BOSNA I HERCEGOVINA
UNIVERZITET U SARAJEVU
MAŠINSKI FAKULTET U SARAJEVU

PROCJENA ZONE SMRTONOSNOG DJELOVANJA HE BOJEVIH GLAVA SA PRIRODNOM FRAGMENTACIJOM

- *Magistarski rad* -

Mentor: V. Prof. dr. Berko Zečević **Autor: Alan Ćatović**

Sarajevo, juli, 2007. godine

PODACI ZA BIBLIOGRAFSKU KARTICU

Broj dokumenta:	**Datum dokumenta:** Juli 2007.	**Tip dokumenta:** Magistarski rad
Naslov: Procjena zone smrtonosnog djelovanja HE bojevih glava sa prirodnom fragmentacijom		**UDK:**
Autor: Alan Ćatović, dipl.maš.ing.		

Mentor:
V. Prof. dr. Berko Zečević, dipl.maš.ing.

Institucija u kojoj je dokument urađen/pohranjen i adresa:
Univerzitet u Sarajevu
Mašinski fakultet u Sarajevu
Vilsonovo šetalište 9, 71000 Sarajevo, Bosna i Hercegovina

Distribucija/raspoloživost dokumenta:

Sažetak:

Definisan je Model za predviđanje zone smrtonosnog djelovanja HE bojevih glava, a koji se sastoji od tri glavna modula: Modul za određivanje vjerovatnoće pogađanja, Modul za predviđanje krivih izogustina, i Interface za CAD modeliranje smrtonosnih zona.

Izvršena su obimna eksperimentalna istraživanja (oko 130 fragmentacionih testova u Pit postrojenjima i Arenama) sa šest tipova artiljerijskih projektila, 3 tipa minobacačkih projektila i 2 tipa bojevih glava raketnih projektila.

Razvijeni su modularni kompjuterski programi, napisani u programskom jeziku MatLab©, koji omogućavaju predviđanje parametara efikasnosti HE bojevih glava.

Na osnovu postavljenih matematičkih modela, eksperimentalnih istraživanjia i metoda numeričke matematike izvršena je analiza parametara masene i prostorne distribucije fragmenata HE bojevih glava.

Izvršena je numerička simulacija naponskog stanja i deformacije komponenata projektila u toku njegovog kretanja kroz cijev oružja, korištenjem softvera ADINA©, sa ciljem provjere sigurnosti u toku kretanja municije kroz cijev oružja i moguće optimizacije unutrašnje trase projektila u cilju povećanja smrtonosne zone HE bojevih glava.

Ključne riječi:
HE bojeve glave, terminalna balistika, prirodna fragmentacija, fragmenti, brzina fragmenata, smrtonosna zona, vjerovatnoća onesposobljavanja, koeficijent efikasnosti, naprezanje projektila, Pit test, Arena test.

Naučno područje:	**Naučno polje:**
Tehničke nauke	HE bojeve glave

Broj stranica:	**Broj slika:**	**Broj tabela:**	**Broj korištenih bibliografskih jedinica:**
266	254	61	77

Komisija:
V. Prof. dr Izet Bijelonja, predsjednik
V. Prof. dr Berko Zečević, mentor
V. Prof. dr Emira Kahrović, član

ZAHVALA

Zahvaljujem se na velikoj stručnoj pomoći, strpljenju i poticaju svome mentoru i prijatelju, v. Prof. dr. Berki Zečeviću, i višem asistentu mr. Jasminu Terziću na pomoći prilikom obrade rada.

Također sam zahvalan v. Prof. dr. Izetu Bijelonji, koji je uprkos obavezama koje je imao kao Prorektor Univerziteta u Sarajevu, našao vremena za pomoć i korisne sugestije iz oblasti numeričke matematike i simulacija.

Hvala v. Prof. dr. Emiri Kahrović na podršci tokom izrade ovog rada.

Zahvalnost dugujem i Tvornici "PRETIS" Sarajevo gdje su izvršena testiranja fragmentacije HE bojevih glava korištena u ovom radu.

Posebnu zahvalnost odajem porodici (majci Izeti, ocu Zuhdiji i sestri Aidi) koji su najzaslužniji za ono što jesam i djevojci Sabini na velikoj potpori i razumijevanju.

Alan Ćatović

SADRŽAJ

1 Uvod 1

1.1 Predmet istraživanja 5
1.1.1 Artiljerijski projektili 5
1.1.2 Projektili za minobacače 6
1.1.3 Raketni projektili 7

1.2 Pojam i vrste HE bojevih glava 8
1.2.1 Upaljač 8
1.2.2 Eksplozivni lanac 9
1.2.3 Tijelo bojeve glave 12
1.2.4 Vrste HE bojevih glava 13
1.2.5 Bojeve glave sa kontrolisanom fragmentacijom 14
1.2.6 Bojeve glave sa prirodnom fragmentacijom 15

2 Dosadašnja istraživanja 17

2.1 Historijski prikaz istraživanja efikasnosti HE bojevih glava 17
2.1.1 Period do II svjetskog rata 17
2.1.2 Period poslije II svjetskog rata 19

2.2 Parametri eksplozivnih materija HE bojeve glave 22
2.2.1 Uvod 22
2.2.2 Sagorijevanje eksplozivnih materija 22
2.2.3 Deflagracija eksplozivnih materija 23
2.2.4 Detonacija eksplozivnih materija 23
2.2.4.1 Udarni talasi 25
2.2.4.2 Detonacioni parametri eksploziva 26
2.2.5 Glavne karakteristike vojnih eksploziva 31
2.2.6 Klasifikacija eksplozivnih materija 33
2.2.7 Jaki eksplozivi 34
2.2.8 Proizvodnja eksplozivnih materija 39
2.2.9 Mehaničke karakteristike eksploziva 40
2.2.10 Osjetljivost eksplozivnih materija 41

2.3 Materijali za tijelo bojeve glave 43
2.3.1 Uvod 43
2.3.2 Vrste čelika za tijelo bojeve glave 43
2.3.3 Termička obrada materijala tijela bojeve glave 46
2.3.4 Mehaničke karakteristike čelika korištenih u izradi tijela bojeve glave 48

2.4 Početna brzina fragmenata i ugao vektora brzine fragmenata 50
2.4.1 Uvod 50
2.4.2 Početna brzina fragmenata 50
2.4.3 Ugao vektora brzine fragmenata 54
2.4.4 Primjenljivost formula Gurney-a i Taylor-a 56

2.5 Dinamika leta fragmenata 58
2.5.1 Uvod 58
2.5.2 Brzina fragmenata 58
2.5.3 Projekcija površine fragmenata 59
2.5.4 Aerodinamički otpor fragmenta 63
2.5.5 Domet fragmenata 66
2.5.6 Kriterij onesposobljavajućeg nivoa kinetičke energije fragmenata 67

2.6 Masena distribucija fragmenata.....69
2.6.1 Uvod.....69
2.6.2 Analiza masene distribucije po Mott-u.....70
2.6.3 Modifikacija Mott-ove formule.....71
2.6.4 Analiza masene distribucije po Held-u.....72

2.7 Prostorna distribucija fragmenata.....76
2.7.1 Uvod.....76
2.7.2 Određivanje ukupnog broja fragmenata.....76
2.7.3 Radijus ubojnog dejstva.....79
2.7.4 Gustina efikasnih fragmenata.....80
2.7.5 Koeficijent efikasnosti.....82

2.8 Osnove balistike rana.....89
2.8.1 Uvod.....89
2.8.2 Povrede uzrokovane penetracijom projektila malog kalibra.....90
2.8.2.1 Povrede mekog tkiva.....90
2.8.2.2 Povrede kostiju.....91
2.8.2.3 Povrede lobanje i kičme.....92
2.8.3 Povrede uzrokovane fragmentima HE bojeve glave.....92
2.8.4 Zaštita borca od efekata fragmentacije.....94
2.8.4.1 Zaštitni balistički prsluk.....94
2.8.4.2 Zaštitna kaciga.....96

3 Eksperimentalne metode istraživanja.....98
3.1 Uvod.....98
3.2 Pit test.....98
3.3 Test u Areni.....101
3.3.1 Test fragmentacije u Areni sa četvrtkružnim sektorima.....101
3.3.2 Test fragmentacije u Areni sa polukružnim sektorima.....103
3.3.3 NATO Arena.....104
3.3.3.1 Pravougla NATO Arena.....106
3.3.3.2 Polukružna NATO Arena.....108

