršila validacija vrijednosti preuzetih iz tehničke specifikacije proizvođača. Orijentacija štampe za kvadre je ista kao u prethodnom slučaju, prikazana na slici 53, dok su epruvete izrađene sa istim parametrima kao kvadri, uz izmjenu gustine ispune na 100%, u položaju prikazanom na slici 59b. Gustina epruveta se bira kao 100% da bi se u fokus stavile mehaničke osobine materijala, a ne odgovor struktura (suštinski isti argument kao i odabir 50% gustine ispune za kvadar). Sve mete su štampane pojedinačno, jedna po jedna, na istoj poziciji na podlozi štampača, kako bi se izbjegla eventualna devijacija rezultata nastala uslijed razlike u položaju komada na radnoj površini. Za sva četiri materijala je na podlogu, prije početka štampe, apliciran jedan sloj ljepila za papir proizvođača Staedtler, u cilju poboljšanja adhezije prvog sloja. Ovo ljepilo nije invazivno, a njegov uticaj na strukturu materijala je zanemarljiv, prije svega jer dolazi u kontakt samo sa jednom, donjom površinom otiska.

Nakon izrade, a i nakon što je u prethodnom odjeljku utvrđena smislenost i značaj ovakvog testiranja, za balistička ispitivanja materijala odabrana je laboratorija kompanije Pobjeda Technology Goražde (PTG), opremljena u skladu sa svim važećim standardima za ispitivanje municije i zaštitnih sredstava. Svaka meta je pojedinačno postavljena na fiksni sto, stezanjem u sredini uzorka, na udaljenosti od 10 m od usta cijevi. U skladu sa dostupnim resursima, za ovaj set ispitivanja odabran je kalibar 0,22 LR, također proizvođača PTG, LOT 2501, oznake standard velocity. Pakovanje i municija su prikazani na slici 60.



Slika 60: Municija kalibra 0,22 LR, PTG

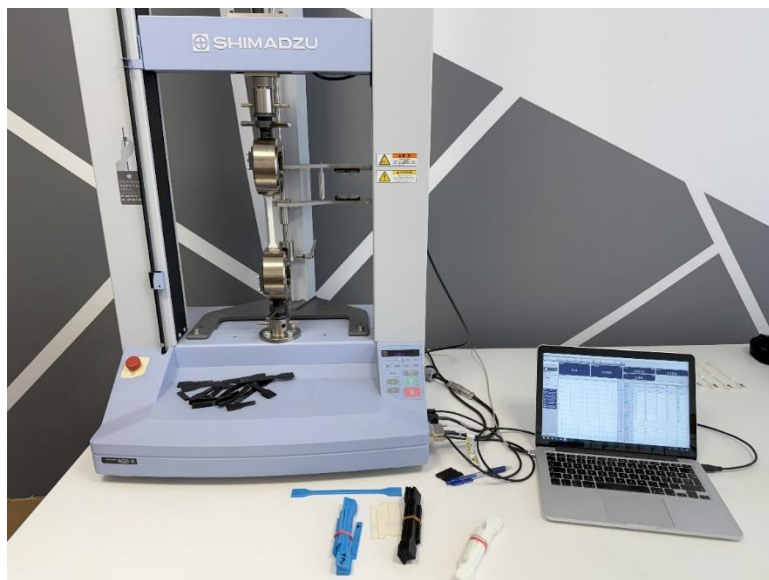
Ovaj projektil ima deklarisanu srednju masu od 2,5 g, geometrijski sličan oblik kao projektil 9×19 mm, te nižu brzinu na ustima cijevi u odnosu na projektil 9×19 mm. Upotreba kalibra 0,22 LR za ovo ispitivanje ne remeti koncepciju istraživanja, jer se u oba slučaja radi o direktnoj, relativnoj usporedbi dubine penetracije pri identičnim uslovima gađanja. Naime, u ranije opisanom radu [153] rađena je direktna komparacija dubine penetracije projektila kalibra 9×19 mm u mete izrađene od istog materijala, sa različitim geometrijama ispune, na osnovu čega je usvojena najbolja geometrija. Analogno tome, i u ovom odjeljku se rade direktne usporedbe dubine penetracije projektila u mete identične geometrije, ali izrađene od različitog materijala, uz upotrebu kalibra 0,22 LR kao referentnog projektila za relativno poređenje.

Testiranje je provedeno na opitnom poligonu PTG, dana 09.09.2025. godine, u potpuno zatvorenom prostoru, pri atmosferskim uslovima od 990 mbar pritiska okoline, temperaturi okoline od $20\text{ }^{\circ}\text{C}$, relativnoj vlažnosti od 70% i temperaturi municije od $21\text{ }^{\circ}\text{C}$. Za sva gađanja korišćena je municija Maxx Tech .22 Long Rifle, 40 grain, round nose, standard velocity, iz LOT-a 2501. Brzina na ustima cijevi mjerena je senzorom Kistler tip 6215, serijskog broja 5418217, a gađanje je izvršeno iz opitne cijevi broj 4893, sa fiksnog postolja oznake STZA12BM1. Prosječna izmjerena brzina na ustima cijevi za sva gađanja iznosila je 339,23 m/s, uz standardnu devijaciju od svega 3,11 m/s, što je malo rasipanje, pa je ova prosječna vrijednost usvojena kao referentna brzina za sva ispitivanja. Tačka ulaska projektila u metu je pri svakom gađanju bila u sredini površine 6×6 cm, a poligon i postavka mete su prikazani na slici 61.



Slika 61: Eksperimentalna postavka za balističko ispitivanje uticaja materijala na opitnom poligonu PTG

Za mehanička ispitivanja materijala korišćena je također univerzalna mašina za ispitivanje Shimadzu AGS-X, u laboratoriji za Aditivne tehnologije na Mašinskom fakulteta Univerziteta u Sarajevu. Ispitivanja su izvršena prema standardima ISO 527-2 i ISO 178, a proces određivanja zatezne čvrstoće je prikazan na slici 62.



Slika 62: Proces eksperimentalnog utvrđivanja zatezne čvrstoće polimera na univerzalnoj mašini za ispitivanje

Zatezne i savojne osobine su također izmjerene i evidentirane u softveru Shimadzu Trapezium-X.

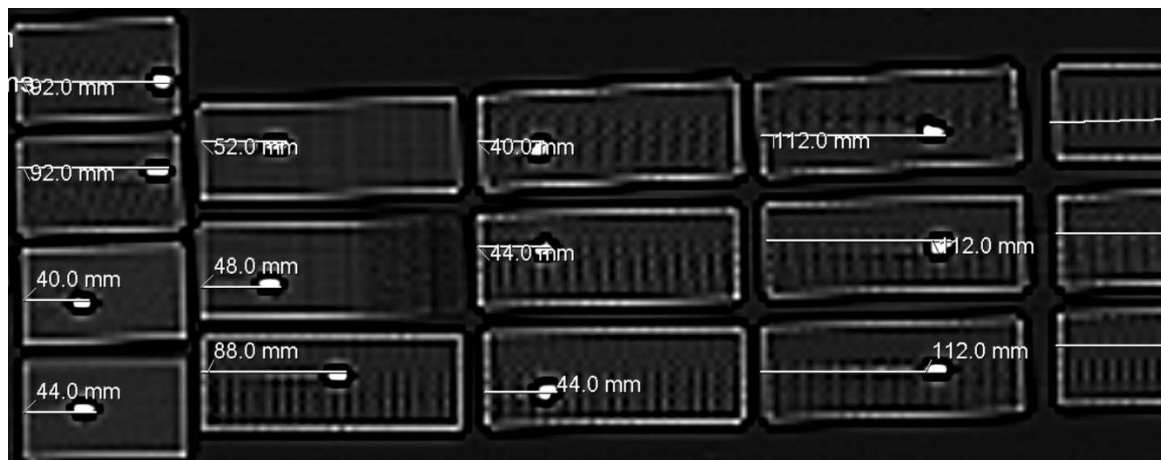
Pošto je i u ovom slučaju, radi preciznog i nedestruktivnog određivanja pozicije zaostalih projektila, primijenjena metoda CT snimanja, na rezultate mjerenja nema uticaj naknadna manipulacija projektilom niti eventualna nelinearnost putanje projektila unutar strukture. Snimanje je izvršeno pod istim uslovima i istom metodologijom kao u odjeljku 3.1 - uređajem Canon CT Prime, uz primjenu SEMAR modula za redukciju artefakata izazvanih prisustvom metalnog projektila, sa debljinom rekonstruisanog sloja od 0,5 mm. Za svaku metu su, radi tačnijeg određivanja stvarne dužine putanje, korišćene i koronalna i sagitalna multiplanarna rekonstrukcija, čime je obuhvaćeno i eventualno odstupanje putanje projektila od pravca normalnog na ulaznu površinu. Dubina penetracije je, kao i ranije, mjerena od ulazne površine mete do najdublje tačke do koje je projektil penetrirao. Postupak snimanja je prikazan na slici 63.



Slika 63: CT snimanje meta nakon balističkog ispitivanja, KCUS

3.2.2 Rezultati i diskusija

Nakon analize CT snimaka, dio prikazan na slici 64, ustanovljeno je da je u svakoj od dvanaest meta ostao zarobljen projektil, što je prvi dobar pokazatelj konzistentnosti postavke i uspješno sprovedenog ispitivanja.

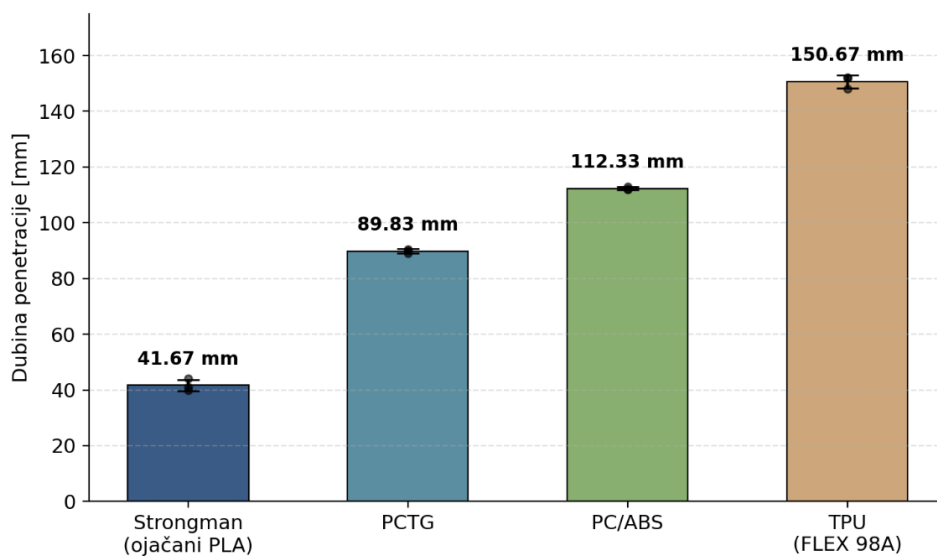


Slika 64: CT snimci sa vidljivim zarobljenim projektilima i dubinama penetracije

Izmjerene dubine penetracije za svaki uzorak, kao i prosječne vrijednosti po materijalu, prikazane su u tabeli 21, a na slici 65 je data vizuelna usporedba rezultata.

Tabela 21: Izmjerene dubine penetracije projektila kalibra 0,22 LR za svaki uzorak i prosječne vrijednosti po materijalu

Materijal	Uzorak 1 [mm]	Uzorak 2 [mm]	Uzorak 3 [mm]	Prosječna dubina penetracije [mm]
Strongman	44	40	41	41,67
PCTG	89	90	90,5	89,83
PC/ABS	112	113	112	112,33
TPU	148	152	152	150,67



Slika 65: Usporedni prikaz dubina penetracija za različite materijale

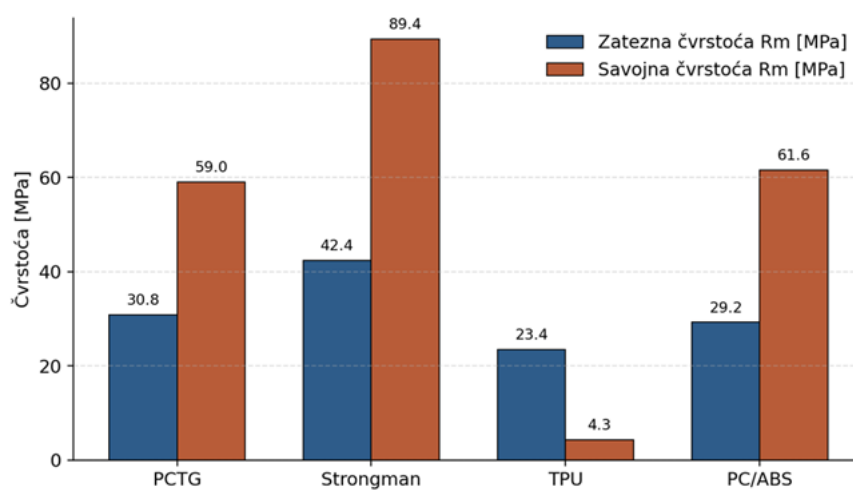
Tri uzorka po svakom materijalu daju međusobno vrlo bliske vrijednosti, dok su razlike između pojedinih materijala izuzetno velike. Dubina penetracije se, u zavisnosti od materijala, mijenja i za više od tri puta pri identičnoj geometriji i gustini ispune. Ovakav raspon jasno pokazuje da je izbor materijala, pored geometrije ispune, jedan od dominantnih uticajnih parametara u projektovanju 3D štampane balističke zaštite.

Što se tiče mehaničkih karakteristika dobijenih eksperimentalnim putem, rezultati zateznog i savojnog ispitivanja dati su u tabeli 22.

Tabela 22: Rezultati mehaničkih osobina prema ISO standardima za 3D štampane polimere

Materijal	F_m [N]	Zatezna čvrstoća R_m [MPa]	Modul elastičnosti pri zatezanju [GPa]	Izduženje [%]	F_m [N]	Savojna čvrstoća R_f [MPa]	Savojni modul elastičnosti [GPa]
PCTG	1233,82	30,84	1,40	4,56	78,62	58,97	2,67
Strongman	1695,14	42,40	2,50	6,68	119,17	89,38	5,21
TPU	937,20	23,43	—	371,23	5,71	4,28	—
PC/ABS	1170,00	29,24	1,72	4,10	82,09	61,57	3,42

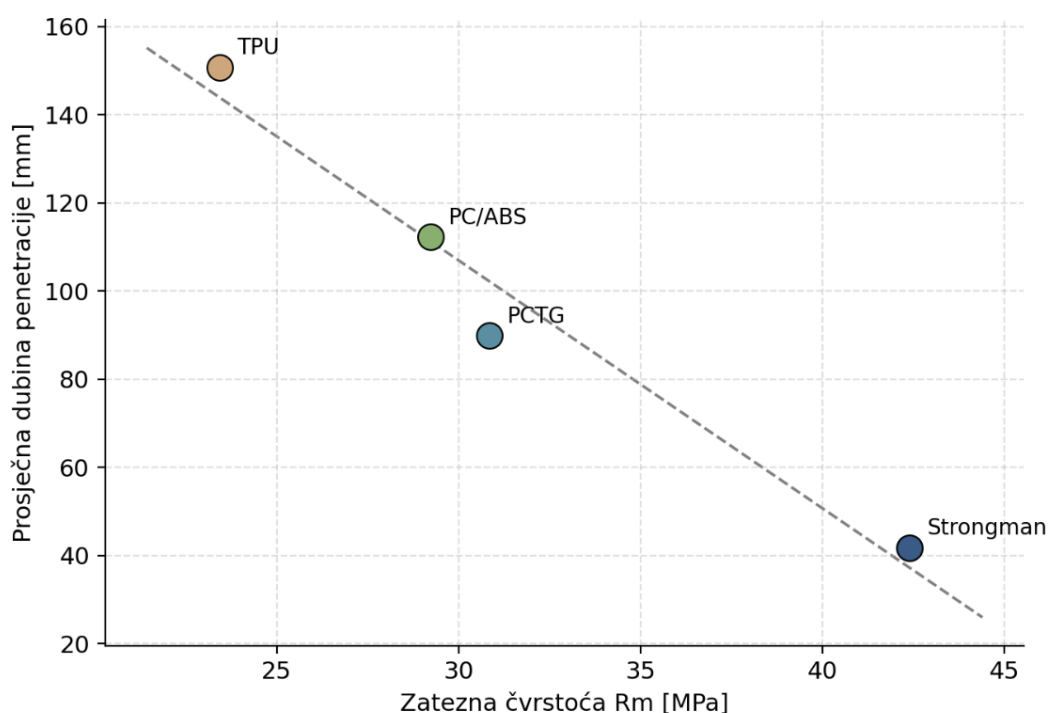
Na osnovu rezultata je evidentno da za TPU nije bilo moguće odrediti zatezni i savojni modul, s obzirom na to da se radi o izuzetno elastičnom materijalu. Uporedni prikaz rezultata je prikazan na slici 66.



Slika 66: Uporedni prikaz zatezne i savojne čvrstoće ispitanih materijala

Analiza rezultata dubine penetracije pokazuje pomalo i neočekivan rezultat: materijal Strongman, izrađen na bazi ojačanog PLA, ostvaruje daleko najbolje rezultate, sa prosječnom dubinom penetracije od svega 41,67 mm, više nego dvostruko manjom od drugoplasiranog PCTG-a, a više od tri puta manjom od TPU materijala. Rezultat je neočekivan prije svega zato što se u komercijalnoj praksi PC/ABS i slični polimeri po pravilu vezuju za primjene gdje se traži udarna žilavost, dok se TPU, kao izrazito elastičan materijal, često koristi upravo tamo gdje je potrebno apsorbovati energiju udara bez loma. Na osnovu takve reputacije bi se prije eksperimenta očekivalo upravo suprotno rangiranje. Kada se rezultati dubine penetracije uporede sa izmjerenim mehaničkim osobinama, uočava se jasna veza sa zateznom čvrstoćom materijala: redoslijed materijala po opadajućoj zateznoj čvrstoći (Strongman, PCTG, PC/ABS, TPU) gotovo u potpunosti odgovara redoslijedu po rastućoj

dubini penetracije. Zanimljivo je da isto pravilo ne važi u potpunosti i za zatezni modul, gdje PCTG ima niži modul od PC/ABS-a, a ipak bilježi bolji, odnosno manji prodor, što ukazuje da je za ovaj tip udara relevantnija otpornost materijala na lom, odnosno njegova čvrstoća, a ne isključivo krutost. Slična, ali nešto slabije izražena zavisnost postoji i kod savojne čvrstoće, gdje PC/ABS neznatno nadmašuje PCTG, iako je pri balističkom ispitivanju PCTG pokazao bolje rezultate. Ovo govori u prilog tome da je zatežno ispitivanje, po prirodi opterećenja, bliže mehanizmu koji dominira prilikom prolaska projektila kroz zid ćelije honeycomb strukture - lokalno, brzo rastezanje i kidanje materijala u uskoj zoni ispred i oko projektila - dok savojno ispitivanje, koje opisuje odgovor materijala na opterećenje raspoređeno duž raspona, slabije korespondira sa ovim specifičnim mehanizmom loma. Uprkos najvećoj masi kvadra izrađenog od Strongman polimera, razlika između PC/ABS i TPU razdvaja uticaj mase i zaustavne moći. Na slici 67 su vizuelno predstavljeni odnosi dubine penetracije i zatezne čvrstoće za različite materijale.



