

Primjena aditivnih tehnologija u izradi moderatora zvuka

Jurak, Franciska

Master's thesis / Diplomski rad

2024

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:745210>

Rights / Prava: [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-05-28**

Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Franciska Jurak

Zagreb, 2024.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Zdravko Schauperl, dipl. ing.

Student:

Franciska Jurak

Zagreb, 2024.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradila samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se svom mentoru prof. dr. sc. Zdravku Schauperlu na smjericama, savjetima i mogućnosti rada na ovako zanimljivoj temi, asistentu dr.sc. Daliboru Viderščaku na izdvojenom vremenu i pomoći prilikom izrade ovog rada te gospodinu Miroslavu Kavuru bez kojeg ovaj diplomski rad ne bi bio izvediv.

Veliko hvala i Metalskoj jezgri Čakovec, posebno ravnatelju dr. sc. Mariu Šerceru na pomoći oko izrade umetaka.

Također, željela bih se zahvaliti svim prijateljima, kolegama i obitelji koji su vjerovali u mene te mi pružili podršku i uljepšali ovaj period života.

Franciska Jurak



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:
Proizvodno inženjerstvo, inženjerstvo materijala, industrijsko inženjerstvo i menadžment,
mehatronika i robotika, autonomni sustavi i računalna inteligencija

Sveučilište u Zagrebu	
Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: 602 - 04 / 24 - 06 / 1	
Ur.broj: 15 - 24 -	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Franciska Jurak**

JMBAG: 0035217296

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Primjena aditivnih tehnologija u izradi moderatora zvuka**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Application of additive manufacturing technologies in the production of sound moderators**

Opis zadatka:

Razvoj tehničkih materijala i tehnologija njihove obrade omogućuje izradu strojnih dijelova sa značajno boljim performansama i ponašanjem u eksploataciji.

U teoretskom dijelu potrebno je istražiti i navesti zahtjeve koji se postavljaju na suvremene moderatore zvuka koji se koriste u lovu, te najčešće konstrukcije. S tim u vezi potrebno je napraviti i pregled trenutnog stanja na području materijala i tehnologija u izradi tih dijelova, te navesti njihova svojstva.

Na temelju prikupljenih podataka, u eksperimentalnom dijelu rada potrebno je izabrati i definirati materijal koji je pogodan za izradu jezgre, tj. aktivnog dijela moderatora zvuka, primjenom 3D printanja. Pri tome treba izabrati i predložiti optimalnu tehnologiju printanja. Na temelju podataka o materijalu i odabranoj tehnologiji potrebno je predložiti strukturu aktivnog dijela moderatora zvuka koji će biti izrađen 3D printanjem i istaknuti prednosti i mane takve strukture.

U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

16. studenoga 2023.

Datum predaje rada:

18. siječnja 2024.

Predviđeni datumi obrane:

22. – 26. siječnja 2024.

Zadatak zadao:

Prof.dr.sc. Zdravko Schauperl

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Ivica Garašić

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA.....	IV
POPIS OZNAKA	V
POPIS KRATICA	VI
SAŽETAK.....	IX
SUMMARY	X
1. UVOD.....	1
1.1. Princip prigušenja zvuka prilikom ispaljivanja metka	1
2. MODERATORI ZVUKA.....	5
2.1. Povijesni razvoj moderatora zvuka	6
2.2. Podjela moderatora zvuka	6
2.3. Zahtjevi za suvremene moderatore zvuka za lov	9
2.4. Prednosti korištenja moderatora zvuka	10
2.4.1. Prevencija oštećenja sluha	10
2.4.2. Povećana preciznost.....	10
2.4.3. Povećanje sigurnosti kroz komunikaciju	10
2.5. Nedostaci korištenja moderatora zvuka	11
2.5.1. Pomak težišta oružja	11
2.5.2. Cijena moderatora zvuka	11
2.5.3. Zakoni vezani za moderatore zvuka.....	11
2.6. Materijali za proizvodnju moderatora zvuka	12
2.6.1. Čelik	13
2.6.2. Aluminijski	13
2.6.3. Kompoziti od ugljičnih vlakana.....	14
2.6.4. Titanij	14
2.6.5. Ostali materijali.....	14
2.6.5.1. Toplinski i kemijski zahtjevi.....	15
2.6.5.2. Mehanički zahtjevi.....	17
3. ADITIVNA TEHNOLOGIJA	21
3.1. Povijest aditivne proizvodnje	22
3.2. Postupak izrade aditivnim tehnologijama	23
3.3. Postupci proizvodnje pomoću aditivnih tehnologija.....	25
4. EKSPERIMENTALNI DIO	27
4.1. Konstruiranje 3D CAD modela moderatora zvuka.....	27
4.2. Pravila konstruiranja za aditivnu proizvodnju	28
4.3. Konstruiranje modela	33
4.4. FDM tiskanje modela.....	36
4.5. FDM tehnologija	40
4.6. FDM izrada umetka	42

5. REZULTATI ISPITIVANJA	46
6. ZAKLJUČAK.....	49
LITERATURA.....	50

POPIS SLIKA

Slika 1. Grafički prikaz tlaka nakon ispaljivanja metka bez moderatora zvuka [2].....	3
Slika 2. Grafički prikaz tlaka nakon ispaljivanja metka s moderatorom zvuka [2]	3
Slika 3. Odnos između brzine metka i razine zvuka proizvedenog balističkim praskom [2]	4
Slika 4. Uzdužni presjek moderatora zvuka [8]	5
Slika 5. BR-Tuote TX8 moderator [2]	7
Slika 6. Prikaz moderatora koji se montira na kraj cijevi [6].....	8
Slika 7. Vameico .30 SX moderator [2]	8
Slika 8. Integrirani moderator zvuka modela .308 Steyr SSG 6D [6].....	9
Slika 9. Prikaz dostupnosti korištenja moderatora zvuka u Europi [15].....	12
Slika 10. Prikaz materijala korištenih u proizvodnji moderatora zvuka i maksimalne radne temperature [2]	16
Slika 11. Prikaz toplinskog širenja naspram toplinske vodljivosti materijala [2].....	17
Slika 12. Prikaz lomne žilavost naspram Youngovog modula [2]	18
Slika 13. Čvrstoća materijala prikazana Youngovim modulom naspram gustoće materijala [2]	19
Slika 14. Cijena po kilogramu za moguće alternativne materijale za izradu moderatora zvuka [2]	20
Slika 15. Proizvodnja AM dijelova u 2021. godini [18]	21
Slika 16. Globalni prihod 2022. godine od AM proizvodnje i proizvoda [19].....	22
Slika 17. Prikaz koraka kod AM proizvodnje [16]	24
Slika 18. Prikaz dijelova moderatora zvuka od aluminija.....	27
Slika 19. Moderator zvuka od aluminija bez ispune	28
Slika 20. Prikaz pravilne orijentacije modela prilikom 3D ispisa [23]	29
Slika 21. Pojava anizotropije [23]	30
Slika 22. Prikaz potporne strukture [23]	31
Slika 23. Pravilo 45 stupnjeva [24]	31
Slika 24. Prikaz izvedbe zračnosti sklopa [23]	32
Slika 25. Prikaz izvedbe bridova [23]	32
Slika 26. 3D CAD modela M1	33
Slika 27. 3D CAD modela M2	34
Slika 28. 3D CAD modela M3.....	35
Slika 29. Prikaz poprečnog presjeka 3D CAD modela M3.....	36
Slika 30. Prikaz modela i potpornih struktura na radnoj podlozi FDM stroja	37
Slika 31. Model M1 tiskan pomoću Prusa uređaja i PETG materijala	38
Slika 32. Prikaz puknuća strukture modela M1	39
Slika 33. STRATASYS F900, profesionalni uređaj za FDM tiskanje [28]	39
Slika 34. FDM postupak [23].....	41
Slika 35. Prikaz svih modela izrađenih FDM postupkom.....	42
Slika 36. Prikaz FDM tiskanog modela M1	43
Slika 37. Prikaz FDM tiskanog modela M2	44
Slika 38. Prikaz FDM tiskanog modela M3.....	45
Slika 39. Prikaz korištene puške malog kalibra i moderatora zvuka	46
Slika 40. Grafički prikaz rezultata ispitivanja.....	47
Slika 41. Prikaz modela nakon ispitivanja	48

POPIS TABLICA

Tablica 1. Postupci proizvodnje i materijali koji se koriste za njih [22].....	25
Tablica 2. Rezultati ispitivanja.....	47

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
E	GPa	Youngov modul
HDT	K	Temperatura toplinske distorzije
K_{Ic}	MPa · m ^{1/2}	Lomna žilavost
λ	m ² /(s K)	Toplinsko širenje
λ	W/mK	Toplinska vodljivost
P_{rms}	Pa	Tlak zvuka
PWL	dB	Razina snage zvuka
R_m	MPa	Vlačna čvrstoća
SPL	dB	Razina tlaka zvuka
T_{max}	K	Maksimalna radna temperatura
ρ	g/m ³	Gustoća

POPIS KRATICA

Kratika	Opis
3DP	Trodimenzionarno tiskanje (eng. <i>3D printing</i>)
3D	Trodimenzionarno
ABS	Akrilonitril/butadien/stiren
AM	Aditivna proizvodnja, aditivni postupci (eng. <i>Additive Manufacturing</i>)
AMF	Datoteka modela pri primjeni za aditivne postupke (eng. <i>Additive Manufacturing File</i>)
CAD	Konstruiranje pomoću računala (eng. <i>Computer Aided Design</i>)
CES	Program za izbor materijala (eng. <i>Cambridge Engineering Selector</i>)
CFD	Računalna dinamika fluida (eng. <i>Computational Fluid Dynamics</i>)
DLP	Očvršćivanje digitalno obrađenim svjetlosnim signalom (eng. <i>Digital Light Processing</i>)
DMD	Izravno taloženje metalnog praha (eng. <i>Direct Metal Deposition</i>)
DMLS	Izravno lasersko sraščivanje metala (eng. <i>Direct Metal Laser Sintering</i>)
EBM	Taljenje s pomoću snopa elektrona (eng. <i>Electron Beam Melting</i>)
EP	Epoksidna smola
FDM	Taložno očvršćivanje (eng. <i>Fused Deposition Modeling</i>)

FFF	Proizvodnja rastaljenim filamentom (eng. <i>Fused Filament Fabrication</i>)
IMLS	Posredno lasersko srašćivanje metala (eng. <i>Indirect Metal Laser Sintering</i>)
LENS	Izravno taloženje metala (eng. <i>Laser Engineering Net Shaping</i>)
LOM	Proizvodnja laminiranih objekata (eng. <i>Laminated Object Manufacturing</i>)
MEB	Inženjering temeljen na modelima (eng. <i>Model-Based Engineering</i>)
MES	Sustav izvršenja proizvodnje (eng. <i>Manufacturing Execution System</i>)
PA	Poliamid
PA 12	Poliamid na osnovi dodekanske kiseline
PC	Polikarbonat
PE	Polietilen
PE-HD	Polietilen visoke gustoće
PEI	Polieterimid
PE-LD	Polietilen niske gustoće
PET	Polietilen tereftalat
PETG	Polietilen tereftalat glikol
PLA	Poliaktid
PMMA	Poli(metil-metakrilat)
PolyJet	Ispisivanje mlazom fotopolimera
PP	Polipropilen
PPSU	Poli(fenilen-sulfon)
PS	Polistiren
PVC	Poli(vinil-klorid)
SLA/SL	Stereolitografija (e. Stereolithography)

SLM	Selektivno lasersko taljenje (eng. Selective Laser Melting)
SLS	Selektivno lasersko srašćivanje (eng. Selective Laser Sintering)
.STL	Triangulizacijska datoteka (eng. Standard Tessellation Language)
UV	Ultravioletno zračenje

SAŽETAK

Cilj ovog rada bio je osmisliti i izraditi umetak koji bi se uspješno koristio kao aktivni dio moderatora zvuka za lovačku pušku malog kalibra. Pri tome su korištene suvremene metode aditivne proizvodnje te su napravljena tri različita umetka na kojima je provedeno ispitivanje. U ovom diplomskom radu u teorijskom dijelu dan je opis moderatora zvuka za vatreno oružje, pregled vrsta moderatora i materijala za izradu. Također je opisana aditivna tehnologija te su navedeni postupci izrade i proizvodnje. U eksperimentalnom dijelu predložene su konstrukcije umetaka koje su zatim napravljene pomoću tehnologije taložnog očvršćivanja (FDM) i materijala ULTEM 1010 te su modeli potom ispitani.

Ključne riječi: umetak, moderator zvuka, aditivna tehnologija

SUMMARY

The aim of this paper was to design and create an insert that would be successfully used as an active part of a sound moderator for a small-caliber hunting rifle. Modern additive manufacturing methods were employed and three different inserts were produced for experimentation. In the theoretical part of this thesis, a description of sound moderators for firearms, an overview of types of moderators and materials for their production were provided. Additionally, additive manufacturing technology was explained, including the procedures for construction and production. In the experimental section, insert designs were proposed, subsequently created using Fused Deposition Modeling (FDM) technology and ULTEM 1010 material, and the models were then tested.

Key words: insert, sound moderator, additive technology

1. UVOD

S razvojem novih materijala i tehnologija obrade, moguće je izraditi strojne dijelove s poboljšanim mogućnostima te ponašanjem u eksploataciji. Jedan od načina ostvarivanja toga jest upotrebom aditivnih tehnologija (eng. *Additive Manufacturing* – AM).

U prošlosti sam dizajn i proizvodnja moderatora zvuka bili su ovisni o dostupnim tehnologijama koje su se koristile za izradu komponenata moderatora. Moderator zvuka se s obzirom na strukturu najjednostavnije može opisati kao umetak koji se sastoji od komponenti koje se ponavljaju, a njihova geometrijska kompleksnost ovisi o načinu izrade. S razvojem novih tehnologija proizvodnje, prvenstveno aditivnih tehnologija, došlo je do pomaka u stvaranju komponenata unikatnih geometrijskih oblika. Pomoću takvih procesa proizvodnje moguće je optimizirati dizajn uz primjenu metoda inženjerskih analiza poput MES-a (eng. *Manufacturing Execution System*), MEB-a (eng. *Model-Based Engineering*) i CFD-a (eng. *Computational Fluid Dynamics*) [1].

Iako je upotreba moderatora zvuka u Republici Hrvatskoj još uvijek zabranjena, njihova primjena uvelike bi pomogla lovcima. Najveći problem s kojim se susreću lovci i rekreativni strijelci su problemi sa sluhom. Istraživanja su pokazala da se sa svakih 5 godina rekreativnog pucanja šansa za trajno oštećenje sluha povećava za 7 %. Pošto je lov radnja koja zahtjeva potpunu svijest o okolini, mnogi lovci ne koriste zaštitnu opremu poput čepića za uši ili zaštitnih slušalica. Kako u okolini puške prilikom pucnja može doći do zvučnog pritiska većeg od 160 dB, jasno je kako nisu samo lovci u opasnosti od oštećenja sluha, već i svi ostali u njihovoj blizini. U takvim situacijama, upotreba moderatora zvuka smanjila bi mogućnost oštećenja sluha te pružila odličan način za zaštitu okoline od buke pucnja [2].