4 Ciljevi istraživanja.....111
4.1 Model za predviđanje smrtonosne zone HE bojevih glava.....111
4.1.1 Modul za određivanje vjerovatnoće onesposobljavanja.....115
4.1.2 Modul za predviđanje krivih izogustina.....117
4.1.3 Interface za CAD modeliranje smrtonosnih zona.....124

5 Analiza istraživanja.....127
5.1 Plan eksperimentalnih istraživanja.....127
5.1.1 Artiljerijski projektili.....127
5.1.2 Minobacački projektili.....128
5.1.3 Bojeve glave raketnih projektila.....128
5.2 Eksperimentalna ispitivanja fragmentacije u polukružnoj areni.....130
5.2.1 Predviđanje koeficijenta efikasnosti.....133
5.2.2 Predviđanje 3D modela gustine efikasnih fragmenata.....149
5.2.3 Procjena ukupnog broja fragmenata u prostoru.....152
5.2.4 Određivanje krivih izogustina i 2D smrtonosne zone.....155
5.2.5 Analiza 2D smrtonosnih zona CAD metodom.....157
5.2.6 Predviđanje 3D smrtonosne zone.....162
5.3 Eksperimentalna ispitivanja fragmentacije u Pit uređajima.....171
5.3.1 Predviđanje masene distribucije fragmenata kod minobacačkih projektila.....178
5.3.2 Predviđanje masene distribucije fragmenata kod artiljerijskih projektila.....185

5.3.3 Predviđanje masene distribucije fragmenata kod BG raketnih projektila.....193
5.3.4 Analiza uticaja materijala tijela BG na masenu distribuciju fragmenata.....201
5.3.5 Analiza uticaja tipa eksploziva na masenu distribuciju fragmenata.....204
5.3.6 Analiza geometrije fragmenata.....206
5.4 Eksperimentalna ispitivanja fragmentacije u četvrtkružnoj areni.....214
5.4.1 Predviđanje radijusa efikasnog dejstva HE bojeve glave.....216
5.5 Analiza početne brzine fragmenata i ugla vektora brzine fragmenata.....222
5.5.1 Početna brzina fragmenata.....222
5.5.2 Ugao vektora brzine fragmenata (Taylor-ov ugao) 227
5.6 Analiza dinamike leta fragmenata.....230
5.7 Analiza naponskog stanja bojeve glave u cijevi oružja.....242
5.7.1 Analitička metoda.....242
5.7.1.1 Analiza naprezanja tijela projektila 105mm M1 245
5.7.2 Numeričko modeliranje naponskog stanja projektila u cijevi oružja.....246

6 Zaključak.....263

7 Literatura.....265

Oznake

Simbol	Opis simbola
N	očekivani broj žrtava
$\sigma(x, y)$	površinska gustina vojnika u određenoj tački (x,y) na bojištu
$P(x, y)$	vjerovatnoća onesposobljavanja vojnika koji se nalazi u datoj tački (x,y)
$P_B(x, y)$	vjerovatnoća onesposobljavanja uslijed blast efekta (rušećeg efekta)
$P_F(x, y)$	vjerovatnoća onesposobljavanja uslijed djelovanja fragmenata
R_{B1}	radijus oko tačke detonacije za koju je vjerovatnoća onesposobljavanja uslijed rušećeg efekta jednaka 1
R_{B2}	radijus oko tačke detonacije za koju je vjerovatnoća onesposobljavanja uslijed rušećeg efekta jednaka 0
$d(x, y)$	srednja gustina efikasnih fragmenata
A_t	izložena površina mete na određenoj udaljenosti od centra detonacije
UZ	zadnja statička zona arene
LZ	prva statička zona arene
$N(i, j)$	broj fragmenata u *i*-toj masenoj grupi unutar *j*-te statičke zone
$S(j)$	broj steradiana za *j*-tu statičku zonu na udaljenosti *r*
r	udaljenost od centra detonacije
$P_{K/H}$	uslovna vjerovatnoća onesposobljavanja
a	konstanta ranjivosti
b	konstanta ranjivosti
n	konstanta ranjivosti
m	masa fragmenta
V_r	brzina fragmenta prilikom udara u metu
A_L	smrtonosna površina
V_0	početni volumen eksploziva
V_1	volumen eksploziva u datom trenutku
ρ_0	gustina polazne eksplozivne materije
ρ_1	gustina eksplozivnih produkata u datom trenutku
p_0	početni pritisak eksploziva
p_1	pritisak eksplozivnih produkata u datom trenutku
T_0	početna temperatura eksploziva
T_1	temperatura eksplozivnih produkata u datom trenutku
D	detonacijska brzina čistih eksploziva
u	brzina detonacijskih produkata
E	unutrašnja energija detonacijskih produkata
u_P	brzina klipa
u_S	brzina fronte udarnog vala
p	pritisak produkata detonacije pri njihovoj ekspanziji
p_s	pritisak produkata detonacije pri izentropskoj ekspanziji
A, B, C	linearni koeficijenti JWL jednačine stanja
R_1, R_2, ω	nelinearni koeficijenti JWL jednačine stanja
E_0	detonaciona energija po jedinici volumena
$\bar{v}$	odnos volumena produkata detonacije i početnog volumena eksplozivnog punjenja
Q_D	detonacijska energija (toplota detonacije)
γ	adijabatski eksponent
D_{sm}	detonacijska brzina smjese
φ	volumni udio *i* - te komponente mješavine eksplozivnih komponenti smjese
A_1, B_1, C_1	koeficijenti zavisnosti detonacijske brzine od gustine eksploziva
A_p, n_p	koeficijenti zavisnosti pritiska detonacije od gustine eksploziva

ρ_{TMD}	maksimalna teoretska gustina eksploziva
$P_{(TMD)}$	pritisak detonacije pri maksimalnoj teoretskoj gustini eksploziva
E	modul elastičnosti materijala
G	modul klizanja materijala
σ_m	zatezna čvrstoća materijala
ε	relativno izduženje
σ_v	granica razvlačenja
ψ	relativno suženje
C_{eks}	jedinična masa eksploziva
M	jedinična masa tijela cilindra
R_c	unutrašnji radijus cilindra
r_c	udaljenost gasovitih produkata od ose simetrije
v_M	radijalna brzina tijela cilindra
$v(r_c)$	brzina gasovitih produkata u nekoj tački (funkcija udaljenosti r_c)
$\rho(r_c)$	gustina gasovitih produkata u nekoj tački (funkcija udaljenosti r_c)
R_{ct}	položaj metalnog tijela cilindra u trenutku *t* nakon detonacije
v_{ps}	stvarna početna brzina fragmenta
v_{tr}	translatorna brzina projektila u trenutku udara u metu
v_ω	obimna brzina rotirajuće bojeve glave
$\theta/2$	ugao vektora brzine fragmenata
v	brzina fragmenta
α	ugao između tačke iniciranja detonacije i elementa na tijelu bojeve glave
dF	element na košuljici bojeve glave
ϕ_1, ϕ_1	uglovi Shapira
F_w	sila otpora atmosfere
C_x	aerodinamički koeficijent otpora atmosfere
S	maksimalni poprečni presjek fragmenta
ρ_w	gustina vazduha
S_p	ukupna vanjska površina fragmenta
ρ_k	gustina materijala fragmenta
a_{ekv}	ekvivalentna dimenzija fragmenta
V	zapremina fragmenta (ekvivalentnog oblika)
$\overline{S}$	srednja izložena površina fragmenta
f_k	faktor prilagođavanja
a_i, b_i i c_i	stranice pravouglog paralelepipeda (aproksimirani oblik fragmenta)
v_0	početna brzina fragmenata
E_{KS}	onesposobljavajući nivo kinetičke energije fragmenta
v_{min}	minimalna smrtonosna brzina fragmenta
x_s	smrtonosni domet fragmenta
N(m)	kumulativni broj fragmenata
μ	srednja masa fragmenta
t_i	debljina tijela projektila
d_i	prečnik eksplozivnog punjenja
B_e	konstanta eksploziva
A_e	konstanta eksploziva
M_{0f}	ukupna masa sakupljenih fragmenata (Mott)
M_k	parametar koji karakterizira masenu distribuciju fragmenata
μ_0	parametar koji mora biti izabran tako je ukupna masa fragmenata jednaka M_0
μ_k	parametar koji se određuje iz ksperimentalnih podataka
m_{max}	parametar koji se određuje iz eksperimentalnih podataka
M_0	ukupna masa svih pronađenih fragmenata (Held)

