

# Modeliranje sustava za ispućavanje projektila komprimiranim zrakom

---

**Maćešić, Nedjeljko**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2017**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **Karlovac University of Applied Sciences / Veleučilište u Karlovcu**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:128:433896>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-03-10**



**VELEUČILIŠTE U KARLOVCU**  
Karlovac University of Applied Sciences

*Repository / Repozitorij:*

[Repository of Karlovac University of Applied Sciences - Institutional Repository](#)



zir.nsk.hr



DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

VELEUČILIŠTE U KARLOVCU  
STROJARSKI ODJEL  
*Stručni studij Strojarstva*

Nedjeljko Maćešić

**MODELIRANJE SUSTAVA ZA  
ISPUCAVANJE PROJEKTILA  
KOMPRIMIRANIM ZRAKOM**

**Modeling of compressed air system for  
projectile ejection**

Završni rad

Karlovac, 2017.godina.

VELEUČILIŠTE U KARLOVCU  
*STROJARSKI ODJEL*  
*Stručni studij Strojarstva*

Nedjeljko Maćešić

**MODELIRANJE SUSTAVA ZA  
ISPUCAVANJE PROJEKTILA  
KOMPRIMIRANIM ZRAKOM**

**Modeling of compressed air system for  
projectile ejection**

Završni rad

Nikola Šimunić, mag.ing.mech.

Karlovac, 2017. godina.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći stečenaznanja tijekom studija i navedene izvore i literaturu.

Zahvaljujem se mentoru mag. ing. mech. Nikoli Šimuniću na susretljivosti, strpljenju i pomoći pri obradi teme i oblikovanju završnog rada.

Nedjeljko Maćešić



## VELEUČILIŠTE U KARLOVCU

Stručni studij: Strojarstva

Usmjerenje: Strojarske konstrukcije

Karlovac, 15.06.2017

### ZADATAK ZAVRŠNOG RADA

Student: **Nedjeljko Maćešić**

Matični broj: 0110614083

Naslov: **Modeliranje sustava za ispućavanje projektila komprimiranim zrakom**

Opis zadatka:

Mehanika leta nemoguća je bez poznavanja osnovnih prirodnih zakona. U završnom radu potrebno je analizirati razvoj tehnologije ispaljivanja projektila pomoću zraka kroz povijest. Potrebno je navesti i objasniti matematičke izraze i jednadžbe koje opisuju mehaniku leta projektila koji se ispućava pomoću komprimiranog zraka. Na temelju iznesenih jednadžbi matematički modelirati parametarski sustav u odgovarajućem programskom paketu.

Pomoću dobivenog modela simulirati ispućavanje projektila. Rezultate prikazati grafički ili tablično te po potrebi komentirati. Na temelju dobivenog iznijeti zaključke.

Koristiti odgovarajuću dostupnu literaturu, priručnike i podatke.

Zadatak zadan:

Rok predaje rada:

Predviđeni datum obrane:

15.06.2017

15.09.2017

22.09.2017

Mentor:

Predsjednik Ispitnog povjerenstva:

Nikola Šimunić, mag.ing.stroj.

## SADRŽAJ

SADRŽAJ .....	I
POPIS SLIKA .....	III
POPIS OZNAKA .....	IV
SAŽETAK.....	V
SUMMARY .....	VI
1. UVOD.....	1
1.1. Pregled tehnologije .....	3
1.1.1. Puhaljka za izbacivanje strelica .....	3
1.1.2. Zračne puške i pištolji .....	5
1.1.3. Puške za uspavljivanje .....	9
1.1.4. Podvodna zračna puška.....	10
1.1.5. Impulsna vatrogasna puška za gašenje požara.....	12
2. Zakonski okvir korištenja i nabavke zračnog oružja .....	14
3. BALISTIKA .....	15
3.1. Općenito .....	15
3.1.1. Unutarnja balistika .....	15
3.1.2. Vanjska balistika .....	16
3.1.3. Terminalna balistika.....	17
3.2. Projektili.....	17
3.3. Neki od načina ispaljivanja projektila.....	17
3.3.1. Ispaljivanje snagom tetive.....	17
3.3.2. Zračni sustavi .....	18
3.3.3. Barutno punjenje .....	19
3.3.4. Elektromagneni top – Railgun .....	19
4. MODELIRANJE SUSTAVA ZA ISPUCAVANJE PROJEKTILA KOMPRIMIRANIM ZRAKOM.....	21
4.1. Tlačni spremnik.....	22
4.2. Projektil.....	22
4.3. Izlazni otvor .....	22
4.4. Modeliranje sustava .....	22
4.4.1. Unutarnja balistika .....	22
4.4.2. Proračun unutrašnje balistike sustava .....	23
4.4.2.1. Jednadžbe unutarnjeg stanja sustava uz pretpostavku konstantne temperature - izoterma ( $T = \text{const.}$ ) .....	24
4.4.2.2. Proračun unutarnjeg stanja sustava sa pretpostavkom promjene temperature prilikom ekspanzije – izentropa ( $s = \text{const.}$ ).....	25
4.4.3. Proračun vanjske balistike (putanja projektila - kosi hitac sa silom otpora) .....	26
4.5. Grafički prikaz modeliranog sustava .....	27
4.5.1. Unutarnji sustav .....	28
4.5.1.1. Ovisnost izlazne brzine o promjeni duljine cijevi.....	28
4.5.1.2. Odnos početnog tlaka i izlazne brzina .....	29

---

4.5.1.3. p – V dijagram .....	29
4.5.2. Vanjski sustav .....	30
4.5.2.1. Domet za različite koeficijente otpora .....	30
5. ZAKLJUČAK.....	31
PRILOZI.....	32
LITERATURA.....	33

**POPIS SLIKA**

Slika 1. Primitivno oružje i oruđe kamenog doba. [1] .....	1
Slika 2. RS-28 Sarmat – Sotonin sin. [2] .....	2
Slika 3. Ukrašena puhaljka za izbacivanje strelica porijeklom iz Brazila. [3].....	4
Slika 4. Prva zračna puška. [6] .....	6
Slika 5. Zračna puška Girandoni (Bartholomaeus Girandoni),.....	7
Slika 6. Komplet zračnog pištolja sa priborom marke Girandoni [10].....	7
Slika 7. Elegantna inovativna puška izumitelja Kunitomo Ikkansai. [6].....	8
Slika 8. Schimel GP-22, zračna replika pištolja Luger.[11].....	8
Slika 9. AirForce Texan zračna puška [12].....	9
Slika 10. Puška za ispaljivanje injekcija. [13].....	10
Slika 11. Jedna od prvih podvodnih zračnih pušaka, autor ing. Josip Medur – Kit 61. [14] ...	11
Slika 12. Podvodna puška na komprimirani zrak Kit 61. [15].....	11
Slika 13. Podvodna puška na komprimirani zrak proizvedena u Zagrebu - Sraga[14].....	12
Slika 14. Vatrogasna zračna puška IFEX 3000. [19] .....	13
Slika 15. luk i samostrel. [25] .....	18
Slika 16. CO <sub>2</sub> ampule za zračno oružje. [26] .....	18
Slika 17. Pješadijski bojevi metak. [21].....	19
Slika 18. Jednostavna struktura EM topa. [26] .....	20
Slika 19. Elektromagnetski top američke mornarice na testnom poligonu.[27] .....	20
Slika 20. Promatrani sustav .....	21
Slika 21. Ovisnost izlazne brzine o promjeni duljine cijevi.....	28
Slika 22. Odnos početnog tlaka i izlazne brzina. ....	29
Slika 23. p – V dijagram.....	29
Slika 24. Domet za različite koeficijente otpora .....	30



## POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
A	[m <sup>2</sup> ]	površina presjeka strelice
cos( $\alpha$ )	[°]	kosinus kuta ispaljivanja strelice
d	[m]	promjer strelice
E <sub>K,S</sub> (x)	[J]	kinetička energija strelice na udaljenosti " x " za izentropu
E <sub>K,T</sub> (x)	[J]	kinetička energija strelice na udaljenosti " x " za izotermu
e	-	Eulerov broj (e = 2,7182818284)
F <sub>tr</sub>	[N]	sila trenja
g	[m/s <sup>2</sup> ]	gravitacijska konstanta ( g = 9,80665)
k	-	koeficijent otpora
m	[kg]	masa projektila
p <sub>atm</sub>	[Pa]	atmosferski tlak (p <sub>atm</sub> = 101325 Pa)
p <sub>0</sub>	[Pa]	početni tlak
p <sub>T</sub> (x)	[Pa]	promjenjivi tlak po izotermi
p <sub>S</sub> (x)	[Pa]	promjenjivi tlak po izentropi
t	[s]	trenutno vrijeme za koje se računa
V <sub>X</sub>	[m <sup>3</sup> ]	volumen za udaljenost " x "
V <sub>0</sub>	[m <sup>3</sup> ]	početni volumen
v <sub>S</sub> (x)	[m/s]	brzina na udaljenosti " x " po izentropi
v <sub>T</sub> (x)	[m/s]	brzina na udaljenosti " x " po izotermi
v <sub>x</sub> (t)	[m/s]	brzina po apcisi u vremenskom trenutku
v <sub>y</sub> (t)	[m/s]	brzina po ordinati u vremenskom trenutku
v <sub>0</sub>	[m/s]	brzina na izlazu iz cijevi
W <sub>S</sub>	[J]	rad dobijen ekspanzijom po izentropi
W <sub>T</sub> (x)	[J]	rad dobijen ekspanzijom po izotermi
x	[m]	udaljenost strelice u datom trenutku (u cijevi)
x <sub>1</sub>	[m]	domet strelice izvan cijevi
x(t)	-	položaj na apcisi u datom trenutku
y(t)	-	položaj na ordinati u datom trenutku
κ	-	izentropski eksponent (za zrak, κ = 1,4)
μ	-	faktor trenja
π	-	Ludolfov broj (π = 3,141592265)

## **SAŽETAK**

Ovim završnim radom napravljen je pregled uporabe komprimiranog zraka, kao sastavnog dijela sustava za ispućavanje projektila. Radom je obuhvaćen kratki pregled razvoja i uporabe ove tehnologije kroz povijest, te primjena u današnje vrijeme. Napravljen je osvrt na balistiku kao nauku koja opisuje promjene u sustavu i izvan njega, vezane za ponašanje projektila. Na kraju je matematičkim jednadžbama opisan jedan takav idealizirani sustav, a dobiveni rezultati su prikazani grafički.