1.1. Princip prigušenja zvuka prilikom ispaljivanja metka

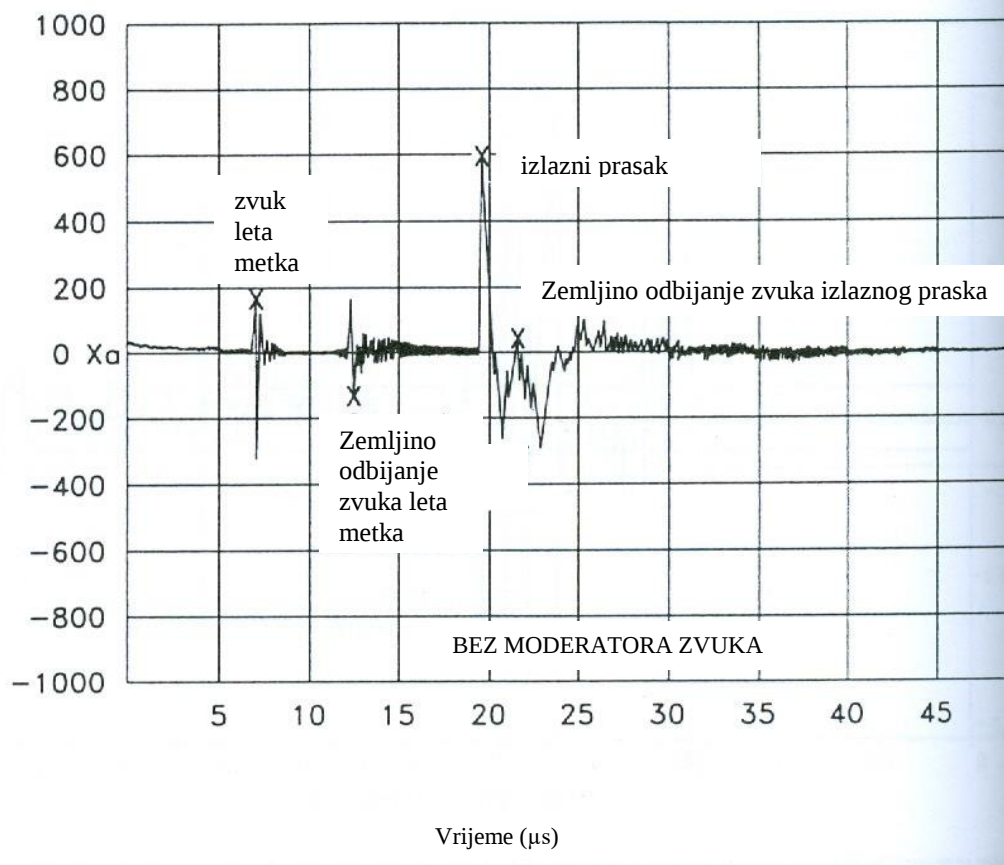
Zvuk se može okarakterizirati kao promjene tlaka, temperature i gustoće koje putuju kroz medij valovima. Valne osobitosti zvuka igraju ključnu ulogu u raznim fenomenima poput refleksije, refrakcije, raspršivanja, difrakcije, apsorpcije i interferencije. Ponašanje zvuka značajno ovisi o brzini širenja kroz određeni zvučni medij i okolne uvjete. Različiti vanjski čimbenici poput temperature i tlaka utječu na interakcije između zvučnih valova i čestica. Za suzbijanje zvuka

moгуće je primijeniti različite metode. To uključuje postavljanje prepreka koje blokiraju put zvučnim valovima, korištenje materijala koji apsorbiraju zvuk, upotrebu specifičnih struktura te čak i primjenu elektroničkog prigušivanja. Unatoč raznolikim pristupima, udaljenost ostaje najjednostavniji način smanjenja buke. Zbog toga, poligoni za gađanje često se nalaze daleko od stambenih zona, no u slučajevima gdje udaljenost nije uvijek opcija potrebna su dodatna rješenja za kontrolu i suzbijanje zvuka [2].

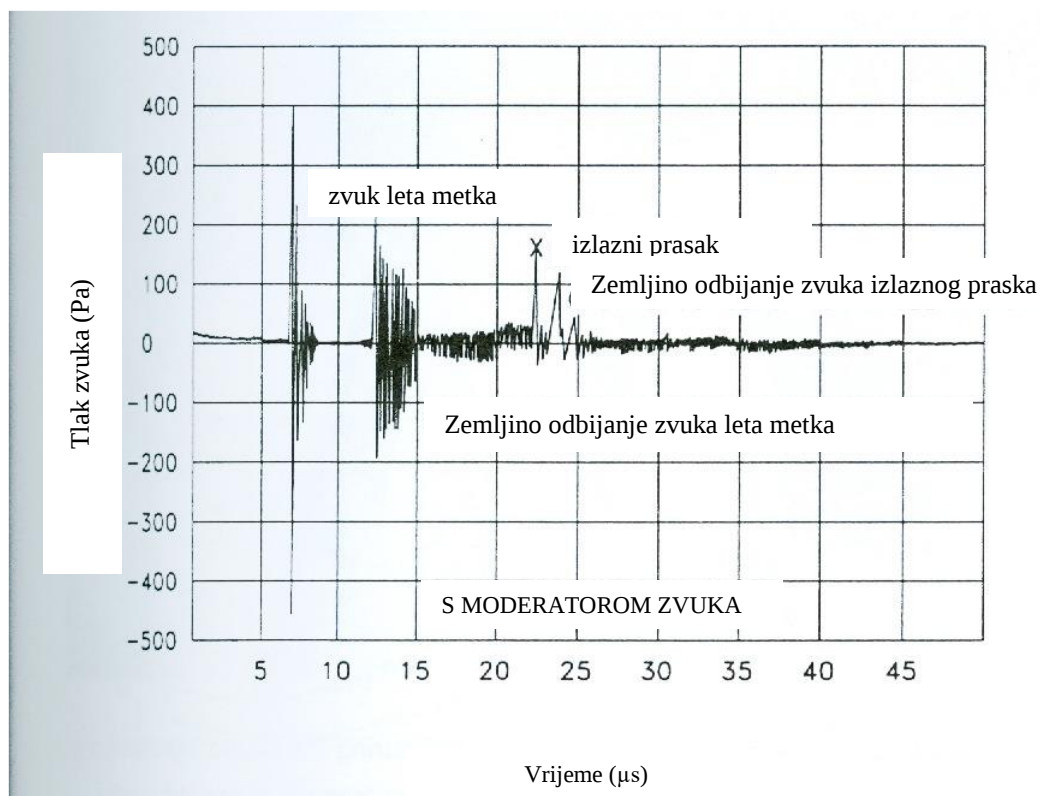
Zvuk paljbe nastaje kombinacijom nekoliko akustičnih valova koji proizlaze kao rezultat [3]:

- vala plina baruta na izlaznom otvoru
- udarnog vala generiranog kretanjem nadzvučnog projektila
- vala stvorenog zračnim stupcem izbačenim iz cijevi ispred projektila
- akustičnog vala koji se javlja zbog sudara dijelova oružja tijekom paljbe

Zvuk će ovisiti o kalibru i korištenosti oružja, streljivu, tlaku zraka, temperaturi i okolini, a najglasniji izvor zvuka nastaje ekspanzijom plinova punjenja zajedno sa zrakom koji izlazi iz cijevi s metkom (eng. *Muzzle report*). Također, kada se metak kreće brže od brzine zvuka, stvara se specifičan zvuk koji se naziva balistički prasak (eng. *Ballistic crack*), a takav zvuk je uobičajen kod projektila koji se kreću nadzvučnom brzinom. Korištenjem moderatora zvuka utječe se jedino na zvuk koji nastaje na izlasku iz cijevi (eng. *Muzzle report*). Iako se veći dio oslobađanja tlaka odvija tijekom duljeg vremena, vršni zvučni intenzitet zapravo traje kraće vrijeme. Na slikama 1 i 2 moguće je vidjeti razliku koju donosi upotreba moderatora zvuka u smanjenju razine tlaka zvuka na izlasku iz cijevi [2].

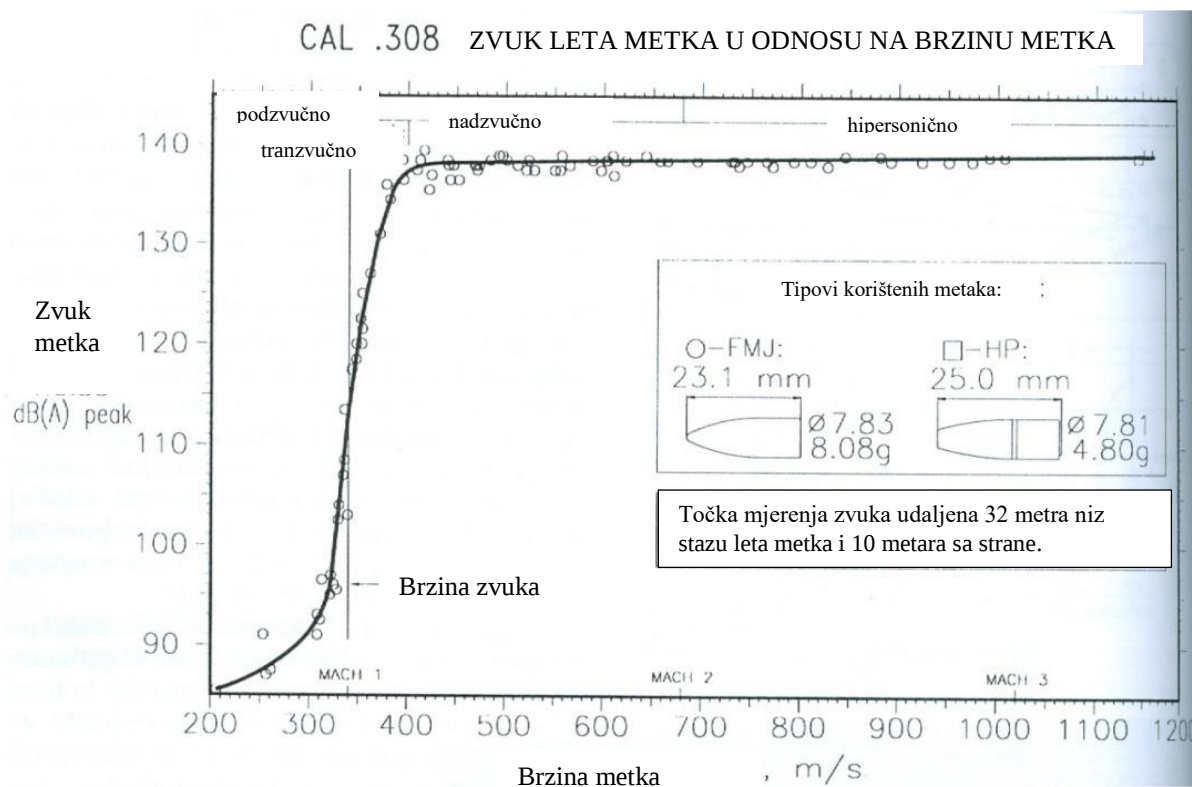


Slika 1. Grafički prikaz tlaka nakon ispaljivanja metka bez moderatora zvuka [2]



Slika 2. Grafički prikaz tlaka nakon ispaljivanja metka s moderatorom zvuka [2]

Moderator zvuka može jedino utjecati na balistički prasak putem smanjenja brzine projektila, no uz to dolaze dodatni izazovi poput smanjene preciznosti i izbora metaka. Na Slici 3 vidljiv je odnos između brzine metka i razine zvuka proizvedenog balističkim praskom. S većom brzinom metka doći će do primjetno glasnijeg balističkog zvuka [2].



Slika 3. Odnos između brzine metka i razine zvuka proizvedenog balističkim praskom [2]

Moderatori trebaju biti pravilno konstruirani kako bi se postiglo maksimalno smanjenje tlaka uz pomoć protoka plinova u unutarnje komore. S većim unutarnjim volumenom moderatora bolje će biti i prigušenje. Također, s povećanjem broja pregrada povećava se prigušenje, ali samo do određene vrijednosti nakon koje opada [4].

2. MODERATORI ZVUKA

Moderatori zvuka, znani kao i prigušivači, imaju glavnu funkciju smanjenja buke nastale ispaljivanjem metka kroz cijev vatrenog oružja [5].

Po definiciji to je svaka naprava pomoću koje se prigušuje ili smanjuje zvuk pucnja iz vatrenog oružja, uključujući bilo kakvu kombinaciju dijelova dizajniranih, redizajniranih ili namijenjenih za upotrebu u izradi ili sastavljanju moderatora zvuka za vatreno oružje [6].

Moderatori postoje u različitim oblicima, najčešće kao dodaci koji se spajaju na cijev ili su već integrirani na samo oružje. Također valja napomenuti kako moderator zvuka ni po jednoj definiciji nije krucijalna komponenta vatrenog oružja te njegovo korištenje ne smije utjecati na ostala svojstva pucnja, pogotovo ona koja će se odraziti na udarnu energiju metka. Međutim, osim zvuka, moderatori utječu i na svojstva poput trzaja, preciznosti, težine, težišta te bljeska [6, 7].

Na slici 4 prikazan je uzdužni presjek moderatora zvuka [8].



Slika 4. Uzdužni presjek moderatora zvuka [8]

2.1. Povijesni razvoj moderatora zvuka

Razvoj moderatora zvuka moguće je podijeliti na četiri faze. Prvi patenti ovih naprava datiraju iz 1899. godine, kada su J. Borrensen i S. Sigbjornsen patentirali ekspanzijske komore i prepreke, ideje koje se i danas koriste u modernim moderatorima zvuka. Unatoč tome što su ti patenti podneseni 1899. godine, bilježe se i stariji pokušaji i dizajni moderatora. Maxim Model 1908, razvijen od strane Hiram Perceya Maxima, bio je prvi komercijalno uspješan moderator zvuka. U drugoj fazi, koja se pojavila 70-ih godina, došlo je do upotrebe novih materijala i konfiguracija. Treća faza bila je 90-ih godina, a obilježena je upotrebom računalnih sustava i analiza. Početak 21. stoljeća označio je četvrtu fazu razvoja koja je uključivala primjenu novih materijala, dizajna i proizvodnih procesa koji su sposobni apsorbirati udarne valove municija. Danas postoje i prototipovi koji se koriste gelovima, tekućinom ili apsorpcijskim materijalima koji smanjuju razinu buke tijekom pucnja [2, 5].

2.2. Podjela moderatora zvuka

Podjela moderatora zvuka može biti po klasi na [9]:

- disperzivne moderatore zvuka – dolazi do smanjenja fluktuacije akustičkog tlaka pretvorbom zvučne energije u toplinsku
- reaktivne moderatore zvuka – glasnoća buke smanjuje se ovisno o geometrijskom obliku perforirane cijevi i širenju komora
- hibridne moderatore zvuka – kombinacija disperzivnih i reaktivnih moderatora zvuka koja se sastoji od izolacijskih materijala, perforirane cijevi i ekspanzijskih komora

Ipak, najčešća podjela moderatora je po strukturi na [2, 6]:

- moderatore zvuka koji se protežu uzduž cijevi – refleksi moderatora
- moderatore zvuka koji se stavljaju na kraj cijevi
- moderatore zvuka koji su integrirani u oružje

Refleks moderatori ili moderatori koji se protežu uzduž cijevi montiraju se tako što se cijev vatrenog oružja pričvrsti unutar moderatora zvuka. Prednost ovog dizajna je u tome što se ukupna duljina cijevi smanjuje što olakšava rukovanje [2, 6].

Primjer ove vrste moderatora je BR-Tuote TX8 te je prikazan na slici 5 [2].



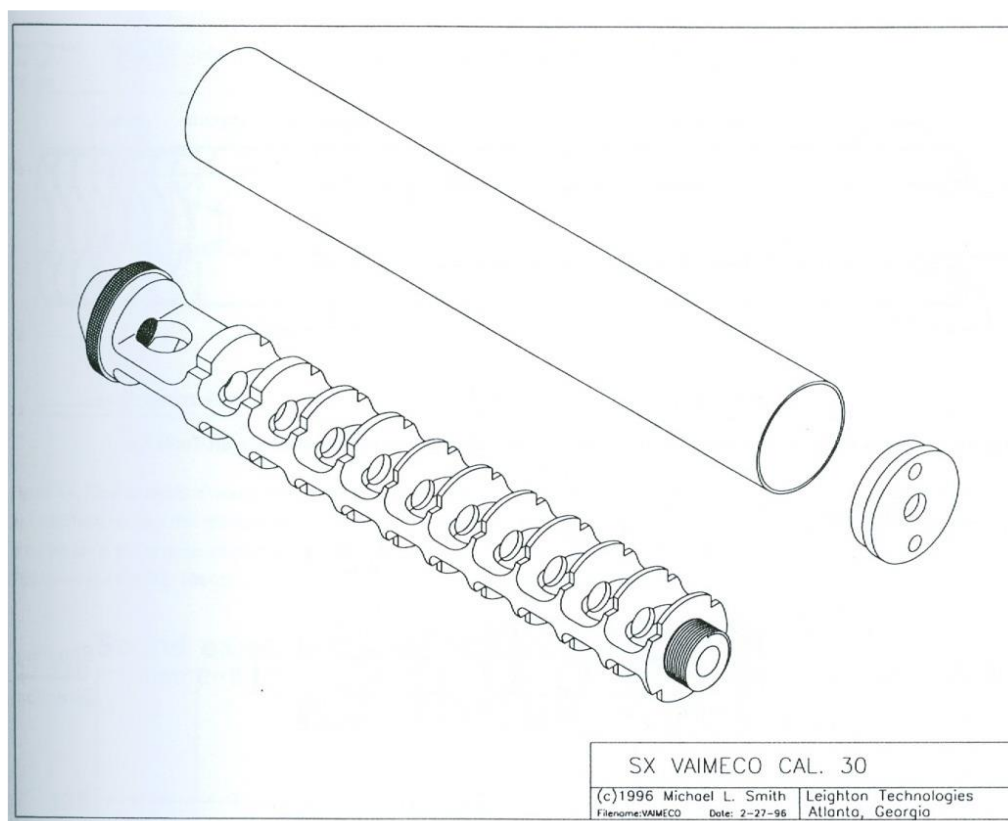
Slika 5. BR-Tuote TX8 moderator [2]

Sljedeći tip moderatora, koji se montira na kraj cijevi, koristi se u situacijama kada zbog debljine cijevi nije moguće montirati refleks modatore zvuka. Ovakav tip moderatora često se koristi te su zbog toga mnogi proizvođači razvili i standardizirali navoje na krajeve cijevi s idejom da je jedan moderator moguće pričvrstiti na što više modela oružja [6].