B_H, λ_H	empirijski određene konstante
M_{0opt}	optimalna masa fragmenata
R_k	radijus sfere
θ_i	polarni ugao arene
h_o	visina odsječka sfere
A_o	površina odsječka sfere
Ω	prostorni ugao (steradijan)
d_s	gustina efikasnih fragmenata čevrtkružne arene
n_s	broj efikasnih fragmenata čevrtkružne arene
S_s	izložena površina sektora čevrtkružne arene
h_s	visina panela četvrtkružne arene
d_{sp}	gustina efikasnih fragmenata polukružne arene
n_{sp}	broj efikasnih fragmenata polukružne arene
S_{sp}	izložena površina sektora polukružne arene
a_{sp}	širina panela polukružne arene
h_{sp}	visina panela polukružne arene
A_{ef}	koeficijent efikasnosti
R, R_k	radijus sektora arene
l	dužina luka arene
X_D	udaljenost od centra detonacije do panela
x_r	udaljenost, duž tla, od centra pravougle test Arene do anti-rikošetne barikade
Y_b	visina anti-rikošetne barikade
H_m	udaljenost ose bojeve glave od tla
D_m	udaljenost od ose bojeve glave do mete (panela)
h_m	udaljenost između tla i dna mete
L_m	vertikalna dužina mete
F_1, F_2	zone polukružne NATO Arene
h	Visina panela polukružne NATO Arene
α	širina polarne zone polukružne NATO Arene
t	debljina panela polukružne NATO Arene
β	meridijalni ugao polukružne NATO Arene
X_i, Y_i	skup tačaka
θ_{ci}	centralni uglovi polarnih zona u pojedinim sektorima polukružne arene
Z_s	skalirano rastojanje
R_i	rastojanje od centra eksplozije
C_{ekv_TNT}	ekvivalentna masa eksploziva u odnosu na masu TNT-a
P_{rel}	relativna snaga eksploziva u odnosu na standardni vojni eksploziv TNT
A_s	površina zone smrtonosnog dejstva
k_1, k_2	koeficijenti određeni regresionom analizom
Δp	vrijednost nadpritiska
a_1, b_1	konstante određene regresionom analizom.
$N_{uk\text{-}ef}$	ukupni broj efikasnih fragmenata u prostoru oko bojeve glave
N_{uk}	ukupni broj svih fragmenata u prostoru oko bojeve glave
$N_{j\text{-}ef}$	ukupni broj efikasnih fragmenata u *j*-toj polarnoj zoni arene
N_j	ukupni broj svih fragmenata u *j*
$n_{j\text{-}ef}$	broj registrovanih efikasnih fragmenata (prodori) u *j*-toj polarnoj zoni arene
n_j	broj registrovanih fragmenata (prodori i zadori) u *j*
$S_{\Omega j}$	površina dijela sfere koju odsjeca prostorni ugao u *j*-toj polarnoj zoni arene
S_m	površina mete (segmenta/panela arene)
A_{ekv}	ekvivalentna površina fragmenta
$V_{fr\text{-}ekv}$	ekvivalentna zapremina fragmenta
G_i	razmatrana dimenzija fragmenta

p_i, r_i	koeficijenti koji se određuju na bazi regresione analize dimenzija fragmenata
F_b	sila nastala uslijed djelovanja barutnih gasova
F_u	sila urezivanja vodećeg prstena
F_{na}	aksijalna komponenta normalne sile vodećeg prstena
F_v	otpor zraka duž X
F_{gx}	gravitaciona sila duž X
I_x	moment tromosti (inercije) bojeve glave za X
ω	ugaona brzina bojeve glave oko X
M_x	moment spoljašnjih sila, u odnosu na X
P_{cp}	proračunski pritisak
k	konstanta koja uzima u obzir kalibar projektila
$\sigma_{(max)i}$	maksimalni proračunski naponi na pritisak u tijelu bojeve glave
σ_v	granica razvlačenja materijala
υ	Poisson-ov koeficijent

Spisak Slika

Redni broj	Naziv slike	Strana
1	Slika 1. Rastresit raspored vojnika na terenu i uvjeti dejstva bojeve glave [11]	3
2	Slika 1.1.1 Klasični artiljerijski projektil [52]	5
3	Slika 1.1.2 Projektili za minobacače [5]	6
4	Slika 1.1.3 Klasični raketni projektil	7
5	Slika 1.2.1.1 Komponente upaljača [52]	8
6	Slika 1.2.1.2 Primjena različitih upaljača, u zavisnosti od uvjeta na bojištu	9
7	Slika 1.2.2.1 Elementi eksplozivnog lanca bojeve glave	10
8	Slika 1.2.2.2 Vrh bojeve glave sa ugrađenim upaljačem	10
9	Slika 1.2.2.3 Shema metoda iniciranja eksploziva, DDT i SDT mehanizam	11
10	Slika 1.2.4 Klasifikacija HE bojevih glava	13
11	Slika 1.2.5. Snimak procesa prirodne (a) i kontrolisane (b) fragmentacije bojeve glave ultra-brzom kamerom [1]	14
12	Slika 1.2.6 Shematski prikaz procesa prirodne fragmentacije [1]	15
13	Slika 2.2.4.1 Struktura detonacijskog procesa (ZND model) [58]	24
14	Slika 2.2.4.2 Udarna adijabata eksplozivne tvari i detonacijskih produkata [58]	25
15	Slika 2.2.4.1.1 Mehanizam stvaranja udarnog talasa u udarnoj cijevi [58]	26
16	Slika 2.2.4.2.1 Zavisnost detonacijske brzine od gustine eksploziva za čiste eksplozive RDX i TNT [2]	29
17	Slika 2.2.4.2.2 Zavisnost detonacijske brzine od gustine eksploziva za kompoziciju A-3 i eksploziv CH-6 [2]	29
18	Slika 2.2.4.2.3 Zavisnost detonacionog pritiska od gustine eksploziva (TNT) [2]	31
19	Slika 2.2.6.1 Podjela eksplozivnih materija	33
20	Slika 2.2.6.2 Mogućnosti stabilnog sagorijevanja različitih tipova eksplozivnih materija	33
21	Slika 2.3.2.1 Efekti hladne deformacije na mehaničke karakteristike nisko-ugljičnih čelika [59]	44
22	Slika 2.3.2.2 Zatezna čvrstoća i granica razvlačenja za različite srednje-ugljične čelike [59]	44
23	Slika 2.3.3.1 Promjena mehaničkih osobina HF čelika u zavisnosti od temperature termičke obrade [60]	47
24	Slika 2.3.3.2 Fragmenti dobijeni fragmentacijom čelika AISI 1340 [47]	48
25	Slika 2.4.1 Proces detonacije bojeve glave [1]	50
26	Slika 2.4.2 Presjek cilindra korištenog za izračunavanje početne brzine fragmenata [22]	51
27	Slika 2.4.3.1 Pravac fragmenata nakon nailaska detonacionog fronta [1], [23]	54
28	Slika 2.4.3.2 Postupak izvođenja Taylorovog ugla $\delta = \theta/2$, normalne komponete brzine vN, i prividne brzine fragmenata vA [23]	55
29	Slika 2.4.3.3 Taylor-ov ugao u slučaju kada se razmatra tačkasto iniciranje sa jedne strane [1]	55
30	Slika 2.4.3.4 Izbacni ugao kod košuljice oživalnog oblika [1]	56
31	Slika 2.4.4.1 Komparacija rezultata dobijenih Taylor-ovom jednačinom i eksperimentalnim putem [1]	57
32	Slika 2.4.4.2 Poređenje formule Gurney-a i Taylor-a sa eksperimentalnim podacima [66]	57
33	Slika 2.5.2 Sile koje djeluju na fragment	
34	Slika 2.5.3.1 Fragmenti različitog oblika [47]	59
35	Slika 2.5.3.2 Oblik fragmenata aproksimiran kockom stranice a_{ekv}	60
36	Slika 2.5.3.3 Oblik fragmenata aproksimiran sferom prečnika a_{ekv}	61
37	Slika 2.5.3.4 Oblik fragmenata aproksimiran cilindrom sa visinom jednakoj prečniku a_{ekv} baze cilindra	61
38	Slika 2.5.3.5 Oblik fragmenata aproksimiran pravouglim paralelepipedom sa dimenzijama: a_{ekv} x $2 \cdot a_{ekv}$ x $2 \cdot a_{ekv}$	62
39	Slika 2.5.3.6 Oblik fragmenata aproksimiran pravouglim paralelepipedom sa	62