Slika 67: Odnos zatezne čvrstoće materijala i dubine penetracije projektila

Ovakvo ponašanje se može objasniti i prirodom samog udara. Za razliku od klasičnog udarnog (Izod/Charpy) opterećenja, gdje se udarna energija raspoređuje na veću zapreminu materijala i gdje dolazi do izražaja sposobnost materijala da tu energiju apsorbira kroz plastičnu deformaciju bez loma, prolazak projektila kroz uzak kanal predstavlja lokalizovan, izrazito brz proces probijanja, u kojem materijal na samoj putanji projektila mora da pruži dovoljan otpor da bi se projektil usporio i zaustavio prije nego što ga jednostavno razdvoji i pomjeri u stranu. Visoka zatezna čvrstoća Strongman materijala, u kombinaciji sa relativno visokim zateznim i savojnim modulom, obezbjeđuje veći otpor po jedinici površine u trenutku kontakta, pa je za probijanje istog poprečnog presjeka honeycomb zida potrebno znatno više energije. TPU, sa druge strane, praktično nema izraženu zateznu čvrstoću u klasičnom smislu i izuzetno je elastičan (izduženje pri kidanju od preko 370%), pa projektil kroz njega prolazi uz minimalan otpor, materijal se rasteže i razmiče umjesto da se lomi, što u konkretnom slučaju ne doprinosi zaustavljanju projektila, već naprotiv, olakšava mu prodor. PC/ABS, kao kompromisna kombinacija dvije žilave inženjerske plastike, daje umjeren, ali i dalje osjetno slabiji rezultat od Strongman materijala.

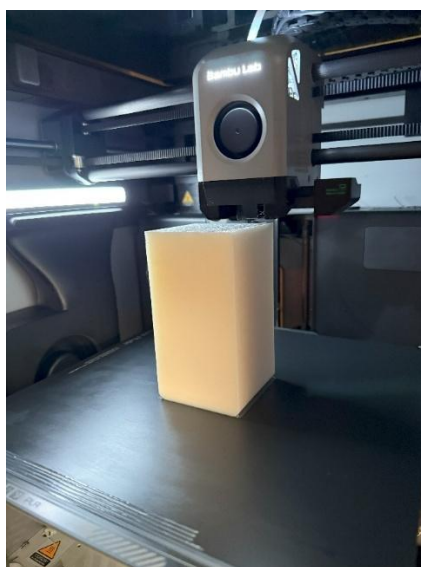
Kada se ovi rezultati posmatraju zajedno sa zaključcima iz prethodnog odjeljka, dolazi se do jasne slike: uz optimalan dizajn honeycomb geometrije ispune, kao optimalan materijal za ovu primjenu usvaja se Strongman, odnosno ojačani PLA. Kombinacija ova dva parametra, geometrije i materijala, daje do sada najbolji rezultat zaustavljanja projektila zabilježen u okviru ove disertacije, pri relativno skromnoj gustini ispune od 50%.

U uvodnom dijelu ove cjeline iznesena je jedna pretpostavka - da je orijentacija ispune u kojoj projektil putuje kroz zidove ćelija, a ne udara na njih okomito, optimalna orijentacija. Ovakva tvrdnja se mora eksperimentalno potkrijepiti, i upravo je to predmet narednog eksperimenta, opisanog u sljedećem odjeljku, koji se bavi isključivo uticajem orijentacije honeycomb ispune na balističku zaštitu.

3.3 Uticaj orijentacije ispune na sposobnost zaustavljanja projektila

Kao što je ranije pomenuto, hipoteza je glasila da je 3D štampana struktura otpornija kada projektil putanju kroz nju ostvaruje presijecajući zidove ispune, nego kada se kreće okomito na njih, odnosno duž ose ćelija. Ovakva pretpostavka je logična posljedica mehanizma opisanog u odjeljku 3.1, gdje je objašnjeno da honeycomb ispuna svoju otpornost duguje nizu zidova koje projektil presijeca jedan za drugim duž svoje putanje, pri čemu svaki od njih troši dio kinetičke energije kroz lokalno lomljenje i plastičnu deformaciju. Ipak, ovakva projekcija do sada nije bila potkrijepljena direktnim eksperimentom, već je proizašla isključivo iz posmatranja jedne, unaprijed usvojene orijentacije ispune. Cilj ovog odjeljka je da se ta pretpostavka provjeri eksperimentalno, poređenjem dvije krajnje orijentacije iste ispune pri identičnim uslovima gađanja.

Pošto je u odjeljku 3.2 kao optimalan kandidat za dalju optimizaciju usvojen Strongman sa honeycomb ispunom od 50%, izrađene su 3D štampane mete pripremljene za gađanje okomito na zidove ispune, odnosno duž ose ćelija. Zbog ograničenja samog procesa 3D štampe i nemogućnosti da se ista geometrija ispune odštampa u drugoj orijentaciji dok je meta postavljena horizontalno na podlogu, ovaj tip meta je štampan vertikalno, odnosno rotiran za 90° u odnosu na standardnu, horizontalnu postavku. Proces 3D štampe za ovaj slučaj je prikazan na slici 68.



Slika 68: 3D štampa rotirane mete

Ovakva promjena sa sobom nužno povlači i izmjenu orijentacije slojeva štampe, visine 0,2 mm, u odnosu na pravac gađanja. U prethodnom slučaju je gađano u ravni slojeva, dok je u ovom gađano okomito na njih. Pošto je visina sloja od 0,2 mm izuzetno mala, vizuelno i mehanički kvadar nalikuje

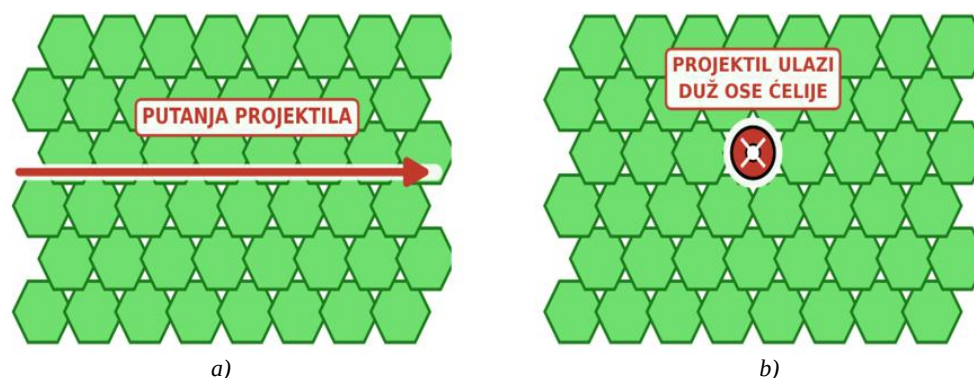
homogenom tijelu bez slojeva, pa je ova varijabla u ovoj analizi zanemarena, uz svijest da bi u detaljnijem razmatranju mogla imati određeni uticaj. Naime, za očekivati je da bi kvadar u koji se gađa okomito na ravan slojeva bio nešto otporniji, jer u tom slučaju ne dolazi do delaminacije slojeva. Delaminacija podrazumijeva razdvajanje susjednih slojeva materijala duž granice nanošenja, do kojeg dolazi kada opterećenje djeluje u pravcu normalnom na ravan slojeva, s obzirom na to da se, usljed same prirode FDM procesa, svaki novi sloj samo djelimično stapa sa prethodnim kroz ponovno taljenje tankog graničnog sloja, veza između slojeva je po pravilu slabija od čvrstoće materijala unutar samog sloja. Kako je udio ove varijable, s obzirom na minimalnu visinu sloja, procijenjen kao zanemarljiv u odnosu na dominantan uticaj same geometrije i orijentacije ispune, on nije posebno izdvojen iz analize, ali će biti uzet u obzir u nekoj od narednih faza istraživanja.

Ono što je suštinski najvažnije jeste da, osim promjene orijentacije, kvadri za horizontalno i vertikalno gađanje imaju identičnu masu od 431 g, čime je otklonjena mogućnost da razlika u dubini penetracije potiče od razlike u količini materijala, odnosno u efektivnoj gustini ispune.

Gađanje u kvadre okomito na uzorak ispune, u stranicu 6×6 cm, rađeno je pri istim uslovima kao i u odjeljku 3.2, također u laboratoriji PTG, istog dana, istom municijom kalibra 0,22 LR i pri istoj referentnoj brzini na ustima cijevi.

3.3.1 Rezultati i diskusija

Radi jasnijeg shvatanja terminologije i razlika u orijentaciji, na slici 69 je dat šematski prikaz dvije ispitane orijentacije honeycomb ispune u odnosu na putanju projektila.



Slika 69: Šematski prikaz orijentacije: a) projektil presijeca zidove susjednih ćelija; b) projektil putuje duž ose ćelije, okomito na njene zidove

Važno je napomenuti da raspored ćelija nije uniforman od najniže do najviše tačke kvadra, već se ćelije smiču (preklapaju) jedna preko druge sa promjenom visine.

Izmjerene dubine penetracije za obje orijentacije, kao i prosječne vrijednosti, prikazane su u tabeli 23.

Tabela 23: Izmjerene dubine penetracije projektila u zavisnosti od orijentacije honeycomb ispune (Strongman, 50% gustina ispune)

Pravac kretanja projektila	Uzorak 1 [mm]	Uzorak 2 [mm]	Uzorak 3 [mm]	Prosječna dubina penetracije [mm]
Kroz zidove ispune	44	40	41	41,67
Okomito na zidove ispune	52	48	44	48

Interesantan je podatak da je maksimalna izmjerena dubina penetracije u jednom slučaju (44,0 mm, orijentacija A) istovremeno i minimalna izmjerena dubina penetracije u drugom slučaju (44,0 mm, orijentacija B), odnosno da se rasponi rezultata dviju orijentacija dodiruju u jednoj tački, iako im se prosjeci jasno razlikuju. Ovo dodatno potvrđuje da razlika između orijentacija, iako po apsolutnoj vrijednosti nije drastična, nije ni slučajna, s obzirom na to da unutar svake grupe od tri uzorka rezultati ostaju međusobno bliski i konzistentni.

Uprkos relativno bliskim rezultatima - prosječna razlika iznosi svega 6,33 mm, odnosno oko 15% u odnosu na manju vrijednost, evidentno je da je za potrebe balističke zaštite efektivnije pozicionirati strukturu tako da projektil penetrira kroz njene zidove, radije nego duž ose ćelija. Ovakvo ponašanje se objašnjava istim mehanizmom koji je već opisan u odjeljku 3.1 povodom uspjeha honeycomb geometrije u odnosu na ostale tipove ispune. Kada projektil putuje kroz zidove ispune, on na svom putu presijeca čitav niz zidova poredanih jedan za drugim, pri čemu svaki od njih pruža zaseban, nezavisan otpor, a ukupna otpornost strukture predstavlja zbir tih pojedinačnih doprinosa. Kada, s druge strane, projektil putuje duž ose ćelije, on se najvećim dijelom svoje putanje kreće kroz šupljinu same ćelije, a zidove susreće samo povremeno, u trenucima prelaska iz jedne ćelije u susjednu. Ovo je direktna posljedica same prirode 3D štampe honeycomb ispune, u kojoj ćelije nisu poredane u pravim, neprekinutim cijevima od dna do vrha kvadra, već je svaki naredni sloj blago smaknut (preklapljen) u odnosu na prethodni, slično prepletu cigle u zidu. Zbog toga se ni u orijentaciji B ne formira jedna kontinuirana, prava šupljina kroz koju bi projektil mogao proći potpuno bez kontakta sa zidovima, čime je broj stvarnih prepreka na jedinici dužine putanje značajno manji nego u prvom slučaju, ali nikad jednak nuli. Ipak, treba biti svjestan da u uslovima u kojima nije moguće postaviti ovakvu konfiguraciju, udar projektila okomito na ispunu bi i dalje bio, u približno sličnoj mjeri, ublažen, jer je razlika između dvije orijentacije stvarna i mjerljiva, ali ne toliko izražena da bi orijentaciju okomitu na zidove trebalo smatrati neupotrebljivom. Ipak, postoji i značajno ograničenje ovakvog zaključka. Konfiguracija u kojoj projektil nailazi paralelno sa osom ćelija, a ne kroz njihove zidove, ima smisla samo ukoliko je razmak između zidova, odnosno prečnik same ćelije, manji od prečnika projektila. Naprimjer, ukoliko bi se gustina ispune smanjila, recimo na 25%, razmak između zidova bi se povećao, čime bi realno postojala mogućnost da projektili manjeg kalibra, poput 0,22 LR i sličnih, prođu kroz samu šupljinu ćelije, a da pritom uopšte ne dođu u kontakt sa njenim zidovima. Kod orijentacije u kojoj projektil presijeca zidove poprečno, ovakav scenario nije moguć, jer projektil svojom putanjom nužno prelazi preko niza zidova bez obzira na gustinu ispune. Upravo zbog toga se potvrđuje polazna hipoteza - za potrebe balističke zaštite je efikasnije postaviti strukturu tako da projektil pogađa direktno u zidove ispune, kako zbog većeg izmjerenog otpora u ispitanom slučaju, tako i zbog robusnosti ovakve konfiguracije na promjenu gustine ispune.

3.4 Uticaj gustine ispune na sposobnost zaustavljanja projektila

Jedan od najvažnijih uticajnih parametara je zasigurno gustina ispune. Osim što direktno utiče na masu štampanih dijelova i brzinu izrade, gustina ispune igra jednu od ključnih uloga kada je riječ o mehaničkim osobinama gotovih dijelova. Gustina ispune direktno određuje debljinu zidova ćelije i razmak između njih, što je već ranije navedeno kao jedan važan ograničavajući faktor kod orijentacije ispune (mogućnost da projektil manjeg kalibra prođe kroz šupljinu). Ipak, takva mana se u praksi djelimično nadomješta time što ćelije od početka do kraja svoje visine nisu potpuno uniformne, već su pomjerene, odnosno smaknute jedna u odnosu na drugu.

Značaj istraživanja gustine ispune je utoliko veći jer se, barem u teoriji, nameće i mogućnost da se, na primjer, 80%, 90% i 100% ispune ponašaju gotovo identično pri mehaničkim opterećenjima, dok veći procenat pritom troši više materijala i oduzima više vremena za štampu. Ovakav nalaz bi imao ogroman praktičan značaj za realnu primjenu, jer bi omogućio lakšu, jeftiniju i brže odštampanu zaštitu, bez žrtvovanja stvarnih zaštitnih svojstava.

Intuitivno, očekuje se dosljedan odnos - veća gustina ispune i manje šupljina direktno znače veći otpor i manju penetraciju. U praksi, sa različitim polimerima, taj odnos nije uvijek tako jednostavan.

Za PLA, što je u kontekstu ove disertacije posebno bitno s obzirom na to da je Strongman zapravo ojačani PLA, izvori literature poput [150] kroz niz eksperimentalnih istraživanja pokazuju da povećanje gustine ispune kod PLA uzoraka rezultira porastom čvrstoće, krutosti i žilavosti, ali da nakon otprilike 80% gustine ispune taj rast mehaničkih osobina počinje osjetno da usporava.

3.4.1 Materijali i metode

Za potrebe ovog istraživanja, s obzirom na to da u ranije navedenim radovima već postoje podaci za PLA, pristupilo se drugačijem izboru materijala radi obogaćivanja baze podataka, pa je kao materijal usvojen jedan od tehnološki najnaprednijih i najskupljih materijala za FDM štampu današnjice - Ultimaker PET CF. Riječ je o kompozitnom materijalu na bazi PET-a ojačanog kratkim karbonskim vlaknima, koji, prema tehničkoj dokumentaciji proizvođača, u odnosu na ostale kompozitne filamente odlikuje znatno jednostavnija štampa uz zadržavanje visokih mehaničkih performansi, kao i mogućnost naknadnog kaljenja štampanih dijelova radi dodatnog poboljšanja čvrstoće, krutosti i toplotne otpornosti [82].

Za potrebe ispitivanja izrađene su po tri mete dimenzija $6 \times 6 \times 10$ cm, sa gyroid geometrijom ispune, pri gustinama od 25%, 50% i 75%. Izbor gyroid geometrije za ovo ispitivanje zaslužuje posebno objašnjenje, s obzirom na to da je u odjeljku 3.1 upravo gyroid pokazao ubjedljivo najslabije rezultate od sva četiri ispitana tipa ispune, bez ijednog zaustavljenog projektila u meti debljine 200 mm. Cilj ovog odjeljka, međutim, nije poređenje geometrija, već izolovano ispitivanje uticaja same gustine ispune, nezavisno od toga koja je geometrija u prethodnim sekcijama ocijenjena kao najuspješnija. Gyroid je za ovu namjenu odabran iz nekoliko praktičnih razloga. Prije svega, u dostupnim izvorima literature koji se bave dinamičkim ispitivanjima uticaja gustine ispune, gyroid se uz kvadratnu geometriju izdvaja kao najčešće korišćena geometrija, što omogućava lakše poređenje ostvarenih rezultata sa postojećim istraživanjima. Osim toga, honeycomb geometrija, zbog velikog broja kratkih, isprekidanih putanja mlaznice duž zidova ćelija, zahtijeva znatno duže vrijeme štampe od gyroid geometrije, čija kontinuirana, glatko zakrivljena putanja mlaznice dodatno pogoduje i štampi sa abrazivnim, karbonskim vlaknima ojačanim materijalima poput PET CF, gdje se produženim zadržavanjem materijala u mlaznici pri ostrim promjenama pravca povećava rizik od začepljenja, pogotovo na starijoj i sporijoj generaciji 3D štampača poput Ultimaker S5. S obzirom na to da se u ovom odjeljku ispituje isključivo uticaj promjene gustine ispune pri fiksnoj geometriji, a ne apsolutna zaustavna moć strukture, ovakav izbor ne narušava validnost zaključaka o samoj gustini ispune, pri čemu ostaje realno očekivanje da bi apsolutne vrijednosti dubine penetracije za PET CF materijal, uz analognu honeycomb geometriju ispune, bile znatno povoljnije, u skladu sa zaključcima iz odjeljka 3.1.

3D štampa je izvršena na štampaču Ultimaker S5 Pro, uz obaveznu upotrebu posebne CC mlaznice, namijenjene za štampu abrazivnih materijala. Treba spomenuti i da je kombinacija Ultimaker 3D štampača, PET CF materijala i CC mlaznice potencijalno i do 10 puta skuplja kombinacija od Bambu Lab X1C i polimernih materijala korišćenih u ranijim eksperimentima. Na istom štampaču izrađene su i epruvete za zatezno i savojno ispitivanje, ispitane na ranije opisanoj kidalici Shimadzu AGS-X, prema standardima ISO 527-2 i ISO 178. Na slici 70 su prikazani procesi 3D štampe meta i epruveta na UM S5 Pro.