Primjere ove vrste moderatora moguće je vidjeti na slici 6 [6] i slici 7 koja prikazuje Vameico.30 SX [2].



Slika 6. Prikaz moderatora koji se montira na kraj cijevi [6]



Slika 7. Vameico .30 SX moderator [2]

Integrirani moderatori zvuka iziskuju puno više modifikacija na oružju nego preostala dva tipa moderatora. Oni su ugrađeni u oružje te postaju sastavnim dijelom koji djeluje kao velika ekspanzijska komora oko cijevi oružja. Korištenjem ove vrste moderatora dolazi do smanjenja brzine metka te je ograničen broj patrona za oružje [2].

Na slici 8 prikazan je integrirani moderator zvuka modela .308 Steyr SSG 6D [6].



Slika 8. Integrirani moderator zvuka modela .308 Steyr SSG 6D [6]

2.3. Zahtjevi za suvremene moderatore zvuka za lov

Pri konstruiranju moderatora zvuka treba imati na umu čimbenike poput [10]:

- težine – moderator ne smije biti pretežak jer to može utjecati na ukupnu težinu vatrenog oružja te otežati rukovanje
- pokretljivost – moderator ne smije utjecati na brzinu ili jednostavnost rukovanja
- generiranja rezonantnih frekvencija – neželjene frekvencije mogu utjecati na stabilnost i učinkovitost oružja
- stabilnost tijekom ponovnih pucnjeva – moderator treba ostati stabilan i siguran za dulju upotrebu

Također, suvremeni moderatori zvuka za lov trebali bi se odlikovati i sljedećim značajkama [1]:

- u usporedbi s prijašnjim verzijama, trebaju biti pouzdaniji i otporniji
- specifikacije smanjenja toplinskog potpisa trebaju biti poboljšane

- sustav za smanjenje zvuka, temperature produkata izgaranja i plamena treba biti učinkovit
- toksične pare plinovitih produkata izgaranja trebaju biti maksimalno smanjene

2.4. Prednosti korištenja moderatora zvuka

2.4.1. *Prevenција oštećenja sluha*

Moderator zvuka prigušuje zvuk pucnja na nekoliko načina: smanjuje unutarnju energiju plinova baruta koji izlaze iz cijevi, smanjuje njihovu brzinu i temperaturu izlaska te mijenja protok plinova baruta tako da dolazi do vrtloženja [11].

Europska unija ograničila je najveću dopuštenu razinu impulzivne buke na 140 dB. Prema tome, svaki zvuk jači od 140 dB smatra se potencijalno štetnim za sluh [2]. Kod visoko intenzivne buke, živci odgovorni za sluh mogu biti oštećeni [12]. Prilikom duže izloženosti buci i manja jačina zvuka može uzrokovati trajna oštećenja sluha. Čak i izloženost jačinama zvuka od 85 dB - 90 dB tijekom dugog vremenskog razdoblja pokazala se kao uzrok gubitka sluha. Nažalost, velik broj lovaca izlaže se riziku pucajući bez zaštitne opreme, no nisu samo oni u opasnosti [2]. Njihove obitelji, prijatelji i ljudi koji žive blizu lovišta također su izloženi buci koja nastaje pucanjem iz vatrenog oružja. Situacija je još ozbiljnija za životinje koje posjeduju sluh znatno osjetljiviji od ljudi, a za koje ne postoji nikakva zaštitna oprema [6, 7]. Smanjenjem buke kod pucnja smanjila bi se mogućnost uznemirenja ljudi i životinja u okolini [13].

Korištenje moderatora zvuka evidentno dovodi do manjeg broja ranjenih životinja i kontroliranih lovačkih situacija [2].

2.4.2. *Povećana preciznost*

Pravilno proizveden moderator zvuka utječe na preciznost na dva načina: smanjenjem trzaja oružja te kontroliranim oslobađanjem plinova. Prema nekim istraživanjima, moguće je smanjiti trzaj za 41 %, no ova brojka će se razlikovati ovisno o kalibru metka, dizajnu moderatora te ostalim faktorima [6,7]. Također se reducira bljesak oružja, što može biti korisno prilikom lova u slabo osvijetljenim uvjetima [2].

2.4.3. *Povećanje sigurnosti kroz komunikaciju*

Komunikacija tijekom lova vrlo je bitna za sigurnost lovaca i svih ostalih koji se nalaze u neposrednoj blizini. Lovna područja mogu biti bučna tako da osobe prisutne nemaju mogućnost komunikacije jer nikako ne mogu nadglasati ponavljajući zvuk pucnja. Prisutnost moderatora zvuka omogućava verbalnu komunikaciju na blizinu i daljinu [7].

2.5. Nedostaci korištenja moderatora zvuka

2.5.1. Pomak težišta oružja

S upotrebom moderatora zvuka pomiče se centar težišta oružja dalje od tijela lovca. S obzirom da lovci često moraju stabilno držati cijelu opremu, pomicanje centra mase i povećanje ukupne težine oružja mogu otežati njihov zadatak. Kako ti pomaci ne smiju utjecati na izvedbu oružja, potrebno je koristiti moderatore napravljene od materijala koji nemaju preveliku gustoću [7].

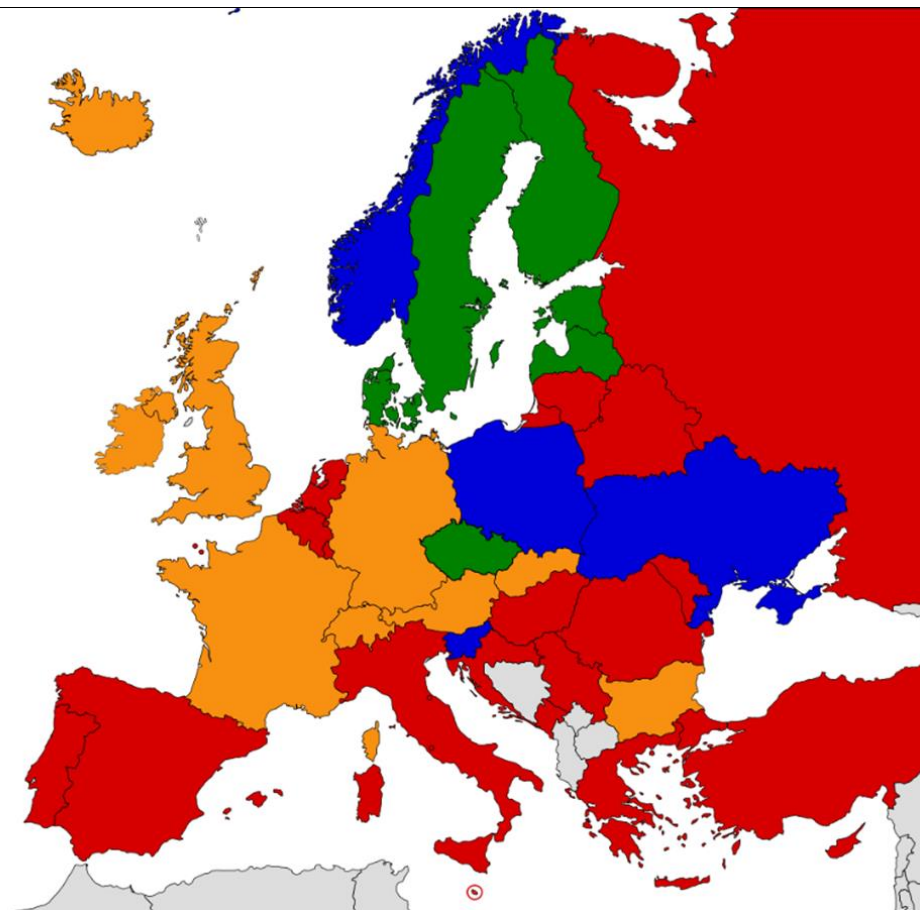
2.5.2. Cijena moderatora zvuka

Materijal, model te kalibar cijevi čimbenici su koji diktiraju cijenu moderatora zvuka. Moderatori niže cjenovne kategorije obično se koriste za manje kalibre, poput .17 Magnum, dok su skuplji moderatori, najčešće izrađeni od titanija, za veće kalibre poput .338LM ili za precizne metke namijenjene gađanju cilja [6].

2.5.3. Zakoni vezani za moderatore zvuka

U Zakon o nabavi i posjedovanju oružja (članak 7. stavak 1. točka 12), u Republici Hrvatskoj zabranjeno je posjedovanje i korištenje moderatora zvuka u svrhu lova, no u istom se zakoniku nalazi i prijedlog za brisanje točke 12 [14].

Na slici 9 moguće je vidjeti trenutni prikaz dostupnosti korištenja moderatora zvuka u Europi [14].



Slika 9. Prikaz dostupnosti korištenja moderatora zvuka u Europi [15]

U zemljama označenima plavom bojom posjedovanje moderatora zvuka nije regulirano. Zemlje označene zelenom bojom dozvoljavaju posjedovanje moderatora za upotrebu u lovu, sportu, samoobrani ili bez posebnog razloga, dok zemlje označene narančastom bojom dozvoljavaju posjedovanje moderatora samo uz posebnu dozvolu. Hrvatska, kao i ostale zemlje označene crveno, zabranjuje posjedovanje moderatora zvuka u potpunosti [15].

2.6. Materijali za proizvodnju moderatora zvuka

Izbor materijala za moderator zvuka ključna je stavka u konstrukciji. Neispravan odabir materijala može dovesti do smanjenog vijeka trajanja, loše izvedbe ili neuspjeha s ozbiljnim posljedicama. Tijekom procesa dizajniranja važno je u obzir uzeti različite faktore do kojih dolazi zbog naglih promjena uvjeta unutar i oko cijevi otvora nakon pucanja. 200 μ s nakon što je metak napustio cijev, plinovi izgaranja šire se i ubrzavaju na visoku brzinu, a temperatura može doseći i 1026,85 °C (1300 K). Brzina strujanja plina i eventualnih čestica neizgorenog baruta kreće se otprilike 1000 m/s - 1400 m/s, a tlak može doseći i 600 bara. Također valja naglasiti da oružje koje se koristi na otvorenim prostorima, poput onih za lov, izloženo je vanjskim uvjetima: UV svjetlu, kiši, trošenju

i sudarima. Usto, kemijski ostaci plinova i baruta u oružju mogu predstavljati opasnost za materijale [2].

Zbog svoje dugotrajnosti, raznolikosti procesa izrade, jednostavnog pristupa i razumne cijene, materijali koji se najčešće koriste za izradu moderatora su metali. Nehrđajući čelici učestalo se koriste pri proizvodnji moderatora zvuka za oružja s centralnim paljenjem, dok se za moderatore oružja s rubnim paljenjem gdje je niži tlak plina koristi aluminij [2].

2.6.1. Čelik

Iako se različiti materijali sve češće uvode u upotrebu za proizvodnju moderatora, čelik i dalje zadržava vodeću poziciju zbog svoje jednostavnosti izrade, visoke čvrstoće, niske cijene i raznolikosti legura. Jedini nedostaci čelika su njegova težina i gustoća. Moderator zvuka napravljen od čelika može težiti oko 0,5 kg - 1 kg, što ne utječe na vježbe gađanja, no u lovu svaka dodatna težina je bitna jer može otežati rukovanje. Prilikom gađanja čelični moderator se zagrijava te može doći do problema poput optičke distorzije nastale zagrijavanjem zraka zbog koje lovac može imati problema s nišanjem. Čelik nudi široku paletu legura i modifikacija koje se mogu koristiti, no najčešće se upotrebljavaju nehrđajući čelici koji zbog sadržaja kroma u sebi imaju odličnu korozijsku otpornost, pogotovo ako se koriste u vlažnim uvjetima [2].

2.6.2. Aluminij

Za proizvodnju moderatora zvuka manjeg kalibra koristi se aluminij. Zbog svoje male mase i jednostavnosti izrade smatra se izvrsnim materijalom tamo gdje su njegove mehaničke osobine dovoljne. U usporedbi s čelicima, aluminij je mekan te izložen toplinskim naporima, tlaku i abrazivnom trošenju od strane neizgorelih čestica goriva brzo se troši. Aluminij može izazvati probleme kada se koristi zajedno s drugim materijalima zbog svog termičkog širenja koje je veće od mnogih drugih materijala koji se koriste u proizvodnji moderatora zvuka. Kako bi se zaštitili dijelovi napravljeni od ovog materijala, površina se anodizira te se stvara debeli zaštitni oksidni sloj [2].

Prednosti aluminijske su njegova niska težina, ekonomičnost, dostupnost te mnogi načini proizvodnje. U lovu, rijetko kada dolazi do situacije gdje je potreban uzastopan broj hitaca u kratkom vremenu, te se prednost pridaje težini moderatora zvuka. Uz manje toplinske napore, moderator napravljen od aluminijske je pogodniji su od onih napravljenih od čelika [2].

2.6.3. Kompoziti od ugljičnih vlakana

Kompoziti napravljeni od ugljičnih vlakana uključuju polimernu matricu i čestice ili ugljična vlakna radi pojačanja. Prednost ovog materijala je u kombinaciji niske težine te dobrih mehaničkih svojstava. Ovaj snažan i lagan materijal često se koristi u zrakoplovnoj industriji i visokokvalitetnoj sportskoj opremi, od teniskih reketa do trupa zrakoplova. Moderator zvuka od ugljičnih vlakana obično se koriste s pištoljskim kalibrima zbog osjetljivosti polimerne matrice u kompozitima od ugljičnih vlakana na kombinaciju topline i mehaničkog stresa, a temperature i tlakovi ostaju niži kod pištoljskih kalibara. Usred neprekidnog pucanja, može doći do topljenja matrice što može rezultirati s ozbiljnim štetama na oružju i moderatoru [2].

Za razliku od dijelova napravljenih od čelika, dijelovi od kompozita od ugljičnih vlakana postavljaju određena ograničenja na dizajn i obradu kod koje može doći do smanjenja mehaničkih svojstava usred oštećenja. Stoga dijelovi napravljeni od kompozita od ugljičnih vlakana moraju biti oblikovani što je moguće bliže konačnom obliku kako bi se smanjila mogućnost oštećenja vlakana tijekom oblikovanja [2].

2.6.4. Titanij

Zbog svoje gustoće, titanij je pronašao upotrebu u mnogim granama industrije poput: kemijske, medicinske, sportske te zrakoplovne. Ključna značajka ovog materijala je spoj dobrih mehaničkih svojstava, niske težine i izvrsnih kemijskih karakteristika. Na svojoj površini, titanij formira pasivni oksidni sloj koji ga čini otpornim na koroziju. Jedinu nedostatak ovog materijala je složen proces proizvodnje jer je titanij izrazito reaktivan s okolinom pri visokim temperaturama te se može taliti samo u vakuumu ili inertnoj atmosferi. Moderator zvuka od titanija sve su popularniji, no cjenovno su još uvijek u skupljem rangu [2].

2.6.5. Ostali materijali

Osim glavnih materijala za izradu moderatora zvuka, provedena su istraživanja kako bi se pronašli alternativni. Polimerni materijali koji su većinom upotrebljavani kao matrice kompozitnih materijala i gumene brtve odlično su prigušavali zvuk ispućavanja, no negativno su utjecali na brzinu metka i preciznost jer su se već nakon 10 - 20 pucnjeva istrošili. Uobičajeni keramički materijali pokazali su se često previše krhki na tlačne i toplinske udare neizgorenog praha, osobito tijekom brze paljbe [2].