	dimenzijama: a_{ekv} x a_{ekv} x $2 \cdot a_{ekv}$	
40	Slika 2.5.4.1 Koeficijent otpora Cx u funkciji od Mach-ovog broja - M_a za karakteristične oblike fragmenata [9]	64
41	Slika 2.5.4.2 Uređaj za mjerenje koeficijenta otpora zraka - C_x	65
42	Slika 2.5.4.3 Dijagrami koeficijenta C_x otpora za realne fragmente i fragmente oblika sfere [24]	66
43	Slika 2.6.1 Fragmenti nastali prirodnom fragmentacijom bojeve glave rakete 128mm M87, napunjene eksplozivom TNT (a) i kompozicijom B (b)	69
44	Slika 2.6.3.1 Komparacija dijagrama masene distribucije po Mott-u (originalna i modifikovana formula) sa eksperimentalnim podacima [69]	72
45	Slika 2.6.4.1Grafički prikaz Held-ove funkcije [2]	73
46	Slika 2.6.4.2 Određivanje konstani BH i λH iz log-log dijagrama [2]	73
47	Slika 2.6.4.3 Masena distribucija HE projektila HISPANO SUIZA 30-mm × 170 UIA [2]	74
48	Slika 2.6.4.4 Masena distribucija fragmenata za HISPANO SUIZA 30-mm HE projektil [2]	75
49	Slika 2.7.1 Djelovanje fragmenata projektila na borce na terenu [10]	76
50	Slika 2.7.2.1 Prikaz polarnih zona polukružne arene [13]	76
51	Slika 2.7.2.2 Geometrijske karakteristike sfere [15]	77
52	Slika 2.7.2.3 Geometrija koja se koristi u analizi ukupnog broja fragmenata	78
53	Slika 2.7.3 Određivanje radijusa ubojnog dejstva [6]	80
54	Slika 2.7.4.1 Rasprskavanje bojeve glave [29]	80
55	Slika 2.7.4.2 Gustina efikasnih fragmenata za minobacački projektil 81mm [46]	81
56	Slika 2.7.5.1 Zone oštećenja uslijed blast efekta i dejstva fragmenata nakon eksplozije bojeve glave	82
57	Slika 2.7.5.2 Dvostepena funkcija vjerovatnoće onesposobljavanja uslijed blast efekta [46]	83
58	Slika 2.7.5.3 Pik nadpritiska u funkciji rastojanja od centra eksplozije izražen preko skalirane distance Z [73]	84
59	Slika 2.7.5.4 Koeficijent efikasnosti AL vs visina detonacije[46]	86
60	Slika 2.7.5.5 Zamišljeni raspored boraca na terenu [11]	87
61	Slika 2.7.5.6 Raspodjela vjerovatnoća P_F na terenu za minobacački projektil 81mm [29]	88
62	Slika 2.8.1 Kategorije rana [32]	89
63	Slika 2.8.2.1.1 Prevrtanje projektila u tkivu i stvaranje trajnih i privremenih šupljina	90
64	Slika 2.8.2.1.2 Penetracija projektila u glicerinskom sapunu [32]	91
65	Slika 2.8.2.2 Penetracija sintetičke kosti [32]	91
66	Slika 2.8.2.3 Simulacija povrede lobanje (izlazna rana) [32]	92
67	Slika 2.8.3.1Simulacija penetracije fragmenta u glicerinskom sapunu [32]	
68	Slika 2.8.3.2 Simulacija infekcije u tijelu čovjeka uslijed penetracije fragmenta [32]	93
69	Slika 2.8.4.1.1 Tvrdi zaštitni prsluk	94
70	Slika 2.8.4.1.2 Meki zaštitni prsluci	95
71	Slika 2.8.4.1.3 Dijelovi mekog zaštitnog prsluka	95
72	Slika 2.8.4.2.1 PASGT kaciga (kamuflažni uzorak za šumski teren)	96
73	Slika 2.8.4.2.2 Advanced Combat Helmet	97
74	Slika 3.2.1 Pit test (detonacija bojeve glave u jami)	99
75	Slika 3.2.2 Protokol fragmentacije (Pit test)	99
76	Slika 3.2.3 Shema modernog postrojenja za Pit test	100
77	Slika 3.2.4 Struktura Pit uređaja za fragmentaciju u vodi [70]	100
78	Slika 3.3.1.1 Četvrtkružna arena [70]	101
79	Slika 3.3.1.2 Shema Arene sa četiri četvrt-kružna sektora	101
80	Slika 3.3.1.3 Protokol fragmentacije u četvrtkružnoj Areni	102
81	Slika 3.3.2 Shema polukružne Arene [14]	103
82	Slika 3.3.3 Tipičan primjer reprezentativnih fragmenata u polarnim ugaonim zonama od 0° do 180° [13]	105
83	Slika 3.3.3.1.1 Shema tipične pravougle arene [13]	106
84	Slika 3.3.3.1.2 Rikošetne barikade; i opcija A i opcija B su zadovoljavajuće [13]	108