Ključne riječi: komprimirani zrak, balistika, projektil, sustav.

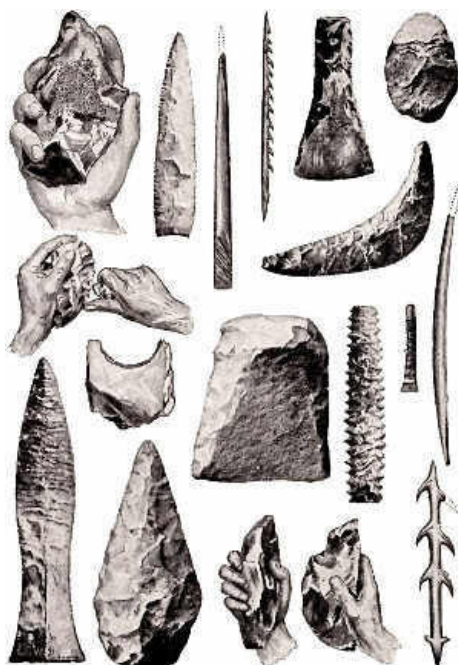
## **SUMMARY**

This final work provides an overview of the use of compressed air as an integral part of the ejector projectile system. The work includes a brief overview of the development and application of this technology throughout history and its application today. Reference is made to ballistics, as a science, that describes the changes in the system and outside of it, related to the projectile motion. In the end, mathematical equations are used to describe such idealized systems and the results are presented graphically.

Keywords: compressed air, ballistic, projectiles, system.

## 1. UVOD

Od najranijeg doba ljudskog roda, vođen osnovnim nagonima: potreba za hranom i zaštitom, čovjek je izmišljao razne načine kako da uhvati životinje za hranu, a usporedo se odvijala i borba za teritorij, status i moć, koja je sa razvojem čovječanstva i tehnologije postajala sve izraženija. Svojom razvojem čovjek je izmišljao razne načine kako da sa neke udaljenosti postigne svoje ciljeve. Ispočetka sa veoma primitivnim rješenjima kao što je jednostavno bacanje kamena. S vremenom je shvatio da jednostavnom prilagodbom materijala oko sebe može povećati svoju sposobnost lova i obrane. Tako je nastalo prvo oružje. Primitivna koplja, luk i strijela razne inačice prački, ... (Slika 1).



Slika 1. Primitivno oružje i oruđe kamenog doba.[1]

Otkrićem vatre, kasnije pronalaskom i usavršavanjem obrade metala ovaj razvoj je nezaustavljivo “grabio“ krupnim koracima naprijed i ništa ga više nije moglo zaustaviti. Vremenom je razvoj oružja daleko prevazišao svoju osnovnu svrhu ljudi, da se prehrane i obrane, a sve više čovjek je postajao inteligentni predator željan moći i teritorija ili jednostavno željan ubijanja iz zabave i sporta. Otkriće baruta uveliko mu je olakšalo ovaj put. Shvativši da tim crnim prahom može povećati domet i razornu snagu oružja počela je nova era na jednoj sasvim novoj razini. Udaljenosti su se sve više i više smanjivale, a razorna moć

povećavala. Današnja dostignuća omogućila su da je svaki dio planeta dostupan. Zemlja je postala premalena, a razorna moć zastrašujuća.



**Slika 2. RS-28 Sarmat – Sotonin sin.[2]**

Slika 2 pokazuje jednu od budućih balističkih raketa nove generacije koja će prema nekim tvrdnjama biti sposobna da nosi preko deset nuklearnih glava, brzine i do 12 Mach-a i dometa preko 10 000km.

Iako se tehnologija neusporedivo promijenila sa razvojem ljudskog društva i čovjek evoluirao kao ljudsko inteligentno biće krajnji cilj je i dalje ostao jednako primitivan kao i na početku: status, moć, teritorij.

## 1.1. Pregled tehnologije

Negdje u vremenu, između svih tih zbivanja netko je došao na ideju da upotrijebi najveći prirodni resurs koji nas okružuje – zrak.

Time smo došli i do teme ovog završnog rada u kome ću pokušati napraviti kratki pregled ove tehnologije i opisati neke primjere iskorištenja ovog prirodnog resursa kao potencijalne energije uskladištene u komprimiranom stanju. Te na kraju matematičkim modelom opisati jedan takav sustav.

Nije poznato tko i kada je prvi došao na tu ideju, ali princip da se komprimirani zrak uskladišti, kao potencijalna energija, i u potrebnom trenutku pretvori u kinetičku energiju drugog tijela, svakako je našlo svoju primjenu u povijesti, kako u civilnom tako i u vojnom području. Sa današnjeg gledišta primitivna tehnologija, pogotovo promatrajući zračno oružje koje je najzastupljenije u primjeni ove tehnologije, tijekom vremena je usavršavana i danas je široko rasprostranjena. Iako je tijekom vremena, uslijed razvijanja vatrenog oružja, izgubila svoju vojnu primjenu, razvoj je nastavljen u civilnom sektoru. Lov, sport, veterina, vatrogastvo, hobi i zabava; neke su od područja iskorištavanja komprimiranog zraka kao potencijalne energije. Neki od primjera korištenja komprimiranog zraka kao potencijalne energije opisani su ispod.

### 1.1.1. Puhaljka za izbacivanje strelica

Prvo oružje koje je koristilo zrak za ispaljivanje nekog projektila bila je puhaljka za izbacivanje strelica. Jednostavni šuplji štap sa strelicom u svom tijelu bilo je precizno i ubojito oružje kojim bi lovacjačinom svojih pluća izbacivao strelicu na svoj plijen. Dobrim poznavanjem botanike i zoologije, te korištenjem otrovnih vrsta životinja i biljaka da umoči vrh strelice u njihov otrov, paralizirao bi pogođenu divljač koja bi na taj način postala lak plijen. Što su bila jača pluća lovca to je domet bio veći.

Puhaljke datiraju još od kamenog doba i razna primitivna plemena su ih koristilatisućama godina. Od plemena Aboridžina u Australiji, pa do Amazonskih plemena Južne Amerike, Afrike te jugoistočne Azije, akoriste je i danas mnoga Južnoamerička plemena.

Puhaljke su izrađivane od šupljih prirodnih materijala kao što je bambus, riječna trska ili neko drugo drvo. Puhaljke su se razlikovale u svojoj izradi koja je uvelike je ovisila o boravištu pojedinih plemena i prirodnom potencijalu staništa na kojem su živjeli. Dok su plemena

tropskih dijelova jugoistočne Azije koristili bambus zbog svoje prirodne šupljine, na drugom području bi presjecanjempunog štapa po dužini izdubili obje polovice te ih kasnije spojili vezivanjem i tako dobili šupljinu za puhaljku. Za izradu puhaljke nije bilo nekih pravila i mjera. Pravile su se različitih dimenzija ovisno o potrebama i mogućnostima lovaca te dostupnom materijalu (Slika 3).



**Slika 3. Ukrašena puhaljka za izbacivanje strelica porijeklom iz Brazila.[3]**

Kao projektili korištene su sjemenke, glinene kuglice ili strelice, a lovila se sitna divljač. Glinene kuglice su izrađivane većeg promjera da bi kada se osuše odgovarale promjeru cijevi. Strelice su pak izrađivane od tvrdog drveta sa oštrim šiljkom na jednom kraju i paperjem, perjem ili krznom privezanim za kraj strijele na drugom kraju radi bolje aerodinamičnosti i što boljeg ispunjenja presjeka puhaljke da ima što manjeg gubitka zraka oko strelice i što veći domet (Slika 3).[4]

Puhaljke su korištene uglavnom samo za lov, a rijetki su zabilježeni slučajevi korištenja u međusobnom sukobu pojedinih plemena.

Puhaljka je i do danas ostala slična, šuplja cijev, ali za razliku od starih današnje su izrađene od lakših i jačih kompozitnih materijala (karbon, aluminij, platika). Strelice se izrađuju sa metalnim šiljkom ili kao injekcije sa sredstvom za uspavljivanje u svom tijelu, a neke inačice imaju i spremnik sa plinom (CO<sub>2</sub>) ili se ručno pumpa u spremnik ugrađen u puhaljku. Na ovaj se način postiže domet strelice i do 40 m.

Osim za lov danas se puhaljke koriste i u rekreativne svrhe, a postoje i natjecanja u više disciplina na kojima se sa standardiziranim puhaljkama i strelicama gađa meta sa udaljenosti od deset metara ili inačica slična biatlonu.

Koliko je ovaj sport zastupljen govori i činjenica da se radi na tome da se uvrsti u olimpijske sportove.[5]

### 1.1.2. Zračne puške i pištolji

Zračno oružje je vrsta oružja koja ispucava projekte (kuglice, tupo zrno ili strelice) sabijenim zrakom uz pomoć opruge, tlačenjem pumpom direktno u tlačni spremnik u tijelu oružja ili dogradnjom tlačnog spremnika sa plinom (CO<sub>2</sub>) na samo oružje. Na tržištu je raznovrsna paleta zrna za zračnu pušku, a jednim imenom zovu se dijabole. ispućavanje projektila izvodi se brzom ekspanzijom plina (zrak ili CO<sub>2</sub>) bez djelovanja kemijske reakcije.

Zračne puške ispućavaju projekte na tri načina:

- *klip sa oprugom* – preklapanjem prednjeg djela puške napinje se opruga zajedno sa kompresionim klipom, a ujedno se otvara mjesto za ležište dijabole u cijevi. Vraćanjem cijevi u prvobitni položaj i povlaćenjem okidača opruga potiskuje klip tlaćeći zrak između klipa i dijabole. Sve se odvija u milisekundama i na taj način se dijabolaispućava kroz cijev. Na ovakav način je potrebno za svaki hitac ponovo napeti pušku i postaviti novi projektil.