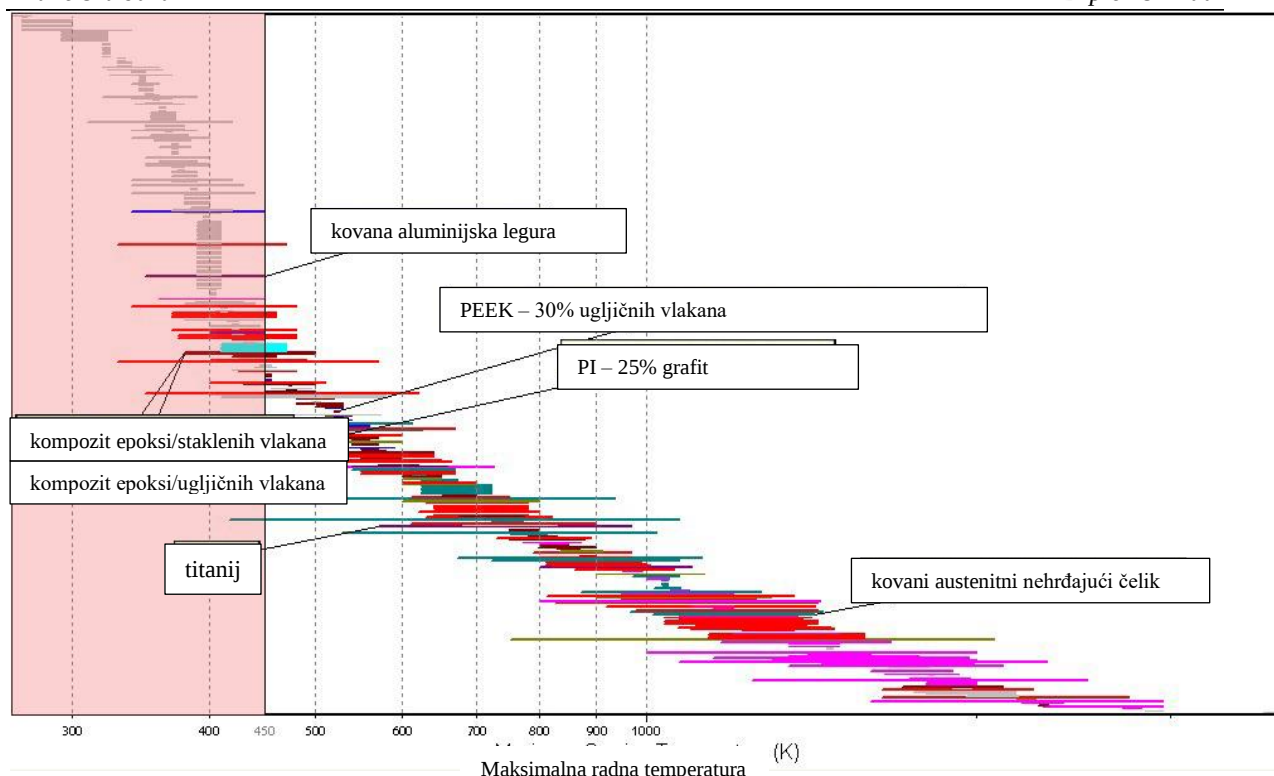
U potrazi za ostalim alternativnim materijalima za proizvodnju moderatora zvuka važno je postaviti odgovarajuće zahtjeve koji se razlikuju od namjene te od oružja do oružja. Primjerice za moderator

zvuka za lovačku pušku kalibra .308 potrebno je postaviti veći kriterij za tvrdoću i čvrstoću od moderatora pištolja kalibra .22 kod kojeg je puno manji tlak plinova te je manje punjenje baruta u metcima. Kod automatske puške kalibra 7.62 postavljeni su još veći zahtjevi na abrazijsku i toplinsku otpornost materijala za izradu moderatora. Što su niži zahtjevi za karakteristike moderatora to je veći raspon odabira materijala [2].

U jednom istraživanju napravljenom za moderator zvuka oružja mogućeg kalibra .308, namijenjenog za lov i vježbanje, korišten je CES program (eng. *Cambridge Engineering Selector*) proizvođača Ansys (Ansys Inc., Canonsburg, Pennsylvania, USA) u želji pronalaska novog alternativnog materijala koji će zadovoljiti postavljene kriterije. Budući da u lovu broj naizmjenično ispućanih metaka nije velik, zahtjevi za visoke radne temperature su rijetki, ali zbog velikih tlakova tražena je visoka čvrstoća. Pomoću CES programa zadani zahtjevi uspoređeni su s bazom podataka te oni materijali koji nisu zadovoljavali uvjete su eliminirani. U prvom dijelu postupka traženja novih materijala za modatore, identificirao se skup zahtjeva koji su odobravali materijale s prethodnom primjenom u moderatorima zvuka, dok su istodobno isključivani oni koji nisu mogli zadovoljiti predefinirane uvjete. Druga faza obuhvaćala je proučavanje grupa materijala preporučenih od strane softvera, s ciljem prepoznavanja izvedivih opcija za dodatna istraživanja. Filtriranje se temeljilo na odabiru jedne ili dvije karakteristike materijala koje su zatim djelovale kao osi odabira na grafičkim kartama, a zatim na odabiru dva materijala koji su već korišteni u moderatorima zvuka i crtanjem granice između njih. Oni materijali koji su bili u crvenom području karata eliminirani su iz daljnjeg istraživanja [2].

2.6.5.1. Toplinski i kemijski zahtjevi

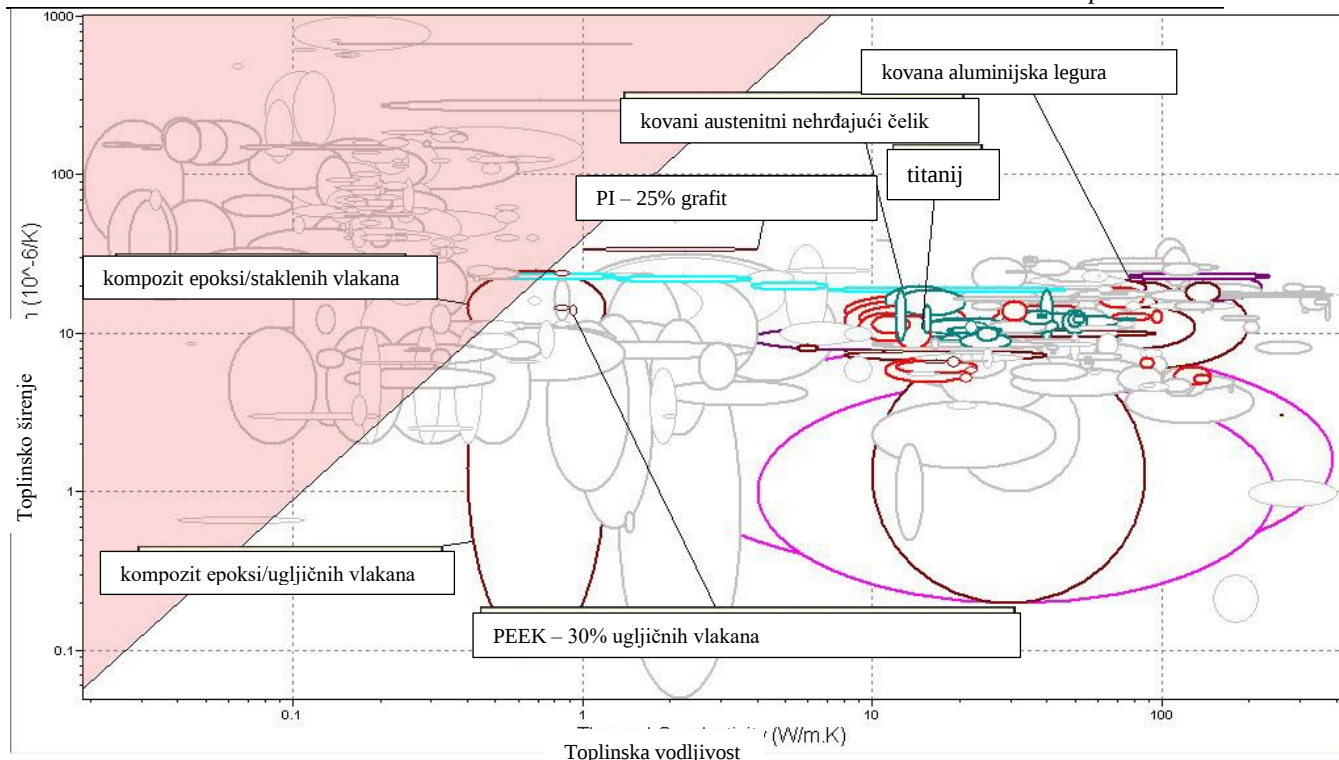
Na početku istraživanja, u CES softveru postavljeni su zahtjevi poput: otpornosti na koroziju, zapaljivost, habanje, organska otapala i oksidaciju pri 500 °C. Pošto je namjena bila pronaći odgovarajuće alternativne materijale za moderator zvuka lovačkog oružja, granica od 180°C postavljena je kao zahtjev za maksimalnu radnu temperaturu materijala (T_{max} , K). Na sljedećoj slici 10 prikazana je grafička karta materijala koji zadovoljavaju uvjete [2].



Slika 10. Prikaz materijala korištenih u proizvodnji moderatora zvuka i maksimalne radne temperature [2]

Osim otpornosti na toplinu, kao zahtjev za materijal uzeta je i toplinska distorzija koja se najbolje opisuje korištenjem materijalnih svojstava toplinske vodljivosti (λ , W/mK) i širenja (α , $\text{m}^2/(\text{s K})$). Značajno toplinsko širenje uzrokuje naprezanje u materijalu kada se temperature mijenjaju, dok visoka toplinska vodljivost ubrzava izravnavanje temperatura kroz materijal. Materijali s visokim toplinskim širenjem i niskom toplinskom vodljivošću snažno se šire i skupljaju s porastom temperature, ali ta naprezanja su lokalizirana te to rezultira značajnim unutarnjim naprezanjima.

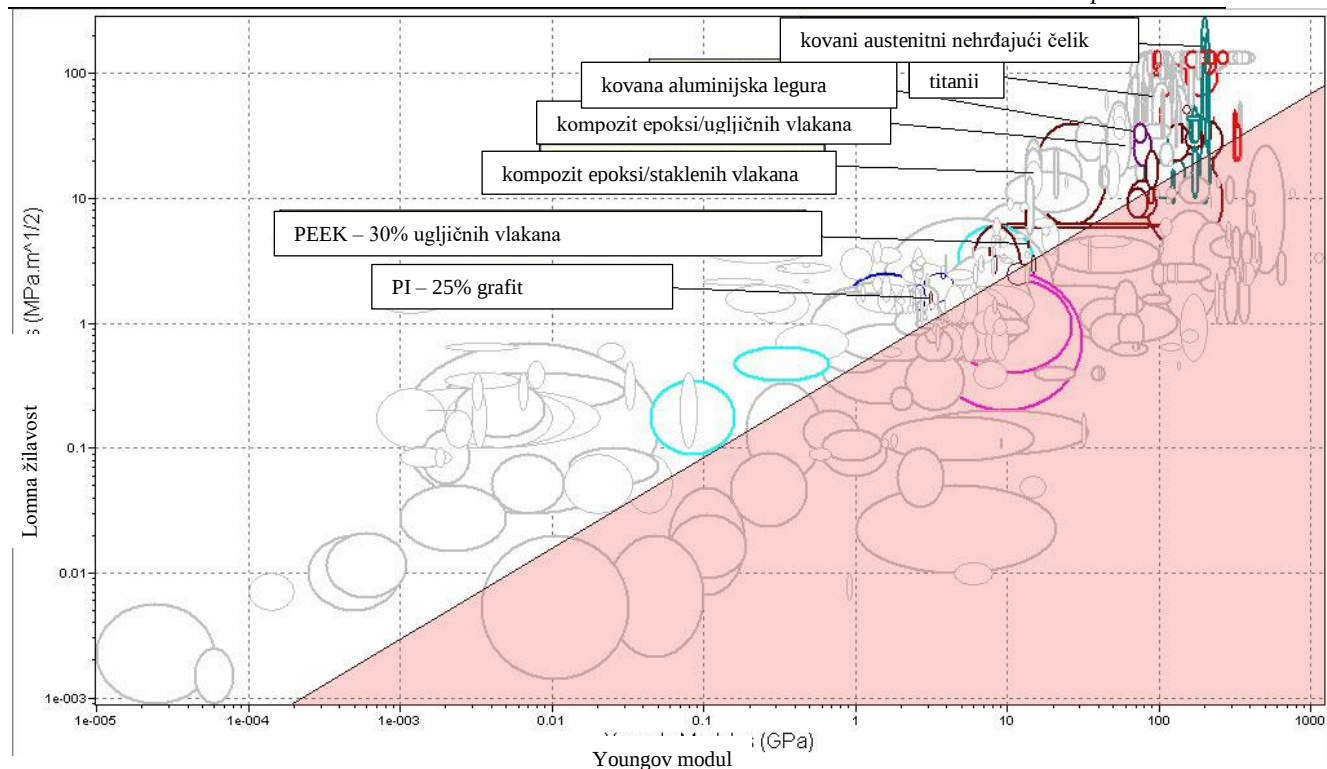
S druge strane, materijali s niskim toplinskim širenjem i visokom vodljivošću imaju manje promjene dimenzija čak i pri velikim varijacijama temperature, te se promjene ravnomjerno šire, a unutarnja naprezanja su minimalna. Uz ova dva faktora napravljena je nova filtracija, a rezultati su prikazani na slici 11 [2].



Slika 11. Prikaz toplinskog širenja naspram toplinske vodljivosti materijala [2]

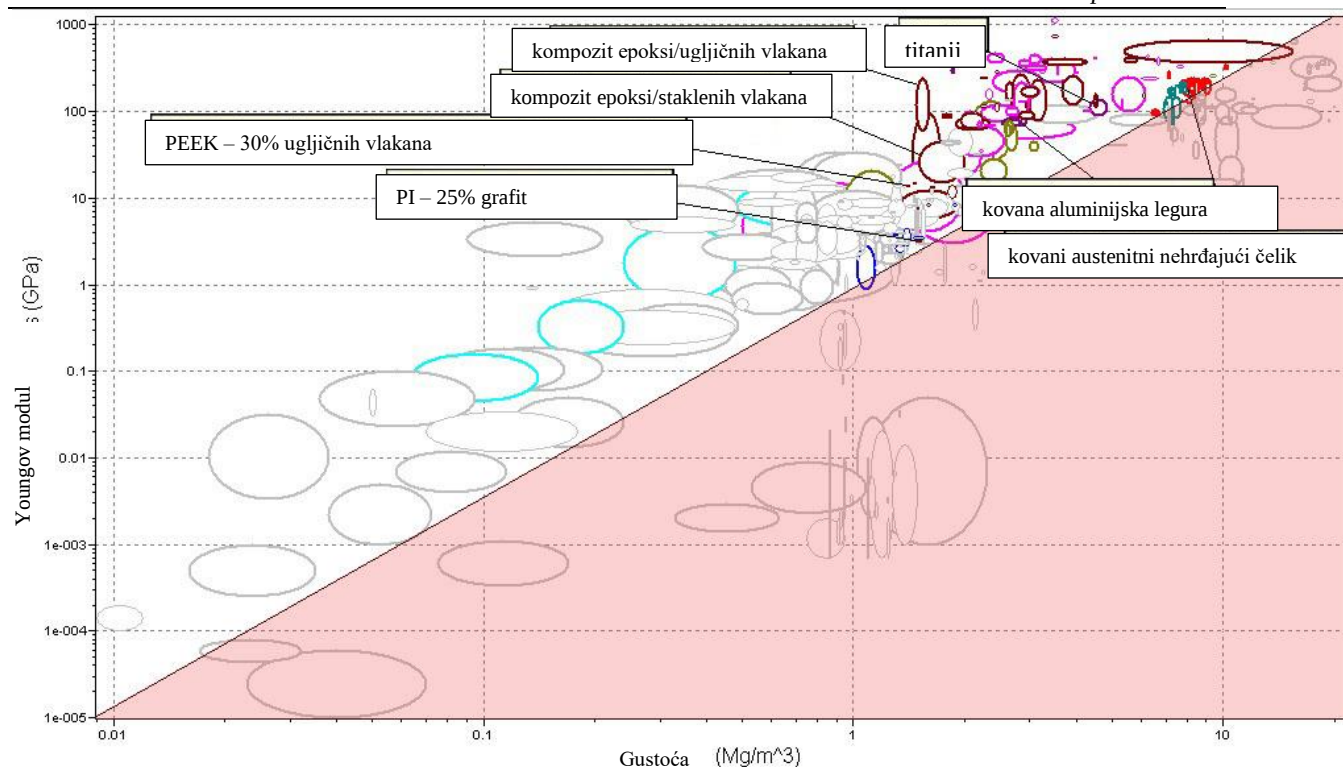
2.6.5.2. Mehanički zahtjevi

Nakon filtracije materijala s kemijskim i toplinskim zahtjevima na red su došli mehanički. Kriteriji koji su se tražili su visoka čvrstoća koja je neophodna kako ne bi došlo do deformacije strukture, te otpornost na udarni lom. Pomoću otpornosti na udar isključili su se materijali koji su previše lomljivi da bi izdržali teže uvjete. Lomna žilavost materijala (K_{Ic} , $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$) uspoređena je s Youngovim modulom (E , GPa) te su na sljedećoj slici 12 prikazani filtrirani materijali koji su podložni udarnom lomu. Tvrdi materijali imaju visok Youngov modul, dok materijali sposobni izdržati stres uzrokovan lomom imaju visok koeficijent lomne žilavosti [2].