85	Slika 3.3.3.2.1 Shema klasične polukružne arene [13]	108
86	Slika 3.3.3.2.2 Sekcijski pogled na polukružnu aren	109
87	Slika 3.3.3.2.3 Tipične lokacije senzora u NATO polukružnoj Areni [13]	110
88	Slika 4.1.1 Dvostepena funkcija vjerovatnoće onesposobljavanja uslijed blast efekta [46]	112
89	Slika 2. Funkcija vjerovatnoće onesposobljavanja uslijed blast efekta	112
90	Slika 4.1.3 Model za predviđanje smrtonosne zone	114
91	Slika 4.1.1.1 Jednostepena funkcija vjerovatnoće onesposobljavanja uslijed blast efekta	115
92	Sl. 4.1.1.2 Nadpritisak u funkciji rastojanja, izražen preko skalirane distance Zs [73]	116
93	Slika 4.1.1.3 Vrijednosti usvojenih izloženih površina vojnika na terenu [10]	117
94	Slika 4.1.2.1 Polarni dijagram rasporeda gustine efikasnih fragmenata (R = const)	118
95	Slika 4.1.2.2 Interpolacija dobijenih tačaka spline funkcijom (R = const)	118
96	Slika 4.1.2.3 Prikaz koordinata centara svih panela arene	119
97	Slika 4.1.2.4 Domen 3D modela gustine efikasnih fragmenata	119
98	Slika 4.1.2.5 Aproksimacione funkcije gustine efikasnih fragmenata za različite udaljenosti od centra detonacije i različite polarne zone	120
99	Slika 4.1.2.7 Geometrija korištena u analizi ukupnog broja fragmenata	122
100	Slika 4.1.2.8 Određivanje dometa efikasnog fragmenta [6]	123
101	Slika 4.1.3.1 Postupak crtanja 2D modela zone smrtonosnog dejstva u CAD softveru	124
102	Slika 4.1.3.2 Presjek ravni tla sa 3D modelom smrtonosne zone za različite napadne uglove bojeve glave	125
103	Slika 4.1.3.3 Određivanje površine smrtonosne zone na visini od 2m od tla	125
104	Slika5.1.1 Ispitivani artiljerijski projektili	127
105	Slika 5.1.2 Ispitivani minobacački projektili	128
106	Slika 5.1.3 Ispitivane bojeve glave raketnih projektila	128
107	Slika 5.2.1 Bojeve glave testirane u polukružnoj areni	130
108	Slika 5.2.2.1 Polarni dijagrami gustine efikasnih fragmenata za bojevu glavu 120mm W1 (TNT)	136
109	Slika 5.2.1.2 Polarni grafikoni gustine efikasnih fragmenata za 122mm M76 (Komp. B)	137
110	Slika 5.2.1.3 Polarni grafikoni gustine efikasnih fragmenata za 122mm OF-462 (TNT)	138
111	Slika 5.2.1.4 Polarni grafikoni gustine efikasnih fragmenata za 128mmm M63 (TNT)	139
112	Slika 5.2.1.5 Polarni grafikoni gustine efikasnih fragmenata za BG 128mm M87 (TNT)	139
113	Slika 5.2.1.6 Polarni grafikoni gustine efikasnih fragmenata za BG 128mm M87 (Komp. B)	140
114	Slika 5.2.1.7 Vjerovatnoća onesposobljavanja vojnika dejstvom bojeve glave 120mm W1, TNT, za tri izložene površine vojnika (stojeća, jurišna i ležeća)	142
115	Slika 5.2.1.8 Vjerovatnoća onesposobljavanja vojnika dejstvom projektila 122mm M76, Komp. B, za tri izložene površine vojnika (stojeća, jurišna i ležeća)	143
116	Slika 5.2.1.9 Vjerovatnoća onesposobljavanja vojnika dejstvom projektila 122mm OF-462, TNT, za tri izložene površine vojnika (stojeća, jurišna i ležeća)	144
117	Slika 5.2.1.10 Vjerovatnoća onesposobljavanja vojnika dejstvom bojeve glave 128mm M63, TNT, za tri izložene površine vojnika (stojeća, jurišna i ležeća)	145
118	Slika 5.2.1.11 Vjerovatnoća onesposobljavanja vojnika dejstvom bojeve glave 128mm M87, TNT, za tri izložene površine vojnika (stojeća, jurišna i ležeća)	146
119	Slika 5.2.1.12 Vjerovatnoća onesposobljavanja vojnika dejstvom bojeve glave 128mm M87, Komp. B, za tri izložene površine vojnika (stojeća, jurišna i ležeća)	146
120	Slika 5.2.1.13 Zavisnosti koeficijenta efikasnosti - A_L od izložene površine borca - A_t	148
121	Slika 5.2.2.1 3D modeli gustine efikasnih fragmenata za bojeve glave 120mm W1 (TNT), 122 M76 (Komp. B), 122mm OF-462 (TNT)	150
122	Slika 5.2.2.2 3D modeli gustine efikasnih fragmenata za bojeve glave raketnih projektila: 128mm M63 (TNT), 128mm M87 (TNT) i 128mm M87 (Komp. B)	151
123	Slika 5.2.3.1 Dijagrami ukupnog broja efikasnih fragmenata u zavisnost od polarne zone oko bojeve glave 120mm W1 (TNT) na udaljenosti 10,5 m od centra eksplozije	152
124	Slika 5.2.3.2 Dijagrami ukupnog broja efikasnih fragmenata u zavisnost od polarne zone oko bojeve glave 122mm M76 (Komp. B) na udaljenosti 10,5 m od centra eksplozije	153
125	Slika 5.2.3.3 Dijagrami ukupnog broja efikasnih fragmenata u zavisnost od polarne zone	153

	oko bojeve glave 122mm OF-462 (TNT) na udaljenosti 10,5 m od centra eksplozije	
126	Slika 5.2.3.4Dijagrami ukupnog broja efikasnih fragmenata u zavisnost od polarne zone oko bojeve glave 128mm M63 (TNT) na udaljenosti 10,5 m od centra eksplozije	153
127	Slika 5.2.3.5 Dijagrami ukupnog broja efikasnih fragmenata u zavisnost od polarne zone oko bojeve glave 128mm M87 (TNT) na udaljenosti 10,5 m od centra eksplozije	154
128	Slika 5.2.3.6 Dijagrami ukupnog broja efikasnih fragmenata u zavisnost od polarne zone oko bojeve glave 128mm M87 (Komp. B) na udaljenosti 10,5 m od centra eksplozije	154
129	Slika 5.2.4.1 Smrtonosna zona za bojeve glave: 128mm M63, 128mm M87 (TNT), 128mm M87 (Komp. B), 122mm OF-462, 122mm M76 (Komp. B) i 120mm W1	156
130	Slika 5.2.5.1 Ugaona širina snopova smrtonosne zone za bojevu glavu 120mm W1	157
131	Slika 5.2.5.2 Ugaona širina snopova smrtonosne zone za bojevu glavu 122mm M76	158
132	Slika 5.2.5.3 Ugaona širina snopova smrtonosne zone za bojevu glavu 122mm OF-46	159
133	Slika 5.2.5.4 Ugaona širina snopova smrtonosne zone za bojevu glavu 128mm M63	160
134	Slika 5.2.5.5 Ugaona širina snopova smrtonosne zone za bojevu glavu 128mm M87, TNT	161
135	Slika 5.2.5.6 Ugaona širina snopova smrt. zone za bojevu glavu 128mm M87, Komp. B	162
136	Slika 5.2.6.1 3D smrtonosne zone za ispitivane bojeve glave	163
137	Slika 5.2.6.2 Prikaz 3D smrtonosne zone i njenih projekcija za različite napadne uglove bojeve glave 120mm W1 (TNT) i nivoe terena	164
138	Slika 34. Prikaz 3D smrtonosne zone i njenih projekcija za različite napadne uglove bojeve glave 122mm M76 (Komp. B) i nivoe terena	165
139	Slika 5.2.6.4 Prikaz 3D smrtonosne zone i njenih projekcija za različite napadne uglove bojeve glave 122mm OF-462 (TNT) i nivoe terena	166
140	Slika 5.2.6.5 Prikaz 3D smrtonosne zone i njenih projekcija za različite napadne uglove bojeve glave 128mm M63 (TNT) i nivoe terena	167
141	Slika 5.2.6.6 Prikaz 3D smrtonosne zone i njenih projekcija za različite napadne uglove bojeve glave 128mm M87 (TNT) i nivoe terena	168
142	Slika 5.2.6.7 Prikaz 3D smrtonosne zone i njenih projekcija za različite napadne uglove bojeve glave 128mm M87 (Komp. B) i nivoe terena	168
143	Slika 5.2.6.8 Usvojena dvostepena aproksimaciona funkcija	169
144	Slika 5.3.1 Ispitivane bojeve glave	171
145	Slika 5.3.1.1 Udio broja fragmenata po masenim grupama prema ukupnom broju sakupljenih fragmenata za BG 120mm M62P3 (TNT)	178
146	Slika 5.3.1.2 Udio srednje mase fragmenata po masenim grupama prema ukupnoj masi sakupljenih fragmenata za BG 120mm M62P3 (TNT)	178
147	Slika 5.3.1.3 Dijagram kumulativnog broja fragmenata N u funkciji od srednje mase fragmenta m (120mm M62P3, TNT)	179
148	Slika 5.3.1.4 Dijagram kumulativne mase fragmenata M u zavisnosti od kumulativnog broja fragmenata n (120mm M62P3, TNT)	179
149	Slika 5.3.1.5 Dijagram srednje mase fragmenata u zavisnosti od kumulativnog broja fragmenata n (120mm M62P3, TNT)	180
150	Slika 5.3.1.6 Udio broja fragmenata po masenim grupama prema ukupnom broju sakupljenih fragmenata za BG 120mm W1 (TNT, Č.9180VP)	180
151	Slika 5.3.1.7 Udio srednje mase fragmenata po masenim grupama prema ukupnoj masi sakupljenih fragmenata za BG 120mm W1 (TNT, Č.9180VP)	181
152	Slika 5.3.1.8 Dijagram kumulativnog broja fragmenata N u funkciji od srednje mase fragmenta m (120mm W1, TNT, Č.9180VP)	181
153	Slika 5.3.1.9 Dijagram kumulativne mase fragmenata M u zavisnosti od kumulativnog broja fragmenata n (120mm W1, TNT, Č.9180VP)	182
154	Slika 5.3.1.10 Dijagram srednje mase fragmenata u zavisnosti od kumulativnog broja fragmenata n (120mm W1, TNT, Č.9180VP)	182
155	Slika 5.3.1.11Udio broja fragmenata po masenim grupama prema ukupnom broju sakupljenih fragmenata za BG 120mm W2 (TNT, Č.9180VP)	183
156	Slika 5.3.1.12 Udio srednje mase fragmenata po masenim grupama prema ukupnoj masi sakupljenih fragmenata za BG 120mm W2 (TNT, Č.9180VP)	183
157	Slika 5.3.1.13 Dijagram kumulativnog broja fragmenata N u funkciji od srednje mase	184