- *ampule sa plinom (CO<sub>2</sub>)*– ampule sa plinom nisu dio oružja. Kupuju se posebno i postavljaju na oružje. Povlaćenjem okidača iz ampule se oslobađa dio plina i brzom ekspanzijom ispućava projektil iz cijevi. Ovisno o veličini i tlaku ampule i vrsti oružja jedna ampula može ispućati nekoliko desetaka projektila. Ampule mogu biti različitih veličina, jednokratne ili se mogu dopunjavati.

-*tlaćenje zraka pumpom* – princip ispućavanja je isti kao i sa ampulama sa razlikom da je tlačni spremnik dio oružja u koji se pumpom tlaći zrak.

Domet zračnog oružja je mali u odnosu na vatreno oružje i koriste se prije svega za natjecanja, u manjoj mjeri za lov ili jednostavno za gađanje iz zabave. Dozvola za kupovinu i držanje nije potrebna, ali zračnu pušku smiju kupiti ili posjedovati samo punoljetne osobe. Djeca od 11 godina smiju rukovati zračnom puškom samo uz nazočnost ovlaštenog trenera.[5]

Zračne puške predstavljaju najstariju pneumatsku tehnologiju. Nema preciznih podataka kada je napravljena prva zračna puška, ali se smatra da su prve zračne puške razvijene početkom



16. stoljeća. Korištene su za lov, sport i u ratu, a najstariji sačuvani primjerak je iz 1580. godine i nalazi se u Kraljevskom muzeju oružja u Stockholmu (Slika 4). Ovaj najstariji sačuvani primjerak je Austrijskog proizvođača i predak je moderne zračne puške.



**Slika 4. Prva zračna puška. [6]**

U razdoblju 17. do 19. stoljeća zračno oružje, kalibra .30 - .51 (7.62mm – 12.95mm) korišteno je za lov krupne divljači (jeleni, divlje svinje). Te su zračne puške imale ugrađen spremnik zraka u koji se zrak tlačio ručnom pumpom, i na taj način spremala potencijalna energija kojom se ispucavala kugla brzinom 200-300 m/s.

Zbog slabo razvijenog vatrenog oružja tog vremena zračne puške su korištene i u ratovima. U odnosu na vatreno oružje imale su svojih prednosti; nije im smetala kiša za razliku od barutnih kojese zakazivale kada bi se smočile, bile su tiše od barutnih pušaka istog kalibra, nije bilo dima kod ispaljenja pa nisu otkrivale poziciju pucača za razliku od mušketa koje su koristile crni barut, mogle su brže pucati. Zbog ovih prednosti Austrija, Francuska i neke druge države ustrojili su specijalne snajperske vojne odrede koji su koristili zračne puške.

Najpoznatiji model tog vremena bila je Austrijska zračna puška “Windbüchse“ (zračna puška) iz 1770. godine, čiji je tvorca bio poznati urar, mehaničar i oružar Bartholomäus Girandoni. Bila je to puška oko 1.2m dužine i oko 4.5kg težine, otprilike dimenzija kao i muškete tog doba (Slika 5). Bila je to prva repetirka sa odvojivim konusnim tlačnim spremnikom, koji je prema izvedbi služio i kao kundak. Sa spremnikom od 22 hitaca, kalibra .51 (12.95mm) ispucavala je kugle brzinom 210 – 290 m/s.

Na sto koraka mogla je probiti drvenu dasku debljine 25 mm. [8]



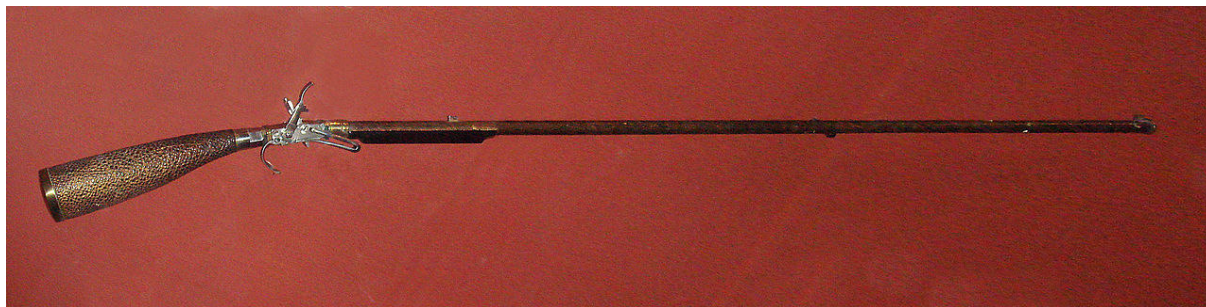
**Slika 5. Zračna puška Girandoni (Bartholomaeus Girandoni), prvi put je korištena za vrijeme Napoleona.[7]**

Girandoni je osim pušaka izrađivao i pištolje. Slika 6 prikazuje jedan takav primjerak.



**Slika 6. Komplet zračnog pištolja sa priborom marke Girardoni[10]**

Razvoj zračnog oružja nastavljen je dalje kroz 18. i 19. stoljeće. Oko 1820. godine Japanski izumitelj Kunitomo Ikkansai razvio je inovativne metode proizvodnje elegantnih zračnih pušaka bazirane na zapadnjačkom znanju, (Slika 7).



**Slika 7. Elegantna inovativnapuška izumitelja KunitomoIkkansai. [8]**

Sve do kasnih 80-tih godina 19. stoljeća zračne puške su proizvodili mnogi oružari u malim serijama. Jačanjem domaćeg tržišta u SAD-u i stvaranjem srednjeg sloja stvorila se tražnja za oružjem koje je bilo jeftino za proizvodnju i uporabu. Mnoge tvrtke koje su se bavile preradom metala okušale su se u proizvodnji zračnog oružja. Bila je to proizvodnja u malim serijama sa nestandardnim dijelovima što je iziskivalo vremena i truda kod popravaka jer se svaki zamjenski dio morao izraditi baš za tu pušku. Prva masovno serijski proizvedena zračna puška bila je Challenger, tvrtke W.F. MarkhamCo. 1888. godine.

1876. godine američka tvrtka Pope Brothers izbacila je na tržište zračni pištolj na strelice u kalibru .45 (11.43mm).

U to vrijeme zračnooružje cjenovno nije bilo konkurentno malokalibarskim puškama, koje su bile jeftinije, sa jeftinijim streljivom i boljim performansama. Tako da su zračne puške sve više postajale sportsko oružje za koje su organizirana razna natjecanja. Sportska primjena zračnog oružja, a u manjoj mjeri i u lovu održala se i do danas. Jednostavnost nabave zračnog oružja i zakonski okvir koji dopušta nabavu istog omogućio je široku primjenu. Danas je na tržištu široka paleta raznovrsnih oblika oružja i različitih proizvođača. Postoji široka paleta zračnihreplika od starog (Slika 8), pa sve do modernih verzija novog oružja (Slika 9). [8]



**Slika 8. Schimel GP-22, zračna replika pištolja Luger.[11]**



**Slika 9. AirForceTexan zračna puška.[12]**

### ***1.1.3. Puške za uspavlivanje***

Iako su strelice za paraliziranje sitne divljači koristili lovci mnogih plemena za lov ispaljujući ih iz puhaljki, pušku za uspavlivanje kakvu danas poznajemo izmislio je pedesetih godina prošlog stoljeća Novozelandsanin Colin Murdoch.

Prvi sustav ubrizgavanja lijeka sa udaljenosti izmislili su naučnici na Sveučilištu Gorgia 1950-tih. godina, bio je to početak na kome su se gradili svi ostali sustavi.

Proučavajući sa kolegama populaciju divljih koza i jelena, Murdoch je došao na ideju da bi bilo puno lakše životinje prgledavati kada bi ih uspjeli neozlijeđene uhvatiti. Tako se rodila ideja za pušku koja bi izbacivala strelice sa sredstvom za uspavlivanje. Strelice su u biti šprice sa iglom (injekcije) za ubrizgavanje sredstva za uspavlivanje ili lijeka pri pogotku. Na zadnjem kraju imaju stabilizator od vlaknastog materijala koji ujedno ispunjava presjek cijevi da zrak ne prolazi pored strelice, a na igli prsten za manju penetraciju igle i ubrizgavanja čitave doze pod kožu. Postoje i drugačije inačice strelica ovisno o proizvođaču. U trenutku pogodka životinje, kuglica koja se nalazi na kraju šprice uslijed momenta inercije krene prema naprijed i potiskuje čep u igli istiskujući anestetik u pogođenu životinju.

Murdoch je razvio niz pušaka, pištolja i strelica za uspavlivanje koji su imali veliki utjecaj i olakšali proučavanje i liječenje životinja širom svijeta. Dok su neke zračne puške za uspavlivanje bile modifikacija običnih zračnih pušaka druge su pak u cijelosti bile konstruirane za ovu namjenu. Princip ispucavanja injekcija bio je isti kao i kod ostalog zračnog oružja (opisano u poglavlju 1.1.2). Injekcije kao projektili su obično kalibra .50

(12.7mm). Puške su tihe i imaju ventile za regulaciju pritiska, a samim tim i brzinu izbačaja i dometa injekcije.