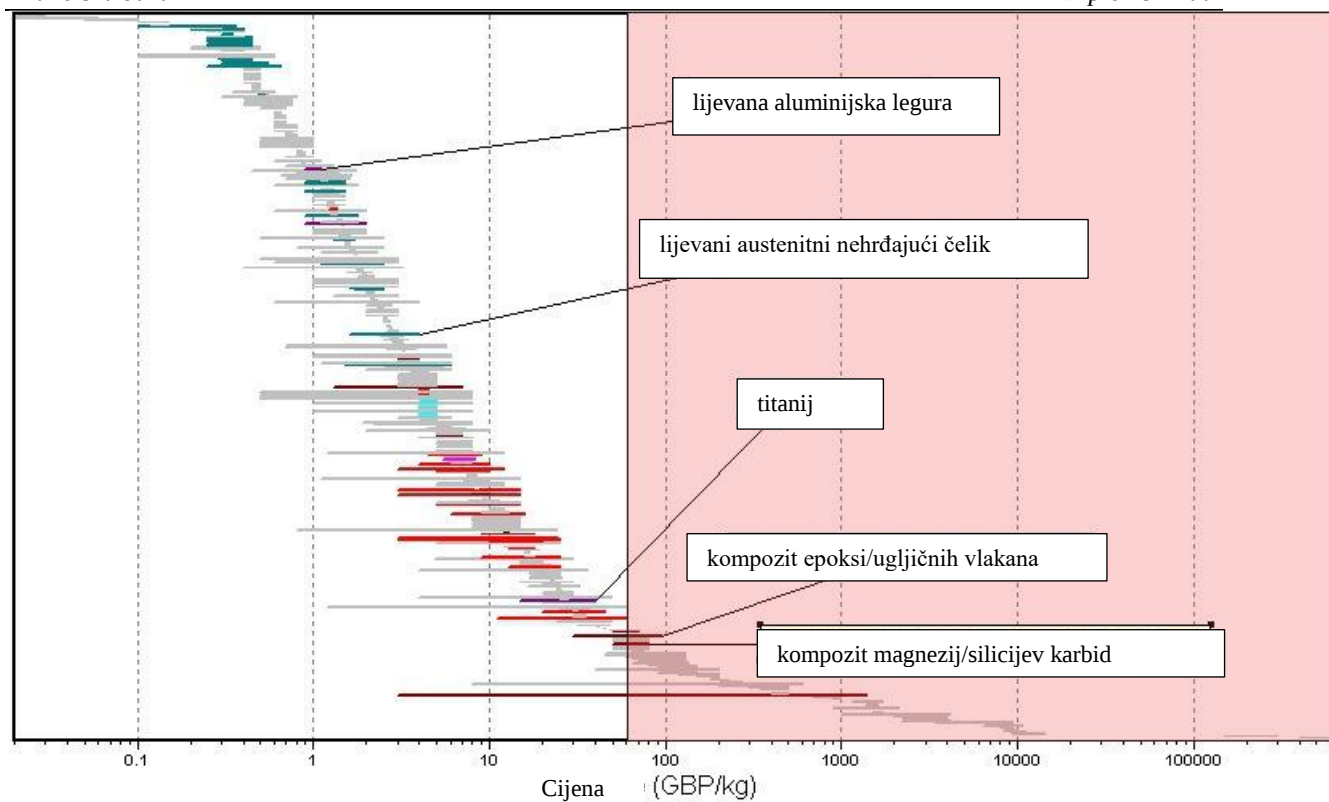
Slika 12. Prikaz lomne žilavost naspram Youngovog modula [2]

Čvrstoća materijala povezana je s Youngovim modulom koji opisuje koliku deformaciju uzrokuje određeno naprezanje. Za sljedeći kriterij uzet je odnos Youngovog modula i gustoće (ρ , g/m^3) materijala te su filtrirani materijali koji su zahtijevali preveliku težinu ili nisu pružali dovoljnu čvrstoću. Rezultati su prikazani na slici 13 [2].



Slika 13. Čvrstoća materijala prikazana Youngovim modulom naspram gustoće materijala [2]

Nakon primjene ovih filtera dobiven je popis od potencijalnih 72 materijala za upotrebu u proizvodnji moderatora zvuka za lovačku pušku. Te alternative mogle su se podijeliti u manje skupine, pri čemu su čelici i lijevano željezo, aluminijske legure, polimerni matični kompoziti, titanove i niklove legure te legure visokih temperatura činile najveće skupine. Zadnji korak bio je filtriranje po cijeni te je za granicu postavljeno otprilike 69,72 eura po kilogramu. Rezultati su prikazani na slici 14 [2].



Slika 14. Cijena po kilogramu za moguće alternativne materijale za izradu moderatora zvuka [2]

Nakon zadnjeg filtera, ostale su 64 skupine potencijalnih materijala. Eliminacijom već korištenih materijala za izradu moderatora zvuka, CES program prikazao je popis potencijalnih alternativnih rješenja poput: legura nikla volfram, kompozita aluminijskog/silicijskog karbida, kompozita magnezij/silicijev karbid, aluminij-bronce, legure molibdena, polimid/grafit kompozita, legure nikla, legure kroma nikla, cirkonija raznih razreda, te kobalt superlegura. [2]

3. ADITIVNA TEHNOLOGIJA

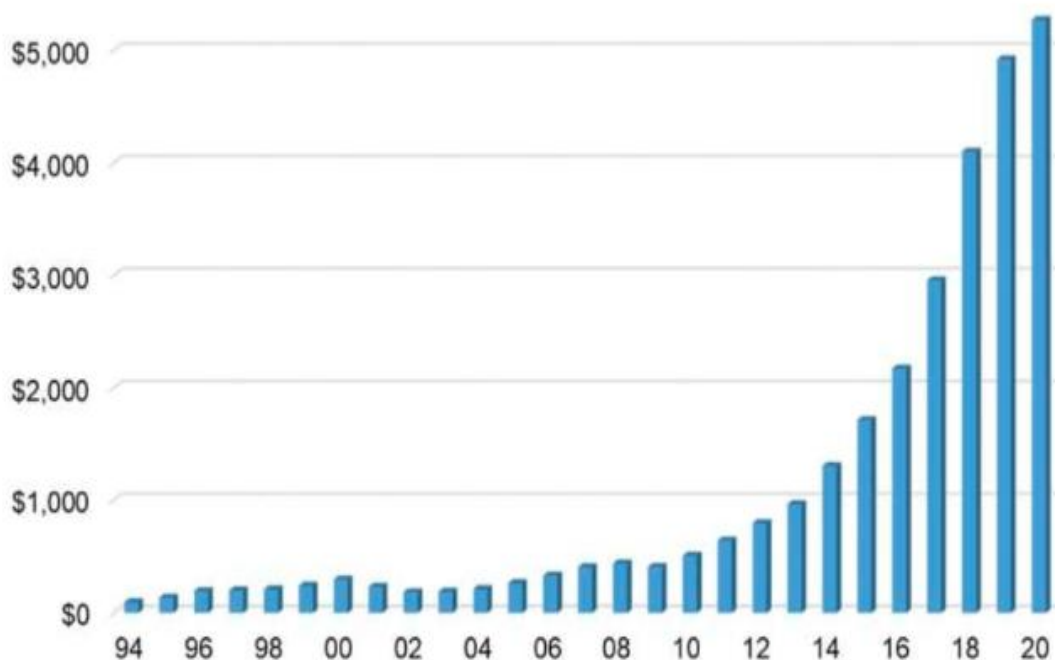
S rastućim zahtjevima tržišta standardi za razvoj i proizvodnju sve su stroži, a uz naglasak na poboljšanje kvalitete proizvoda i povećanje fleksibilnosti u proizvodnim i razvojnim procesima istodobno se nameću potrebe za smanjenjem troškova i vremena izrade. Smjer razvoja različitih grana industrije je prelazak s masovne proizvodnje na maloserijsku, pa često čak i personaliziranu proizvodnju, što je osobito značajno u medicinskom području.

Da bi se odgovorilo na ove zahtjeve tržišta, od sredine 80-ih godina dvadesetog stoljeća razvijaju se metode aditivne proizvodnje koje se temelje na postupku dodavanja materijala sloj po sloj. Ovakva proizvodnja omogućuje izradu modela vrlo kompleksne geometrije izravno iz 3D CAD modela [16].

U prošlosti se aditivna tehnologija uglavnom koristila za izradu prototipova, no u posljednjim godinama, zbog sposobnosti prilagodbe većim serijama, postalo je široko primjenjivano u industriji automobila, zrakoplovstva, građevine, elektronike i medicinskih uređaja [17].

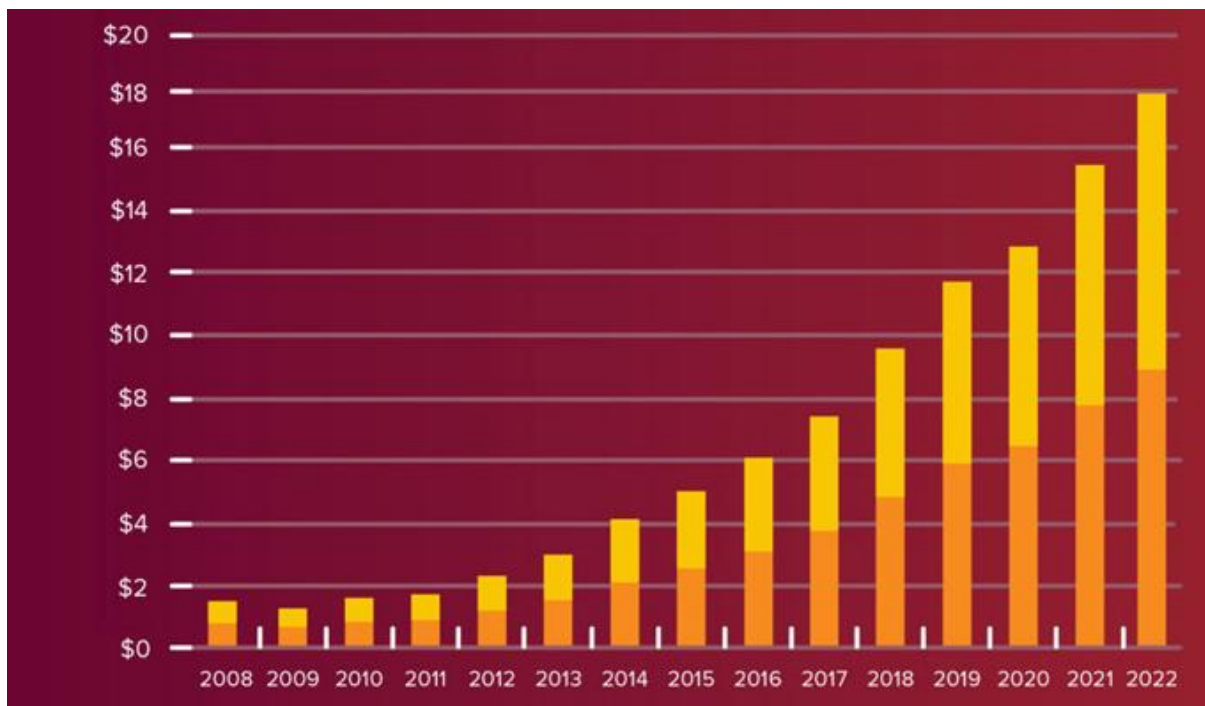
Mnogi vjeruju kako će u budućnosti upotreba aditivnih tehnologija biti jedna od najbitnijih pokretača proizvodne ekonomije, tj. četvrte industrijske revolucije [16].

Na slici 15 prikazana je proizvodnja dijelova pomoću aditivnih tehnologija u 2021. godini te je moguće vidjeti kako se kroz prošlost povećavala proizvodnja i njezin trošak.



Slika 15. Proizvodnja AM dijelova u 2021. godini [18]

Na slici 16 prikazan je globalni prihod 2022. godine od usluga aditivne proizvodnje (žuto) i proizvoda (narančasto) izražen u milijardama dolara. Moguće je primijetiti trend porasta u obje kategorije.



Slika 16. Globalni prihod 2022. godine od AM proizvodnje i proizvoda [19]

3.1. Povijest aditivne proizvodnje

1960-ih u institutu Battelle Memorial nastala je ideja o aditivnoj proizvodnji, gdje je pokušano učvršćivanje fotopolimernih smola s dvije laserske zrake različite valne duljine. No, pravi proboj u razvoju 3D tehnologije dogodio se s razvojem stereolitografije (eng. *Stereolithography* – SL/SLA) kada je tvrtka 3D Systems 1987. godine komercijalizirala novi postupak stvrdnjavanja tankih polimernih slojeva osjetljivih na UV zračenje pomoću lasera. U 1991. godini razvila su se dva nova postupka aditivne proizvodnje različita od stereolitografije - postupak očvršćivanja taloženjem (eng. *Fused Deposition Modeling* – FDM) tvrtke Stratasys (USA) te postupak laminiranja (e. *Laminated Object Manufacturing* – LOM) tvrtke Helisys (USA). Tvrtka DTM je godinu kasnije predstavila uređaj na metodi laserskog srašćivanja (eng. *Selective Laser Sintering* – SLS), a 1994. godine Solidscape (tada Sanders Prototype) lansirao je uređaj ModelMaker koji se temeljio na ink-jet tehnologiji. 1997. Početkom 2000. godine

tvrtka Z Corp predstavila je prvi višebojni 3D printer (Z402C), a godinu dana kasnije, tvrtka EOS (Njemačka) prah na osnovi čelika nazvan DirectSteel 20-V1.

Godine 2009., ASTM International Committee F42 osnovana je kao međunarodna komisija za postupke aditivne proizvodnje [20].

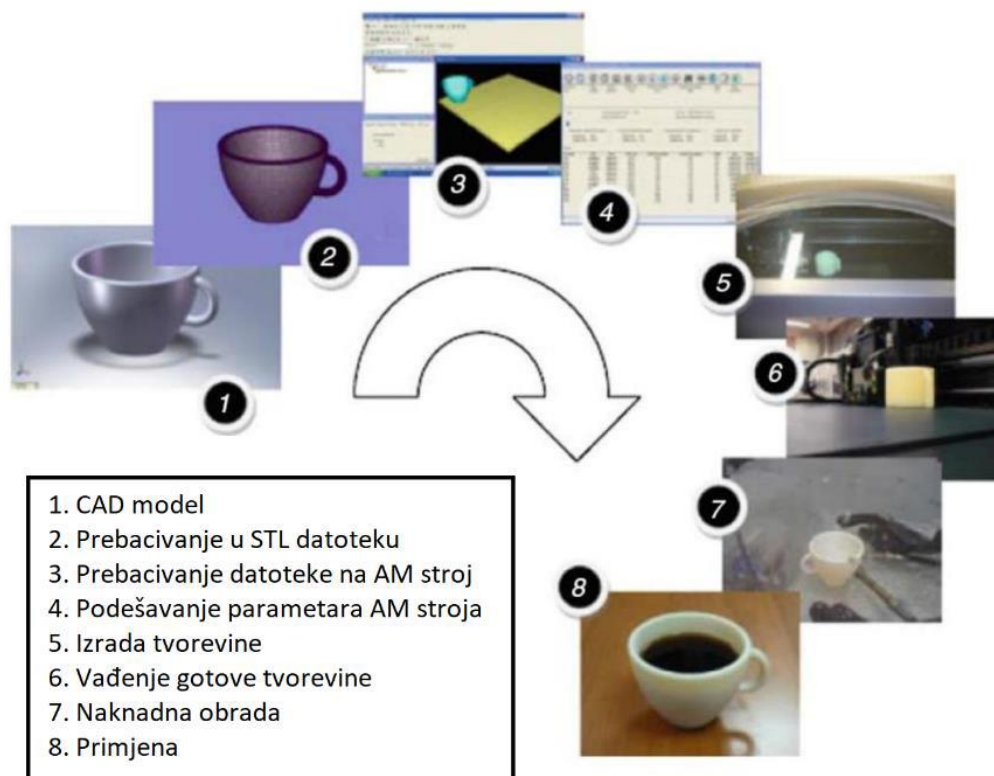
U današnje vrijeme moguće je osim osnovnog polimernog materijala koristiti i metale, keramiku i kompozite kao materijal za 3D tiskanje [21].