	fragmenta m (122mm W2, TNT, Č.9180VP)	
158	Slika 5.3.1.14 Dijagram kumulativne mase fragmenata M u zavisnosti od kumulativnog broja fragmenata n (120mm W2, TNT, Č.9180VP)	184
159	Slika 5.3.1.15 Dijagram srednje mase fragmenata u zavisnosti od kumulativnog broja fragmenata n (120mm W2, TNT, Č.9180VP)	185
160	Slika 5.3.2.1 Udio broja fragmenata po masenim grupama prema ukupnom broju sakupljenih fragmenata za 105mm M1 (TNT)	186
161	Slika 5.3.2.2 Udio srednje mase fragmenata po masenim grupama prema ukupnoj masi sakupljenih fragmenata za 105mm M1 (TNT)	186
162	Slika 5.2.2.3 Dijagram kumulativnog broja fragmenata N u funkciji od srednje mase fragmenta m (105mm M1, TNT)	187
163	Slika 5.3.2.4. Dijagram kumulativne mase fragmenata M u zavisnosti od kumulativnog broja fragmenata n (105mm M1, TNT)	187
164	Slika 5.3.2.5 Dijagram srednje mase fragmenata u zavisnosti od kumulativnog broja fragmenata n (105mm M1, TNT)	188
165	Slika 5.3.2.6 Udio broja fragmenata po masenim grupama prema ukupnom broju sakupljenih fragmenata za 122mm OF-462 (TNT)	188
166	Slika 5.3.2.7 Udio srednje mase fragmenata po masenim grupama prema ukupnoj masi sakupljenih fragmenata za 122mm OF-462 (TNT)	189
167	Slika 5.3.2.8 Dijagram kumulativnog broja fragmenata N u funkciji od srednje mase fragmenta m (122mm OF-462, TNT)	189
168	Slika 5.3.2.9 Dijagram kumulativne mase fragmenata M u zavisnosti od kumulativnog broja fragmenata n (122mm OF-462, TNT)	190
169	Slika 5.3.2.10 Dijagram srednje mase fragmenata u zavisnosti od kumulativnog broja fragmenata n (122mm OF-462, TNT)	190
170	Slika 5.3.2.11 Udio broja fragmenata po masenim grupama prema ukupnom broju sakupljenih fragmenata za 122mm M76 (Komp. B)	191
171	Slika 5.3.2.12 Udio srednje mase fragmenata po masenim grupama prema ukupnoj masi sakupljenih fragmenata za 122mm M76 (Komp. B)	191
172	Slika 5.3.2.13 Dijagram kumulativnog broja fragmenata N u funkciji od srednje mase fragmenta m (122mm M76, Komp. B)	192
173	Slika 5.3.2.14 Dijagram kumulativne mase fragmenata M u zavisnosti od kumulativnog broja fragmenata n (122mm M76, Komp. B)	192
174	Slika 5.3.2.15 Dijagram srednje mase fragmenata u zavisnosti od kumulativnog broja fragmenata n (122mm M76, Komp. B)	193
175	Slika 5.3.3.1 Udio broja fragmenata po masenim grupama prema ukupnom broju sakupljenih fragmenata za 128mm M63 (TNT)	193
176	Slika 5.3.3.2 Udio srednje mase fragmenata po masenim grupama prema ukupnoj masi sakupljenih fragmenata za 128mm M63 (TNT)	194
177	Slika 5.3.3.3 Dijagram kumulativnog broja fragmenata N u funkciji od srednje mase fragmenta m (128mm M63, TNT)	194
178	Slika 5.3.3.5 Dijagram kumulativne mase fragmenata M u zavisnosti od kumulativnog broja fragmenata n (128mm M63, TNT)	195
179	Slika 5.3.3.6 Dijagram srednje mase fragmenata u zavisnosti od kumulativnog broja fragmenata n (128mm M63, TNT)	195
180	Slika 5.3.3.7 Udio broja fragmenata po masenim grupama prema ukupnom broju sakupljenih fragmenata za 128mm M87 (TNT)	196
181	Slika 5.3.3.8 Udio srednje mase fragmenata prema ukupnoj masi fragmenata za 128mm M87 (TNT)	196
182	Slika 5.3.3.9 Dijagram kumulativnog broja fragmenata N u funkciji od srednje mase fragmenta m (128mm M87, TNT)	197
183	Slika 5.3.3.10 Dijagram kumulativne mase fragmenata M za BG 128mm M87, TNT	197
184	Slika 5.3.3.11 Dijagram srednje mase fragmenata u zavisnosti od kumulativnog broja fragmenata n (128mm M87, TNT)	198
185	Slika 5.3.3.12 Udio broja fragmenata po masenim grupama prema ukupnom broju sakupljenih fragmenata za 128mm M87 (Komp. B)	198

186	Slika 5.3.3.13 Udio srednje mase fragmenata po masenim grupama prema ukupnoj masi sakupljenih fragmenata za 128mm M87 (Komp. B)	199
187	Slika 5.3.3.14 Dijagram kumulativnog broja fragmenata N u funkciji od srednje mase fragmenta m(128mm M87, Komp. B)	199
188	Slika 5.3.3.15 Dijagram kumulativne mase fragmenata M u zavisnosti od kumulativnog broja fragmenata n (128mm M87, Komp. B)	200
189	Slika 5.3.3.16 Dijagram srednje mase fragmenata u zavisnosti od kumulativnog broja fragmenata n (128mm M87, Komp. B)	200
190	Slika 5.3.4.1 Bojeve glave 120mm W1 i W2	201
191	Slika 5.3.4.2 Komparacija eksperimentalno dobijenih rezultata i rezultata dobijenih analizom masene distribucije Mott-ovom formulom za minobacačku BG 120mm W1, napunjenu TNT-om, i 3 različita materijala tijela BG	202
192	Slika 5.3.4.3 Komparacija eksperimentalno dobijenih rezultata i rezultata dobijenih analizom masene distribucije Mott-ovom formulom za minobacačku BG 120mm W2, napunjenu TNT-om, i 3 različita materijala tijela BG	202
193	Slika 5.3.4.4 Zavisnost odnosa Ni/N i Mi/M od srednje mase fragmenata masnih grupa za BG 120mm W1, sa TNT, za tri različita materijala tijela bojeve glave	203
194	Slika 5.3.4.5 Zavisnost odnosa N_i/N i M_i/M od srednje mase fragmenata masnih grupa za BG 120mm W2, sa TNT, za tri različita materijala tijela bojeve glave	204
195	Slika 5.3.5.1 Bojeve glave 120mm W1 i 120mm W2	204
196	Slika 5.3.5.2 Zavisnost odnosa N_i/N i M_i/M od srednje mase fragmenata masenih grupa za BG 120mm W1, za dva tipa eksplozivnih punjenja, TNT i Komp. B	205
197	Slika 5.3.5.3 Zavisnost odnosa N_i/N i M_i/M od srednje mase fragmenata masenih grupa za BG 120mm W2, za dva tipa eksplozivnih punjenja, TNT i Komp. B	206
198	Slika 5.3.6.1 Analizirana bojeva glava (128m M87, TNT i Komp. B)	206
199	Sl. 5.3.6.2 Ekvivalentni oblik fragmenta	208
200	Sl. 5.3.6.3 Realni oblik fragmenta sa srednjim vrijednostima dužine c_{sr} i širine a_{sr}	208
201	Slika 5.3.6.4 Karakteristični oblici fragmenata različitih masenih grupa kod bojeve glave 128mm M87 [52]	208
202	Slika 5.3.6.5 Regresiona analiza eksponencijalnom funkcijom za dimenzije fragmenata bojeve glave 128mm M87, Komp. B	210
203	Slika 5.3.6.6 Regresiona analiza eksponencijalnom funkcijom za dimenzije fragmenata bojeve glave 128mm M87, TNT	211
204	Slika 5.3.6.7 Regresiona analiza dimenzija fragmenata za BG 128mm M87, TNT	212
205	Slika 5.3.6.1 Regresiona analiza dimenzija fragmenata za BG 128mm M87, 128mm M87, Komp. B	213
206	Slika 5.4 Prikaz bojevih glava koje su ispitivane u četvrtkružnoj areni	214
207	Slika 5.4.1.1 Curve Fitting Toolbox© u MatLab©-u [74]	216
208	Slika 5.4.1.2 Komparacija radijusa efikasnog dejstva za minobacačke projektile	218
209	Slika 5.4.1.3 Komparacija radijusa efikasnog dejstva za artiljerijske projektile kalibra 122mm, OF-462 i M76	219
210	Slika 5.4.1.4 Komparacija radijusa efikasnog dejstva za artiljerijske projektile 152mm M84 (TNT, Komp. B)	220
211	Slika 5.4.1.5 Komparacija radijusa ef. dejstva za artiljerijske projektile 155mm M107 i 155mm ERFB	220
212	Slika 5.4.1.6 Komparacija radijusa efikasnog dejstva za BG raketnih projektila 128mm M63 (TNT), 128mm M87 (TNT) i 128mm M87 (Komp. B)	221
213	Slika 5.5.1.1 Zavisnost detonacione brzine eksploziva od gustine za eksplozive RDX i TNT [2]	222
214	Slika 5.5.1.2 3D model bojeve glave podijeljen na segmente različite debljine	223
215	Slika 5.5.1.3 Bojeve glave za koje je izvršena analiza početne brzine fragmenata	224
216	Slika 5.5.1.4 Početna brzina fragmenata u funkciji od relativnog položaja elemenata košuljice za minobacačke projektile 120mm M62P3, 120mm W1 i 120mm W2	225
217	Slika 5.5.1.5 Početna brzina fragmenata u funkciji od relativnog položaja elemenata košuljice za art. projektile 105mm M1, 122mm M76 i OF-462, 152mm M84 i OF-540, te 155mm M107 i ERFB	226