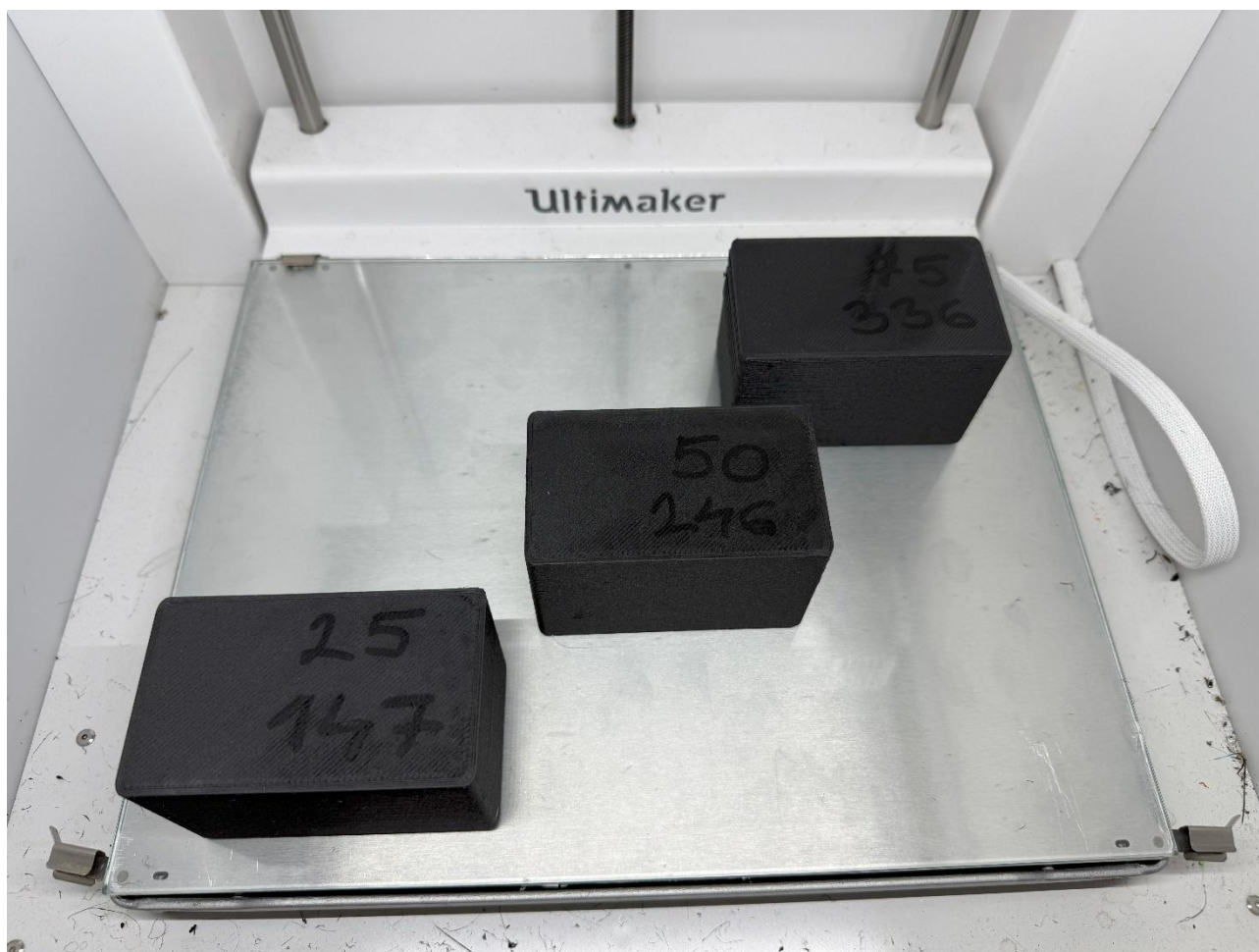
Slika 70: 3D štampa meta za balistička i epruveta za mehanička ispitivanja od PET CF na Ultimaker S5 Pro

Za pripremu G koda za izradu modela na UM, korišćen je softver za pripremu (*slicer*) UM Cura. U tabeli 24 su dati glavni parametri za 3D štampu (epruvete su izrađene sa gustinom ispune od 100%).

Tabela 24: Glavni parametri 3D štampe PET CF na UM S5 Pro

Parametar	Vrijednost
Prečnik mlaznice	0,6 mm
Visina sloja	0,2 mm
Tip ispune	Gyroid
Gustina ispune	25%/50%/75%
Temperatura štampe	270°C
Brzina štampe	30 mm/s
Temperatura podloge	80°C
Tip mlaznice	CC

Balističko ispitivanje je, kao i u prethodnom odjeljku, provedeno na poligonu PTG, sa istim lotom municije kalibra 0,22 LR, istim eksperimentalnim uslovima, alatima i opremom, pri čemu se gađalo kroz zidove ispune, a ulaz je na površini 6 x 6 cm. Mjerenje dubine penetracije je, kao i u svim prethodnim slučajevima, izvršeno na osnovu CT snimaka. Ove kvadre je moguće prepoznati i vizuelno zbog karakteristične „grublje“ strukture, koja je rezultat karbonskih vlakana u materijalu. Na slici 71 su prikazane mete sa 25%, 50% i 75%, sa navedenim masama u gramima. Odnos izmjerenih masa (147 : 246 : 336 g) ne odgovara omjeru 1:2:3 zato što svaki kvadar, pored ispune, sadrži i vanjske zidove te gornju i donju plohu, čija je masa konstantna i nezavisna od postotka ispune. Ta fiksna masa postoji i kod najmanje popunjenog kvadra, pa ukupna masa raste linearno s postotkom ispune, ali polazeći od te vrijednosti, a ne od nule.



Slika 71: Izgled meta od PET CF sa različitim gustinama ispune (vidljive u procentima i masa u gramima)

Svjesno se nije birala gustina ispune od 100%, jer u tom slučaju više nema smisla govoriti o geometriji i gustini ispune, već se gađa direktno u praktično homogenu metu u kojoj vladaju potpuno drugačiji mehanizmi loma. Ovakva konfiguracija je na inicijalnim probnim ispitivanjima pokazala izrazito slabu zaštitnu moć, budući da dolazi do delaminacije, kidanja slojeva i dijelova mete, te potpune penetracije municije uz veliko razaranje mete.

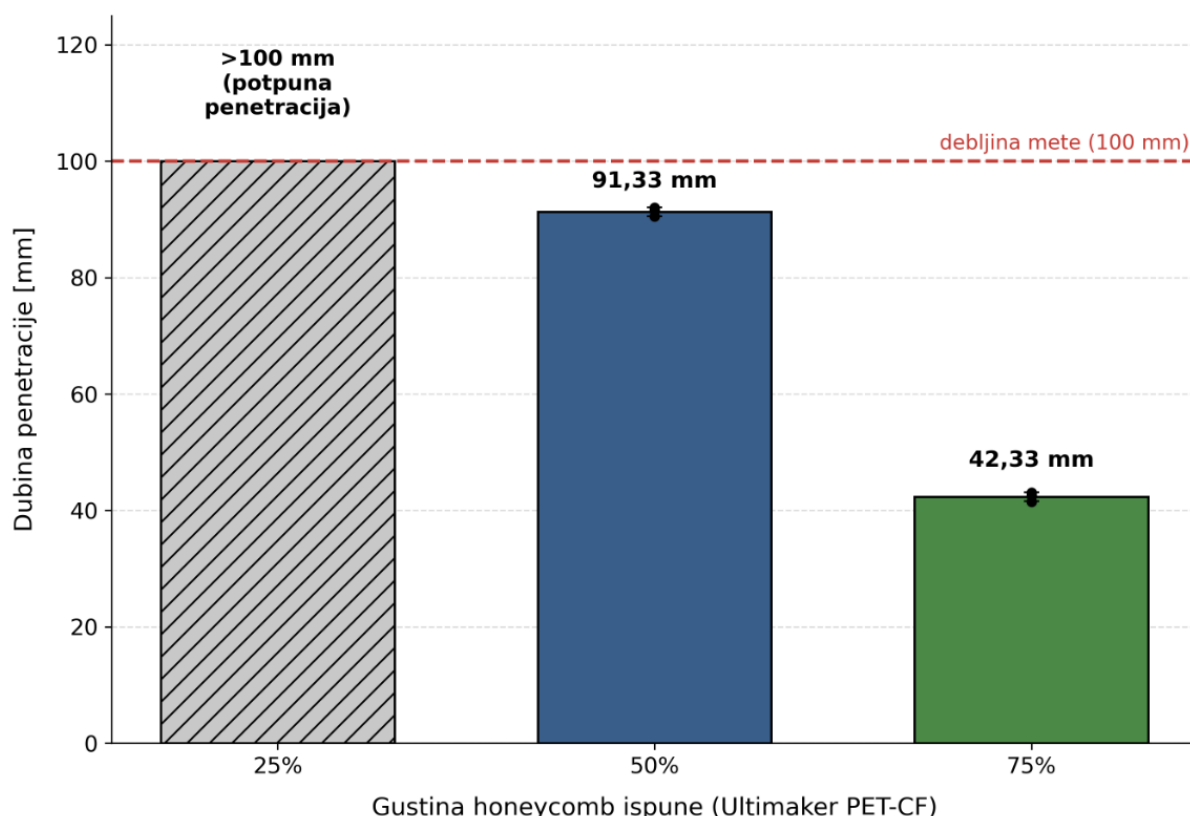
3.4.2 Rezultati i diskusija

Izmjerene dubine penetracije za sve tri gustine ispune, kao i prosječne vrijednosti, prikazane su u tabeli 25.

Tabela 25: Izmjerene dubine penetracije projektila kalibra 0,22 lr u 3D štampane mete izrađene od PET CF sa različitim gustinama ispune

Gustina ispune	Uzorak 1 [mm]	Uzorak 2 [mm]	Uzorak 3 [mm]	Prosječna vrijednost
25%	>100	>100	>100	Potpuna penetracija
50%	92	92	90	91,33
75%	44	40	43	42,33

Rezultati su radi lakše usporedbe vizuelno predstavljeni na slici 72.



Slika 72. Usporedba prosječno ostvarenih dubina penetracije projektila 0,22 LR u 3D štampanoj meti od PET CF sa različitim gustinama ispune

Ostvarene vrijednosti mehaničkih osobina prikazane su u tabeli 26.

Tabela 26: Rezultati mehaničkog ispitivanja osobina 3D štampanih epruveta od PET CF

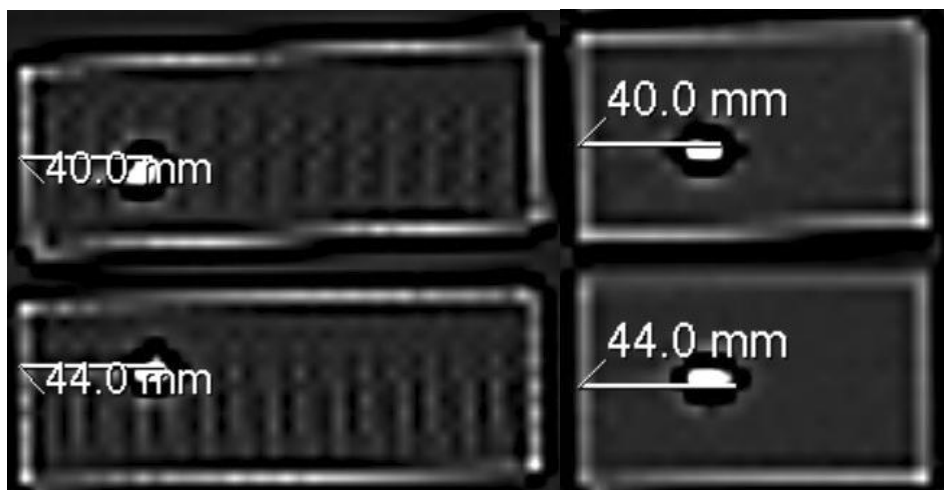
Materijal	F _m [N]	R _m [MPa]	Modul elastičnosti pri zatezanju [GPa]	Izduženje [%]	F _m [N]	Svojna čvrstoća R _r [MPa]	Svojni modul elastičnosti [GPa]
Ultimaker PET CF	1588,1	39,72	3,48	3,24	118,41	88,81	7,66

Na osnovu dobijenih rezultata potvrđuje se uvodna teza da gustina ispune značajno utiče na otpornost prepreke. Sama činjenica da gustina od 25% nije bila dovoljna da zaustavi projektil u meti debljine 100 mm, dok gustina od 50% u prosjeku zaustavlja projektil na dubini od 91,33 mm, a 75% zaustavlja projektil na dubini od svega 42,33 mm, više nego dvostruko manjoj u odnosu na 50%, dovoljno govori o razmjerama uticaja ovog parametra. Skok između 25% i 50% ispune je teže precizno kvantifikovati, s obzirom na to da je pri 25% ispune kod sva tri uzorka zabilježena potpuna penetracija mete, odnosno projektil je u potpunosti probio metu prije nego što se zaustavio, pa se tačna dubina penetracije u ovom slučaju ne može utvrditi, već je poznato samo da prelazi 100 mm.

Ipak, jedan od glavnih benefita aditivne proizvodnje jeste upravo mogućnost gotovo potpune kontrole proizvodnog procesa i svjesnog biranja kompromisa. Ponekad je opravdano svjesno ići na manju zaustavnu moć strukture, u zamjenu za manju masu, kraće vrijeme izrade ili nižu cijenu, u zavisnosti od konkretne namjene proizvoda.

Još jedan interesantan nalaz proizilazi iz poređenja ovih rezultata sa rezultatima ostvarenim u odjeljcima 3.2 i 3.3, gdje je Strongman materijal, pri honeycomb ispuni od 50%, ostvario sličnu prosječnu dubinu penetracije (41,67 mm) kao i PET CF, uz čak dva identična mjerenja. Iako se radi

o dva odvojena eksperimentalna seta sa različitom debljinom, gustinom i geometrijom ispune mete (100 mm u ovom slučaju, naspram 160 mm u prethodnom), pa strogo uzeto poređenje apsolutnih vrijednosti nije u potpunosti metodološki opravdano, red veličine ostvarenih rezultata, pokazuje da čak i tehnološki znatno napredniji i skuplji materijal, ojačan karbonskim vlaknima, ne donosi bolje rezultate u odnosu na jednostavan, ojačani PLA filament ni pri većoj gustini ispune. Naravno, za očekivati je bolje rezultate za PET CF ukoliko bi se koristila honeycomb geometrija ispune, često nazvana saćastim tipom. Ovo na svojevrsan način pokazuje koliko je napredovala nauka o polimernim materijalima, te da je sve izvjesnije da će ovakvi, relativno pristupačni materijali naći važnu ulogu i u vojnoj industriji. Pošto je statistički mala vjerovatnoća da se podudare čak dvije izmjerene dubine penetracije, na slici 73 su prikazani CT snimci sa izmjerenim dubinama, gdje su vidljivi i nedeformisani projektili. Lijeva kolona su uzorci od Strongman, a desna od PET-CF.



Slika 73: Izmjerene dubine penetracije za Strongman (50% honeycomb, lijevo) i PET CF (75% gyroid, desno)

Ovim je potvrđena i važnost gustine ispune kao jednog od najuticajnijih parametara u projektovanju 3D štampane balističke zaštite. Ipak, u ovom trenutku nije realno izdvojiti jednu, univerzalno optimalnu vrijednost gustine ispune, jer je, kao što je već navedeno, uvijek riječ o kompromisu između zaštitne moći, mase i utroška materijala i vremena izrade. Ono što se, na osnovu ostvarenih rezultata i podataka iz literature [150], može preporučiti kao smjernica jeste da se, gdje god je to praktično moguće, gustina ispune drži na nivou od oko 80%, s obzirom na to da upravo iznad te vrijednosti rast mehaničkih osobina počinje osjetno da usporava, čime se dodatno povećanje gustine iznad ove granice sve teže može opravdati u odnosu na porast mase i utrošenog vremena izrade.

3.5 Izrada sendvič panela sa optimizovanom 3D štampanom jezgrom

Kroz dosadašnje sekcije variran je i ispitan niz uticajnih faktora, sa ciljem utvrđivanja optimalne kombinacije parametara. Analizirana je geometrija ispune, materijal, orijentacija i gustina ispune, ali i nakon svih sprovedenih optimizacija, potpuno polimerna struktura i dalje zaustavlja projekte malog kalibra tek između 4 (kalibar 0,22 LR) i 12 (kalibar 9 x 19 mm) centimetara dubine. Treba imati u vidu da bi struktura debljine od 40 do 120 mm imala nešto manju otpornost nego u slučaju kada je debljina 160 mm ili 200 mm, zbog uticaja slobodne površine. To znači da bi realna, samostalna polimerna balistička zaštita, projektovana na ovaj način, morala biti nepraktično debela i teška za nošenje ili ugradnju. Ovakav zaključak prirodno otvara pitanje o hibridnim rješenjima, u kojima bi se iskoristili nalazi o optimalnim uticajnim parametrima i izvrsna sposobnost 3D štampanih struktura za apsorpciju energije, ali uz istovremeno unapređenje strukture u smislu smanjenja gabarita i povećanju otpornosti.

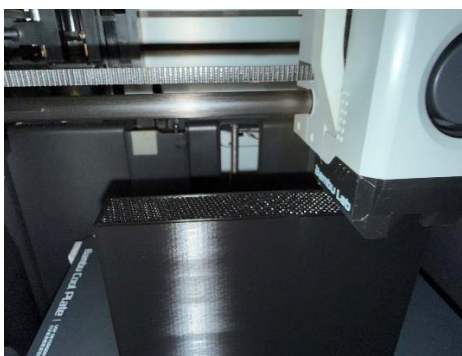
Bitno je naglasiti da sami mehanizmi i izvedeni zaključci o ulozi geometrije ćelije, orijentacije ispune i gustine ispune u odnosu na putanju projektila nisu ograničeni isključivo na polimere. S obzirom na to da su posljedica geometrije same strukture, a ne specifično polimernog ponašanja materijala, ovi nalazi se mogu direktno prenijeti i na metalne strukture, konvencionalno proizvedene, uz ograničenja koja nameću same proizvodne metode, kao i na aditivno proizvedene metalne i kompozitne strukture, poput metalnih honeycomb jezgri i sličnih rješenja, gdje bi ista logika optimizacije mogla dati znatno kompaktnija i lakša rješenja, zahvaljujući drastično višoj čvrstoći metala u odnosu na polimere. Ipak, pristup u kojem se različiti parametri ispituju direktno kroz 3D štampane polimerne strukture predstavlja vjerovatno najbrži, najsmisleniji i jedan od najjeftinijih načina ovakvog testiranja, te može poslužiti kao ulazna osnova za dalja, znatno složenija i skuplja ispitivanja na metalnim i kompozitnim sistemima. Posmatrano izolovano, tamo gdje polimerna honeycomb struktura sama po sebi nije dovoljna da posluži kao primarna barijera, njena prirodna uloga postaje uloga sekundarnog, energetsko-apsorbirajućeg sloja unutar hibridne, slojevite (sendvič) konfiguracije. U ovakvoj konfiguraciji tvrdi, kruti sloj, u ovom slučaju karbonski kompozit, prvi usporava i deformiše projektil, dok polimerno jezgro dodatno apsorbuje preostalu energiju kroz mehanizme koji su već detaljno okarakterisani u prethodnim odjeljcima. Karbonski sloj na suprotnoj strani sendviča ima zadatak da zaustavi projektil koji je prošao kroz prednji sloj i jezgro, a da pri tome nije potpuno izgubio kinetičku energiju, i tako spriječi njegov izlazak iz mete. Ovakav pristup se u potpunosti podudara sa istorijskim konstantnim obrascem u razvoju balističke zaštite - od kompozitnih oklopnih ploča drevnih civilizacija do modernih keramičko-kompozitnih prsluka, gdje hibridna, višeslojna rješenja gotovo uvijek nadmašuju monolitne materijale iste mase, jer svaki sloj cilja na drugačiju fazu zaustavljanja projektila: deformaciju i lomljenje vrha projektila, disipaciju preostale kinetičke energije, te konačno zadržavanje fragmenata.

Kao i u slučaju rasprskavajućih projektila, ovaj odjeljak daje praktičnu, primijenjenu nadogradnju na fundamentalna istraživanja iz prethodnih sekcija, pokazujući da spoznaje o parametrima strukture i materijala nisu samo akademski interesantne, već imaju i direktnu primjenu u realnoj, kombinovanoj zaštitnoj strukturi.

3.5.1 Materijali i metode

Kako bi se ocijenila dubina penetracije i efikasnost polimerno-kompozitnog sendvič panela, odlučeno je da se izrade tri identične mete, svaka sastavljena od po četiri polimerne ploče i ukupno deset slojeva karbonskih vlakana, radi postizanja veće ukupne debljine.

U skladu s tim, primarno je dizajnirana i 3D štampana ploča dimenzija 140×140×25 mm, sa parametrima koji su u prethodnim odjeljcima usvojeni kao optimalni: 50% honeycomb ispuna, materijal Strongman, gađanje kroz zidove ispune. Masa svake ploče iznosila je 390 g, a korišćeni parametri štampe identični su onima ranije navedenim za Strongman materijal. Proces 3D štampe na Bambu Lab X1C štampaču prikazan je na slici 74.