3.2. Postupak izrade aditivnim tehnologijama

Postupak izrade dijelova pomoću aditivne tehnologije uvijek se odvija na isti način [16]:

1. Izrađuje se CAD model
2. CAD model pretvara se u STL datoteku
3. STL datoteka prebacuje se na stroj za 3D tiskanje
4. Parametri na stroju za 3D tiskanje se podešavaju
5. Izrađuje se tvorevina
6. Tvorevina se vadi iz stroja
7. Ako je potrebno naknadno se obrađuje tvorevina
8. Primjena

Na slici 17 prikazani su koraci kod AM proizvodnje.



Slika 17. Prikaz koraka kod AM proizvodnje [16]

Nakon što se u CAD programu izradi trodimenzionalni model, on se sprema u STL datoteku (*eng. Standard Tessellation Language*) koja je uvedena od strane 3D Systems-a 1987. godine. Model je spremljen kao mreža povezanih trokuta, no pošto STL datoteka nema mogućnost korištenja boja, od 2009. uvodi se i AMF datoteka (*eng. Additive Manufacturing File*) koja zajedno sa STL-om čini osnovu za rezanje u slojevima i standard za 3D proizvodnju. Prednost AMF datoteke je što može sadržavati boje svakog trokuta u mreži i pojedinog volumena te opise materijala. Za postupke kao PolyJet, SLA i FDM potrebno je napraviti potpurnu strukturu kako bi se spriječila deformacija tijekom slojevite izgradnje. Nakon podešavanja parametara na AM stroju (snaga, brzina, debljina sloja) kreće izrada tvorevine. Potrebno je paziti da temperatura prilikom rukovanja s izrađenom tvorevinom nije previsoka. Dodatno umrežavanje može biti potrebno u postupcima poput 3DP-a i stereolitografije kako bi se dovršila polimerizacija i poboljšala se mehanička svojstva. Ako je potrebno, naknadno se obrađuje tvorevina s postupcima poput uklanjanja viška materijala i potporne strukture, obrade površine, bojanja i dr. [16].

3.3. Postupci proizvodnje pomoću aditivnih tehnologija

Pomoću postupaka proizvodnje aditivnim tehnologijama, moguće je izraditi tvorevine polimernih, metalnih i keramičkih materijala u obliku praha, kapljevine, folija, žica, itd., a koji se prema vrsti materijala mogu podijeliti na [16]:

- materijale u obliku praha (postupci poput 3DP-a, SLS-a)
- krute materijale (postupci poput FDM-a, LOM-a)
- kapljevite materijale (postupci poput PolyJet-a, stereolitografije)

U tablici 1 navedeni su postupci proizvodnje aditivnim tehnologijama i materijali koji se koriste za navedene postupke [22].

Tablica 1. Postupci proizvodnje i materijali koji se koriste za njih [22]

Postupak	Materijal
Stereolitografija – SLA	Fotoosjetljiva polimerna smola, akrilne i epoksidne smole (npr. PMMA, EP, PE-HD), keramika
PolyJet	Fotoosjetljiva smola
Očvršćivanje digitalno obrađenim svjetlosnim signalom – DLP	Fotoosjetljiva polimerna smola
Selektivno lasersko srašćivanje – SLS	polimeri (ABS, PC, PA, PS, PMMA), ojačani polimeri (npr. staklom), polimeri s raznim punilima, keramika, metali (nehrđajući čelici, legure aluminija, titana)
Izravno lasersko srašćivanje metala – DMLS	Čelici legirani s Ni, Cr, Mo, Si, V, nehrđajući čelici, maraging čelici, kobalt-krom legure (CoCrMo), niklove legure (NiCr22Mo9Nb), titanove legure (Ti6-Al4-V) i aluminijske legure (AlSi10Mg)

Posredno lasersko srašćivanje metala – IMLS	Nehrđajući čelici, bakar i njegove legure, aluminij i njegove legure
Selektivno lasersko taljenje (SLM)	Nehrđajući čelici, visokolegirani čelici, legure aluminija, titanove legure (Ti-6Al-4V, Ti-6Al-7Nb, NiTi, TiB) i čisti titan, kobal-krom legure, Inconel legure, legure bakra, legure nikla i aluminija (Cu-Ni-Al)
3D tiskanje – 3DP	Polimeri, keramika, škrob, gips, metali
Taložno očvršćivanje – FDM	Plastomeri (ABS, PE-HD, PE-LD, PP, PC, PPSU, PLA), keramika
Proizvodnja laminiranih objekata – LOM	Polimeri u obliku folija (PVC), papir, metalne ploče i folije, kompoziti s epoksidnom matricom i staklenim ojačavalima
Izravno taloženje metala – LENS	Nehrđajući čelici, alatni čelik, legure nikla, legure titana
Izravno taloženje metalnog praha – DMD	Legure nikla, kobalta, titana, mangana, kroma
Taljene pomoću snopa elektrona – EBM	Titan i njegove legure, volfram, niobij, tantal, platina, paladij, cirkonij, iridij, nikal, legure nikla

4. EKSPERIMENTALNI DIO

4.1. Konstruiranje 3D CAD modela moderatora zvuka

Zadatak ovog diplomskog rada bio je izraditi ispunu, tj. strukturu aktivnog dijela moderatora zvuka za lovačku pušku manjeg kalibra. Na slikama 18 i 19 prikazani su dijelovi moderatora zvuka proizvedenog od aluminija.



Slika 18. Prikaz dijelova moderatora zvuka od aluminija



Slika 19. Moderator zvuka od aluminija bez ispune

Ispunu aktivnog dijela moderatora zvuka bilo je potrebno prvotno konstruirati u CAD programu (u ovom slučaju korišten je OnShape (verzija 2019. dio PTC-a iz Massachusetts-a, USA)). Za konstruiranje modela bilo je potrebno obratiti pozornost na zahtjeve konstruiranja koja nameće aditivna tehnologija.

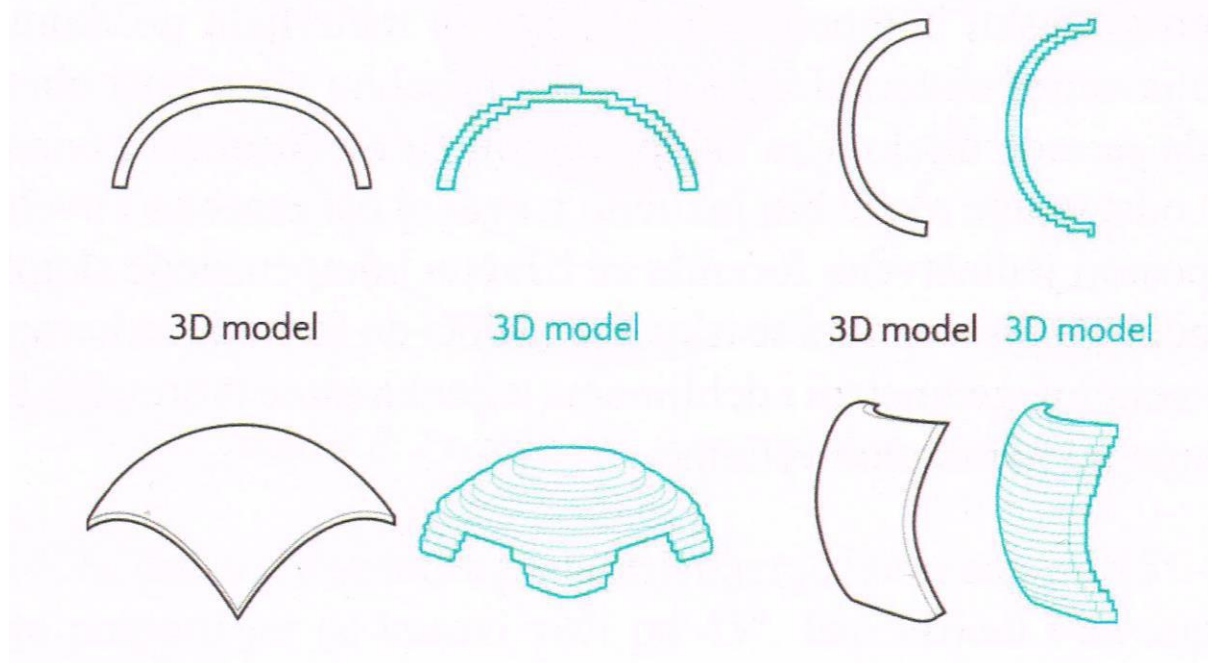
4.2. Pravila konstruiranja za aditivnu proizvodnju

Kako bi model načinjen pomoću postupaka aditivne tehnologije bio što vjernije i kvalitetnije napravljen, potrebno je paziti na parametre poput [23] :

- debljine stjenke
- dimenzijske točnosti

- anizotropija
- podloga
- orijentacija i kvaliteta površine
- potporne strukture
- sklopovi
- vitoperenje
- zračnost pomičnih dijelova
- ukrućenja (npr. rebrasta)
- navoji
- oštri bridovi i kutovi
- rastavljanje na dijelove
- moguće greške prilikom izrade STL datoteka

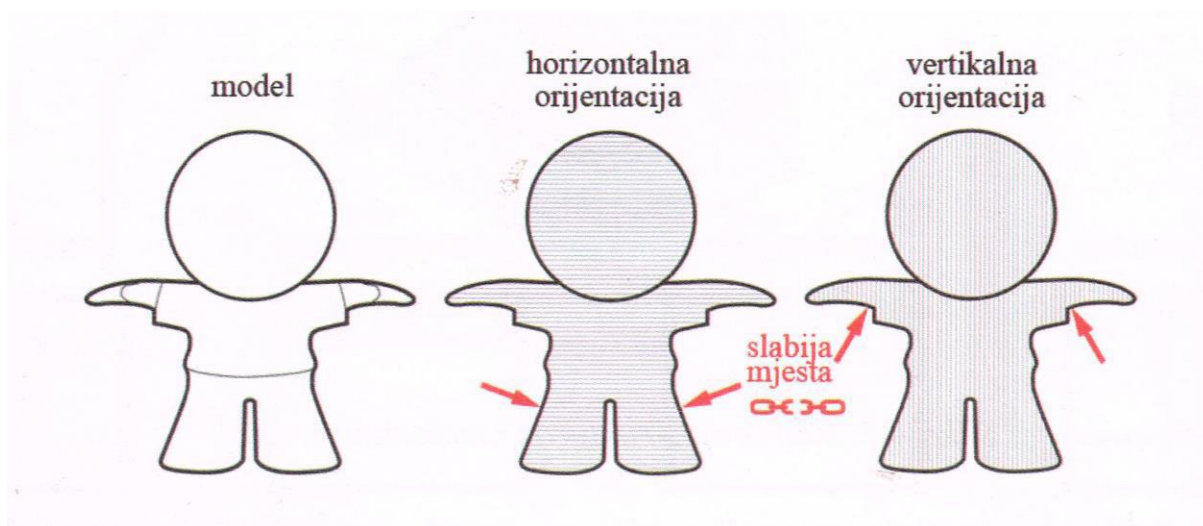
Preporučljivo je odabrati debljinu stjenke veću od 1mm, tj. minimalno 2 - 3 puta veću debljinu od promjera mlaznice za ispisivanje. Također, potrebno je pravilno orijentirati model u prostoru kako se ne bi narušila kvaliteta ispisa [23]. Pravilna orijentacija modela prikazana je na sljedećoj slici:



Slika 20. Prikaz pravilne orijentacije modela prilikom 3D ispisa [23]

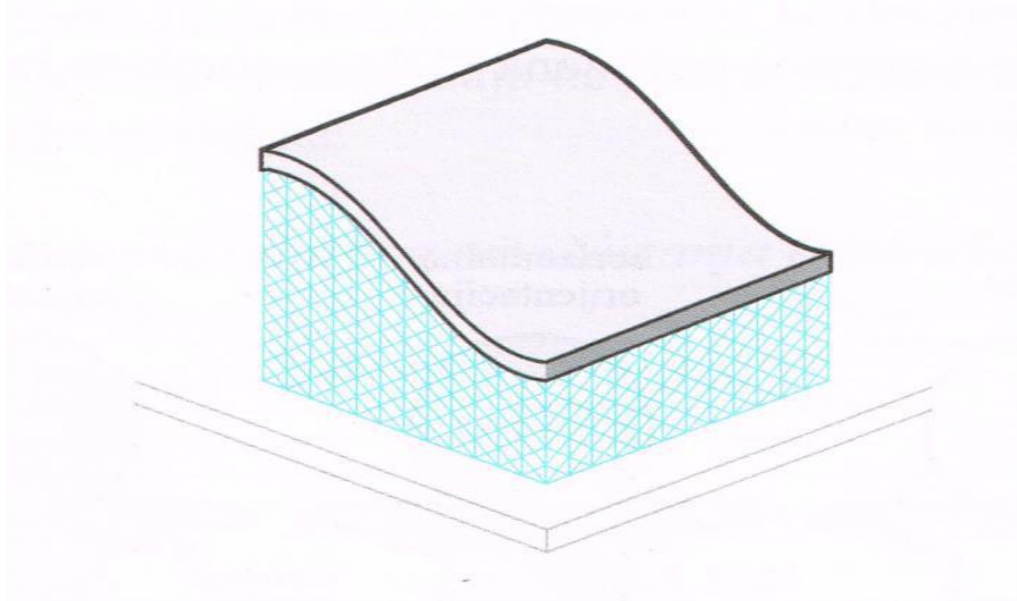
Pojava anizotropije javlja se kod izrade sloj po sloj te su zbog nje tanki dijelovi podložni pucanju na slabim točkama. Preporučljivo izbjegavati dijelove na modelu koji su paralelni s bazom ili donjom ravninom te je važno osigurati potporu na tim mjestima kako bi se spriječilo pucanje [23].

Na slici 21 prikazana je pojava anizotropije.

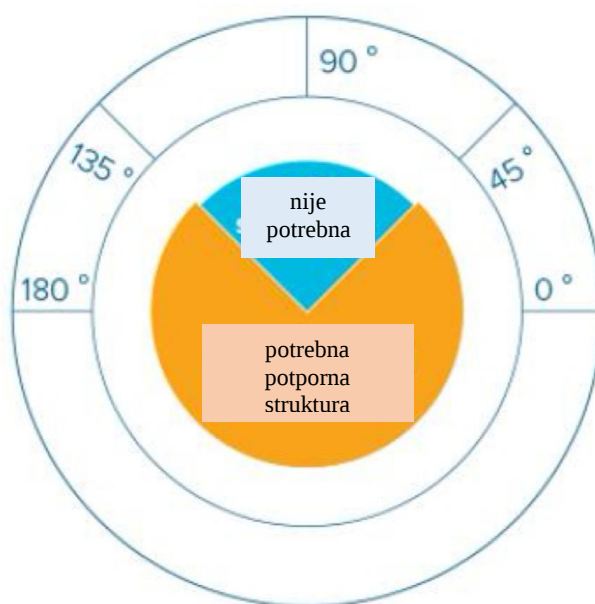


Slika 21. Pojava anizotropije [23]

Kod upotrebe niskobudžetnih pisača potrebno je pripaziti na dimenzijsku točnost kako kasnija odstupanja ne bi smjela utjecati na dijelove koji funkcioniraju kao sklop. Također, kod dijelova koji se izrađuju u zraku potrebna je potporna struktura kako ne bi došlo do urušavanja [23]. Na slici 22 prikazana je potporna struktura, a na slici 23 pravilo 45 stupnjeva.