Na ekspediciji u Keniji 60-tih godina prošlog stoljeća tim predvođen Dr. Toney Pooley i Dr. Toni Harthoom otkrili su zanimljivu činjenicu da različite životinje iako su slične fizionomije drugačije reagiraju na anestetik i trebaju različitu dozu sredstva za uspavlivanje za jednako djelovanje. Brzina djelovanja anestetika ovisi o sredstvu, količini, fizionomiji i izdržljivosti životinje. Primjena je uglavnom u veterini, zoološkim vrtovima i kod zoologa. [13]



**Slika 10. Puška za ispaljivanje injekcija.[13]**

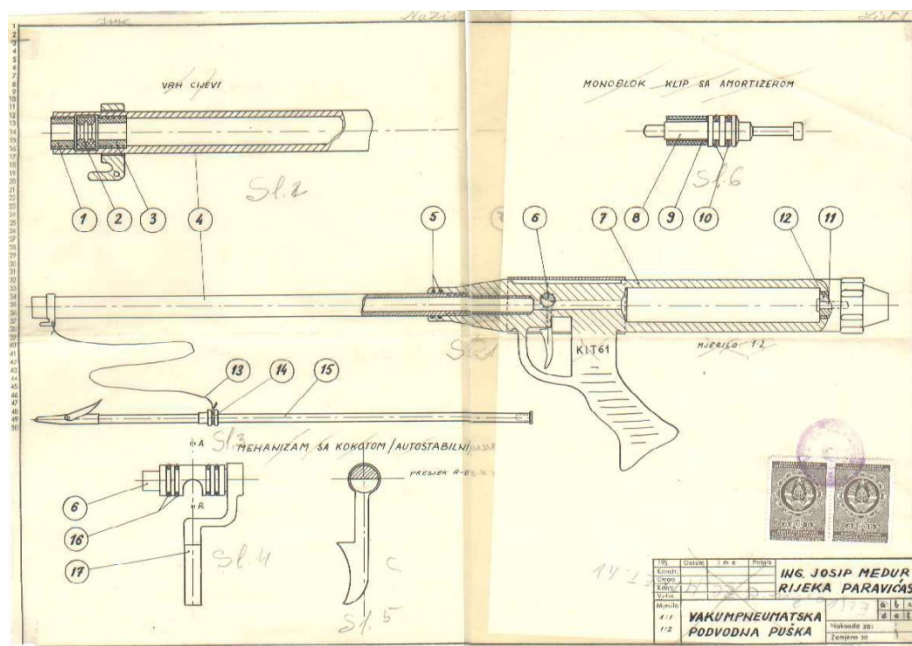
#### **1.1.4. Podvodna zračna puška**

Osim klasičnih podvodnih pušaka na lastiku (tzv. lastikače), koriste se i puške za podvodni ribolov na komprimirani zrak, tzv. komprimirke. Ravnodušan pristup proizvođača proizvodnji starih podvodnih pušaka na lastiku tražio je novo kvalitetnije rješenje uz adekvatnu cijenu za podvodni ribolov.

Podvodne puške koje koriste uskladišteni komprimirani zrak kao potencijalnu energiju nemaju daleku povijest. Zanimljiv podatak je da je jedna od prvih, a možda i prva podvodna puška na komprimirani zrak porijeklom iz Hrvatske. Pedesetih godina prošlog stoljeća, u centru za podvodna istraživanja u Rijeci ing. Josip Medur konstruirao je jednu od prvih pušaka za podvodni ribolov na komprimirani zrak "Kit-57".



Šezdesetih godina proizvodile su se četiri modela podvodnih pušaka na komprimirani zrak sa njegovim potpisom. Slike 11 i 12 prikazuju nacrt i jednu od te četiri puške – KIT 61.



Slika 11. Jedna od prvih podvodnih zračnih pušaka, autor ing. Josip Medur – Kit 61.[14]



Slika 12. Podvodna puška na komprimirani zrak Kit 61. [15]

Te puške predstavljale su tada u svijetu tehnološko čudo. Prvu masovnu proizvodnju prilagođenog dizajna, ali po ideji vakumskog sustava Josipa Medura, pokrenuo je Dragutin Sraga, kasnije se uključio i njegov sin Rene, u Zagrebu 1963. godine pa sve do 1994. godine (Slika 13).



**Slika 13. Podvodna puška na komprimirani zrak proizvedena u Zagrebu –Sraga. [14]**

Njihova koncepcija temelji se na zračnoj komori koju u cijevi zatvara klip u koji se postavlja strijela. Guranjem strijele u cijev zrak u cilindru se tlači i sabija na uskom prostoru. U zadnjoj poziciji klip se zakači za osigurač, odakle ga oslobađa mehanizam okidanja pri pritisku na okidač. Puške su dolazile u kompletu sa pumpom kojom se komora pumpala na pretlak po preporuci proizvođača (i do trideset atmosfera). Ove podvodne puške, ubrzo nazvane komprimirke, već u prvoj razvojnoj fazi bile su dosta ozbiljno koncipirane. Tržištu su ponuđene u širokoj paleti dimenzija od podvodnih pištolja duljine tridesetak centimetara do najvećih modela duljih od sto centimetara kojima se moglo bez problema krenuti u podvodni ribolov i na velike primjerke riba koji sa tadašnjim lastikačama i federačama nije bio efikasan. [16] Ovisno o proizvođaču postoje razni modeli, jedan takav je model sa duplom zračnom komorom. Korištenjem samo jedne ili obje komore regulira se snaga izbačaja prema potrebi, ovisno o veličini lovine. Iako su razvojem lastika lastikačepostale zastupljenije, talijanski proizvođači vraćaju komprimirke na sam vrh. Zahvaljujući naprednim tehnologijama, talijanski proizvođači kao što su Omer i Seac, u zadnje vrijeme izrađuju iznimno kvalitetne karbonske podvodne puške u obliku sipine kosti. [17]

#### ***1.1.5. Impulsna vatrogasna puška za gašenje požara***

Primjena tehnologije komprimiranog zraka našla je svoju primjenu i u vatrogastvu. Jedan takav primjer je Njemačka firma “Ifex Technologies“. Proizvod je impulsna puška serije Ifex. 1994 godine inženjer FransSteur osnovao je IFEX Technologies GmbH za proizvodnju impulsne tehnologije u gašenju požara. Kada je na internacionalnom sajmu u Hannoveru Njemačka predstavila jednolitrenu impulsnu pušku za gašenje požara, zanimanje je

bilo veliko. U slijedećim godinama Steur je razvio i znatno veće inačice, a primjena se do danas proširila po cijelom svijetu.

Impulsna tehnologija omogućava da se sa ekstremno malim količinama sredstva za gašenje, voda ili pjena, ugasi puno veća površina nego sa običnim aparatom za gašenje ili sa vatrogasnim crijevom. Primjena puške je u gašenju otvorenog plamena ili žara kako na otvorenom, tako i u zatvorenom prostoru.

Impulsna puška "Ifex 3000" (Slika 14) izbacuje sredstvo za gašenje pod pritiskom od 25 bara, brzinom od 120 – 200 m/s. Zbog tako velike brzine impulsni hitac prouzroči nastanak velike količine mikro kapljica koje zbog velike kinetičke energije prodiru u samo žarište požara te ga gase u izuzetno kratkom vremenu. Vrijeme ponovnog punjenja do opaljenja je 2-4 sekunde, ovisno o uvježbanosti osobe koja gasi.

Puška koristi kao pogonsko sredstvo komprimirani zrak iz boce, kapaciteta je jedne litre, a uz pušku ide i spremnik od 13 litara vode.

Domet mlaza je 6 – 9 metara. Uz jak mehanički udar puška izbacuje sredstvo za gašenje velikom brzinom u kratkom vremenu u mjesto požara. Otpor zraka koji djeluje na kapljice smanjuje ih sa otprilike 700 mikrona na cca. 100 mikrona što omogućuje da se sa jednom litrom vode ohladi prostor od 68 m<sup>2</sup> umjesto normalnih 5.8 m<sup>2</sup> i prklično smanjujući temperaturu u prostoriji sa 100 °C na podnošljivih 40 °C u samo nekoliko sekundi.[18]



Slika 14. Vatrogasna zračna puška IFEX 3000.[19]



## 2. Zakonski okvir korištenja i nabavke zračnog oružja

Prema važećem zakonu o oružju RH, zračno oružje su sve vrste pušaka, pištolja, ravolvera i drugih naprava koje snagom stlačenog zraka ili drugog plina izbacuju kroz cijev kuglicu, sačmu ili drugi projektil.

Prma ovom zakonu zračno oružje ulazi u dvije grupe:

- *oružje kategorije C* - zračno oružje čija kinetička energija je 10,5 J ili veća ili je brzina projektila 200 m/s ili veća i kalibra većeg od 4,5 mm. Oružje kategorije C smiju nabavljati i držati bez odobrenja nadležnog tijela fizičke osobe starije od 21. godinu i pravne osobe. Oružje ove kategorije spada u dozvoljeno oružje za koje je potrebna prijava nadležnom tijelu u roku od osam dana i to od osobe koja je nabavila oružje i od ovlaštenog prodavača oružja.

- *oružje kategorije D* - zračno oružje čija je kinetička energija manja od 10,5 J ili je brzina projektila manja od 200 m/s i kalibra maksimalno 4.5 mm. Zračno oružje kategorije D ubraja se u dozvoljeno oružje za koje nije potrebno odobrenje niti prijava nadležnom tijelu, osim u slučaju prelaska državne granice.

Oružje obje kategorije ne smije se na javnom mjestu učiniti vidljivim i nositi na način da uznemiruje druge građane. Zračno oružje smije se osim na streljanama koristiti i na drugim mjestima koja po svom položaju i preduzetim mjerama ne ugrožavaju sigurnost građana. Zračnim oružjem se mogu koristiti i djeca starija od 11 godina na sportskim streljštima i na drugim mjestima određenim i uređenim za vježbe gađanja pod nadzorom ovlaštenog trenera.

Zabranjeno je posuđivanje zračnog oružja maloljetnicima.

Za nepoštovanje propisa ovog zakona predviđene su prekršajne novčane kazne.[20]

### 3. BALISTIKA

#### 3.1. Općenito

Balistika je znanstvena i tehnička disciplina koja proučava gibanja bačenih tijela, posebno brzinu, putanju i domet, te u području naoružanja proučava gibanje projektila ispaljenih iz vatrenog oružja i to u cijevi (unutarnja balistika), u atmosferi (vanjska balistika) i kroz prepreku (balistika na cilju).[22]

Riječ balistika potječe iz stare Grčke. U starom stoljeću sprave za bacanje kamena nazivale su se baliste. Leonardo da Vinci bio je prvi koji se bavio ovim problemom. On je pokušavao da poveže utjecaj dužine i promjera cijevi na let projektila. Tada se smatralo da projektil uvijek ide horizontalno, a tek gubitkom energije pada na zemlju vertikalno. Krajem 14. st. pojavila su se prva vatrena oruđa, ali puno kasnije, tek u 17. st. kretanje zrna u cijevi nazvano je balistika. U 18. st. (1745. godine) u svojoj knjizi Leonhard Euler dijeli balistiku na unutarnju i vanjsku i ukazuje da su to dvije različite discipline.[21] Prema nekima se balistika dijeli još i na terminalnu.

Iako se balistika veže uz vatreno oružje možemo je primjeniti i na zračno sa razlikom da kod povlačenja okidača ne dolazi do kemijske reakcije unutar oružja, već se projektil ispaljuje ekspanzijom komprimiranog zraka ili plina.