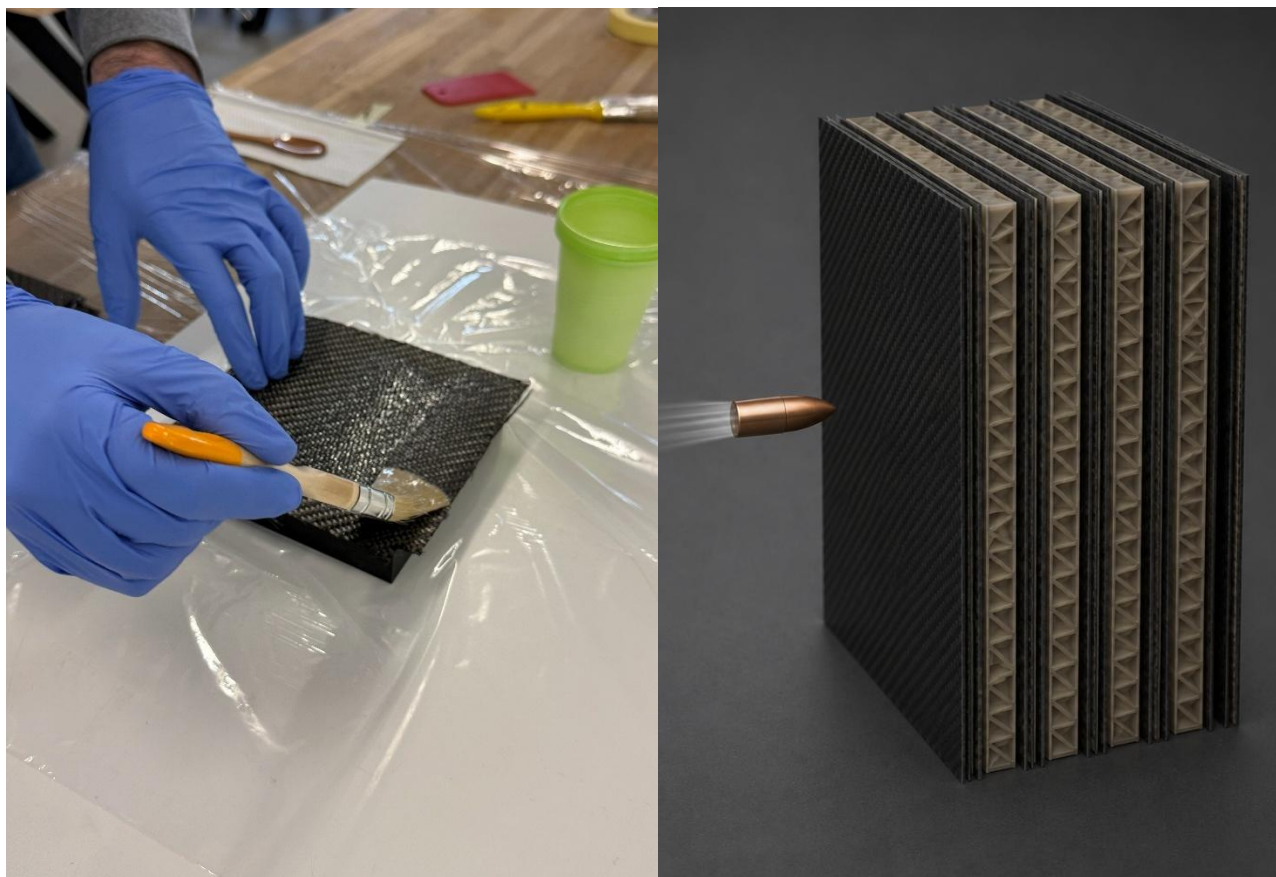


Slika 74: Proces 3D štampe ploče za sendvič panel, 50% honeycomb, BL X1C

Radi boljeg prijanjanja vezivne smole, prednja i zadnja površina svake ploče su obrađene finim brusnim papirom granulacije 120, nakon čega su očišćene etanolom čistoće 96% i ostavljene da se osuše. U međuvremenu je izvršeno miješanje epoksidne smole ES TCR30 sa odgovarajućim učvršćivačem, u masenom odnosu smola : učvršćivač = 100 : 60. Prema tehničkoj specifikaciji proizvođača, riječ je o smoli namijenjenoj za oblaganje i presvlačenje dijelova karbonskim vlaknima u procesima bez vakumiranja i naknadnog pečenja, koju odlikuju potpuno stvrdnjavanje nakon 12 sati, kristalna prozirnost, UV stabilnost, srednji viskozitet i osobina samoporavnjanja, uz dobru impregnaciju karbonskih, aramidnih i staklenih vlakana i dobro prijanjanje na širok spektar podloga [195].

Za izradu sendvič panela korišćeno je ranije pripremljeno karbonsko platno specifične težine 200 g/m² (tkanje Köper/Twill 2/2), materijal razvijen prema standardima za primjenu u vazduhoplovstvu, gdje se traže najzahtjevniji uslovi eksploatacije [196]. Karbonsko platno je isječeno na dimenzije 145 × 145 mm, kako bi se osiguralo potpuno prekrivanje površine ploče.

Nakon pripreme svih komponenti, pristupilo se izradi sendvič panela. Na jednu stranu 3D štampane ploče prvo je nanescena smjesa smole i učvršćivača, zatim je postavljen prvi sloj karbonskog platna, ponovo premazan smolom, na koji je postavljen drugi sloj karbonskog platna, te ponovo premazan. Višak smjese je pri svakom koraku istisnut. Isti postupak ponavljan je do postizanja konfiguracije: dva sloja karbona – ploča – dva sloja karbona – ploča – dva sloja karbona – ploča – dva sloja karbona – ploča – dva sloja karbona, odnosno ukupno deset slojeva karbonskog platna i četiri 3D štampane ploče po jednoj meti. Proces karbonskog oblaganja i prikaz jednog gotovog sendvič panela sa prikazom pravca gađanja su dati na slici 75. Prikaz je isključivo ilustrativnog karaktera radi boljeg razumijevanja postavke.



Slika 75: Proces izrade sendvič panela i njegov ilustrativni prikaz sa orijentacijom gađanja

Izrađene su tri ovakve mete, ali sa novom smjesom svaki put, zbog njenog ograničenog vremenskog trajanja. Kompletan pribor za izradu je prikazan na slici 76.



Slika 76: Pribor potreban za izradu sendvič panela karbon - polimer

Po završetku laminacije, na sendvič panel je ravnomjerno aplicirano opterećenje od 500 N, koje je zadržano tokom 72 sata u zatvorenom prostoru sa kontrolisanim uslovima, namjerno znatno duže od deklarisanog vremena punog stvrdnjavanja od 12 sati navedenog u tehničkoj specifikaciji proizvođača, radi dodatne sigurnosti da je došlo do potpunog umrežavanja smole i vezivanja slojeva. Nakon 72 sata, ivice panela su obrađene na konačnu dimenziju 140×140 mm, dok je finalna debljina iznosila približno 102,5 mm. Ukupna masa gotovog sendvič panela je iznosila približno 1640 grama, što odgovara površinskoj masi od približno 84 kg/m^2 .

Pripremljene mete su zatim podvrgnute balističkom ispitivanju na civilnom strelištu u Sarajevu, istog dana kada je vršeno i ispitivanje 3D štampane municije. Fotografija eksperimentalne postavke prikazana je na slici 77. I u ovom slučaju korišćen je pištolj Sig Sauer, kalibra 9×19 mm, kojim je gađano sa udaljenosti od 3 m, pri čemu je cijeli proces udara i penetracije zabilježen ranije detaljno opisanom ultra-brzom kamerom. Meta je bila fiksirana za postolje, a iza mete je postavljen balistički gel kako bi zarobio projektil ukoliko dođe do pune penetracije.



Slika 77: Postavka sendvič panela za eksperimentalno testiranje (nakon gađanja)

3.5.2 Rezultati i diskusija

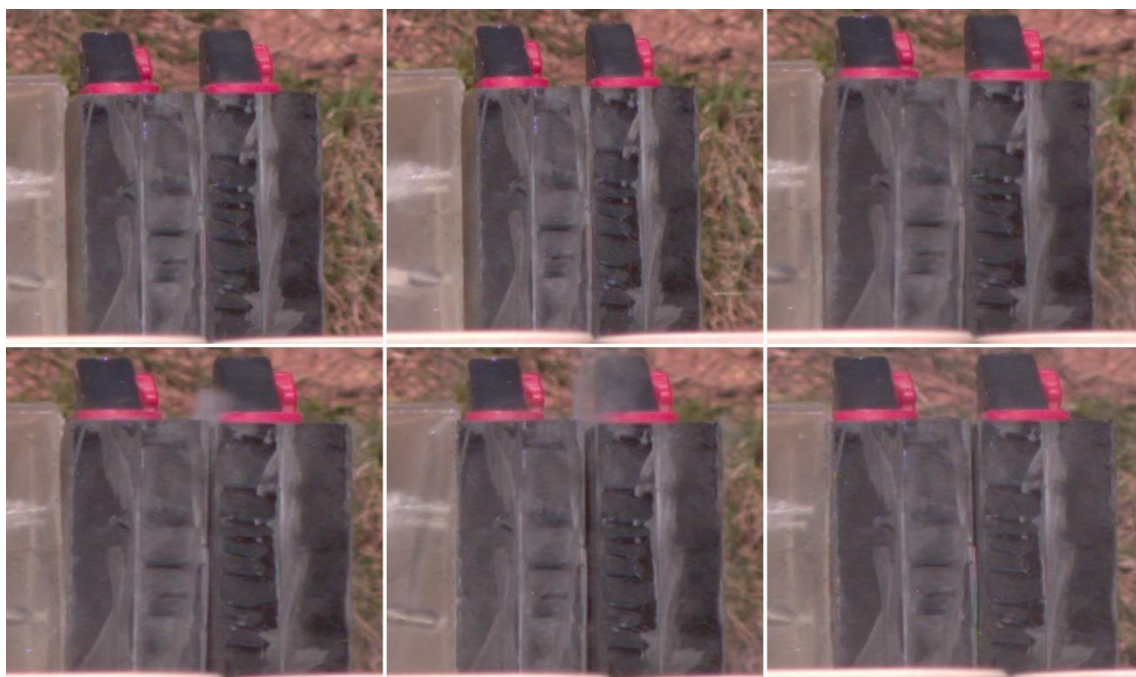
U svaku metu je gađano samo jednom, kako bi se izbjeglo kumulativno oštećenje strukture od strane prethodnog udara i time narušila validnost mjerenja. Postignuti rezultati su interesantni i prilično konzistentni - u dva slučaja, projektil je zaustavljen nakon prolaska kroz drugu 3D štampanu ploču, od strane karbonskog sloja koji se nalazio iza nje, pri čemu je na tom mjestu vidljivo izraženo oštećenje karbona i naredne ploče, prikazano na slici 78.



Slika 78: Izgled sendvič panela nakon gađanja i pozicija zaustavljanja projektila kalibra 9 x 19 mm

U trećem slučaju, projektil je prošao i kroz sloj karbona iza druge ploče i penetrirao u treću ploču svega nekoliko milimetara, prije nego što se zaustavio. Prosječna dubina penetracije za sve tri mete iznosi 53 mm.

Sekvenca snimljena ultra-brzom kamerom za jedan od ova tri slučaja, prikazana na slici 79, dodatno potvrđuje opisano ponašanje.

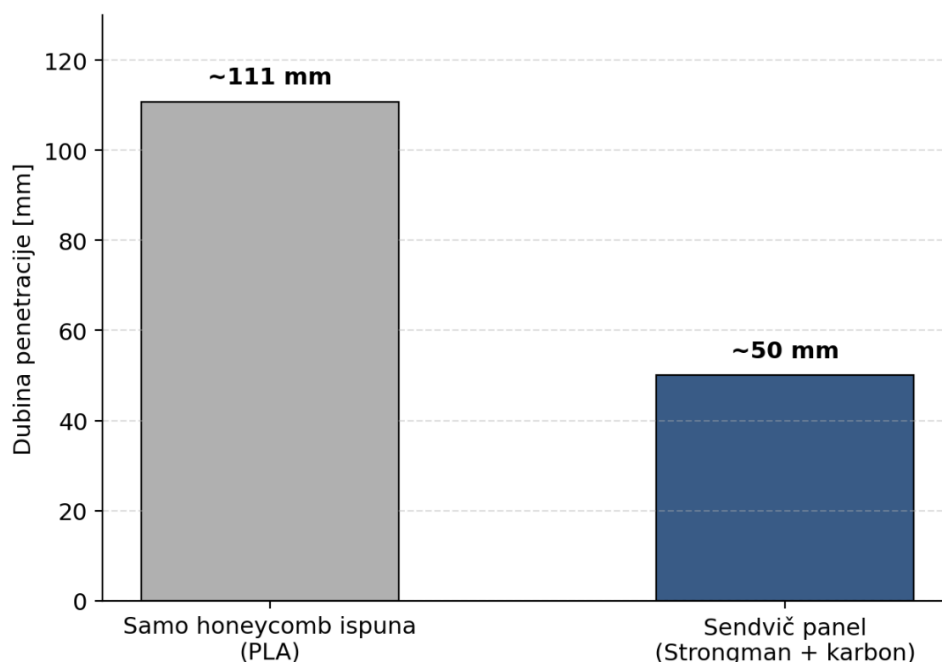


Slika 79: Snimak sa ultrabrze kamere - udar i penetracija projektila 9 x 19 mm u sendvič panel

Na snimku se jasno vidi trenutak udara projektila u metu, reakcija mete, te trenutak konačnog zaustavljanja od strane sloja karbona postavljenog između druge i treće ploče. U tom trenutku dolazi i do izraženog razdvajanja slojeva sendviča na mjestu udara - sistem se lokalno raslojava, pri čemu projektil ostaje zarobljen unutar polimerne ploče, dok karbonski sloj koji ga je zaustavio ostaje vidno oštećen, sa oštećenjem izraženijim na suprotnoj, izlaznoj strani u odnosu na pravac udara.

Ovim je prije svega potvrđeno da hibridna kombinacija polimernog jezgra i karbonskih slojeva ima smisla, i to znatno više nego što bi se moglo očekivati na osnovu prostog zbira ponašanja pojedinačnih komponenti. Karbonski kompozit sam po sebi, iako izuzetno krut i čvrst, ne posjeduje sposobnost da apsorbira energiju udara na način na koji to čini polimerna honeycomb struktura - kod karbona dolazi do lokalnog loma i delaminacije vlakana na maloj površini oko mjesta udara, bez šireg rasprostiranja opterećenja kroz zapreminu materijala. S druge strane, sam polimer, kako je pokazano u prethodnim sekcijama, nema dovoljnu tvrdoću i čvrstoću da odmah pri kontaktu uspori i deformiše vrh projektila, već ga zaustavlja tek postepeno, praktično nedeformisanog, kroz seriju uzastopnih otpora zidova ćelija duž same putanje. Kombinacijom ova dva mehanizma dobija se struktura u kojoj prednji sloj karbona pri samom udaru deformiše i djelimično usporava projektil, polimerno jezgro dalje apsorbira najveći dio preostale kinetičke energije kroz mehanizme detaljno okarakterisane u ranijim odjeljcima, dok naredni slojevi karbona, raspoređeni između ploča, dodatno usporavaju i na kraju zaustavljaju projektil, sprječavajući ga da napusti metu.

Značaj ovakvog pristupa primijetan je kroz direktno poređenje sa rezultatima objavljenim u radu [153], gdje je meta izrađena potpuno od PLA, sa honeycomb ispunom, bez ikakve kombinacije sa drugim materijalima, gađana istim pištoljem i istom municijom, pri istim uslovima, ostvarila prosječnu dubinu penetracije od 110,72 mm. Sendvič panel ispitan u ovom odjeljku zaustavlja isti tip projektila na prosječnoj dubini od svega 53 mm, što predstavlja više nego dvostruko manju dubinu penetracije po jedinici iskorišćene debljine materijala u odnosu na čisto polimernu strukturu (ulogu igra i to što je Strongman sam po sebi jača izvedba PLA, ali se porede informativno radi iste baze), slika 80.

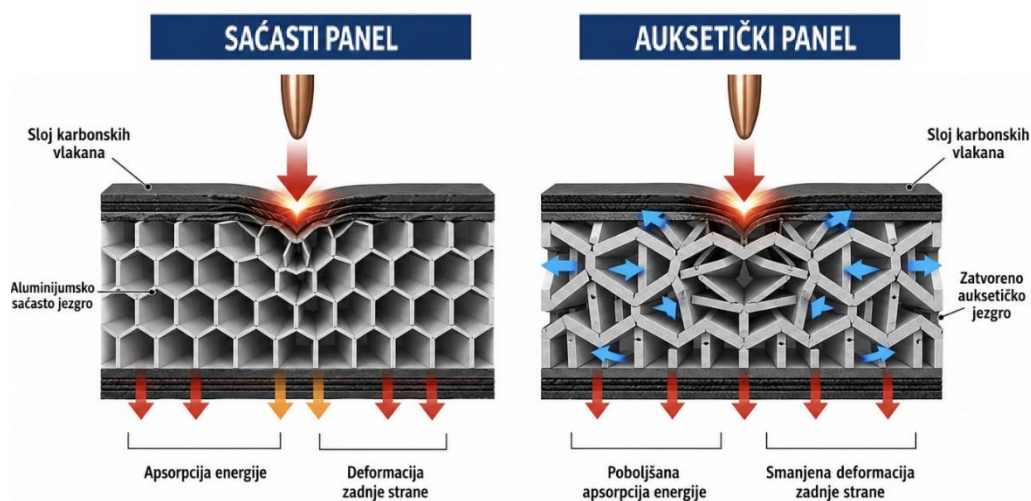


Slika 80: Usporedba dubine penetracije za slučaj čisto polimerne strukture i sendvič panela

Važno za naglasiti je da su oba slučaja imala isti broj zidova (po 2) prilikom 3D štampe, kako bi se sačuvao strukturalni integritet cjeline i zatvorila ispuna sa svih strana. Ovakav rezultat potvrđuje polaznu tezu iz uvida ovog odjeljka - da samostalna polimerna zaštita, uprkos svim ranije sprovedenim optimizacijama, ostaje ograničena, dok hibridna, slojevit konfiguracija drastično poboljšava odnos zaštitne moći i utrošenog materijala.

Vrijedi napomenuti i da, s obzirom na to da je u dva od tri slučaja projektil zaustavljen već nakon druge ploče, preostale dvije ploče sendviča u tim slučajevima praktično nisu bile iskorišćene, što ukazuje na to da bi se ukupna debljina panela vjerovatno mogla smanjiti bez značajnog gubitka zaštitne moći. Ovo otvara prostor za dalju optimizaciju broja i rasporeda slojeva, koja izlazi iz okvira ovog rada, ali predstavlja logičan pravac nastavka istraživanja. Osim smanjenja gabarita, dalja istraživanja bi trebalo usmjeriti i na ispitivanje različitih kombinacija materijala, na primjer, zamjenu polimernog jezgra materijalima poput PET CF, variranje broja slojeva karbonskog i njihovog rasporeda unutar sendviča, kao i upotrebu drugih tipova ojačanja (aramidna ili staklena vlakna), čime bi se dodatno mogao unaprijediti odnos zaštitne moći, mase i cijene ovakve strukture.

Posebno perspektivan pravac za nastavak istraživanja predstavljaju i strukture zasnovane na negativnom Poasonovom koeficijentu, poznate kao auksetične strukture, koje su u novije vrijeme sve popularnije upravo u kontekstu balističke i udarne zaštite. U okviru ove disertacije auksetične strukture nisu razmatrane, prije svega zato što ne predstavljaju standardan, konvencionalan tip ispune dostupan u okviru uobičajenih softvera za pripremu G koda za 3D štampu, dok je jedna od polaznih ideja cijelog istraživanja bila da se, korišćenjem što jednostavnijeg i svima dostupnijeg pristupa, dođe do što efikasnijih rješenja. Dodatna specifičnost auksetičkih struktura jeste i to da se u praksi najčešće ne štampaju kao zatvorena unutrašnja ispuna sa zidovima sa svih strana, poput honeycomb geometrije korišćene u ovoj disertaciji, već kao samostalna, otvorena rešetkasta struktura, bez punih vanjskih zidova koji bi je zatvarali i strukturno objedinjavali. Upravo iz tog razloga je za auksetične strukture sendvič konfiguracija, sa čvrstim licima od karbonskog kompozita koja preuzimaju ulogu strukturnog zatvaranja i objedinjavanja jezgra, prirodno i gotovo neophodno rješenje, za razliku od honeycomb ispune korišćene u ovom istraživanju, koja je, zahvaljujući zatvorenim zidovima, mogla biti testirana i kao samostalna, nezavisna struktura. Slika 81 ilustruje konceptualnu razliku u mehanizmu odgovora klasičnog sačastog i auksetičkog panela pri udaru projektila, gdje auksetičko jezgro, usljed svoje karakteristične geometrije, pri opterećenju teži da se dodatno zbije prema unutra umjesto da se širi, čime se ostvaruje poboljšana apsorpcija energije i smanjena deformacija zadnje strane panela.