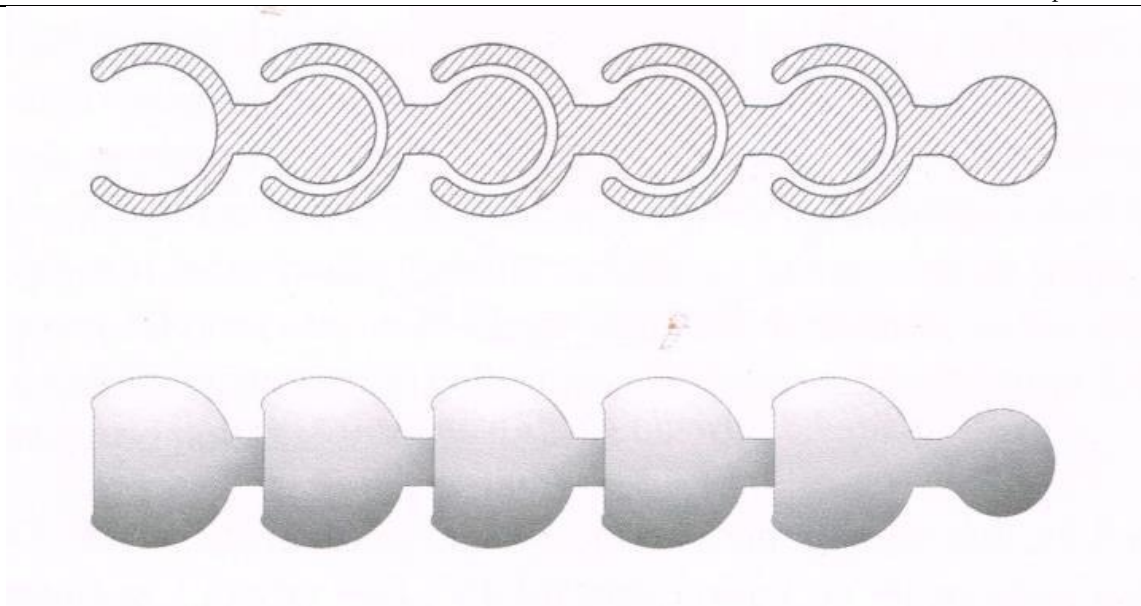


Slika 22. Prikaz potporne strukture [23]



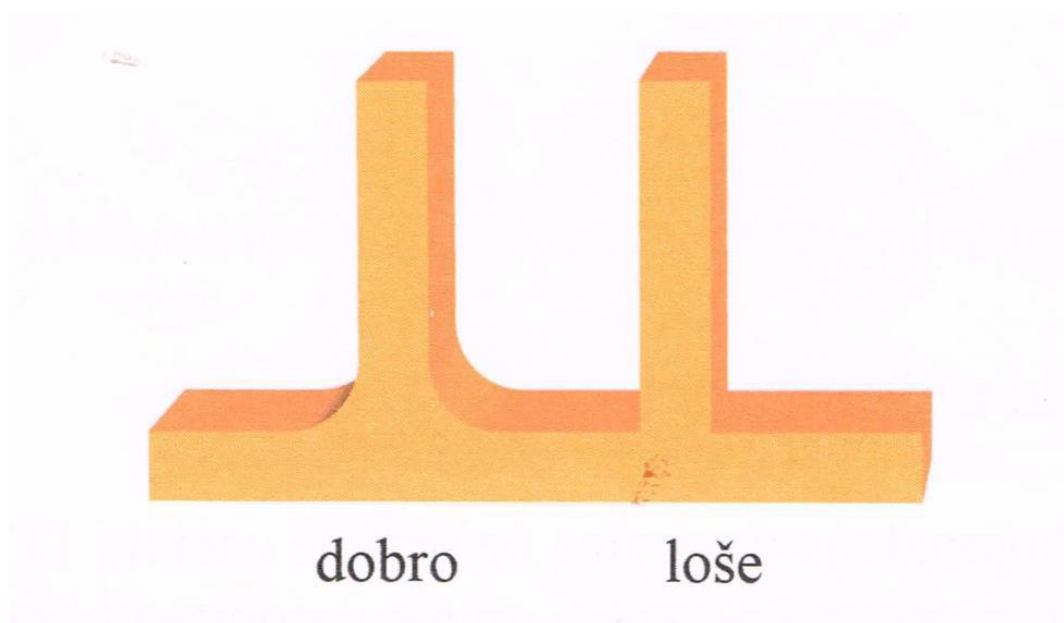
Slika 23. Pravilo 45 stupnjeva [24]

Za sklopne dijelove, ključna je pravilna zračnost koja omogućuje njihovo usklađeno sklapanje. Minimalna zračnost koja je potrebna za dijelove sklopa trebala bi biti jednaka toleranciji FDM stroja [23]. Na slici 24 prikazana je zračnost sklopa.



Slika 24. Prikaz izvedbe zračnosti sklopa [23]

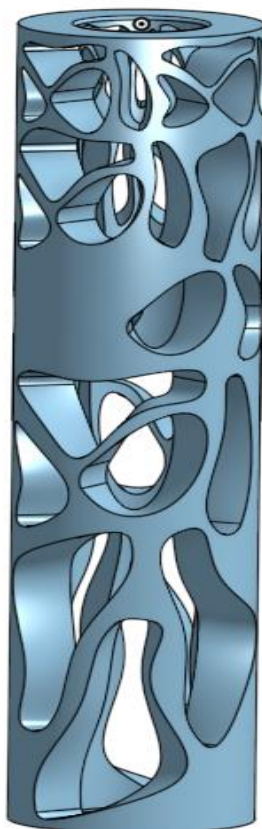
U modelu, oštri kutovi i bridovi predstavljaju koncentratore naprezanja. Dodavanjem zaobljenja na takvim kritičnim točkama može se smanjiti naprezanje, što dovodi do jačanja proizvoda [23]. Na slici 25 prikazana je dobra i loša izvedba bridova.



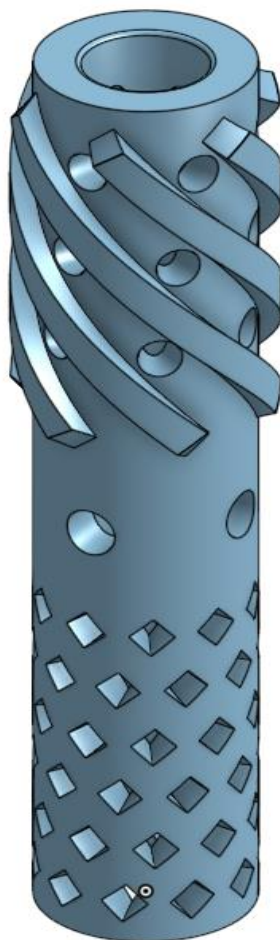
Slika 25. Prikaz izvedbe bridova [23]

4.3. Konstruiranje modela

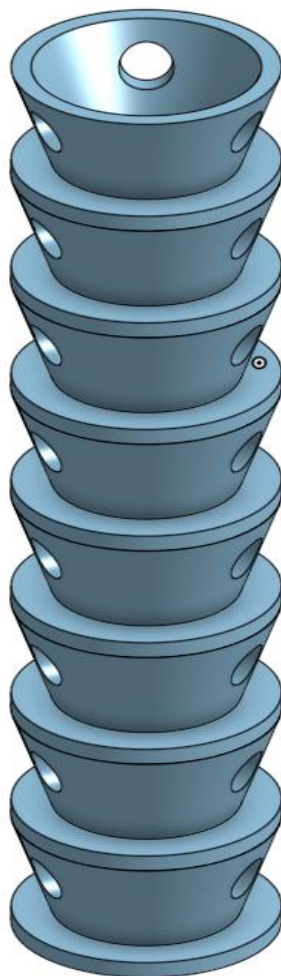
Za konstruiranje 3D CAD modela korišten je softverski program OnShape. Konstruirana su tri različita modela umetka za aktivni dio moderatora zvuka. Na sljedećim slikama prikazane su gotove konstrukcije modela 1 (M1), modela 2 (M2) i modela 3 (M3).



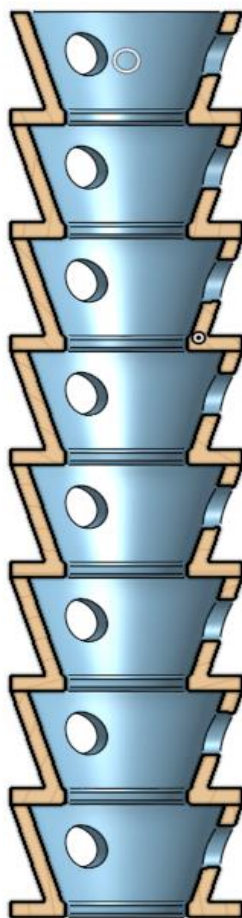
Slika 26. 3D CAD modela M1



Slika 27. 3D CAD modela M2



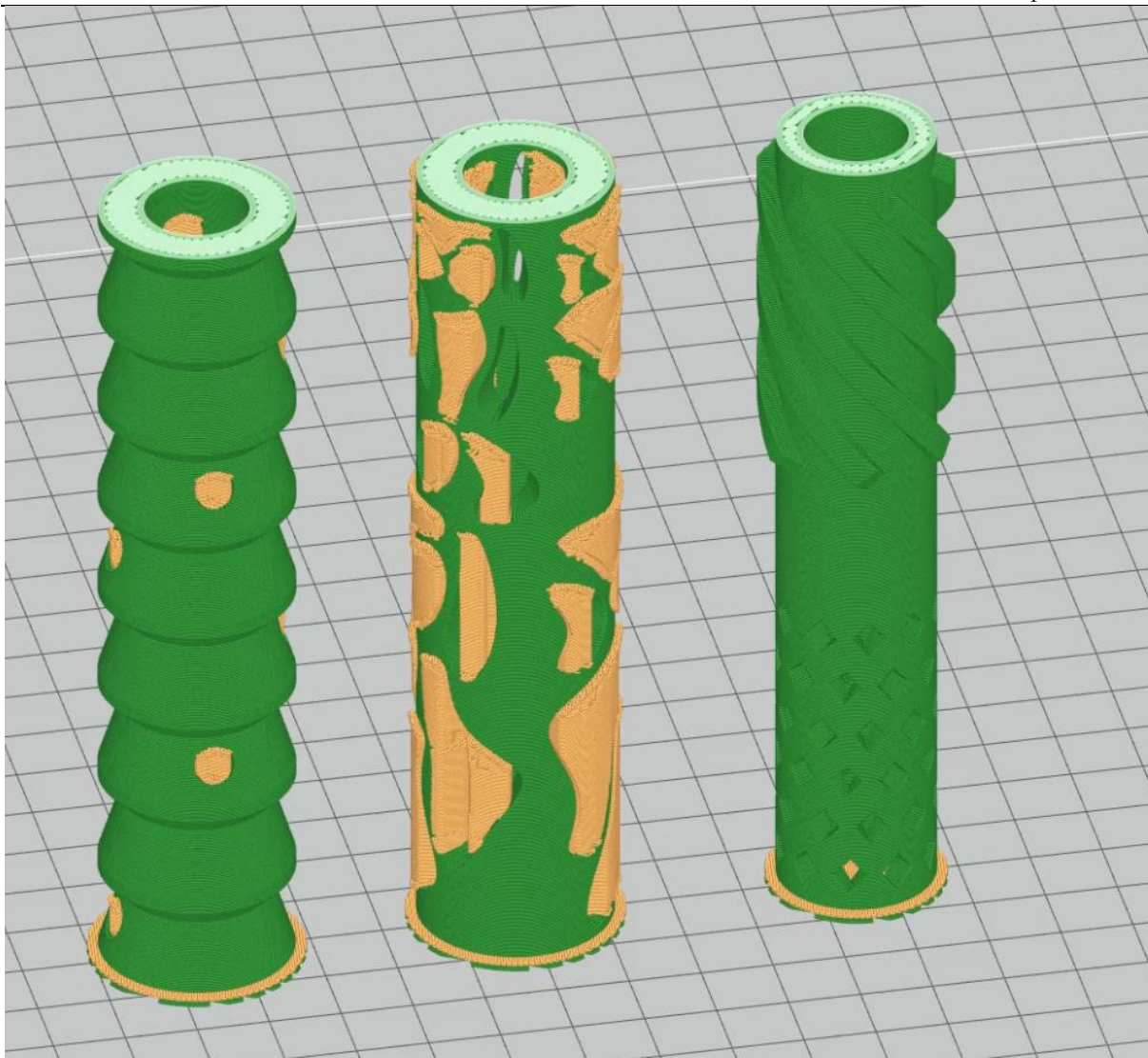
Slika 28. 3D CAD modela M3



Slika 29. Prikaz poprečnog presjeka 3D CAD modela M3

4.4. FDM tiskanje modela

Na slici 30 moguće je vidjeti prikaz iz simulacije FDM tiskanja modela na radnoj podlozi stroja na kojem su izrađeni umetci od materijala ULTEM 1010. Zelenom bojom označeni su modeli, a žutom bojom potporne strukture.



Slika 30. Prikaz modela i potpornih struktura na radnoj podlozi FDM stroja

Model M1 tiskan je na kućnom uređaju Prusa MK3 iz PETG materijala.

PETG je polietilen-tereftalata (PET) pojačan glikolom koji se dodaje u sastav materijala tijekom polimerizacije [25]. Mehanička svojstva PETG kopolimera slična su svojstvima PET-a [26]. Odlikuje se dobrim toplinskim svojstvima te ima dobru žilavost. Odličan je kao izbor filamenta za tiskanje kada se zahtjeva čvrstoća, glatka površina i minimalno skupljanje [25].

Na slici 31 prikazan je model M1 tiskan pomoću Prusa uređaja i PETG materijala.



Slika 31. Model M1 tiskan pomoću Prusa uređaja i PETG materijala

S obzirom da postoje ograničenja debljine stijenke, pojedini spojevi su slaba točka modela te dolazi do pucanja i razdvajanja modela na dva dijela. Model je neupotrebljiv te se ne preporučuje izrada na kućnom FDM uređaju. Nažalost, prilikom manjih iznosa opterećenja usred uklanjanja potporne strukture došlo je do puknuća modela M1 te je prikaz toga moguće vidjeti na slici 32.



Slika 32. Prikaz puknuća strukture modela M1

Za izradu svih modela izabran je ULTEM 1010CG materijal te se tiskanje provelo na STRATASYS F900 (Rehovot, Izrael) profesionalnom uređaju za tiskanje FDM postupkom. Na slici 33 prikazan je STRATASYS F900 stroj [28].



Slika 33. STRATASYS F900, profesionalni uređaj za FDM tiskanje [28]

ULTEM 1010 ističe se visokom čvrstoćom i izvrsnim toplinskim svojstvima. Radi se o visokoučinkovitom termoplastičnom polietereimidu (PEI) kojeg odlikuje visoka otpornost na toplinu, uz najniži koeficijent termičke ekspanzije među FDM materijalima. Ovaj materijal ima granicu toplinske distorzije (*HDT*) do 216 °C, a vlačne čvrstoće (*R_m*) do 81 MPa. Zahvaljujući kombinaciji visokih čvrstoća, ULTEM 1010 predstavlja najjači FDM materijal, posebno pogodan za zahtjevne primjene poput izrade laganih kompozitnih alata, malo serijske proizvodnje te proizvodnje visoko prilagođenih funkcionalnih dijelova [27].

Upravo zbog svojih odličnih toplinskih svojstava i visoke čvrstoće odabran je za izradu umetka za moderator zvuka.

Također, posjeduje vrlo dobru biokompatibilnost te je otporan na koroziju [29].

4.5. FDM tehnologija

FDM/FFF (eng. *Fused Deposition Modeling/Fused Filament Fabrication*) ili tehnologija taložnog sraščivanja je postupak u kojem se koristi najčešće rastaljeni polimerni materijal [23]. Zbog niske cijene, jednostavnog korištenja i preciznosti ovo je široko korištena tehnologija 3D proizvodnje [30].