##### 3.1.1. Unutarnja balistika

Unutarnja balistika se bavi proučavanjem dinamičkih i termodinamičkih karakteristika pogonskog punjenja nakon opaljenja. Proučava uvjete i promjene koje se događaju u oružju nakon opaljenja, te utjecaj tih sila na projektil i proučava njegovo ponašanje izlaza iz cijevi oružja.

Povijesni razvitak unutarnje balistike tijesno je povezan s općim razvitkom fizičko-matematičkih i tehničkih znanosti. Jedna od najznačajnijih etapa u razvitku unutarnje balistike je pronalazak kolidnih baruta. Prve osnove na području unutarnje balistike dao je francuski balističar Guillaume Piobert, koji je 1839. godine utvrdio zakon sagorijevanja baruta po paralelnim slojevima koje važi za bezdimne barute. Prvo mjerenje maksimalnog tlaka koji vlada u cijevi vatrenog oružja obavio je pomoću krešera 1860. godine Alfred Nobel. Četiri godine kasnije je Resel objavio svoju prvu osnovnu jednadžbu unutarnje balistike. Najveće

zasluge moraju se pripisati francuskom inženjeru Paulu Vieilleu koji je svojom manometarskom bombom utvrdio razvoj tlakova pri sagorjevanju baruta u funkciji vremena, a u komori stalnog volumena. Krajem 19. st. Belgijanac Bulange uspio je da pomoću svog kronografa izmjeri početnu brzinu projektila. Tada se balistika počela naglo razvijati, a pogotovo kasnije, kada se pojavljuje niz poznatih balističara koji su proširili znanje balistike.[21]

### 3.1.2. Vanjska balistika

Vanjska balistika proučava kretanje projektila od usta cijevi vatrenog oružja do udara u prepreku ili rasprsnuća u zraku. Kao znanstvena disciplina predstavlja dio primjenjene racionalne mehanike, a temelji se na zakonima dinamike i aerodinamike. Temeljna zadaća vanjske balistike je da za projektil poznatih karakteristika od određenog trenutka odredi, s dovoljnom točnošću, karakteristike putanje (trajektorije) do padne ili druge zadane točke. Za rješavanje ovog problema neophodno je odrediti sile koje djeluju na projektil, napisati diferencijalne jednadžbe kretanja, a zatim rješavajući sistem tih jednadžbi odrediti karakteristiku i promjene kretanja projektila u promatranom vremenu.

Povijesni razvoj vanjske balistike pratio je razvoj znanstvenih oblasti na koje se ona oslanjala. Za prvog pisca iz vanjske balistike se može smatrati Mlečanin Tartalja, koji je 1573. godine izložio u vidu dijaloga zakone kosog hica, a kasnije i primjenu ovog zakona na ispaljivanje projektila iz vatrenih oruđa. Matematičku formulaciju zakona slobodnog pada i kosog hica i geometrijski dokaz da je putanja kosog hica parabola dao je Galileo Galilei. Isaac Newton uvodi u razmatranje i otpor zraka, jer kako je zaključio otpor se povećava sa kvadratom brzine tijela. Probleme vanjske balistike su kasnije rješavali i drugi poznati znanstvenici: Euler, Bernoulli, d'Alembert, i dr. ... Polovinom 17. st. napravljeni su prvi pokušaji mjerenja brzine projektila balističkim klatnom. Sto godina kasnije brzina počinje da se mjeritočnije pomoću kronografa sa slobodnim padom, koji je prvi izveo Belgijanac Boulange u Gavru 1865. godine. Krajem 19. st. za računanje se koriste metode numeričke integracije. Kako je nedovoljno razvijena računalna tehnika ograničavala širu primjenu ovih metoda, razvijaju se druge približne metode koje koriste specijalne tablice određene metodama numeričke integracije. Najveći napredak u rješavanju problema vanjske balistike napravljen je korištenjem i razvojem računala kao i nove elektronske instrumentacije za mjerenje balističkih veličina.[21]

### **3.1.3. Terminalna balistika**

Terminalna balistika, ili kako se još naziva balistika na cilju, određuje učinak projektila na pogodenom cilju. Terminalna balistika proučava učinak projektila na cilju koji je uvjetovan, prije svega, masom i brzinom, i ako se ne mogu zanemariti i ostali faktori kao što su: oblik projektila, vrsta prepreke, lokacija pogotka i sl. U okviru terminalne balistike izračunava se udarna energija projektila (energija na cilju).[21]

## **3.2. Projektili**

Projektil je fizičko tijelo, naprava ili složeno sredstvo koje gađa neki cilj. Projektil može biti ispucan iz puške (metak, zrno), iz topa (granata), raketnog lansera, broda i slično. Projektili se najčešće spominju u vojnom smislu u kojem označava oružje koje nanosi izravnu štetu čovjeku, objektu, životinji i sl. Neki projektili su punjeni i eksplozivom kako bi se povećala učinkovitost razaranja, dok su neki drugi izrađeni od tvrdog materijala koji se velikom brzinom zabija u tijelo čovjeka ili vozila. [23] Kako je navedeno u definiciji projektilima u općem smislu može se smatrati od kamena koji je naš daleki predak iz kamenog doba bacio na neku životinju, lopte koju je neko dijete igrajući se ispucalo na gol pa do današnjih razornih tvorevina kojima je cilj da naprave što veću štetu na krajnjem odredištu.

## **3.3. Neki od načina ispaljivanja projektila**

### **3.3.1. Ispaljivanje snagom tetive**

Preteća vatrenog oružja bilo je hladno oružje koje je ispaljivalo projekte (strijele) snagom tetive kao što su lukovi i samostreli. Vezivanjem tetive za dva suprotna kraja gibljive šipke izrađene od prirodnih ili umjetnih materijala, te povlačenjem tetive strijelac bi luku ili samostrelu prenio potencijalnu energiju koja bi se otpuštanjem tetive pretvarala u kinetičku energiju strijele usmjeravajući je u željenom smjeru. Naziv tetiva, kao spoj dva kraja dolazi iz anatomije, to je produžetak mišića koji spaja mišiće sa kostima. Ispočetka su tetive rađene od prirodnih materijala kao što su životinjska koža, životinjske tetive, konjska dlaka, crijeva, a danas od jačih i otpornijih umjetnih materijala.

Maksimalan domet strijele ispaljene lukom iznosio je nekoliko stotina metara, ovisno o veličini i tehnologiji izrade, dok strijele ispucane samostrelom imaju veći domet i veću probojnu moć.



Slika 15. luk i samostrel. [24]

### 3.3.2. Zračni sustavi

Zračni sustavi ispaljuju projektile brzom ekspanzijom zraka ili nekog drugog plina ( $\text{CO}_2$ ). Povlačenjem mehanizma za okidanje otvara se ventil tlačne komore, zrak se širi istvara se veliki tlak koji djeluje na projektil potiskujući ga u smjeru najmanjeg otpora, a to je cijev. Potencijalnu energiju koju je zrak primio kompresijom iz nekog vanjskog izvora ili potisnutog tlačnog klipa (ovisno o sustavu) predaje projektilu u vidu kinetičke energije. Što je veći tlak veća je i kinetička energija, izlazna brzina i domet projektila. Ispucavati se mogu kuglice, dijabole, strelice, injekcije, i sl.

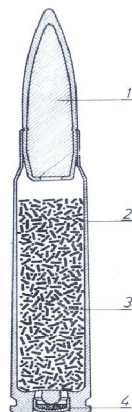
Domet može varirati od nekoliko desetaka do nekoliko stotina metara, ovisno o namjeni, dizajnu, tehnologiji izrade ili veličini samog sustava.

Slika 16.  $\text{CO}_2$  ampule za zračno oružje. [25]

### 3.3.3. Barutno punjenje

Otkrićem baruta i kontroliranjem njegovog djelovanja počeo je razvoj vatrenog oružja. Mehaničkim djelovanjem izvana dolazi do zapaljenja baruta. Neovisno na koji način je došlo do zapaljenja, uslijed istog dolazi dokemijske reakcije. Trenutnim porastom temperature stvaraju se barutni dimni plinovi. Barutni plinovi nastali kemijskom reakcijom uslijed zapaljenja naglo se šire u smjeru najmanjeg otpora. Najmanji otpor stvara metak u cijevi ina taj način se izbacuje projektil u željenom smjeru. Zapaljenje baruta se može vršiti kao kod starog oružja, direktnim paljenjem traga baruta, zapaljive vrpce ili kod modernijih sustavamehanički udar udarne igle u inicijalnu kapislu koja pali eksplozivnu smjesu unutar upotrebljenog projektila. Stvaranje kemijske reakcije unutar samog oružja je i glavna osobina vatrenog oružja po čemu se razlikuje od ostalih vrsta. Domet mu može biti od nekoliko desetaka metara (pištolji) pa do više hiljada metara (granate).

Postoji široka paleta projektila koji se izbacuju ili su se izbacivali na ovaj način. Prvi topovi su koristili topovske kugle, prve puške i pištolji metalne kuglice, a danas se za lako vatreno oružje je koristi metak, teško granate, signalne rakete, i sl.