Slika 81: Konceptualna razlika mehanizma odgovora na udar projektila za različite tipove struktura u sendvič panelima

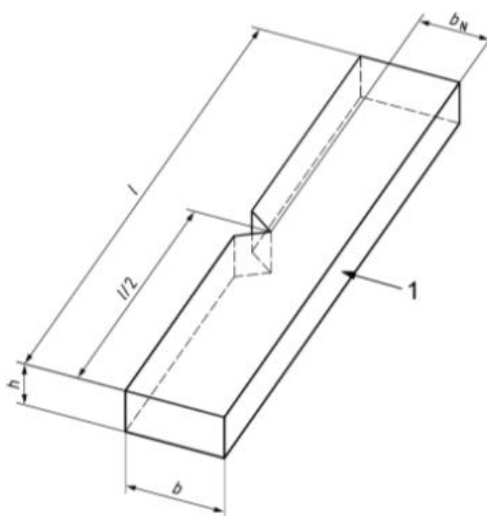
3.6 Uticaj temperaturnog kondicioniranja na udarnu žilavost 3D štampanih materijala

Iako je materijal Strongman u prethodnim sekcijama izdvojen kao najbolji kandidat na osnovu balističkih performansi, postoji opravdana bojazan da on, kao i svaki drugi polimer, mijenja svoje mehaničke osobine u zavisnosti od temperature kojoj je izložen. U vojnoj primjeni je ovaj aspekt izuzetno bitan, s obzirom na to da je oprema u realnim uslovima eksploatacije često izložena temperaturnim ekstremima - od pustinjske vrućine i direktnog sunčevog zračenja do arktičkih uslova i dugotrajnog boravka na otvorenom pri niskim temperaturama, dok se najveći broj eksperimentalnih ispitivanja i karakterizacija polimernih materijala, uključujući i sva dosadašnja ispitivanja u ovoj disertaciji, sprovodi isključivo na sobnoj temperaturi. Slično kao što je u poglavlju 2 pokazano da temperatura cijevi ima fundamentalan uticaj na ponašanje 3D štampanih projektila, opravdano je pretpostaviti da promjene temperature utiču i na materijal odabran za izradu balističke zaštite, pa je stoga neophodno eksperimentalno provjeriti u kojoj mjeri temperaturni uslovi utiču na mehanički odgovor materijala korišćenih u ovom istraživanju.

3.6.1 Materijali i metode

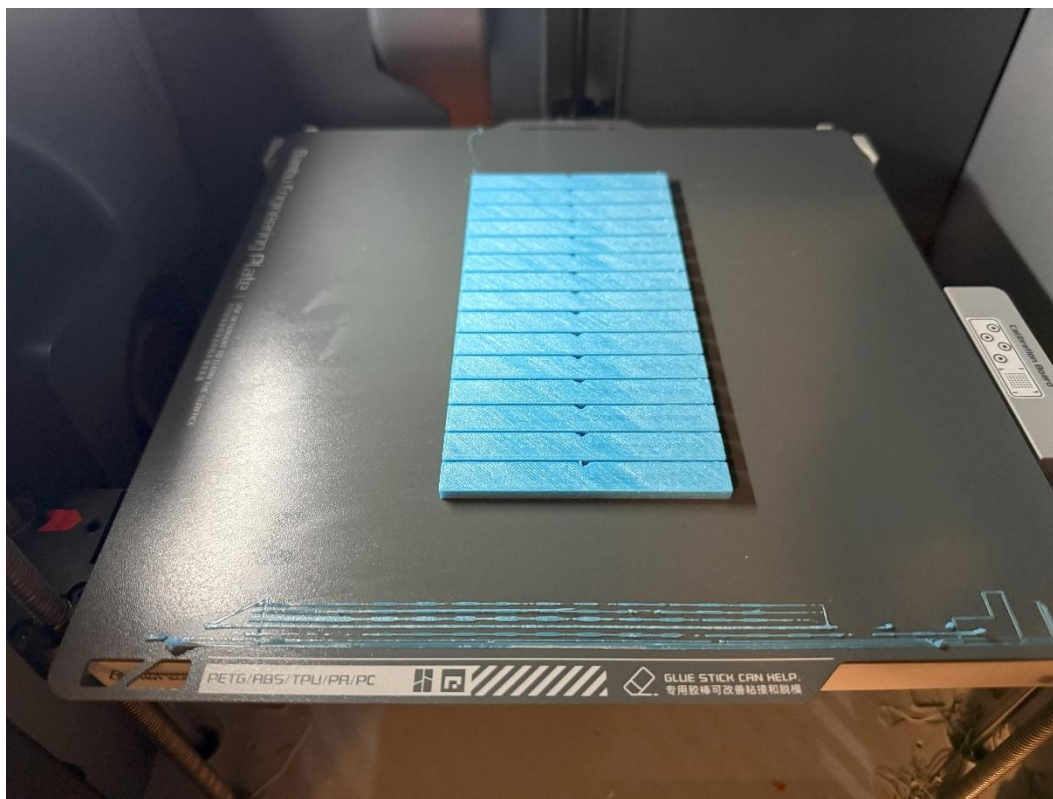
U dosadašnjem toku istraživanja mehaničke osobine materijala ispitivane su isključivo na zatezanje i savijanje, metodama koje, zbog ograničenih resursa, nije bilo moguće izvesti pri drugačijim temperaturnim uslovima. Plan je bio da se epruvete testiraju neposredno nakon temperaturnog kondicioniranja, ali s obzirom na to da nije bila dostupna mašina sa ugrađenom komorom za kondicioniranje, a imajući u vidu i trajanje samog ispitivanja na univerzalnoj mašini za testiranje, pristup je morao biti prilagođen. Iz tog razloga je odabrano ispitivanje udarne žilavosti prema standardu ISO 179-1, koji posebno tretira plastične materijale i, za razliku od zateznog i savojnog ispitivanja, zahtijeva znatno kraće vrijeme same izvedbe testa, čime je kondicioniranje neposredno prije ispitivanja postalo praktično izvodljivo [197].

Ispitivanja su provedena na mašini za udarna testiranja, turskog proizvođača Bulut Makina, pri čemu je, u skladu sa standardom, korišćena metoda sa Charpy klatnom. Za potrebe testiranja su, prema dimenzijama koje standard predviđa u vidu intervala, dizajnirane i izrađene epruvete sa zarezom, koji predstavlja kontrolisani koncentrador napona i osigurava da do inicijacije oštećenja i loma dođe unutar unaprijed definisane zone epruvete. Izgled i osnovni elementi epruvete prema ISO 179-1 standardu su predstavljeni na slici 82.



Slika 82: Izgled i dimenzioni odnosi epruvete za ispitivanje prema standardu 179-1 [197]

Epruvete su štampane i na Bambu Lab X1C i na Ultimaker S5 Pro štampaču, prema ranije navedenim parametrima za odgovarajuće materijale, uz gustinu ispune od 100%. Dimenzije epruvete usvojene su na $80 \times 10 \times 4$ mm, što predstavlja čest izbor u radovima poput [130,131], a izgled epruveta nakon izrade je dat na slici 83.



Slika 83: Epruvete 3D štampane prema ISO 179-1 standardu, TPU, Bambu Lab X1C

S obzirom na to da se radilo o termalnim ispitivanjima, bilo je neophodno kontinuirano mjerenje temperature epruveta neposredno prije i tokom ispitivanja, što je rađeno profesionalnom termalnom kamerom proizvođača UNI-T, oznake UTi716S. Radi validne komparacije, epruvete su ispitivane na tri temperaturna nivoa: nakon dva sata hlađenja na -20°C , bez kondicioniranja, na temperaturi laboratorije od 20°C , te nakon dva sata zagrijavanja u inkubatoru na 40°C . Zagrijavanje je ostvareno profesionalnim laboratorijskim inkubatorom Innova 42, dok je hlađenje izvršeno u industrijskom zamrzivaču proizvođača Dr. Dairei. Temperaturno kondicioniranje i ispitivanje izvršeno je u okviru Istraživačko-razvojnog centra Internacionalnog Univerziteta u Sarajevu, u saradnji sa Centrom za napredne tehnologije u Sarajevu, s obzirom na značajne praktične implikacije ovakvog testiranja za dizajn različitih sistema. Za svaki od tri temperaturna nivoa izrađeno je po pet epruveta za materijale Strongman, PCTG, PC/ABS i TPU, dok je za PET CF, koji u ovom slučaju predstavlja sporedni materijal usljed svoje kompozitne strukture, izrađeno samo pet epruveta, ispitanih isključivo na sobnoj temperaturi.

3.6.2 Rezultati i diskusija

Ispitivanja su prvo provedena na sobnoj temperaturi, nakon čega je, uzorak po uzorak, ispitivanje ponovljeno nakon dva sata kondicioniranja, bez naknadnog hlađenja ili zagrijavanja, na istoj temperaturi na kojoj su uzorci kondicionirani. Očitavanja su preuzeta direktno sa mašine, koja automatski izračunava prosječnu vrijednost udarne žilavosti za svaku seriju od pet epruveta, na osnovu definisanih dimenzija epruveta. Postavka epruveta za mjerenje i mjerenje temperature su

prikazani na slici 84, sa vidljivim razlikama u termalnom otisku nekondicionirane i ohlađene epruvete. V-zarez je orijentisan prema standardu, na suprotnoj strani u odnosu na stranu koja trpi udar klatna.



Slika 84: Epruvete pozicionirane za ispitivanje i njihovo mjerenje, sobna temperatura (lijevo) i ohlađena (desno)

Rezultati ispitivanja su prikazani u tabeli 27.

Tabela 27: Vrijednosti udarne žilavosti ostvarene pri ispitivanju nakon temperaturnog kondicioniranja materijala

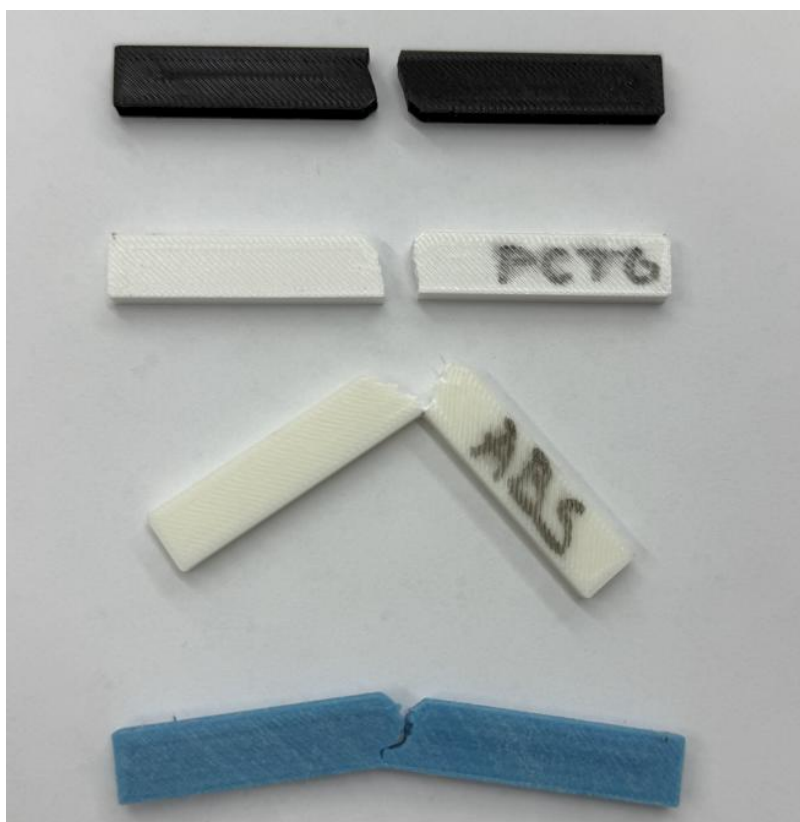
Materijal	-20°C [kJ/m ²]	+20°C [kJ/m ²]	+40°C [kJ/m ²]
Strongman	0,9	1,08	1,24
PCTG	0	1,8	0,18
PC/ABS	4,76	8,72	10,7
TPU	30,40	42,9	33,06
PET CF	-	1,24	-

Ovo ispitivanje predstavlja još jednu potvrdu da je Strongman izuzetno perspektivan materijal, s obzirom na to da bilježi najmanja odstupanja i najmanju relativnu promjenu vrijednosti udarne žilavosti u cijelom ispitanom temperaturnom opsegu. S druge strane, evidentno je da je PCTG izrazito loš kandidat za eksploataciju pri promjenljivim temperaturnim uslovima. PC/ABS pokazuje solidne i predvidljive vrijednosti, dok je TPU vrlo specifičan po svojim visokim apsolutnim vrijednostima, što je i očekivano s obzirom na njegovu izuzetnu sposobnost apsorpcije energije. Ono što je za TPU najkritičnije u kontekstu realne primjene nije toliko temperatura ispitivanja koliko uslovi njegovog skladištenja i štampe. TPU je praktično neupotrebljiv ako je makar nekoliko sati proveo otvoren i izložen vlazi, dok je Strongman stabilan i nakon dugotrajnog skladištenja, što predstavlja dodatni parametar koji treba uzeti u obzir, posebno imajući u vidu mogućnost izrade balističke zaštite u mobilnim terenskim jedinicama za 3D štampu.

Vrijednost od 0,00 kJ/m² zabilježena za PCTG na -20 °C zasluži posebnu pažnju, s obzirom na to da ne predstavlja tek slab rezultat, već pokazatelj da su epruvete prelomljene praktično bez ikakvog mjerljivog otpora, na samom udaru klatna (otpor postoji, ali je ispod mjernog opsega mašine). Ovakav nalaz ukazuje na potpuni prelaz materijala iz duktilnog u krto ponašanje pri niskoj temperaturi, fenomen dobro poznat kod amorfni i poluamorfni poliestarskih materijala poput PETG-a i njegovih varijacija, na koje se PCTG i oslanja.

Podjednako je neočekivan i podatak da PCTG na +40 °C bilježi vrijednost od svega 0,18 kJ/m², odnosno pad od preko 90% u odnosu na rezultat na sobnoj temperaturi. Za razliku od PC/ABS-a i Strongmana, kod kojih žilavost dosljedno raste sa porastom temperature, kod PCTG-a se dešava suprotno, što ovaj nalaz čini anomalijom, a ne potvrdom očekivanog obrasca. Mogući uzroci ovakvog ponašanja uključuju specifičnu morfologiju samog materijala, zaostale unutrašnje napone nastale u procesu 3D štampe, ili apsorpciju vlage iz okoline, s obzirom na to da su materijali na bazi PETG-a poznati po izraženoj higroskopsnosti - sve pojave koje bi zahtijevale dalju, ciljanu analizu izvan okvira ovog istraživanja.

Kod TPU materijala uočava se drugačiji, nemonoton obrazac promjene udarne žilavosti u odnosu na temperaturu, sa maksimalnom vrijednošću zabilježenom upravo na sobnoj temperaturi (30,40 → 42,90 → 33,06 kJ/m² za -20 °C, +20 °C i +40 °C, redom). Na -20 °C, TPU se približava svojoj temperaturi staklastog prelaza, usljed čega djelimično gubi karakterističnu super-elastičnost i, posljedično, sposobnost apsorpcije energije udara. Na +40 °C, s druge strane, materijal postaje previše mekan, pa je vjerovatno da dolazi do izraženije plastične deformacije i tečenja materijala umjesto elastičnog povrata energije, što dodatno smanjuje izmjerenu vrijednost udarne žilavosti. Ovakvo ponašanje predstavlja mehanizam bitno drugačiji od onog zabilježenog kod ostalih ispitanih materijala. Izgled epruveta nakon loma je prikazan na slici 85, te je jasno izraženo do kojeg tipa loma je došlo (crna boja je Strongman, plava TPU).



Slika 85: Izgled 3D štampanih epruveta nakon ispitivanja

Konačno, upoređivanjem rangiranja materijala dobijenog ovim ispitivanjem (TPU znatno ispred svih ostalih, zatim PC/ABS, Strongman i na kraju PCTG) sa stvarnim rangiranjem prema dubini balističke penetracije (Strongman, PCTG, PC/ABS, TPU), uočava se da su dva rangiranja praktično obrnuta

jedno u odnosu na drugo. Materijal koji Charpy ispitivanje izdvaja kao ubjedljivo najbolji, TPU, balistički je najlošiji od svih ispitanih, dok je PCTG, rangiran kao najlošiji prema udarnoj žilavosti, balistički drugoplasiran. Ovaj nalaz je utoliko značajniji što je Charpy ispitivanje intuitivno najbliži izbor za problem dinamičkog udarnog opterećenja, pa bi izbor materijala zasnovan na njemu vodio direktno ka najlošijem mogućem rješenju.

Rangiranje prema zateznoj čvrstoći iz odjeljka 3.2 (Strongman, PC/ABS, PCTG, TPU) po redoslijedu ima približno poklapanje sa balističkim rangiranjem, ali se ovakvo poklapanje ne može uzeti kao dokaz prediktivne vrijednosti zateznog ispitivanja. Prije svega, riječ je o podudaranju poretka na svega četiri materijala, što ne predstavlja statistički dovoljan uzorak za tvrdnju o postojanju veze. Zatim, poklapa se isključivo redoslijed, ali ne i iznos razlika, s obzirom na to da se dubina penetracije, u zavisnosti od materijala, mijenja i više od tri puta, dok razlike u zateznoj čvrstoći ne prate taj raspon. Drugim riječima, zatezno ispitivanje u ovom slučaju eventualno može ukazati na poredak, ali ne i predvidjeti stvarnu balističku otpornost, niti odrediti razliku između dva kandidata.

Sve navedeno predstavlja snažnu, samostalnu potvrdu centralne teze cijele disertacije da nijedan pojedinačni standardizovani mehanički test, bilo zatezni, savojni ili Charpy udarni, ne može pouzdano predvidjeti stvarno balističko ponašanje materijala. Sama činjenica da dva standardizovana ispitivanja istih materijala daju međusobno suprotstavljena rangiranja dovoljna je da se pokaže da nijedno od njih nije pouzdan kriterij. Zbog toga je direktno eksperimentalno balističko ispitivanje, kakvo je sprovedeno kroz cijeli ovaj rad, neophodno i ne može se zamijeniti standardnim metodama karakterizacije materijala.

4 Zaključak

Ulazak terminalne balistike na područje novih klasa materijala i struktura, za koje njeni klasični modeli nisu adekvatni, zahtijeva konstantan rad i razvoj novih modela, gdje je eksperiment temelj novih shvatanja. Radi zaokružene slike u sistemu interakcije projektil - meta, gdje se aditivna proizvodnja nalazi na jednoj, drugoj ili na obje strane, rad je pristupio problematici u cjelini.

Kroz analizu prve cjeline, vezane za 3D štampanu polimernu municiju malog kalibra, ustanovljen je čitav niz korisnih zaključaka, koji su i doprinijeli stvaranju novih modela. Na samom početku potvrđena je funkcionalnost FDM polimernih projektila - ne dezintegrišu se u cijevi, užlijebe se i stabilizuju se. Skaliranje 1:1 prema metalnom FMJ projektilu nije dovoljno; preduslov zaptivanja je blago uvećanje prema faktoru koji je eksperimentalno utvrđen. Sa stanovišta unutrašnje balistike, evidentiran je znatno niži pritisak u komori sagorijevanja za PLA municiju u odnosu na FMJ municiju. Uprkos manjoj konzistentnosti pritisaka, vrijednosti su upotrebljive, a eksperiment ponovljiv. Fenomen nižeg pritiska direktno je objašnjen i analiziran kroz snimanje bljeska na ustima cijevi, u domenu prelazne balistike. Uz dva različita tipa mjerenja pokazano je isto - nesagorjelo barutno punjenje i sekundarni bljesak predstavljaju direktno objašnjenje i validaciju nalaza iz unutrašnje balistike. U fazi leta, odnosno u domenu spoljne balistike, analitički je, uz numeričku i eksperimentalnu potvrdu, dokazano da masa dominira, a ne hrapavost. Faktor usporavanja za PLA projektil devet je puta veći od onog za FMJ projektil iste geometrije.