218	Slika 5.5.1.6 Početna brzina fragmenata u funkciji od relativnog položaja elemenata košuljice za bojeve glave raketnih projektila 128mm M63 i 128mm M87	227
219	Slika 5.5.2.1 Ugao vektora brzine fragmenata u funkciji od relativnog položaja elemenata košuljice za minobacačke projektile 120mm M62P3, 120mm W1 i 120mm W2	228
220	Slika 5.5.2.2 Ugao vektora brzine fragmenata u funkciji od relativnog položaja elemenata košuljice za artiljerijske projektile 105mm M1, 122mm M76, 122mm OF-462, 155mm M107 i 155mm ERFB	228
221	Slika 5.5.2.3 Ugao vektora brzine fragmenata u funkciji od relativnog položaja elemenata košuljice za BG raketnih projektila 128mm M63 i 128mm M87	229
222	Slika 5.6.1 Koeficijent otpora C_x u funkciji od Mach-ovog broja za različite oblike fragmenata [9]	231
223	Slika 5.6.2 Bojeve glave koje su korištene u analizi dinamike leta fragmenata	232
224	Slika 5.6.3 Dijagram efektivnog dometa fragmenata za minobacački projektil 120mm W1, TNT	234
225	Slika 5.6.4 Dijagrami brojčanog i masenog udjela masenih grupa fragmenata prema ukupnom broju i masi sakupljenih fragmenata za projektil 120mm W1, TNT	235
226	Slika 5.6.5 Dijagram efektivnog dometa fragmenata za projektil 122mm OF-462, TNT	236
227	Slika 5.6.6 Dijagrami brojčanog i masenog udjela masenih grupa fragmenata prema ukupnom broju i masi sakupljenih fragmenata za artiljerijski projektil 122mm OF-462, TNT	236
228	Slika 5.6.7 Dijagram efektivnog dometa fragmenata za projektil 122mm M76, Komp. B	237
229	Slika 5.6.8 Dijagrami brojčanog i masenog udjela masenih grupa fragmenata prema ukupnom broju i masi sakupljenih fragmenata za artiljerijski projektil 122mm M76, Komp. B	238
230	Slika 5.6.9 Dijagram efektivnog dometa fragmenata za BG rak. projektila 128mm M63, TNT	239
231	Slika 5.6.10 Dijagrami efektivnog dometa fragmenata, brojčanih i masenih udjela fragmenata, te smrtonosna zona za BG raketnog projektila 128mm M63, TNT	239
232	Slika 5.6.11 Dijagram efektivnog dometa fragmenata za BG rak. projektila 128mm M87, TNT	240
233	Slika 5.6.12 Dijagrami efektivnog dometa fragmenata, brojčanih i masenih udjela fragmenata, te smrtonosna zona za BG raketnog projektila 128mm M87, TNT	240
234	Slika 5.7.1.1 Sile koje djeluju na bojevu glavu u toku kretanja kroz cijev oružja [6]	242
235	Sl.5.7.1.2 Površina poprečnog presjeka cijevi oružja [6]	243
236	Sl. 5.7.1.3 Određivanje napona na pritisak u tijelu bojeve glave [6]	244
237	Sl. 5.7.1.1.1 Određivanje naponskog stanja metodom podjele košuljice na segmente (105mm M1)	245
238	Sl. 5.7.2.1 Shematski prikaz strukture ADINA softvera	246
239	Slika 5.7.2.2 Artiljerijski projektil 105mm M1	247
240	Sl. 5.7.2.3 Dijagram toka za numeričku simulaciju modela bojeve glave 105mm M1	247
241	Sl. 5.7.2.4 Dimenzionisani 2D model bojeve glave 105mm M1	248
242	Sl. 5.7.2.5 2D model bojeve glave 105mm M1 (ADINA©) - lijevo 2D model bojeve glave 105mm M1 (AutoCAD©) - desno	248
243	Sl. 5.7.2.6 Ravan simetrije modela u ADINA©-i	250
244	Sl. 5.7.2.7 Kriva promjene pritiska u zavisnosti od vremena za haubicu 105mm [37]	250
245	Sl. 5.7.2.8 Opterećenje na dnu košuljice bojeve glave	251
246	Sl. 5.7.2.9 Karakteristične tačke koje su uzete u obzir u analizi rezultata	251
247	Sl. 5.7.2.10 Naponi u Z pravcu, za različite vremenske korake	252
248	Sl. 5.7.2.11 Maksimalni glavni naponi, za različite vremenske korake	254
249	Sl. 5.7.2.12 Minimalni glavni naponi, za različite vremenske korake	255
250	Sl. 5.7.2.13 Uticaj intenziteta brzine deformacije na mehaničke karakteristike materijala (materijal: osiromašeni Uranijum). Kriva dinamičke deformacije pokazuje ponašanje materijala koji je podvrgnut deformacijama reda 5000 s-1, a kriva statičke deformacije pokazuje karakteristike materijala podvrgnutog deformaciji brzine 0,001 s-1 [36]	256
251	Sl. 5.7.2.14 Radijalna pomjeranja bojeve glave, za različite vremenske korake	257

252	Sl. 5.7.2.15 Efektivni naponi, za različite vremenske korake	259
253	Sl. 5.7.2.16 Komparacija rezultata dobijenih za pomjeranje kod analitičkog rješenja i numeričke simulacije	260
254	Sl. 5.7.2.17 Komparacija rezultata dobijenih za brzinu kod analitičkog rješenja i numeričke simulacije	261