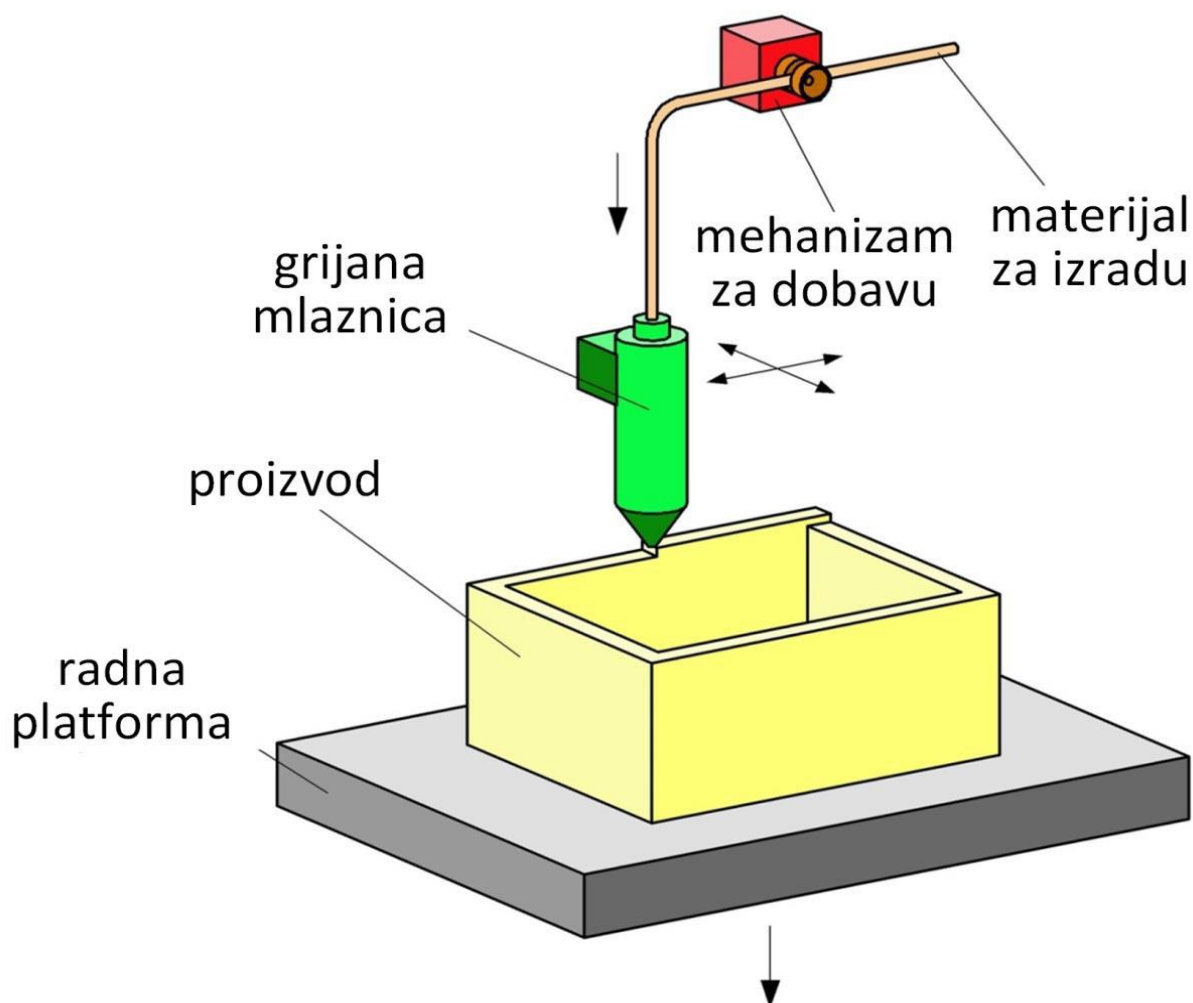
Polimerni materijal u obliku žice prolazi kroz mlaznicu koja se kontrolira pomoću računala u sve tri osi. U mlaznici se materijal zagrijava i topi, te izlazi u kapljevitom stanju. Pošto brzo stvrdnjava pri sobnoj temperaturi, ključno je održavati temperaturu kapljevine malo iznad temperature stvrdnjavanja. Tijekom izrade proizvoda, materijal se ekstrudira i nanosi na određena mjesta u slojevima [23]. Valja istaknuti da se prilikom tiskanja svaki sloj najprije tiska s obrubom, a zatim s unutarnjim popunjavanjem kako bi se uštedilo vrijeme tijekom tiskanja [31].

Za proizvode s kompleksnom geometrijom može se koristiti potporni materijal te se u tom slučaju postavlja sloj za lakše razdvajanje proizvoda i potporne strukture. Iako je kvaliteta površine proizvoda slična kao nakon SLS postupka, česti problem je poroznost koja se dodatnom obradom popunjava s punilom kako bi se povisila gustoća proizvoda.

Neke od prednosti FDM tehnologije uključuju nepotreban laser, manju potrošnju energije, odsutnost zahtjeva za hlađenjem i ventilacijom, niske troškove održavanja, jednostavnu upotrebu i relativno malu investiciju, kompaktnost uređaja te izostanak vitoperenja proizvoda.

Neki od nedostataka FDM procesa uključuju ograničenu funkcionalnost proizvoda zbog izbora materijala, često potrebnu uporabu potpornog materijala, potrebu za naknadnom obradom proizvoda, vidljive linije između slojeva, smanjenu čvrstoću proizvoda u smjeru okomitom na smjer izrade slojeva, te mogućnost delaminacije proizvoda uslijed oscilacija temperature tijekom postupka [23].

Na slici 34 prikazan je FDM postupak.



Slika 34. FDM postupak [23]

4.6. FDM izrada umetka

Na slikama od 35 – 38 prikazani su FDM tiskani modeli za moderator zvuka.



Slika 35. Prikaz svih modela izrađenih FDM postupkom



Slika 36. Prikaz FDM tiskanog modela M1



Slika 37. Prikaz FDM tiskanog modela M2



Slika 38. Prikaz FDM tiskanog modela M3

Nakon FDM tiskanja svi modeli zahtijevali su dodatnu obradu, uklanjanje potporne strukture i dodatno proširivanje centralnih provrta.

5. REZULTATI ISPITIVANJA

Ispitivanja su provedena na lovačkoj puški malog kalibra koja je prikazana na slici 39.



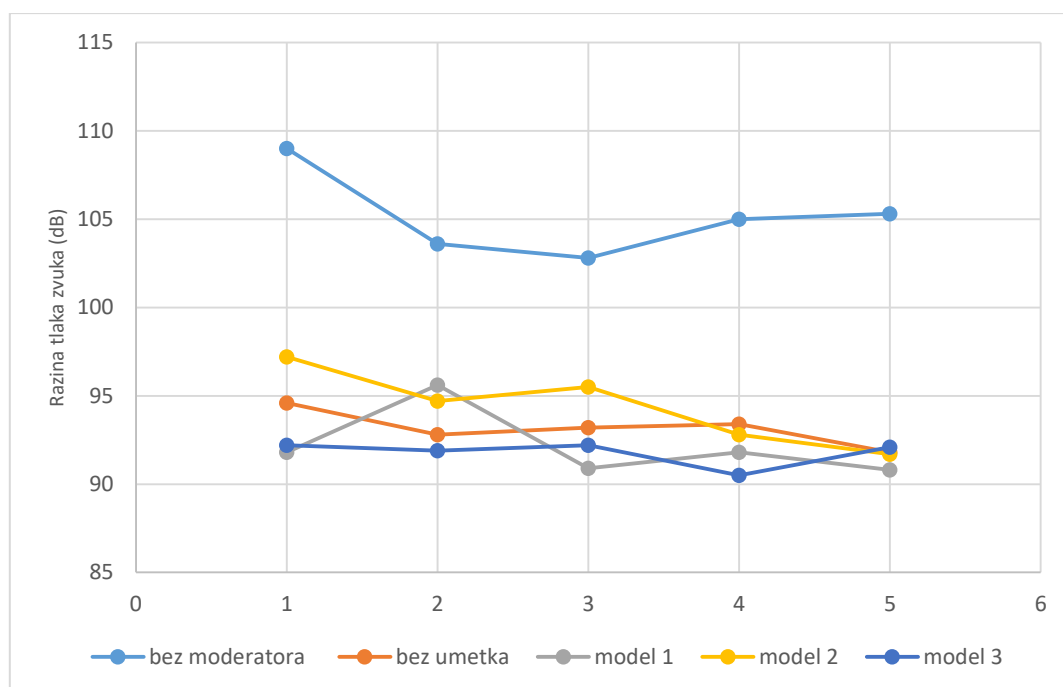
Slika 39. Prikaz korištene puške malog kalibra i moderatora zvuka

Korišteno je streljivo brenda RWS; 22 magnum, NVO soft point 40 grain (2,6 grama). Mjerena je razina tlaka zvuka (SPL, dB) prilikom pucanja iz puške bez moderatora zvuka, samo s aktivnim dijelom moderatora te uz umetke sva tri modela. U tablici 2 prikazani su dobiveni rezultati :

Tablica 2. Rezultati ispitivanja

Razina tlaka zvuka SPL (dB)					
	bez moderatora	bez umetka	model M1	model M2	model M3
1.	109	94,6	91,8	97,2	92,2
2.	103,6	92,8	95,6	94,7	91,9
3.	102,8	93,2	90,9	95,5	92,2
4.	105	93,4	91,8	92,8	90,5
5.	105,3	91,8	90,8	91,7	92,1
Δ SPL (dB)	105,14	93,16	92,18	94,38	91,78
% smanjena u odnosu bez moderatora		11,39	12,33	10,23	12,71

Iz tablice je vidljivo da je razina tlaka zvuka smanjena za 11,39 % korištenjem samo moderatora zvuka bez umetka. Uz korištenje modela M1 i modela M3 taj rezultat se poboljšao za otprilike samo 1 dB, dok se uz korištenje modela M2 smanjio za istu vrijednost. Na slici 40 moguće je vidjeti grafički prikaz rezultata ispitivanja.



Slika 40. Grafički prikaz rezultata ispitivanja

Također, prilikom pucanja došlo je do loma na slaboj točki strukture modela M3 te se model razdvojio na dva dijela. Unatoč tome model M3 je ostvario najbolje rezultate u prigušenju zvuka.

Na slici 41 prikazani su modeli nakon ispitivanja.



Slika 41. Prikaz modela nakon ispitivanja

6. ZAKLJUČAK

Moderatori zvuka odličan su način za zaštitu sluha prilikom lova. Iako su u Republici Hrvatskoj još uvijek zabranjeni, njihova upotreba smanjila bi mogućnost oštećenja sluha sudionika u lovu te poboljšala iskustvo lova. Uz pomoć aditivnih tehnologija moguće je izraditi unikate moderatore zvuka uz upotrebu materijala koji će moći izdržati opterećenja plinova i topline. Kako u lovu rijetko dolazi do uzastopne paljbe, materijali poput ULTEM 1010CG-a pokazali su se kao vrlo dobra alternativa za umetke moderatora zvuka koje je moguće zamijeniti nakon trošenja. Bez upotrebe moderatora srednja vrijednost razine tlaka zvuka iznosila je 105,14 dB, a uz moderator zvuka bez umetka 93,16 dB. Model M3 pokazao se kao najbolja varijanta oblika za umetak aktivnog dijela moderatora zvuka te je smanjio razinu tlaka zvuka na 91,78 dB, tj. za 12,71 % . S poboljšanim konstrukcijama kod kojih postoji veći volumen za slobodan protok plinova zasigurno bi se postigli i bolji rezultati. Također, kako bi se eliminirale greške modela, potrebno je na umu imati i smjernice za pravilno konstruiranje za aditivnu proizvodnju.

LITERATURA

- [1] Magier, M.; Wróblewski, R.; Bajkowski, M.; Szczurowski, K.; Jasiński, M.; Tadzik, P.; Grygoruk, R.; Zelichovska, M.; Sweeklej, P.; Bogajczyk, M.: Preliminary tests of inserts made in additive technology for small gun silencers, *Problemy techniki uzbrojenia* 164(2):7-17, 2023.
- [2] Hakonen, P.: Firearm suppressors – structures and alternative materials, Tampere University of Technology, 2010.
- [3] Selech, J ; Kilikevicius, A ; Kilikeviciene, K ; Borodinas, S; Matijosius,; Vainorius, D; Marcinkiewicz, J; Staszak, Z.: Force and Sound Pressure Sensors Used for Modeling the Impact of the Firearm with a Suppressor, *Appl. Sci.* 2020.
- [4] Rehman, H; Chung, H; Joung, T ; Suwono, A; Jeong, H: CFD analysis of sound pressure in tank gun muzzle silencer, *J. Cent. South Univ. Technol.*, 2011.
- [5] Huerta-Torres, J.K; Silva-Rivera, U.S; Verduzco-Cedeño, V.F; Flores-Herrera, L.A.; Sandoval-Pineda, J.M.: Numerical and Experimental Analysis of Sound Suppressor for a 5.56 mm Calibre, *Defence Science Journal*, 2021.
- [6] MacCarthy, M., O'Neill, M., Cripps, H.: An investigation into the use of sound moderators on firearms for game and feral management in New South Wales, 2011.
- [7] Bajić, M. A. (2022). Primjena aluminijskih pjena za prigušenje zvuka (Završni rad). Zagreb: Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje. Preuzeto s <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:221527>
- [8] <https://www.silencershop.com/blog/post/how-does-a-silencer-work>, (Datum pristupa: 06.01.2024.)
- [9] Akgumus Gok, D.; Gok, S.; Kilictekin, S.: Effect of the Same Sized Holes with Different Geometries and Angles in the Gun Silencer Diffusers on the Acoustic Power Level, Erzincan University, *Journal of Science and Technology*, 2023.
- [10] Kilikevicius, A.; Giedraitis, V; Kilikeviciene, K; Matijosius, J; Selech, J; Buckiunas, G; Rucki, M: Performance Analysis of Different Gun Silencers, *Appl. Sci.* 2023.
- [11] Hristov, N; Kari, A; Jerkovic, D; Savic, S; Sirovatka, R: Simulation and Measurements of Small Arms Blast Wave Overpressure in the Process of Designing a Silencer, *Measurement Science Review*, 2015.
- [12] Arslan, H; Ranjbar, M; Secgin, E; Celik, V: Theoretical and experimental investigation of acoustic performance of multi-chamber reactive silencers, *Applied Acoustics*, 2020.

- [13] Williams,; McSorley, A; Hunt, R; Eccles, G: Minimising noise disturbance during ground shooting of pest animals through the use of a muzzle blast suppressor/silencer, *Ecological Management & Restoration* Vol 19 No 2, 2018.
- [14] Ministarstvo unutarnjih poslova: Konačni prijedlog zakona o nabavi i posjedovanju oružja građana, srpanj 2018.
- [15] [https://en.wikipedia.org/wiki/Silencer_\(firearms\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Silencer_(firearms)), (Datum pristupa: 06.01.2024.)
- [16] Tehničke znanosti/Engineering Power, Glasnik Akademije tehničkih znanosti Hrvatske/Bulletin of the Croatian Academy of Engineering: Vol. 19(1) 2015 – ISSN 1330-7207
- [17] Verma, N; Awasthi, P; Gupta, A; Banerjee, SS: Fused Deposition Modeling of Polyolefins: Challenges and Opportunities, *Macromol. Mater. Eng.*, 2023.
- [18] <https://www.3dprintingmedia.network/new-wohlers-report-2021-finds-7-5-growth-in-additive-manufacturing-industry/> (Datum pristupa: 07.01.2024.)
- [19] <https://www.3dnatives.com/en/wohlers-report-2023-double-digit-growth-additive-manufacturing-030420235/> (Datum pristupa: 07.01.2024.)
- [20] Jurak, F.: Karakterizacija 3D printanih etalonskih pločica tvrdoće, Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2022.
- [21] Sedlak, J; Joska, Z; Hrbackova, L; Jurickova, E; Hrusecka, D; Horak, O; Determination of Mechanical Properties of Plastic Components Made by 3D Printing, *Manufacturing Technology*, 2022.
- [22] Viderščak, D.; Primjena aditivnih postupaka u automobilske industriji, Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2018.
- [23] Bilić, D.; Konstruiranje kućišta čitača QR koda za aditivnu proizvodnju, Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2019.
- [24] Godec, D.; Pilipović, A. kolegij Suvremena aditivna proizvodnja, Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2017.
- [25] <https://printer3d.hr/edukacija-i-podrska/filamenti-i-smole/petg-filament/>, (Datum pristupa: 08.01.2024.)
- [26] Kováčová, M; Kozakovicová, J; Procházka, M; Janigová, I; Vysopal, M; Cernicková, I; Krajcovic, J; Spitalsky, Z; Novel Hybrid PETG Composites for 3D Printing, *Appl. Sci.*, 2020.
- [27] <https://www.stratasys.com/en/materials/materials-catalog/fdm-materials/ultem-1010/> (Datum pristupa: 08.01.2024.)
- [28] <https://metalskajezgra.hr/f900/> (Datum pristupa: 08.01.2024.)

-
- [29] Tang, XF; Qin, YG; Xu, XY; Guo, DM; Ye, WL; Wu, WZ; Li, RY; Fabrication and In Vitro Evaluation of 3D Printed Porous Polyetherimide Scaffolds for Bone Tissue Engineering, BioMed Research International, 2019.
- [30] Cano-Vicent, A; Tambuwala, MM; Hassan, SS; Barh, D; Aljabali, AAA; Birkett, M; Arjunan, A; Serrano-Aroca, A; Fused deposition modelling: Current status, methodology, applications and future prospects, Additive Manufacturing, 2021.
- [31] Zhang, PF; Wang, ZX; Li, JR; Li, XL; Cheng, LJ: From materials to devices using fused deposition modeling: A state-of-art review, Nanotechnology Reviews, 2020.