Posebna pažnja posvećena je, naravno, terminalnoj balistici, gdje je kroz dva tipa eksperimenata utvrđeno dosta korisnih nalaza. Razvijen je empirijski model penetracije u gel, sa $R^2 = 0,998$ za laboratorijske uslove, što predstavlja izuzetno pouzdan model. Definisana je granica za trajno zadržavanje projektila u gelu, mjerene su dubine penetracije i analizirane kinetičke energije i njihova veza sa dubinom penetracije.

Čitav niz eksperimenata i analiza balističkih ciklusa dao je jednu važnu praktičnu implikaciju, gdje je postala realna teza da potpuno polimerno oružje bez metalnih dijelova nije mit, već ga niski pritisci omogućavaju, što je bitna sigurnosna implikacija koju ovaj rad kvantifikuje. Također, data je ideja i opisano inicijalno testiranje municije sa disperznim punjenjem, čiji razvoj može donijeti znatnu materijalnu korist i zaživjeti u serijskoj proizvodnji kod proizvođača municije u regionu.

Cjelina koja se tiče 3D štampane balističke zaštite također je pružila čitav niz eksperimentalnih podataka, gdje je primarno ustanovljeno da je geometrija ispune veoma važna varijabla. Bez obzira na to što se gyroid nameće kao favorit u kvazi-statičkoj analizi, za balističku primjenu honeycomb predstavlja osnovu, a ove tvrdnje potkrijepljene su kako eksperimentalno, tako i pratećim analitičkim modelom koji kvantifikuje koeficijente.

Pri identičnoj geometriji dubina penetracije varira više od tri puta za različite materijale, pri čemu se od polimera najbolje pokazuje Strongman. Potvrđeno je i da je sa aspekta orijentacije povoljnije da projektil presijeca zidove, gdje je razlika mjerljiva, ali ne drastična. Gustina ispune se također pokazala kao značajan, ali nelinearan parametar.

Zbog relativno velike dubine zaustavljanja projektila u polimernim metama i nakon niza optimizacija, pristupilo se izradi hibridne slojevite konfiguracije - sendvič panela sa karbonom i polimernim jezgrom, gdje se pokazalo da ovakva konfiguracija drastično poboljšava odnos zaštitne moći i utrošenog materijala. Bitna stvar je i prenosivost nalaza, odnosno činjenica da su mehanizmi ćelijske geometrije, orijentacije i gustine posljedica strukture, a ne polimernog ponašanja materijala, te ih je moguće direktno prenijeti na metale, keramiku i druge materijale. Vrijedan nalaz, sa ekonomskom implikacijom, jeste i da kompozitni materijal za štampu poput PET CF ne donosi očekivani višestruko bolji rezultat u odnosu na jednostavan ojačani PLA, uprkos cijeni većoj i preko deset puta.

Jedan od važnijih nalaza disertacije proizašao je iz niza sporednih ispitivanja sprovedenih uz ispitivanje balističkih svojstava struktura i materijala, a riječ je o standardizovanim ispitivanjima materijala i njihovim rezultatima. Naime, nezavisna rangiranja materijala prema standardizovanim testovima međusobno se ne poklapaju, a rangiranju prema balističkoj penetraciji odgovara samo poredak rezultata ispitivanja zatezne čvrstoće (koje daje samo isti redoslijed). Dakle, nijedan pojedinačni standardizovani test ne predviđa balističko ponašanje, čime se potvrdila sumnja

provučena kroz početak rada, gdje je bilo upitno da li je za ekstreman dinamički udar validno mjerenje u kvazi-statičkim uslovima, kakvo je najčešće u upotrebi za 3D štampane materijale. Time se pokazalo da direktno eksperimentalno balističko ispitivanje nije samo dopuna standardnoj karakterizaciji materijala, već neizostavan pristup ovoj problematici. Analitički i numerički modeli su upotrebljivi samo unutar eksperimentalno definisanog domena važenja.

Prva hipoteza, koja je tvrdila da je kontrola ponašanja štampanih projektila moguća, potvrđena je kroz skaliranje, izbor materijala, variranje gustine i drugih uticajnih parametara. Tvrdnja da su razlike u odnosu na metalnu municiju posljedica slojevitosti i unutrašnje geometrije također je potvrđena, uz nalaz da je dominantan uzrok razlika kod projektila masa i zaptivanje, dok slojevitost i unutrašnja geometrija imaju sekundaran, ali mjerljiv uticaj. Kod zaštite je odnos obrnut - geometrija je dominantna. Mjerljiva i ponovljiva balistička otpornost također je potvrđena, uz vrlo bliske i konzistentne vrijednosti po svim grupama u eksperimentima. Potvrđeno je i da integrisani analitičko-eksperimentalni pristup daje pouzdane referentne podatke unutar ograničenog domena, kroz empirijski model penetracije u gel pri laboratorijskim uslovima i analitički model prodora kroz 3D štampane čelijske mete.

Naučni doprinos koji je evidentan nakon čitanja rada jeste da je ovo prva sistematska, kontrolisana i ponovljiva terminalno-balistička baza podataka za 3D štampane projekte malog kalibra i 3D štampanu zaštitu. Dati su novi i verifikovani modeli - empirijski model penetracije u gel i analitički model prodora u čelijsku strukturu, oba s eksplicitno definisanim domenom važenja. Kvantifikovan je uticaj parametara aditivne proizvodnje (geometrije, orijentacije, gustine ispune) na mehanizme proboja i prenosa energije.

Sa aspekta stručnog doprinosa, date su inženjerske smjernice za sendvič konfiguraciju zaštitnih struktura, a jedna od najvažnijih je da je izbor materijala za određenu namjenu potrebno vršiti analizom adekvatnih mjerenja. Značajan je i broj nalaza koji se tiču 3D štampane municije. U regionalnom kontekstu, otvoren je put za razvoj novih proizvoda u BiH i Srbiji.

Rad nameće i nekoliko daljih pravaca istraživanja, gdje se osim razvoja čisto polimernih projektila kao možda najperspektivniji ističe pravac razvoja municije sa disperznim dejstvom. Data je jaka podloga i osnovne analize, a rad će se dalje nastaviti na analizi koncepta, do izrade finalnog prototipa i njegovog testiranja. Sa aspekta poboljšanja balističke zaštite, hibridne i gradirane strukture, više slojeva karbona i metalno-polimerne kombinacije nude mnogo kombinacija i perspektivu za ozbiljna dalja istraživanja. Prenos nalaza o čelijskoj geometriji može se analizirati i na drugim materijalima. Perspektivan je i rad na istraživanju drugih kalibara, na temeljima postavljenim ovdje sa polimernim projektilima, kroz veće serije i druge kalibre. Treba nastaviti i termička kondicioniranja u širem opsegu i realnim uslovima eksploatacije; ovo je posebno interesantno za nauku o materijalima, zbog specifičnih nalaza u ovoj disertaciji koji nisu dovoljno detaljno analizirani jer čine sporednu stranu disertacije.

Napad i odbrana se hiljadama godina razvijaju paralelno, a aditivna proizvodnja je prvi put ušla na obje strane istovremeno i istim alatom. Ovaj rad je pokazao da se ta interakcija ne može pouzdano opisati postojećim modelima, ali da se može izmjeriti, a mjerenje je preduslov svakog modela koji tek slijedi.

5 Literatura

- [1] Boot, M.; *War Made New: Technology, Warfare, and the Course of History, 1500 to Today*, Gotham Books, New York, 2006.
- [2] Horowitz, M.C.; Pindyck, S.; What is a military innovation and why it matters, *J. Strateg. Stud.* 2023, 46(1), pp. 85–114. <https://doi.org/10.1080/01402390.2022.2038572>
- [3] Ramsey, S.; *Tools of War: History of Weapons in Ancient Times*, Alpha Editions, 2016.
- [4] Beaman, J.J.; Bourell, D.L.; Seepersad, C.C.; Kovar, D.; Additive Manufacturing Review: Early Past to Current Practice, *J. Manuf. Sci. Eng.* 2020, 142(11), 110812. <https://doi.org/10.1115/1.4048193>
- [5] Kodama, H.; Automatic method for fabricating a three-dimensional plastic model with photo-hardening polymer, *Rev. Sci. Instrum.* 1981, 52(11), pp. 1770–1773. <https://doi.org/10.1063/1.1136492>
- [6] Deckard, C.R.; Method and apparatus for producing parts by selective sintering, US Patent 4,863,538, 1989 (i US 5,155,324, 1992)
- [7] Griffith, M.L.; Keicher, D.M.; Atwood, C.L.; Romero, J.A.; Smugeresky, J.E.; Harwell, L.D.; Greene, D.L.; Free Form Fabrication of Metallic Components Using Laser Engineered Net Shaping (LENS), *Proc. Solid Freeform Fabrication Symposium*, Austin, TX, 1996, pp. 125–131.
- [8] Elek, P.; *Balistika na cilju*, Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu, 2018.
- [9] Volgas, D.A.; Stannard, J.P.; Alonso, J.E.; Ballistics: a primer for the surgeon, *Injury* 2005, 36(3), pp. 373–379. <https://doi.org/10.1016/j.injury.2004.08.037>
- [10] Kneubuehl, B.P.; *Ballistics, Theory and Practice*, Springer, 2024.
- [11] Humphrey, C., Kumaratilake, J.; Ballistics and anatomical modelling – A review, *Legal Medicine*, Vol. 23, 2016, Pages 21-29.
- [12] Rosenberg, Z., Dekel, E.; *Terminal Ballistics*, Springer, 2020.
- [13] Mossor, M., L.; *Ballistics Theory and Design of Guns and Ammunition*.
- [14] National Research Council; *Assessment of the Army Research Laboratory: Interim Report — Chapter 2: Ballistics Sciences (Terminal Ballistics)*, The National Academies Press, Washington, DC, 2014. <https://doi.org/10.17226/18752>
- [15] Pandey, P.K., Harshey, A., Yadav, M.M., Srivastava, A. *Essentials of Forensic Ballistics*. In: Shrivastava, P., Lorente, J.A., Srivastava, A., Badiye, A., Kapoor, N. (eds) *Textbook of Forensic Science*. Springer, Singapore, 2023.
- [16] Kneubuehl, B.P. General wound ballistics. In: Kneubuehl, B.P. (eds) *Wound Ballistics*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2022.
- [17] Wilkins, M. L.; Mechanics of penetration and perforation. *International Journal of Engineering Science*, 16(11), 793–807, 1978.
- [18] Awerbuch, J., Bgdner, S.R.; *Int. J. sofids*, B&671, 1974.
- [19] Backman, M.E.; Goldsmith, W.; The mechanics of penetration of projectiles into targets, *Int. J. Eng. Sci.* 1978, 16(1), pp. 1–99. [https://doi.org/10.1016/0020-7225\(78\)90002-2](https://doi.org/10.1016/0020-7225(78)90002-2)
- [20] Zukas, J.A.; Nicholas, T.; Swift, H.F.; Greszczuk, L.B.; Curran, D.R.; *Impact Dynamics*, John Wiley & Sons, New York, 1982.

- [21] Johnson, G.R., & Cook, W.H., A Constitutive Model and Data for Metals Subjected to Large Strains, High Strain Rates and High Temperatures, 1983.
- [22] Hosur, M.V.; Vaidya, U.K.; Ulven, C.; Jeelani, S.; Performance of stitched/unstitched woven carbon/epoxy composites under high velocity impact loading, *Compos. Struct.* 2004, 64(3–4), pp. 455–466. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2003.09.046>
- [23] Goldsmith, W.; *Impact: The Theory and Physical Behaviour of Colliding Solids*, Edward Arnold (Publishers) Ltd., London, 1960.
- [24] Mladenović, S.; *Balistika u vojnoj tehnici*, 2005.
- [25] Zlatić, M.; *Osnove unutrašnje i spoljašnje balistike*, 2011.
- [26] Anderson, J.D.; *Fundamentals of Aerodynamics*, 2016.
- [27] Feng, J.; Sun, W., Wang, L., Chen, L., Xue, S., Li, W.; Terminal ballistic and static impactive loading on thick concrete target, *Construction and Building Materials*, Volume 251, 2020.
- [28] Swan, K.G., Swan, R.C.; *Principles of Ballistics Applicable to the Treatment of Gunshot Wounds*, *Surgical Clinics of North America*, Volume 71, Issue 2, 1991.
- [29] McCoy, R.; *Modern Exterior Ballistics*, 2012.
- [30] Cunniff, M.P.; *Dimensionless Parameters for Optimization of Textile-Based Body Armor Systems*, U.S. Army Soldier and Biological Chemical Command Soldier Systems Center, Natick.
- [31] Zukas, J. A., & Scheffler, D. R. ; *Introduction to Hydrocodes*. Elsevier, 2000.
- [32] Anderson Jr, C. E.. An overview of the theory of hydrocodes. *International Journal of Impact Engineering*, 5(1-4), 33-59, 1993.
- [33] Goldsmith, W. Non-ideal projectile impact on targets. *International Journal of Impact Engineering*, 22(2-3), 95-395, 1999.
- [34] Backman, M. E., & Goldsmith, W. The mechanics of penetration of projectiles into targets. *International Journal of Engineering Science*, 16(1), 1-99, 1978.
- [35] Khalid, S.; *Terminal Ballistics: Gauging the Accuracy of Empirical Formulas in the Literature based on Numerical Simulations (Dissertation)*. 2024.
- [36] Ryan, S., Sushma, M.N., Kumar, A., Berk, J., Hashem, T., Rana, S., Venkatesh, S.; Machine learning for predicting the outcome of terminal ballistics events, *Defence Technology*, Volume 31, 2024.
- [37] Rietkerk, R., Heine, A., Riedel, W.; Physics-informed machine learning model for prediction of long-rod penetration depth in a semi-infinite target, *International Journal of Impact Engineering*, Volume 173, 2023.
- [38] Abid, K.A.; Syed, S.A.; Khan, M.; Interpretable machine learning models for predicting penetration depth in ultra-high-performance concrete under ballistic impact, *Struct. Concr.* 2026. <https://doi.org/10.1002/suco.70462>
- [39] Ryan, S.; Sushma, N.M.; Kumar AV, A.; Berk, J.; Hashem, T.; Rana, S.; Venkatesh, S.; Machine learning for predicting the outcome of terminal ballistics events, *Def. Technol.* 2024, 31, pp. 14–26. <https://doi.org/10.1016/j.dt.2023.07.010>
- [40] Sharma, A.; Mukhopadhyay, T.; Rangappa, S.M.; Siengchin, S.; Kushvaha, V.; *Advances in Computational Intelligence of Polymer Composite Materials: Machine Learning Assisted*

Modeling, Analysis and Design, Arch. Comput. Methods Eng. 2022, 29, pp. 3341–3385. <https://doi.org/10.1007/s11831-021-09700-9>

- [41] Thompson, B., Sherbrun, J.A., Ross, J., Zhang, Y.; Estimating kinetic energy reduction for terminal ballistics using a hyperparameter-optimized neural network, *Neural Computing and Applications* 36(1):1-15, 2024.
- [42] Thompson, S., Dias, F., Paulino, M., Hamilton, A.; Ballistic response of armour plates using Generative Adversarial Networks, *Defence Technology*, Volume 18, Issue 9, 2022.
- [43] ISO/ASTM 52900:2021, Additive manufacturing — General principles — Fundamentals and vocabulary, International Organization for Standardization / ASTM International, Geneva, 2021.
- [44] Gibson, I.; Rosen, D.; Stucker, B. (2015). *Additive Manufacturing Technologies*, 2nd ed. Springer, New York. <https://doi.org/10.1007/978-1-4939-2113-3>
- [45] Ngo, T.D.; Kashani, A.; Imbalzano, G.; Nguyen, K.T.Q.; Hui, D. (2018). Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges. *Composites Part B* 143, 172–196. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.02.012>
- [46] ASTM F2792-12a, Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2012.
- [47] Bikas, H.; Stavropoulos, P.; Chrysosolouris, G. (2016). Additive manufacturing methods and modelling approaches: a critical review. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 83, 389–405. <https://doi.org/10.1007/s00170-015-7576-2>
- [48] Melchels, F.P.W.; Feijen, J.; Grijpma, D.W. (2010). A review on stereolithography and its applications in biomedical engineering. *Biomaterials* 31(24), 6121–6130. <https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2010.04.050>
- [49] Kruth, J.P.; Levy, G.; Klocke, F.; Childs, T.H.C. (2007). Consolidation phenomena in laser and powder-bed based layered manufacturing. *CIRP Annals* 56(2), 730–759. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2007.10.004>
- [50] Ahn, D.G. (2021). Directed energy deposition (DED) process: State of the art. *Int. J. Precis. Eng. Manuf.-Green Tech.* 8, 703–742. <https://doi.org/10.1007/s40684-020-00302-7>
- [51] DebRoy, T.; Wei, H.L.; Zuback, J.S.; Mukherjee, T.; Elmer, J.W.; Milewski, J.O.; Beese, A.M.; Wilson-Heid, A.; De, A.; Zhang, W.; Additive manufacturing of metallic components – Process, structure and properties, *Prog. Mater. Sci.* 2018, 92, pp. 112–224. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2017.10.001>
- [52] Vaidya, S.; Ambad, P.; Bhosle, S. (2018). Industry 4.0 – A Glimpse. *Procedia Manufacturing* 20, 233–238. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.02.034>
- [53] Berman, B. (2012). 3-D printing: The new industrial revolution. *Business Horizons* 55(2), 155–162. <https://doi.org/10.1016/j.bushor.2011.11.003>
- [54] Tofail, S.A.M.; Koumoulos, E.P.; Bandyopadhyay, A.; Bose, S.; O'Donoghue, L.; Charitidis, C. (2018). Additive manufacturing: scientific and technological challenges, market uptake and opportunities. *Materials Today* 21(1), 22–37. <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2017.07.001>
- [55] Buswell, R.A.; Leal de Silva, W.R.; Jones, S.Z.; Dirrenberger, J. (2018). 3D printing using concrete extrusion: A roadmap for research. *Cement and Concrete Research* 112, 37–49. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.05.006>