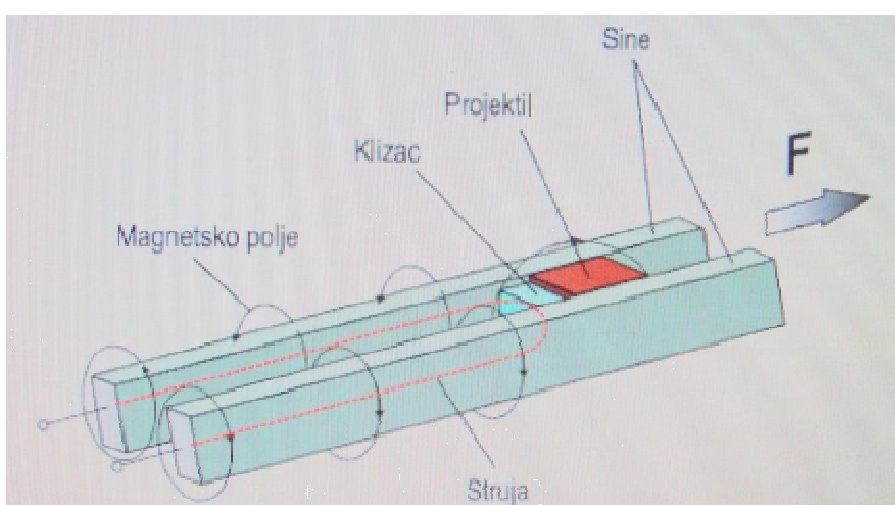
Slika 17. Pješadijski bojevi metak. [21]

1-zrno, 2-čahura, 3-barutno punjenje, 4-inicijalna kapisla

### 3.3.4. Elektromagneni top – Railgun

Elektromagnetni top je u stvari jedan veliki električni krug sastavljen iz izvora napajanja, dvije paralelne tračnice i kraće armature sa projektilom koja povezuje te tračnice. To može biti komad metala ili samo krilca. Električna struja teče od pozitivnog terminala napajanja preko tračnice, pa zatim preko armature na drugu stranu do negativnog pola. Kod topa dvije tračnice djeluju kao žice i oko njih se stvara jako magnetsko polje. Silnice

magnetskog polja su okomite na tračnice. Magnetsko polje formirano oko tračnica u kombinaciji sa električnim tokom stvara Lorentzovu silu koja daje velikubrzinu projektilu koji se ispaljuje. Sila može biti povećana dužinom šina ili povećavanjem jačine struje. Pošto je dužina šina ograničena ide se na korištenje jakih struja, reda milijun ampera za generiranje ogromne sile potrebne za postizanje velikih brzina. Tokom proticanja struje kroz šine i pokretni klizac nastaju ogromne udarne mehaničke sile koje teže da razdvoje tračnice. Opaljenje topa je praćeno velikim bljeskom koji potiče od plazme izazvane velikom energijom sadržanom u magnetskom polju. Jako magnetsko polje lansira projektil brzinom preko 7000 km/h i dometa preko 150 km. Velika kinetička energija daje projektilu veliku razornu moć. [26]

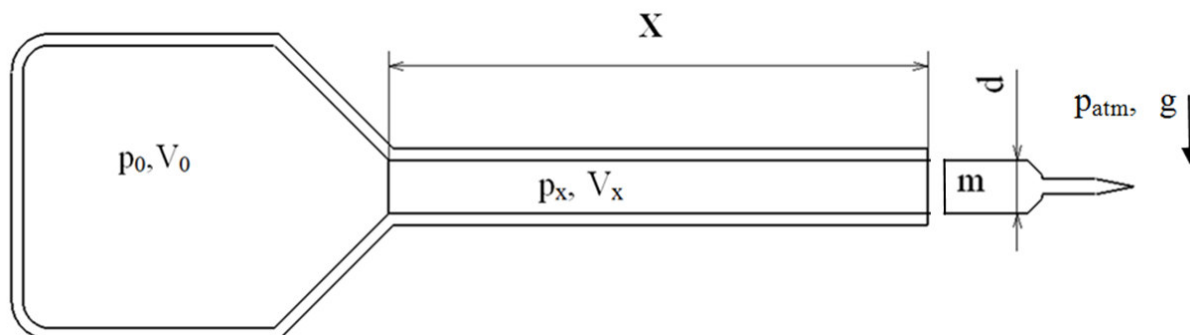


**Slika 18. Jednostavna struktura EM topa. [26]**



**Slika 19. Elektromagnetski top američke mornarice na testnom poligonu. [27]**

#### 4. MODELIRANJE SUSTAVA ZA ISPUCAVANJE PROJEKTILA KOMPRIMIRANIM ZRAKOM



Slika 20. Promatrani sustav

( $V_0$  – početni volumen,  $p_0$  – početni tlak,  $V_x$  – volumen cijevi,  $m$  – masa strelice,  $x$  – duljina cijevi,  $d$  – promjer strelice)

Promatrani sustav za ispucavanje projektila komprimiranim zrakom sastoji se od tlačnog spremnika, cijevi i strelice

Najveća brzina projektila je na izlazu iz cijevi. Uslijed otpora zraka, vjetra, temperature, vlage brzina se smanjuje sa povećanjem udaljenosti.

Zabluda je da se projektil ispaljen iz puške podiže na više, u stvarnosti metak neprestano pada.

Ovu činjenicu možemo objasniti slijedećim pojmovima:

*Linija vida* – prava linija koja se proteže od oka strijelca kroz nišan do mete,

*Linija pravca* – savršeno prava linija koja se proteže duž cijevi oružja do beskonačnosti,

*Putanja projektila* – trajektorija koju projektil ima od napuštanja cijevi do mete (balistička krivulja),

*Pad* – stvarni pad projektila gledano od linije pravca.

Projektil ide na više gledano od linije vida, ali prava linija ispucavanja projektila je linija pravca koja se proteže duž cijevi oružja i u odnosu na nju projektil uvijek pada.

Postojanje linije vida i linije pravca objašnjava razlog neprestanog pada projektila, stoga se ciljnik prilikom gađanja mora podesiti uzimajući u obzir taj pad na određenoj udaljenosti.

Ovu putanju projektila opisuje dio balistike koji se zove vanjska balistika.



#### **4.1. Tlačni spremnik**

Tlačni spremnik je sastavni dio promatranog sustava za ispućavanje projektila komprimiranim zrakom. Pod tlačnim spremnikom smatra se šuplji materijalni volumen izrađen od određenog materijala koji mora biti sposoban primiti i zadržati potrebno vrijeme zrak pod određenim tlakom, te ga uslijed djelovanja kontrolirane vanjske sile pod određenim uvjetima osloboditi, odnosno predati potencijalnu energiju kompresije projektilu.

#### **4.2. Projektil**

Projektil je u našem slučaju strelica za uspavlivanje pretpostavljenog volumena i mase koji promatramo u ovom sustavu. Potencijalna energija komprimiranog zraka pretvara se u kinetičku energiju strelice. Promatramo njeno ponašanje iz stanja mirovanja pa do završne točke leta.

#### **4.3. Izlazni otvor**

Pod izlaznim otvorom podrazumjeva se cijev (duljine "  $x$  " i promjera "  $d$  " kroz koju strelica počinje svoje gibanje iz stanja mirovanja i koja ga usmjerava prema konačnom odredištu. U ovom idealiziranom sustavu cijev je promjera kao i strelica, te sva sila ekspanzije djeluje na nju do trenutka izlaska njene zadnje točke iz cijevi.

#### **4.4. Modeliranje sustava**

##### ***4.4.1. Unutanrnja balistika***

Proračun unutrašnje balistike zračnog oružja puno je jednostavniji od proračuna vatrenog oružja zbog nedostatka visoke temperature koju razvija barut, manjeg tlaka, brzine, nema utjecaja topline na materijal oružja.

Povlačenjem okidača oslobađa se dio stlačenog zraka iz spremnika, prenoseći svoju energiju na projektil u cijevi gurajući ga prema naprijed kroz cijev. Tlak koji djeluje na strelicu jednak je početnom tlaku ( $p_0$ ).

Pretpostavke:

Trenje je konstantno duž cijele cijevi,

Spremnik je pod tlakom duže vrijeme i uspostavljeno je ravnotežno stanje,

Radni fluid je zrak,

Projektil je strelica za uspavlivanje životinja 5ml (cc), težine 0,0125kg,

Kalibar strelice je 0.50 (12,7 mm),

#### 4.4.2. Proračun unutrašnje balistike sustava

- opisuje povećanje volumena na " x "udaljenosti u odnosu na položaj strelice u cijevi:(1)

$$V_x = V_0 + Ax \quad (1)$$

gdje je:

$V_x$  - promjenjivi volumen [ $m^3$ ]

$V_0$  - početni volumen ( $V_0 = 1,6 \cdot 10^{-3}$ ) [ $m^3$ ]

$A$  - površina poprečnog presjeka strelice [ $m^2$ ]

$x$  - udaljenost strelice u datom trenutku u cijevi [m]

- opisuje silu trenja:(2)

$$F_{tr} = mg\mu \quad (2)$$

gdje je:

$F_{tr}$  - sila trenja [N]

$m$  - masa strelice (odabrano,  $m = 0,015$ ) [kg]

$g$  - gravitacijska konstanta ( $g = 9,80665$ ) [ $m/s^2$ ]

$\mu$  - faktor trenja (odabrano  $\mu = 0,35$ )

- opisuje površinu poprečnog presjeka strelice:(3)

$$A = \frac{d^2\pi}{4} \quad (3)$$

gdje je:

$d$  - promjer strelice ( $d = 0,0125$ ) [m]

$\pi$  - Ludolfov broj ( $\pi = 3,14159265$ )

4.4.2.1. Jednadžbe unutarnjeg stanja sustava uz pretpostavku konstantne temperature - izoterma ( $T=const.$ )

- opisuje promjenu tlaka izotermnog procesa u odnosu na povećanje volumena nastalog uslijed promjene položaja strelice u cijevi:(4)

$$P_T(x) = \frac{P_0 V_0}{V_x} \quad (4)$$

gdje je:

$P_T(x)$  - promjenjivi tlak [Pa]

$P_0$  - početni tlak [Pa]

- jednadžba opisuje promjenu brzine strelice u odnosu na njeno gibanje prema izlazu iz cijevi:(5)

$$v_T(x) = \sqrt{\frac{2}{m} \cdot \left[ P_0 V_0 \ln \left( 1 + \frac{Ax}{V_0} \right) - Ax p_{atm} - x F_{tr} \right]} \quad (5)$$

gdje je:

$v_T(x)$  - trenutna brzina strelice u datom trenutku u odnosu na " x " udaljenost u cijevi [m/s]

$p_{atm}$  - atmosferski tlak ( $p_{atm} = 101325$ ) [Pa]

- opisuje kinetičku energiju strelice na položaju " x " u odnosu na trenutnu brzinu:(6)

$$E_{K,T}(x) = \frac{1}{2} m [v_T(x)]^2 \quad (6)$$

gdje je:

$E_{K,T}(x)$  - kinetička energija strelice na položaju " x ", od početka cijevi [J]

- opisuje rad širenja zraka prilikom ekspanzije u sustavu izotermnim procesom:(7)

$$W_T(x) = P_0 V_0 \ln \left( \frac{V_x}{V_0} \right) \quad (7)$$

gdje je:

$W_T(x)$  - rad dobijen ekspanzijom po izotermi [J]

#### 4.4.2.2. Proračun unutarnjeg stanja sustava sa pretpostavkom promjene temperature prilikom ekspanzije – izentropa ( $s = \text{const.}$ )

Zbog brze promjene i kratkog trajanja procesa, temperatura se ne izmjenjuje sa okolišem već ostaje u sustavu - izentropa ( $s = \text{const.}$ )

- opisuje promjenu tlaka izentropskog procesa u odnosu na “ x “ položaj strelice u cijevi:(8)

$$P_S(x) = \frac{P_0 V_0^\kappa}{V_x^\kappa} \quad (8)$$

gdje je:

$p_S(x)$  - promjenjivi tlak u odnosu na “ x “ položaj strelice u cijevi [Pa]

$\kappa$  - izentropski eksponent (zrak = 1,4)

- jednadžba opisuje promjenu brzine strelice u odnosu na njeno gibanje prema izlazu iz cijevi:(9)

$$v_S(x) = \sqrt{\frac{2}{m} \left[ \frac{P_0 V_0}{\kappa - 1} \left( 1 - \frac{V_0}{Ax + V_0} \right)^{\kappa - 1} \right] - Ax p_{atm} - x F_{tr}} \quad (9)$$

gdje je:

$v_S(x)$  - brzina strelice u datom trenutku u odnosu na njen položaj “ x “ u cijevi [m/s]

- opisuje promjenu kinetičke energije strelice na položaju “ x “ u odnosu na trenutnu brzinu(10)

$$E_{K,S}(x) = \frac{1}{2} m [v_S(t)]^2 \quad (10)$$

gdje je:

$E_{K,S}(x)$  - kinetička energija strelice na položaju “ x “, od početka cijevi [J]

- opisuje rad širenja zraka prilikom ekspanzije u sustavu izentropskog procesa:(111)

$$W_S(x) = \frac{P_0 V_0}{\kappa - 1} \left[ 1 - \left( \frac{V_0}{V_x} \right)^{\kappa - 1} \right] \quad (11)$$

gdje je:

$W_S(x)$  - rad dobijen ekspanzijom zraka [J]

#### 4.4.3. Proračun vanjske balistike (putanja projektila - kosi hitac sa silom otpora)

- opisuje položaj na apcisi u vremenskom trenutku “ t “ s koeficijentom otpora:(122)

$$x(t) = \frac{v_0 \cos(\alpha)}{k} (1 - e^{-kt}) \quad (12)$$

$x(t)$  - položaj strelice na apcisi u određenom vremenskom trenutku izvan cijevi [m]

$v_0$  - početna brzina (jednaka izlaznoj brzini iz cijevi) [m/s]

$\cos(\alpha)$  - kosinus kuta pod kojim je strelica ispaljena [ ° ]

$k$  - koeficijent otpora (odabrano  $k = 0,25$ )

$e$  - Eulerov broj ( $e = 2,71828 18284$ )

$t$  - trenutno vrijeme za koje se računa [s]

- opisuje brzinu po apcisi u nekom vremenskom trenutku “ t “:(133)

$$v_x(t) = v_0 \cos(\alpha) e^{-kt} \quad (13)$$

gdje je:

$v_x(t)$  – brzina po apcisi u vremenu [m/s]

- opisuje položaj gibanja po ordinati u nekom vremenskom trenutku " t ":(144)

$$y(t) = -\frac{g}{k} + \frac{g}{k^2} \left( 1 + \frac{k}{g} v_0 \sin(\alpha) \right) (1 - e^{-kt}) \quad (14)$$

gdje je:

$y(t)$  – položaj strelice na ordinati u određenom vremenskom trenutku

- opisuje brzinu po ordinati u nekom trenutku " t ":(155)

$$v_y(t) = -\frac{g}{k} + \frac{g}{k} \left( 1 + \frac{k}{g} v_0 \sin(\alpha) \right) e^{-kt} \quad (15)$$

gdje je:

$v_y(t)$  – brzina po ordinati u vremenu [m/s]

- opisuje krivulju gibanja putanje strelice:(166)

$$y(x) = \frac{g}{k^2} \ln \left( 1 + \frac{kx_l}{v_0 \cos(\alpha)} \right) + x_l \left( tg(\alpha) + \frac{g}{v_0 k \cos(\alpha)} \right) \quad (166)$$

gdje je:

$y(x)$  – funkcija koja opisuje putanju strelice

$x_l$  - domet strelice

#### 4.5. Grafički prikaz modeliranog sustava

Proračun je napravljen po formula iz poglavlja " 4.4 " uz pomoć programa Microsoft Excel.

Jednadžbe su prepisane bez izvoda iz stručne literature i to:

- jednadžbe 5,6,7.[28]

- jednadžbe 4, 6, 7, 8, 10, 11.[30]

- jednadžbe 12, 13, 14, 15, 16. [29]

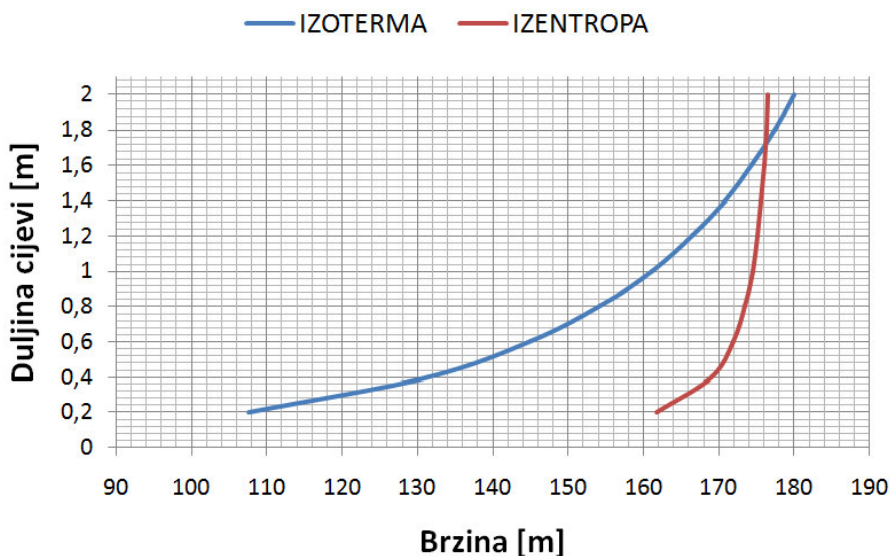
Sustav je idealiziran i puno stvari je zanemareno, ali kroz nekoliko grafičkih primjera matematički će biti prikazano kao se ponaša sustav prije izlaska strelice i putanju strelice do pada sa promjenom pojedinih parametara. Usporedba će biti sa grafičkim prikazom izračunatih podataka, za unutarnji sustav, proračunat po izotermi i izentropi, a za vanjski sustav utjecaj promjene tlaka na domet, te ujecaj koeficijenta otpora na domet.

Fiksni parametri kroz sva promatranja su:

$g = 9,80665 \text{ m/s}^2$ ,  $p_{\text{atm}} = 101325 \text{ Pa}$ ,  $V_0 = 1,6 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3$ ,  $\mu = 0,35$ ,  $\kappa = 1,4$  (zrak), masa strelice  $m = 0,015$ , promjer strelice  $d = 0,0125$

#### 4.5.1. Unutarnji sustav

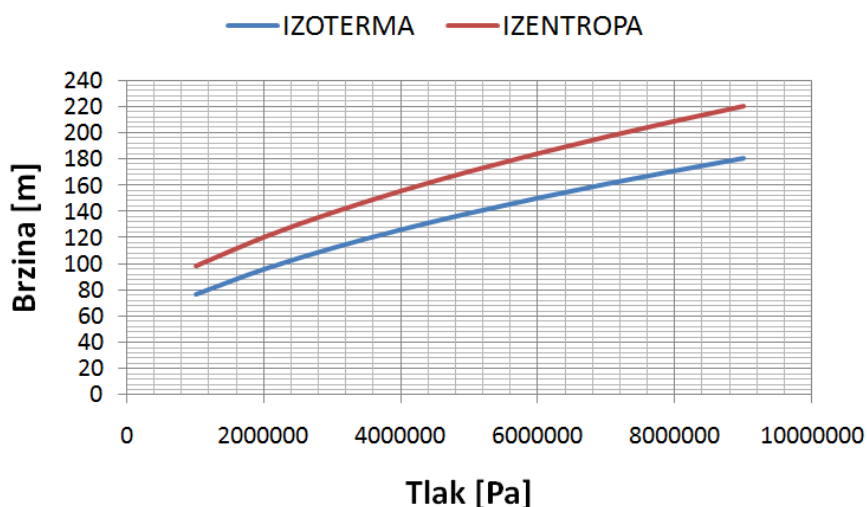
##### 4.5.1.1. Ovisnost izlazne brzine o promjeni duljine cijevi



Slika 21. Ovisnost izlazne brzine o promjeni duljine cijevi.

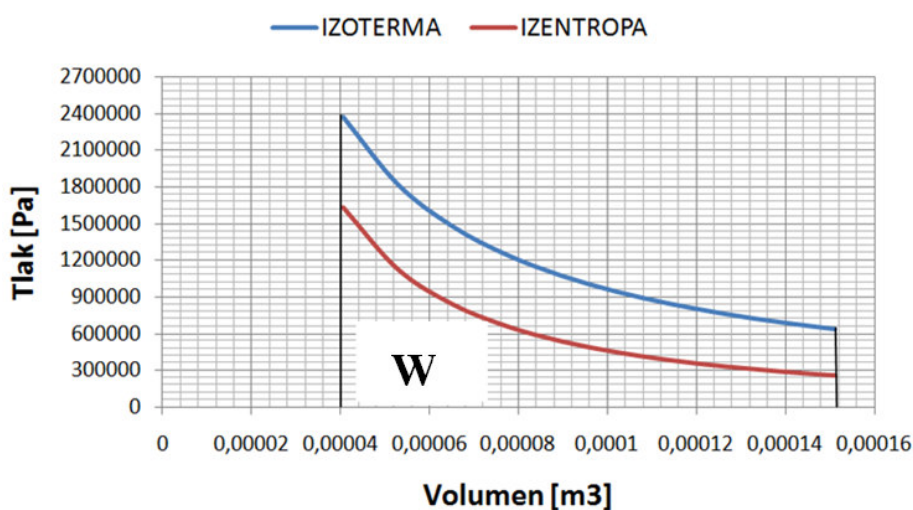
Pri konstantnom tlaku  $p = 60\ 000 \text{ Pa}$ , obje funkcije pokazuju rast brzine sa povećanjem duljine cijevi. Sila kojom ekspanzija djeluje na strelicu traje sve do njenog izlaska iz cijevi, tada se tlak izjednačava sa okolišnim i nema više utjecaja na njeno gibanje pa je i logično da je konstantno ubrzanje kod ovako malih duljina i visokog početnog tlaka. Izentropska krivulja je strmija. Zbog brze promjene stanja nema razmjene temperature sa okolišem. Sva energija ostaje u cijevi pa je stoga i brži porast brzine.