- [56] Jagoda, J.; Diggs-McGee, B.; Kreiger, M.; Schuldt, S. (2020). The Viability and Simplicity of 3D-Printed Construction: A Military Case Study. *Infrastructures* 5, 35. <https://doi.org/10.3390/infrastructures5040035>
- [57] Mohamed, O.A.; Masood, S.H.; Bhowmik, J.L. (2015). Optimization of fused deposition modeling process parameters: a review of current research and future prospects. *Advances in Manufacturing* 3, 42–53. <https://doi.org/10.1007/s40436-014-0097-7>
- [58] Popescu, D.; Zapciu, A.; Amza, C.; Baci, F.; Marinescu, R. (2018). FDM process parameters influence over the mechanical properties of polymer specimens: A review. *Polymer Testing* 69, 157–166. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2018.05.020>
- [59] Torrado, A.R.; Roberson, D.A. (2016). Failure analysis and anisotropy evaluation of 3D-printed tensile test specimens of different geometries and print raster patterns. *J. Fail. Anal. and Preven.* 16, 154–164. <https://doi.org/10.1007/s11668-016-0067-y>
- [60] Kovan, V.; Altan, G.; Topal, E.S. (2017). Effect of layer thickness and print orientation on strength of 3D printed and adhesively bonded single lap joints. *J. Mech. Sci. Technol.* 31, 2197–2201. <https://doi.org/10.1007/s12206-017-0415-7>
- [61] Pandžić, A.; Hodžić, D.; Hajro, I.; Tasić, P. (2020). Strength Properties of PLA Material Obtained by Different Models of FDM 3D Printer. *31st DAAAM Int. Symp.*, 0315–0322. <https://doi.org/10.2507/31st.daaam.proceedings.044>
- [62] Dey, A.; Roan Eagle, I.N.; Yodo, N. (2021). A Review on Filament Materials for Fused Filament Fabrication. *J. Manuf. Mater. Process.* 5, 69. <https://doi.org/10.3390/jmmp5030069>
- [63] Ligon, S.C.; Liska, R.; Stampfl, J.; Gurr, M.; Mülhaupt, R. (2017). Polymers for 3D Printing and Customized Additive Manufacturing. *Chemical Reviews* 117(15), 10212–10290. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.7b00074>
- [64] Rahim, T.N.A.T.; Abdullah, A.M.; Akil, H.M. (2019). Recent Developments in Fused Deposition Modeling-Based 3D Printing of Polymers and Their Composites. *Polymer Reviews* 59(4), 589–624. <https://doi.org/10.1080/15583724.2019.1597883>
- [65] Wickramasinghe, S.; Do, T.; Tran, P. (2020). FDM-Based 3D Printing of Polymer and Associated Composite: A Review on Mechanical Properties, Defects and Treatments. *Polymers* 12, 1529. <https://doi.org/10.3390/polym12071529>
- [66] Wang, X.; Jiang, M.; Zhou, Z.; Gou, J.; Hui, D. (2017). 3D printing of polymer matrix composites: A review and prospective. *Composites Part B* 110, 442–458. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.11.034>
- [67] Blok, L.G.; Longana, M.L.; Yu, H.; Woods, B.K.S. (2018). An investigation into 3D printing of fibre reinforced thermoplastic composites. *Additive Manufacturing* 22, 176–186. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.04.039>
- [68] Pandžić, A.; Hodžić, D.; Hajro, I.; Tasić, P. (2024). A Review of FFF 3D Printed Polymer Materials: Filaments, Physical Aspects in the Formation, Mechanical Properties and Standard Testing. *35th DAAAM Int. Symp.*, 0121–0134.
- [69] Attaran, M. (2017). The rise of 3-D printing: The advantages of additive manufacturing over traditional manufacturing. *Business Horizons* 60(5), 677–688. <https://doi.org/10.1016/j.bushor.2017.05.011>
- [70] Ford, S.; Despeisse, M. (2016). Additive manufacturing and sustainability: an exploratory study of the advantages and challenges. *Journal of Cleaner Production* 137, 1573–1587. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.04.150>

- [71] Duraković, B. (2018). Design for Additive Manufacturing: Benefits, Trends and Challenges. *Periodicals of Engineering and Natural Sciences* 6(2), 179–191. <https://doi.org/10.21533/pen.v6i2.224>
- [72] Xu, X.; Lu, Y.; Vogel-Heuser, B.; Wang, L. (2021). Industry 4.0 and Industry 5.0—Inception, conception and perception. *Journal of Manufacturing Systems* 61, 530–535. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2021.10.006>
- [73] Thompson, M.K.; Moroni, G.; Vaneker, T.; Fadel, G.; Campbell, R.I.; Gibson, I.; Bernard, A.; Schulz, J.; Graf, P.; Ahuja, B.; Martina, F.; Design for Additive Manufacturing: Trends, opportunities, considerations, and constraints, *CIRP Annals* 2016, 65(2), pp. 737–760. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2016.05.004>
- [74] Wong, K.V.; Hernandez, A.; A Review of Additive Manufacturing, *ISRN Mech. Eng.* 2012, 2012, Article ID 208760. <https://doi.org/10.5402/2012/208760>
- [75] Vandenburg, J.R. (2022). The forensic implications of polymer-copper ARX bullets. *AFTE Journal* 54(1).
- [76] Goodridge, R.D.; Tuck, C.J.; Hague, R.J.M. (2012). Laser sintering of polyamides and
- [77] Bambu Lab; PLA Basic — Technical Data Sheet, Bambu Lab, 2024. <https://bambulab.com/> (pristupljeno: 19.07.2026.)
- [78] AzureFilm; Strongman PLA — Technical Data Sheet, AzureFilm d.o.o., 2024. <https://azurefilm.com/> (pristupljeno: 19.07.2026.)
- [79] Bambu Lab; X1 Carbon (X1C) — 3D Printer Technical Specifications, Bambu Lab, 2024. <https://bambulab.com/en/x1> (pristupljeno: 19.07.2026.)
- [80] Ultimaker; Ultimaker S5 — Technical Specifications, UltiMaker (Ultimaker B.V.), 2024. <https://ultimaker.com/> (pristupljeno: 19.07.2026.)
- [81] AzureFilm; PCTG — Technical Data Sheet, AzureFilm d.o.o., 2024. <https://azurefilm.com/> (pristupljeno: 19.07.2026.)
- [82] Ultimaker; PET CF (carbon fiber reinforced PET) — Technical Data Sheet, UltiMaker (Ultimaker B.V.), 2024. <https://ultimaker.com/materials/> (pristupljeno: 19.07.2026.)
- [83] Hays, G.; Ivan, T.; Jenzen-Jones, N.R. (2020). Desktop Firearms: Emergent Small Arms Craft Production Technologies. *ARES Research Report No. 8*.
- [84] Adeleke, A.K.; Portillo Montero, D.J.; Lottu, O.A.; Ninduwezuor-Ehiobu, N.; Ani, E.C.; 3D Printing in Aerospace and Defense: A Review of Technological Breakthroughs and Applications, *World J. Adv. Res. Rev.* 2024, 21, 1149–1160. <https://doi.org/10.30574/wjarr.2024.21.2.0558>
- [85] Chaari, M.Z.; The Impact of 3D Printing on the Defense Industry, *IEEE TechDefense* 2024, Naples, Italy, 149–153. <https://doi.org/10.1109/TechDefense63521.2024.10863694>
- [86] Bisić, M.; Pandžić, A.; Advances in Additive Manufacturing Application in Military Industry. In: *New Trends in Engineering Research*, *CNNTech* 2023, LNNS 792, Springer, 2024. https://doi.org/10.1007/978-3-031-46432-4_14
- [87] Colorado, H.A.; Cardenas, C.A.; Gutierrez-Velazquez, E.I.; Escobedo, J.P.; Monteiro, S.N.; Additive manufacturing in armor and military applications: research, materials, processing technologies, perspectives, and challenges, *J. Mater. Res. Technol.* 27, 2023, 3900–3913. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.11.030>

- [88] Marciniak, M.; 3D Printing in Military Applications: FDM Technology, Materials, and Implications, *Adv. Mil. Technol.* 2023, 18, 241–257. <https://doi.org/10.3849/aimt.018463>
- [89] Harper, J.; Military 3D Printing Projects Face Challenges, *National Defense*, 100(744), 2015, 24–25.
- [90] Booth, J.; Edwards, E.; Whitley, M.; Kranz, M.; Seif, M.; Ruffin, P.; Military Comparison of 3D Printed vs. Commercial Components, *Proc. SPIE* 2018, 10597, 105970J. <https://doi.org/10.1117/12.2300773>
- [91] Kowalski, K.; Biernikowicz, W.; Stankiewicz, G.; Possibilities of Using 3D Printing in Field Repairs of Military Equipment, *Rocznik Bezpieczeństwa Morskiego* 2024, XVIII, 873–886. <https://doi.org/10.5604/01.3001.0054.8334>
- [92] Stankiewicz, G.; Kocur, R.; Kowalski, K.; Additive manufacturing in military using, *Military Logistics Systems*, 58(1), 2023, 129–148. <https://doi.org/10.37055/slw/175936>
- [93] Peleshok, S.A.; Fisun, A.Y.; Morozov, A.V.; Kalinin, S.V.; Eliseeva, M.I.; Additive technologies in military affairs, *Russ. Mil. Med. Acad. Rep.* 40(2), 2021, 5–12. <https://doi.org/10.17816/rmmar77796>
- [94] Bird, D.T.; Ravindra, N.M.; Additive Manufacturing of Sensors for Military Monitoring Applications, *Polymers* 2021, 13, 1455. <https://doi.org/10.3390/polym13091455>
- [95] Kalender, M.; Kılıç, S.E.; Ersoy, S.; Bozkurt, Y.; Salman, S.; Additive Manufacturing and 3D Printer Technology in Aerospace Industry, *RAST* 2019, Istanbul, 689–694. <https://doi.org/10.1109/RAST.2019.8767881>
- [96] Fey, M.; 3D Printing and International Security: Risks and Challenges of an Emerging Technology, *PRIF Reports* 144, Frankfurt, 2017. <https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:0168-ssoar-51867-8>
- [97] Munro, C.; Review of Structural Additive Manufacturing for Defence Applications: Current State of the Art, *DRDC-RDDC-2018-R212*, Defence R&D Canada, 2019
- [98] Dey, A.; Adeniran, O.; Ramoni, M.; Yodo, N.; Cong, W.; Additive Manufacturing Applications in Mission-Critical Operations: A Review, *J. Manuf. Mater. Process.* 2025, 9, 70. <https://doi.org/10.3390/jmmp9030070>
- [99] Zhang, J.-c.; He, K.; Zhang, D.-w.; Dong, J.-d.; Li, B.; Liu, Y.-j.; Gao, G.-l.; Jiang, Z.-x.; Three-dimensional printing of energetic materials: A review, *Energ. Mater. Front.* 2022, 3(2), pp. 97–108. <https://doi.org/10.1016/j.enmf.2022.04.001>
- [100] Yang, W.; Hu, R.; Zheng, L.; Yan, G.; Yan, W.; Fabrication and investigation of 3D-printed gun propellants, *Mater. Des.* 2020, 192, 108761. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.108761>
- [101] Mulligan, P.; Johnson, C.; Ho, J.; Lough, C.; Kinzel, E.; 3D Printed Conical Shaped Charge Performance, *Proceedings of the 2019 Hypervelocity Impact Symposium (HVIS2019)*, April 14–19, 2019, Destin, FL, USA, HVIS2019-110.
- [102] Kantaros, A.; Drosos, C.; Papoutsidakis, M.; Pallis, E.; Ganetsos, T.; Composite Filament Materials for 3D-Printed Drone Parts: Advancements in Mechanical Strength, Weight Optimization and Embedded Electronics, *Materials* 2025, 18, 2465. <https://doi.org/10.3390/ma18112465>
- [103] Schaufelbühl, S.; Florquin, N.; Werner, D.; Delémont, O.; The emergence of 3D-printed firearms: An analysis of media and law enforcement reports, *Forensic Sci. Int. Synerg.* 2024, 8, 100464. <https://doi.org/10.1016/j.fsisyn.2024.100464>

- [104] Dass, R.; 3D-Printed Firearms: Global Proliferation Trends and Analyses, *Stud. Conflict Terrorism*, 2025, 1–35. <https://doi.org/10.1080/1057610X.2025.2477849>
- [105] Veilleux-Lepage, Y.; CTRL, HATE, PRINT: Terrorists and the Appeal of 3D-Printed Weapons, *ICCT Perspective* 2021. <https://hdl.handle.net/1887/3503709>
- [106] Basra, R.; Neumann, P.R.; Printing Terror: The Threat of 3D-Printed Firearms (dataset i izvještaj), Combating Terrorism Center (CTC) at West Point / ICSR, 2024. <https://ctc.westpoint.edu/> (pristupljeno: 19.07.2026.)
- [107] Honsberger, H.; Rhumorbarbe, D.; Werner, D.; Riva, F.; Glardon, M.; Gallusser, A.; Delémont, O.; How to recognise the traces left on a crime scene by a 3D-printed Liberator? Part 1. Discharge, exterior ballistic and wounding potential, *Forensic Sci. Int.* 2018, 286, 245–251. <https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2018.03.026>
- [108] Armament Research Services (ARES); Polymer 3D-Printed Barrel Successfully Tested, ARES, 2020. <https://armamentresearch.com/polymer-3d-printed-barrel-successfully-tested/> (pristupljeno: 19.07.2026.)
- [109] Jenzen-Jones, N.R. (Ed.); Desktop Firearms: Emergent Small Arms Craft Production Technologies (Research Report No. 8), Armament Research Services (ARES), 2020. <https://armamentresearch.com/> (pristupljeno: 19.07.2026.)
- [110] LaRocco, J.; Simulated Testing of a 3D Printed Revolver Cylinder, Peer Evaluation, 2013.
- [111] Honsberger, H.; Werner, D.; Rhumorbarbe, D.; Riva, F.; Glardon, M.; Gallusser, A.; Delémont, O.; How to recognise the traces left on a crime scene by a 3D-printed Liberator? Part 2. Elements of ammunition, marks on the weapons and polymer fragments, *Forensic Sci. Int.* 2019, 295, 137–144. <https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2018.12.010>
- [112] Szwed, A.; Schaufelbühl, S.; Gallusser, A.; Werner, D.; Delémont, O.; Was a 3D-printed firearm discharged? Study of traces produced by the use of six fully 3D-printed firearms, *Forensic Sci. Int.* 2023, 348, 111736. <https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2023.111736>
- [113] Cizdziel, J.; Black, O.; Forensic Analysis of Gunshot Residue, 3D-Printed Firearms, and Gunshot Injuries, Nova Science Publishers, 2019.
- [114] Falardeau, M.S.; Mireault, C.; Daoust, B.; Muehlethaler, C.; Chemical analysis of polymers used for 3D printing of firearms, *Forensic Sci. Int.* 2024, 357, 111999. <https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2024.111999>
- [115] Taylor, M.; Forensic Analysis of 3D-Printed Firearms: Beyond Traditional Traceology, *Forensic Magazine* 2020.
- [116] Bertino, G.; Acquaviva, A.; 3D-Printed Firearms: Forensic Considerations and Trace Analysis, *Forensic Sci. Int.* 2021, 321, 110720. <https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2021.110720>
- [117] Goia, S.; Cooper, G.; Norman, D.G.; Primeau, C.; Hall, M.; Hawley, J.; Williams, M.A.; The use of micro-CT in the investigation of a case involving 3D printed firearms, *Forensic Sci. Int.* 2024, 363, 112157. <https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2024.112157>
- [118] Vandenburg, J.R.; Examining the effects of 3D printed projectiles on firearm identification, *J. Forensic Sci.* 2025, 70(6), 2480–2491. <https://doi.org/10.1111/1556-4029.70122>
- [119] Vandenburg, J.R.; The forensic implications of polymer-copper ARX bullets, *AFTE Journal* 2022, 54(1), 49–52.

- [120] Courtney, E.; Courtney, A.; Andrusiv, L.; Courtney, M.; Terminal performance of lead-free pistol bullets in ballistic gelatin using retarding force analysis from high speed video, arXiv:1604.01000, 2016. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1604.01000>
- [121] Long, J.; Nand, A.V.; Ray, S.; Mayhew, S.; White, D.; Bunt, C.R.; Seyfoddin, A.; Development of customised 3D printed biodegradable projectile for administering extended-release contraceptive to wildlife, *Int. J. Pharmaceutics* 2018, 548(1), 349–356. <https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2018.07.002>
- [122] Bisić, M.; Razić, F.; Pandžić, A.; Bevrnja, M.; Penetration testing of 3D printed projectiles made of various types of polymers, *J. Mech. Sci. Technol.* 2023, 37(11), pp. 5535–5539. <https://doi.org/10.1007/s12206-023-2304-6>
- [123] Xue, H.; Wang, T.; Cui, X.-y.; Wang, Y.-f.; Huang, G.-y.; On the ballistic perforation performance of additively manufactured 316L stainless steel cylindrical projectiles, *Int. J. Impact Eng.* 2023, 179, 104625. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2023.104625>
- [124] Xue, H.; Wang, T.; Cui, X.; Wang, Y.; Huang, G.; Ballistic performance of additive manufacturing 316L stainless steel projectiles based on topology optimization method, *Defence Technology* 2024, 35, 1–17. <https://doi.org/10.1016/j.dt.2023.06.010>
- [125] DSIAC; RAMBO: Researchers Fire 3D-Printed Ammo from 3D-Printed Grenade Launcher, Defense Systems Information Analysis Center (DSIAC) / U.S. Army ARDEC, 2017. <https://dsiac.dtic.mil/articles/rambo-researchers-fire-3d-printed-ammo-from-3d-printed-grenade-launcher/> (pristupljeno: 19.07.2026.)
- [126] Albaşkara, M.; Yıldız, İ.; A Comparative Study on the Tensile Properties of PLA, PETG, and ABS in FDM 3D Printing: Effects of Infill Geometry and Build Orientation, *Int. J. 3D Print. Technol. Digit. Ind.* 2025, 9(3), pp. 688–697. <https://doi.org/10.46519/ij3dptdi.1779348>
- [127] Pandžić, A.; Hodžić, D.; Tensile Mechanical Properties Comparison of PETG, ASA and PLA-Strongman FDM Printed Materials With and Without Infill Structure, *Proceedings of the 33rd DAAAM International Symposium*, B. Katalinic (Ed.), DAAAM International, Vienna, Austria, 2022, pp. 0221–0230. <https://doi.org/10.2507/33rd.daaam.proceedings.031>
- [128] Rodríguez-Panes, A.; Claver, J.; Camacho, A.M.; The Influence of Manufacturing Parameters on the Mechanical Behaviour of PLA and ABS Pieces Manufactured by FDM: A Comparative Analysis, *Materials* 2018, 11(8), 1333. <https://doi.org/10.3390/ma11081333>
- [129] Ambati, S.S.; Ambatipudi, R.; Effect of infill density and infill pattern on the mechanical properties of 3D printed PLA parts, *Mater. Today Proc.* 2022, 64(Part 1), pp. 804–807. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.05.312>
- [130] Gechev, T.; Tsonev, V.; Ivanov, P.; Kralov, I.; Nedelchev, K.; The Influence of Printing Parameters on the Impact Strength of FDM 3D-Printed Polylactic Acid, *Eng. Proc.* 2026, 121, 14. <https://doi.org/10.3390/engproc2025121014>
- [131] Tunçel, O.; Optimization of Charpy Impact Strength of Tough PLA Samples Produced by 3D Printing Using the Taguchi Method, *Polymers* 2024, 16(4), 459. <https://doi.org/10.3390/polym16040459>
- [132] Sambi Reddy, B.; Study the Consequence of Raster Angle on the Charpy Impact Strength of FDP 3D Printed Polylactic Acid Mesostructure, *Industrial Engineering Journal* 2023, 52, pp. 7–15.