## 4.5.1.2. Odnos početnog tlaka i izlazne brzina



Slika 22. Odnos početnog tlaka i izlazne brzina.

Slika 22. prikazuje podjednak rast brzine uslijed povećanja tlaka pri konstantnom volumenu. Vidljivo je da sa povećanjem tlaka i brzine krivulje se razilaze. Zbog malih tlakova i ne postojanja kemijske reakcije kao uzroka ekspanzije možemo za proračune, kod manjih tlakova, koristiti izotermu kao bazu za proračun. Naravno, za pravi konstrukcijski proračun preduvjet je poznavanje drugih parametara koji utječu na promatrani sustav gdje izentropa svakako ima prednost, a kod vatrenog oružja je uvjet.

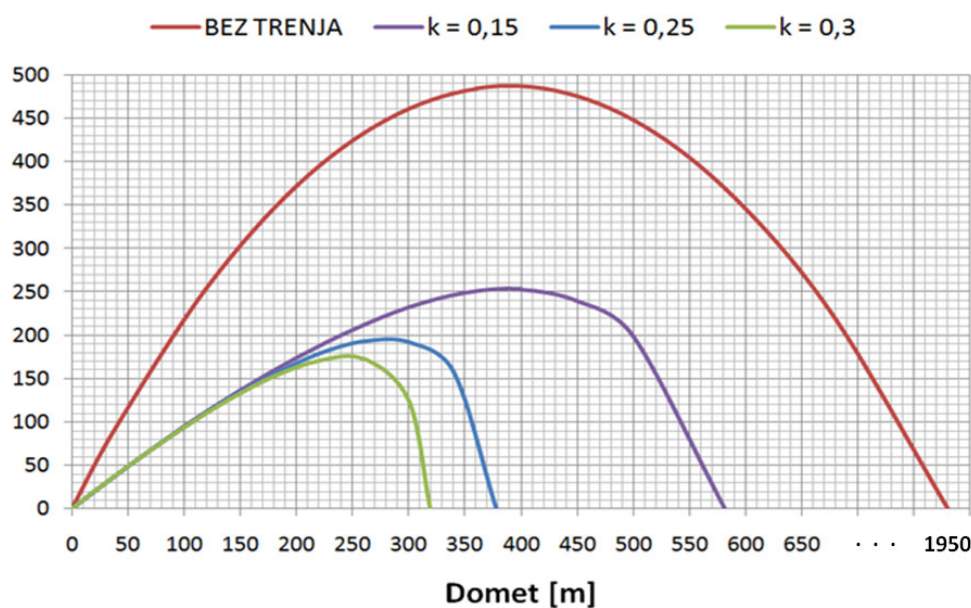
4.5.1.3.  $p - V$  dijagramSlika 23.  $p - V$  dijagram.

Slika 23. prikazuje  $p - V$  dijagram, a površina ispod krivulje je izvršeni rad. Iz dijagrama se jasno vidi da proces po izotermi daje više rada nego proces izentropi.



## 4.5.2. Vanjski sustav

### 4.5.2.1. Domet za različite koeficijente otpora



**Slika 24. Domet za različite koeficijente otpora**

Dijagramom na slici 24. imamo pregled krivulja ispaljenog hica za koonstantan tlak, a različite koeficijente otpora. Crvena krivulja predstavlja slobodni hitac bez otpora i na njoj se vidi da pri nedostatku otpora dobijemo simetričnu parabolu sa tjemenom na sredini. Uvođenjem otpora pri proračunu dobili smo nepravilnu krivulju, a tjeme je pomaknuto prema napred. Normalno, kao što je i logično, za veći koeficijent otpora imamo manji domet. Ovdje smo to pokazali grafički iz prethodnog izračuna.

## 5. ZAKLJUČAK

ZRAK - 78,084 % dušika, 20,947 % kisika, 0,934 % argona, 0,033 % ugljik dioksida. Kako su se ljudi razvijali, razvijala se i tehnologija. Ono što je nekad bilo čudo tehnike danas su samo muzejski primjerci koje promatramo sa čuđenjem ili divljenjem. Zrak kao pogonsko gorivo našao je svoje mjesto u toj povijesti. Kroz ovaj završni rad dan je pregled jednog malog djela te povijesti u jednom segmentu njegovog iskorištavanja, kao potencijalna energija u komprimiranom stanju. Zrak kao pogon za ispućavanje projektila uglavnom se veže za oružje, kako u povijesti tako i danas. Na kraju rada dan je osvrt i kroz neke jednostavne proračune prikazano je ponašanje sustava. Neki ozbiljniji proračuni se ni ne mogu izvoditi bez dobrih matematičkih programa i poznavanja puno varijabli. Grafički, na osnovu izračuna, pokazano je da početni tlak utječe na brzinu ispaljivanja, a onda naravno i domet. Veličina cijevi utječe također na izlaznu brzinu i domet. Tlak, kao osnovna komponenta ovog sustava, ubrzava projektil sve do trenutka dok se ne izjednači sa tlakom okoliša. Nakon izlaska projektila u vanjski sustav projektil se giba po davno utvrđenom zakonu fizike. Kosi hitac je osnova za ovakva promatranja. Ponovo je potrebno uzeti u obzir vanjske varijable, jer svaka sitnica utječe na putanju. Dodavanjem jednog koeficijenta otpora i manipulirajući njime vidjeli smo kako se ponaša krivulja leta projektila. Sve u prirodi teži da zaustavi i skrene projektil sa zadane putanje, a naš je zadatak da sve predvidimo i dovedemo ga na cilj.

## **PRILOZI**

I. CD-R disc

## LITERATURA

- [1] <https://alishapuri.wordpress.com/page/3/>
- [2] <http://censuru.net/16179-kitay-razmestil-rakety-u-granicy-s-rossiey.html>
- [3] <https://www.pinterest.com/pin/353251164505741650/>
- [4] <https://history.knoji.com/ancient-weapons-the-blow-or-pipe-gun-its-use-and-history-down-the-ages/>
- [5] Wikipedija
- [6] [http://emuseumplus.lsh.se/eMuseumPlus?service=direct/1/ResultLightboxView/result.t1.collection\\_lightbox.\\$TspTitleImageLink.link&sp=10&sp=Scollection&sp=SfieldValue&sp=0&sp=1&sp=3&sp=Slightbox\\_4x5&sp=80&sp=Sdetail&sp=0&sp=F&sp=T&sp=92](http://emuseumplus.lsh.se/eMuseumPlus?service=direct/1/ResultLightboxView/result.t1.collection_lightbox.$TspTitleImageLink.link&sp=10&sp=Scollection&sp=SfieldValue&sp=0&sp=1&sp=3&sp=Slightbox_4x5&sp=80&sp=Sdetail&sp=0&sp=F&sp=T&sp=92)
- [7] [https://www.reddit.com/r/ArtefactPorn/comments/6c362f/girandoni\\_style\\_pneumatic\\_rifle\\_with\\_buttstock/](https://www.reddit.com/r/ArtefactPorn/comments/6c362f/girandoni_style_pneumatic_rifle_with_buttstock/)
- [8] [https://en.wikipedia.org/wiki/Air\\_gun](https://en.wikipedia.org/wiki/Air_gun)
- [9] <http://www.guns.com/2011/03/15/the-girandoni-air-rifle-deadly-under-pressure/>
- [10] <https://www.pinterest.com/pin/320811173433880693/>
- [11] <http://www.co2airguns.net/Collection/Schimel%20GP-22/index.htm>
- [12] <http://www.tactical-life.com/firearms/10-of-the-most-powerful-airguns/#swjf16-air-airforce>
- [13] [https://en.wikipedia.org/wiki/Tranquillizer\\_gun](https://en.wikipedia.org/wiki/Tranquillizer_gun)
- [14] <http://www.submania.hr/forum/index.php?topic=10111.0>
- [15] Željko Bonefačić: Hrvatsko ronilašto
- [16] Recenzija knjige Nevena Šarića: Podvodni ribolov na Jadranu
- [17] <https://immersione-professionale.blogspot.hr/2010/08/zacetnik-podvodnog-ribolova-u-hrvatskoj.html>
- [18] <http://www.profesionalni-vatrogasci-zagreb.hr/oprema%20impulsna%20puska%20ifex%203000.htm>
- [19] <https://www.upvh.hr/ifex-impulsna-puska/>
- [20] <https://www.zakon.hr/z/270/Zakon-o-oru%C5%BEju>
- [21] B. Franjić, M. Milosavljević: Forenzička balistika, Sarajevo, 2009.
- [22] <http://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?ID=5525>

- [23] <https://hr.wikipedia.org/wiki/Projektil>
- [24] <https://www.pinterest.com/pin/424112489878929921/?lp=true>
- [25] <https://blueridgefirearms.com/category/Compressed-Air-Cylinders/00B0>
- [26] <http://www.paluba.info/smf/index.php?topic=14683.0>
- [27] <http://www.nationaldefensemagazine.org/articles/2017/6/15/navys-electromagnetic-railgun-project-progressing>
- [28] Z. J. Rohrbach, T. R. Buresh, M. J. Madsen: Modeling the exit velocity of a compressed air canon, 2011.
- [29] Sanda Pleslić: Pripreme za predavanje iz fizike 1
- [30] Antun Galović: Termodinamika 1, FSB Zagreb, 2007.