- [133] Popa, C.-F.; Mărghițaș, M.-P.; Galațanu, S.-V.; Marșavina, L.; Influence of thickness on the IZOD impact strength of FDM printed specimens from PLA and PETG, *Procedia Struct. Integr.* 2022, 41, pp. 557–563. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2022.05.064>
- [134] Shbanah, M.; Jordanov, M.; Nyikes, Z.; Tóth, L.; Kovács, T.A.; The Effect of Heat Treatment on a 3D-Printed PLA Polymer's Mechanical Properties, *Polymers* 2023, 15(6), 1587. <https://doi.org/10.3390/polym15061587>
- [135] Kahya, Ç.; Tunçel, O.; Çavuşoğlu, O.; Tüfekci, K.; Thermal annealing optimization for improved mechanical performance of PLA parts produced via 3D printing, *Polym. Test.* 2025, 144, 108719. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2025.108719>
- [136] Jayanth, N.; Jaswanthraj, K.; Sandeep, S.; Mallaya, N.H.; Siddharth, S.R.; Effect of heat treatment on mechanical properties of 3D printed PLA, *J. Mech. Behav. Biomed. Mater.* 2021, 123, 104764. <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2021.104764>
- [137] Copinet, A.; Bertrand, C.; Govindin, S.; Coma, V.; Couturier, Y.; Effects of ultraviolet light (315 nm), temperature and relative humidity on the degradation of polylactic acid plastic films, *Chemosphere* 2004, 55(5), pp. 763–773. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2003.11.038>
- [138] Slavković, V.; Hanželič, B.; Plesec, V.; Milenković, S.; Harih, G.; Thermo-Mechanical Behavior and Strain Rate Sensitivity of 3D-Printed Polylactic Acid (PLA) below Glass Transition Temperature (T_g), *Polymers* 2024, 16(11), 1526. <https://doi.org/10.3390/polym16111526>
- [139] Del Rosso, S.; Iannucci, L.; On the Compressive Response of Polymeric Cellular Materials, *Materials* 2020, 13(2), 457. <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC7014359/>
- [140] Kazantseva, N.; Onishchenko, A.; Zelepugin, S.; Cherepanov, R.; Ivanova, O.; Impact energy absorption in 3D printed bio-inspired PLA structures, *Polymer* 2024, 313, 127749. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2024.127749>
- [141] Cristea, G.C.; Botan, M.; Pelin, G.; Stefan, A.; Dragomirescu, A.; Patrascoiu, M.; 3D Printed Gyroid Lattices with Graded Density for Advanced Ballistic Protection, *INCAS Bulletin* 2025, 17(4), pp. 43–53.
- [142] Leiffer, J.J.; Behavior of 3D Printed Polymeric Triply Periodic Minimal Surface (TPMS) Cellular Structures Under Low Velocity Impact Loads, *magistarska teza*, Wright State University, 2022. https://corescholar.libraries.wright.edu/etd_all/2656
- [143] Junio, R.F.P.; da Silveira, P.H.P.M.; Neuba, L.d.M.; Monteiro, S.N.; Nascimento, L.F.C.; Development and Applications of 3D Printing-Processed Auxetic Structures for High-Velocity Impact Protection: A Review, *Eng.* 2023, 4, 903–940.
- [144] Medvedev, A.E.; Maconachie, T.; Leary, M.; Qian, M.; Brandt, M.; Perspectives on additive manufacturing for dynamic impact applications, *Mater. Des.* 2022, 221, 110963.
- [145] Porter, M.M.; Ravikumar, N.; Barthelat, F.; Martini, R.; 3D-printing and mechanics of bio-inspired articulated and multi-material structures, *J. Mech. Behav. Biomed. Mater.* 2017, 73, 114–126.
- [146] Martini, R.; Balit, Y.; Barthelat, F.; A comparative study of bio-inspired protective scales using 3D printing and mechanical testing, *Acta Biomater.* 2017, 55, 360–372.
- [147] Scrocco, M.; Chamberlain, T.; Chow, C.; Weinreber, L.; Ellks, E.; Halford, C.; Cortes, P.; Conner, B.P.; Impact Testing of 3D Printed Kevlar-Reinforced Onyx Material, *Proceedings of the 29th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium*, Austin, TX, 2018, pp. 1252–1266.

- [148] Vaithianathan, A.; Farhan, H.; Raja, D.E.; Singh, S.P.; Sonar, T.; Microstructural characteristics and mechanical properties of 3D printed Kevlar fibre reinforced Onyx composite, *Mater. Test.* 2024, 66(9), pp. 1519–1527. <https://doi.org/10.1515/mt-2024-0138>
- [149] Zia, A.A.; Tian, X.; Ahmad, M.J.; Tao, Z.; Meng, L.; Zhou, J.; Zhang, D.; Zhang, W.; Qi, J.; Li, D.; Impact Resistance of 3D-Printed Continuous Hybrid Fiber-Reinforced Composites, *Polymers* 2023, 15(21), 4209. <https://doi.org/10.3390/polym15214209>
- [150] Ma, Q.; Rejab, M.R.M.; Song, Y.; Zhang, X.; Hanon, M.M.; Abdullah, M.H.; Kumar, A.P.; Effect of Infill Pattern of Polylactide Acid (PLA) 3D-Printed Integral Sandwich Panels under Ballistic Impact Loading, *Mater. Today Commun.* 2024, 38, 107626.
- [151] Gladys, A.K.; Damodaran, A.; Ezhilan, J.J.; Raghavan, M.; Venkatesan, N.; Effect of Infill Patterns on Carbon Nylon 3D-Printed Composites under Ballistic Impact, *Phys. Scr.* 2025, 100, 065919.
- [152] Xue, J.; Hou, Y.; Chu, W.; Zhang, Z.; Dong, Z.; Zhang, L.; Wen, G.; 3D printed B4C-based honeycomb ceramic composite and its potential application in three-dimensional armor structure, *Chem. Eng. J.* 2024, 493, 152607.
- [153] Bisić, M.; Pandžić, A.; Jusufbegović, M.; Čerimović, M.; Elek, P.; Influence of Infill Pattern on Ballistic Resistance Capabilities of 3D-Printed Polymeric Structures, *Polymers* 2025, 17, 1854. <https://doi.org/10.3390/polym17131854>
- [154] Zochowski, P.; Bajkowski, M.; Grygoruk, R.; Magier, M.; Burian, W.; Pyka, D.; Bocian, M.; Jamroziak, K.; Ballistic Impact Resistance of Bulletproof Vest Inserts Containing Printed Titanium Structures, *Metals* 2021, 11(2), 225. <https://doi.org/10.3390/met11020225>
- [155] Haq, A.U.; Narala, S.K.R.; Experimental and numerical investigation on the ballistic impact performance of sandwich panels with additively manufactured honeycomb cores, *Compos. Struct.* 2024, 350, 118629. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2024.118629>
- [156] Szachogłuchowicz, I.; Fikus, B.; Grzelak, K.; Kluczyński, J.; Torzewski, J.; Łuszczek, J.; Selective Laser Melted M300 Maraging Steel — Material Behaviour during Ballistic Testing, *Materials* 2021, 14(10), 2681. <https://doi.org/10.3390/ma14102681>
- [157] Lui, E.W.; Medvedev, A.E.; Edwards, D.; Qian, M.; Leary, M.; Brandt, M.; Microstructure modification of additive manufactured Ti-6Al-4V plates for improved ballistic performance properties, *J. Mater. Process. Technol.* 2022, 301, 117436. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2021.117436>
- [158] Bisic, M.; Pandzic, A.; Jokic, N.; Bevrnja, M. & Elek, P. (2025). Evaluation of Firing Reliability and Penetration Depth of 3D Printed PLA Projectiles for 9 X 19 mm Ammunition, *Proceedings of the 36th DAAAM International Symposium*, pp.0154-0162, B. Katalinic, Published by DAAAM International, ISBN 978-3-902734-47-1, ISSN 1726-9679, Vienna, Austria DOI: 10.2507/36th.daaam.proceedings.020
- [159] Courtney, M.; Courtney, A.; A method for testing bullets at reduced velocity, *arXiv preprint* 2008, arXiv:0812.4934. <https://doi.org/10.48550/arXiv.0812.4934>
- [160] Bresson, F.; Franck, O.; Estimating the shooting distance of a 9-mm Parabellum bullet via ballistic experiment, *Forensic Sci. Int.* 2009, 192(1–3), pp. e17–e20. <https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2009.07.018>
- [161] Ongaro, F.; Robbe, C.; Papy, A.; Stirbu, B.; Chabotier, A.; Modelling of internal ballistics of gun systems: A review, *Def. Technol.* 2024, 41, pp. 35–58. <https://doi.org/10.1016/j.dt.2024.05.004>

- [162] Otón-Martínez, R.A.; Velasco, F.J.; García-Cascales, J.R.; Ramírez-Fernández, F.J.; One-Dimensional Modelling of Internal Ballistics, *J. Energ. Mater.* 2017, 35(4), pp. 397–420. <https://doi.org/10.1080/07370652.2016.1265613>
- [163] Carlucci, D.E.; Jacobson, S.S. *Ballistics: Theory and Design of Guns and Ammunition*, 2nd ed.; CRC Press: Boca Raton, FL, 2013. ISBN 978-1-4665-6437-3.
- [164] Corner, J. *Theory of the Interior Ballistics of Guns*; John Wiley & Sons: New York, 1950.
- [165] STANAG 4823, Allied Engineering Publication AEP-97: Multi-Calibre Manual of Proof and Inspection (M-CMOPI) for Small Arms Ammunition, Edition A, Version 1; NATO Standardization Office (NSO): Brussels, November 2020.
- [166] Kistler Instrumente AG; Quartz High-Pressure Sensor for Ballistic Pressure Measurement to 6000 bar, Type 6215 — Technical Data Sheet, Kistler Instrumente AG, Winterthur, Switzerland. <https://www.kistler.com/> (pristupljeno: 19.07.2026.)
- [167] Klingenberg, G.; Heimerl, J.M.; *Gun Muzzle Blast and Flash*, Progress in Astronautics and Aeronautics, Vol. 139, American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA), Washington, D.C., 1992.
- [168] Krieg, J.; Eisele, C.; Seiffer, D.; Electro-optical muzzle flash detection, *Proc. SPIE 9987, Electro-Optical and Infrared Systems: Technology and Applications XIII*, 99870A, 2016. <https://doi.org/10.1117/12.2240777>
- [169] Lee, J.-H.; Chae, J.-W.; Lee, S.-B.; Kim, H.-J.; A Study on Designing Flash Suppressor for Reducing Muzzle Flash, *J. Korea Inst. Mil. Sci. Technol.* 2009, 12(1).
- [170] Mattijssen, E.J.A.T.; Kerkhoff, W.; Bullet trajectory reconstruction – Methods, accuracy and precision, *Forensic Sci. Int.* 2016, 262, pp. 204–211. <https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2016.03.039>
- [171] Stephens, A.L.; Examination of Land and Groove Impressions on Fired Bullets: Repeatability, Consistency and Accuracy of Firearm and Toolmark Examiners, *eScholarship (University of California)*, 2025. <https://escholarship.org/uc/item/98j3b9bm> (pristupljeno: 19.07.2026.)
- [172] Menter, F.R. Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications. *AIAA Journal* 1994, 32(8), 1598–1605. <https://doi.org/10.2514/3.12149>
- [173] Hoerner, S.F. *Fluid-Dynamic Drag: Practical Information on Aerodynamic Drag and Hydrodynamic Resistance*; Published by the Author: Bakersfield, CA, 1965.
- [174] Knopp, T.; Eisfeld, B.; Calvo, J.B. A new extension for $k-\omega$ turbulence models to account for wall roughness. *International Journal of Heat and Fluid Flow* 2009, 30(1), 54–65. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatfluidflow.2008.09.009>
- [175] Courtney, E.; Courtney, A.; Courtney, M.; Methods for Accurate Free Flight Measurement of Drag Coefficients, *arXiv preprint* 2015, arXiv:1503.05504. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1503.05504>
- [176] Courtney, E.; Courtney, A.; Courtney, M.; Accurate Measurements of Free Flight Drag Coefficients with Amateur Doppler Radar, *arXiv preprint* 2016, arXiv:1608.06500. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1608.06500>
- [177] Kerampran, C.; Gajewski, T.; Sielicki, P.W.; Temperature Measurement of a Bullet in Flight, *Sensors* 2020, 20(24), 7016. <https://doi.org/10.3390/s20247016>
- [178] Fackler, M.L.; Malinowski, J.A. Ordnance gelatin for ballistic studies. *Am. J. Forensic Med. Pathol.* 1988, 9(3), 218–219. <https://doi.org/10.1097/00000433-198809000-00008>

- [179] Kneubuehl, B.P. (Ed.); Coupland, R.M.; Rothschild, M.A.; Thali, M.J. *Wound Ballistics: Basics and Applications*; Springer: Berlin, Heidelberg, 2011. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-20356-5>
- [180] Sellier, K.G.; Kneubuehl, B.P. *Wound Ballistics and the Scientific Background*; Elsevier: Amsterdam, 1994.
- [181] Jussila, J. Preparing ballistic gelatine — review and proposal for a standard method. *Forensic Sci. Int.* 2004, 141(2–3), 91–98. <https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2003.11.036>
- [182] Stefanopoulos, P.K.; Filippakis, K.; Soupiou, O.T.; Pazarakiotis, V.C.; Gunshot wounds: A review of ballistics related to penetrating trauma, *J. Acute Dis.* 2014, 3(3), pp. 178–185. [https://doi.org/10.1016/S2221-6189\(14\)60041-X](https://doi.org/10.1016/S2221-6189(14)60041-X)
- [183] Samson Kamnik d.o.o.; Water Clear Reversible/Remeltable Ballistic Gel — Technical Data Sheet, Samson Kamnik d.o.o., Kamnik, Slovenija, 2026. https://www.samsonkarnik.si/default.asp?mid=hr&pid=modul_it&wid=5265&detailid=10919 (pristupljeno: 19.07.2026.)
- [184] Pullen, A.; Kieser, D.C.; Hooper, G.J.; Ballistic gelatin calibration standardisation, *BMJ Mil. Health* 2020, 168(2), pp. 124–127. <https://doi.org/10.1136/bmjilitary-2019-001385>
- [185] Agu, H.O.; Hameed, A.; Appleby-Thomas, G.J.; Wood, D.C.; The Dynamic Response of Dense 3-Dimensionally Printed Polylactic Acid, *J. Dyn. Behav. Mater.* 2019, 5, pp. 377–386. <https://doi.org/10.1007/s40870-019-00198-8>
- [186] Botean, A.-I.; Thermal expansion coefficient determination of polylactic acid using digital image correlation, *E3S Web Conf.* 2018, 32, 01007. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20183201007>
- [187] National Defense Magazine (NDIA); Special Ops Ammo Spreads to Other Services, *National Defense Magazine*, 2023. <https://www.nationaldefensemagazine.org/> (pristupljeno: 19.07.2026.)
- [188] Aničić, A.; Vučković, V.; Đorđević, L.; Blagojević, L.; Tošić, D.; Experimental Validation of Internal Ballistic Mathematical Model for a Small Caliber Weapon, *Appl. Res. Adv.* 2026, 2(1), pp. 74–82. <https://doi.org/10.65069/ara2120268>
- [189] Kobayashi, M.; Mellen, P.F.; Rubber bullet injury: case report with autopsy observation and literature review, *Am. J. Forensic Med. Pathol.* 2009, 30(3), pp. 262–267. <https://doi.org/10.1097/PAF.0b013e318187dfa8>
- [190] Millar, R.; Rutherford, W.H.; Johnson, S.; Malhotra, V.J.; Injuries caused by rubber bullets: a report on 90 patients, *Br. J. Surg.* 1975, 62(6), pp. 480–486. <https://doi.org/10.1002/bjs.1800620613>
- [191] Dhar, S.A.; Dar, T.A.; Wani, S.A.; Maajid, S.; Bhat, J.A.; Mir, N.A.; Dar, I.H.; Hussain, S.; Pattern of rubber bullet injuries in the lower limbs: A report from Kashmir, *Chin. J. Traumatol.* 2016, 19(3), pp. 129–133. <https://doi.org/10.1016/j.cjtee.2015.05.005>
- [192] Ameloot, C.; Robbe, C.; Papy, A.; Hendrick, P.; Modeling Complex Behavior of Multi-projectile Counter UAV 12 Gauge Ammunition, *Hum. Factors Mech. Eng. Def. Saf.* 2022, 6, 3. <https://doi.org/10.1007/s41314-022-00040-5>
- [193] Asgedom, G.; Yeneneh, K.; Tilahun, G.; Negash, B.; Numerical and experimental analysis of body armor polymer penetration resistance against 7.62 mm bullet, *Heliyon* 2025, 11(1), e41286. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e41286>

- [194] Prusa Research; Prusament PETG Tungsten 75% 1kg — proizvodni/tehnički list, Prusa Research a.s., Prag. <https://www.prusa3d.com/> (pristupljeno: 19.07.2026.)
- [195] DraPtec; Epoksidna smola ES-TCR30 — tehnički list (Technical Data Sheet), DraPtec. <https://draptec.com/shop/smole/oblaganje-karbon-smola/> (pristupljeno: 19.07.2026.)
- [196] R&G Faserverbundwerkstoffe GmbH; Kohlegewebe / Carbon fabric 200 g/m² Aero, Köper 2/2, Tenax®-E HTA 40 3k (Art.-Nr. 190230-SV-100), R&G Faserverbundwerkstoffe GmbH, Waldenbuch, Njemačka. <https://www.r-g.de/> (pristupljeno: 19.07.2026.)
- [197] ISO 179-1:2010, Plastics — Determination of Charpy impact properties — Part 1: Non-instrumented impact test, International Organization for Standardization, Geneva, 2010.

Biografija autora

Muhamed Bisić je rođen 1. jula 1998. godine u Sarajevu. Srednju mašinsku tehničku školu u Sarajevu završio je 2018. godine i stekao zvanje mašinski tehničar – konstruktor na računaru. Iste godine upisao je Mašinski fakultet Univerziteta u Sarajevu, katedru za Odbrambene tehnologije, gdje je prvi ciklus studija završio 2021, a drugi 2023. godine, s master radom na temu „Aditivna tehnologija u vojnoj industriji – 3D printana ručna bomba”. Od oktobra 2023. godine doktorant je na Mašinskom fakultetu Univerziteta u Beogradu, na katedri za Sisteme naoružanja, pod mentorstvom prof. dr Predraga Eleka, s istraživačkim fokusom na terminalnu balistiku i aditivnu proizvodnju u vojnoj industriji.

Od 2025. godine radi na Internacionalnom univerzitetu u Sarajevu (IUS), najprije kao stručnjak iz prakse, a od oktobra iste godine kao viši asistent. Profesionalno je angažovan kao konsultant u istraživanju i razvoju, primarno bespilotnih letjelica i vojne opreme.

Položio je stručni ispit iz oblasti mašinstva (2025) i stekao sertifikat za bespilotne sisteme (*UAV systems integration specialist*, 2026). Dobitnik je više nagrada za inovacije, među kojima su prvo mjesto na IDEATHON 2024 i Balkathon 4.0 (2023). Autor je i koautor deset radova objavljenih u međunarodnim časopisima, među kojima su *Polymers* i *Journal of Mechanical Science and Technology*, te u zbornicima radova s konferencija, s fokusom na primjenu aditivne tehnologije, nauku o materijalima i terminalnu balistiku.

Прилог 1.

Изјава о ауторству

Потписани-а _____ Мухамед Бисић _____

број индекса _____ Д14/2023 _____

Изјављујем

да је докторска дисертација под насловом

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

- резултат 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 коректно наведени и
- да нисам кршио/ла ауторска права и користио интелектуалну својину других лица.

Потпис докторанда

У Београду, 19.10.2026.

Изјава о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада

Име и презиме аутора Мухамед Бисић

Број индекса Д14/2023

Студијски програм Докторске студије

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

Ментор др Предраг Елек, редовни професор

Потписани/а Мухамед Бисић

Изјављујем да је штампана верзија мог докторског рада истоветна електронској верзији коју сам предао/ла за објављивање на порталу **Дигиталног репозиторијума Универзитета у Београду**.

Дозвољавам да се објаве моји лични подаци везани за добијање академског звања доктора наука, као што су име и презиме, година и место рођења и датум одбране рада.

Ови лични подаци могу се објавити на мрежним страницама дигиталне библиотеке, у електронском каталогу и у публикацијама Универзитета у Београду.

Потпис докторанда

У Београду, 19.10.2026.

Прилог 3.

Изјава о коришћењу

Овлашћујем Универзитетску библиотеку „Светозар Марковић“ да у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду унесе моју докторску дисертацију под насловом:

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

која је моје ауторско дело.

Дисертацију са свим прилозима предао/ла сам у електронском формату погодном за трајно архивирање.

Моју докторску дисертацију похрањену у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду могу да користе сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (Creative Commons) за коју сам се одлучио/ла.

1. Ауторство

2. Ауторство - некомерцијално

☒ 3. Ауторство – некомерцијално – без прераде

4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима

5. Ауторство – без прераде

6. Ауторство – делити под истим условима

(Молимо да заокружите само једну од шест понуђених лиценци, кратак опис лиценци дат је на полеђини листа).

Потпис докторанда

У Београду, 19.10.2026.

1. Ауторство - Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце, чак и у комерцијалне сврхе. Ово је најслободнија од свих лиценци.
2. Ауторство – некомерцијално. Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела.
3. Ауторство - некомерцијално – без прераде. Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела. У односу на све остале лиценце, овом лиценцом се ограничава највећи обим права коришћења дела.
4. Ауторство - некомерцијално – делити под истим условима. Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада.
5. Ауторство – без прераде. Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела.
6. Ауторство - делити под истим условима. Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада. Слична је софтверским лиценцама, односно лиценцама отвореног кода.