Spisak tabela

Redni broj	Naziv tabele	Strana
1	Tabela 1.2.5 Prednosti i nedostaci HE bojevih glava sa fragmentacionim dejstvom [3]	14
2	Tabela 2.2.4.2.1 Parametri JWL jednačine stanja [2]	27
3	Tabela 2.2.4.2.2 Karakteristične brzine najčešćih komponenti eksplozivnih smjesa [2]	29
4	Tabela 2.2.4.2.3 Vrijednosti parametara A, B i C za različite vrste eksploziva [2]	30
5	Tabela 2.2.4.2.4 Koeficijenti A_p i n_p, maksimalne teoretske gustine eksploziva, i det. pritisak eksploziva sa maksimalnom teoretskom gustinom [2]	30
6	Tabela 2.2.7.1 Čisti sekundarni jaki eksplozivi [2]	35
7	Tabela 2.2.7.2 Komponente eksplozivnih smjesa [2]	36
8	Tabela 2.2.7.3 Detonacioni parametri jakih eksploziva [2]	38
9	Tabela 2.2.7.4 Parametri smjesa baziranim na RDX i TNT [55]	39
10	Tabela 2.2.9.1 Izračunate vrijednosti mehaničkih karakteristika eksploziva [56]	40
11	Tabela 2.2.9.2 Mehaničke karakteristike eksploziva [38]	40
12	Tabela 2.2.9.3 Mehaničke karakteristike eksploziva [57]	40
13	Tabela 2.3.2.1 Osobine nisko-ugljičnih čelika, vruće valjanih, minimalne vrijednosti [59]	43
14	Tabela 2.3.2.2 Podaci za srednje- i visoko-ugljične čelike i njihova primjena [59]	45
15	Tabela 2.3.2.3 Podaci za srednje- i visoko-ugljične čelike i njihova primjena [59]	45
16	Tabela 2.3.2.4 Sastav HF čelika [59]	46
17	Tabela 2.3.4.1 Mehaničke karakteristike materijala primjenjivanih u našoj zemlji za izradu tijela projektila različitih kalibara ([62], [8])	48
18	Tabela 2.3.4.2 Materijal za tijela projektila povećanog dometa (materijal, oznaka, standard, broj materijala, hemijski sastav i zemlja porijekla) [61],[63]	49
19	Tabela 2.4.2 Gustina, detonacijska brzina i karakteristična brzina Gurney-a za različite vrste eksploziva [23]	53
20	Tabela 2.5.4.1 Komparacija rezultata za C_x [67]	65
21	Tabela 2.5.4.2 Vrijednosti C_x za realne fragmente i fragmente oblika sfere [24]	66
22	Tabela 2.6.2.1 Vrijednost konstanti B_e i A_e za neke eksplozive [1]	70
23	Tabela 3.3.3 Karakteristike medija za sakupljanje fragmenata [13]	105
24	Tabela 3.3.2 Radijusi polukružne Arene [13]	109
25	Tabela 5.1 Podaci o ispitivanim projektilima	129
26	Tabela 5.2.1 Vrste i broj ispitivanih bojevih glava u polukružnoj areni	130
27	Tabela 5.2.2 Eksperimentalni podaci dobijeni fragmentacijom u polukružnoj areni	130
28	Tabela 5.2.1.1 Parametri korišteni u analizi radijusa RB	133
29	Tabela 5.2.1.2 Vrijednosti geometrijskih parametera polukružne arene	133
30	Tabela 5.2.1.3 Vrijednosti srednje gustine efikasnih fragmenata za svaku polarnu zonu arene	134
31	Tabela 5.2.1.4 Komparacija koeficijenta efikasnosti bojevih glava AL za različite izložene površine vojnika na terenu (bojištu)	147
32	Tabela 5.2.1.5 Ispitivane bojeve glave, vrste eksploziva i koeficijenti korelacije aproks. funkcija	148
33	Tabela 7. Vrijednosti procjenjenog broja efikasnih fragmenata	154
34	Tabela 5.2.6.1 Vrijednosti smrtonosnih zapremina	163
35	Tabela 5.2.6.2 Vrijednosti površina projekcija smrtonosnih zona za nultu ravan (tlo) i ravan na 2m iznad tla, i za različite padne uglove bojeve glave.	169
36	Tabela 5.2.6.3 Vrijednosti koeficijenata b_1 i c_1, i koeficijenta korelacije	170

37	Tabela 5.3.1 Bojeve glave i projektili ispitivani u Pit uređaju	171
38	Tabela 5.3.2 Prikaz parametara ispitivanih minobacačkih projektila	171
39	Tabela 5.3.3 Prikaz parametara ispitivanih artiljerijskih projektila	172
40	Tabela 5.3.4 Prikaz parametara ispitivanih bojevih glava raketnih projektila	172
41	Tabela 5.3.5 Podaci dobijeni fragmentacijom bojevih glava u Pit uređajima	172
42	Tabela 5.3.6 Mott-ov koeficijent μ za ispitivane bojeve glave	176
43	Tabela 5.3.7 Vrijednosti Held-ovih konstante BH i λH i koeficijenta korelacije r^2	177
44	Tabela 5.3.4.1 Podaci o ispitivanim bojevim glavama	201
45	Tabela 5.3.6.1. Izmjerene geometrijske vrijednosti fragmenata za bojevu glavu 128mm M87, sa Komp. B	207
46	Tabela 5.3.6.2 Izmjerene geometrijske vrijednosti fragmenata za bojevu glavu 128mm M87, sa TNT-om	207
47	Tabela 5.3.6.3 Koeficijenti p_i i r_i za BG 128mm M87, Komp. B	210
48	Tabela 5.3.6.4 Koeficijenti p_i i r_i za BG 128mm M87, TNT	211
49	Tabela 5.4.1 Bojeve glave ispitivane u četvrtkružnoj areni	214
50	Tabela 5.4.2 Rezultati istraživanja u četvrtkružnoj areni	215
51	Tabela 5.4.1.1 Podaci o vrsti eksplozivnog punjenja, mehaničke karakteristike materijala tijela bojeve glave, maseni odnos C_{eks}/M i geometrijski odnos t/d, za ispitivane minobacačke projektile	217
52	Tabela 5.4.1.2 Podaci o vrsti eksplozivnog punjenja, mehaničke karakteristike materijala tijela bojeve glave, maseni odnos C_{eks}/M i geometrijski odnos t/d, za ispitivane artiljerijske projektile	217
53	Tabela 5.4.1.3 Podaci o vrsti eksplozivnog punjenja, mehaničke karakteristike materijala tijela bojeve glave, maseni odnos C_{eks}/M i geometrijski odnos t/d, za bojeve glave raketnih projektila	217
54	Tabela 5.4.1.4 Podaci o rezultatima radijusa efikasnog dejstva za minobacačke projektile	217
55	Tabela 5.4.1.5 Podaci o dobijenim rezultatima radijusa efikasnog dejstva za artiljerijske projektile	218
56	Tabela 5.4.1.6 Podaci o rezultatima radijusa efikasnog dejstva za BG raketnih projektila	218
57	Tabela 5.5.1 Projektili i bojeve glave na kojima je vršena analiza početne brzine fragmenata	224
58	Tabela 5.6.1 Analizirane bojeve glave	231
59	Tabela 5.6.2 Vrijednosti srednje početne brzine fragmenata, minimalne brzine fragmenta u trenutku udara u cilj, interval Mach-ovih brojeva, te srednja vrijednost aerodinamičkog koefijenta otpora fragmenta oblika sfere za ispitivane projektile i bojeve glave	232
60	Tabela 5.6.3 Vrijednosti srednje mase fragmenata za date masene grupe ispitivanih projektila i bojevih glava raketnih projektila	232
61	Tabela 5.7.2.1 Mehaničke karakteristike usvojenih materijala	249

PROCJENA ZONE SMRTONOSNOG DJELOVANJA HE BOJEVIH GLAVA SA PRIRODNOM FRAGMENTACIJOM

Sažetak

Oblast istraživanja zone smrtonosnog dejstva veoma je složena zbog velikog broja kontrolisanih i nezavisnih, a ponekad i povezanih, uticajnih faktora. Sposobnost predviđanja zone smrtonosnog djelovanja zasniva se na kompleksnosti sopstvene baze podataka parametara prirodne fragmentacije bojevih glava koja treba da sadrži podatke o karakteristikama materijala tijela bojeve glave, eksplozivnog punjenja, o broju, masi, početnoj brzini i prostornoj distribuciji fragmenata, uvjetima bojišta, rasporedu vojnika na bojišnoj površini, itd.

Definisan je Model za predviđanje zone smrtonosnog djelovanja HE bojevih glava, a koji se sastoji od tri glavna modula: Modul za određivanje vjerovatnoće pogađanja, Modul za predviđanje krivih izogustina, i Interface za CAD modeliranje smrtonosnih zona.

Model za predviđanje zone smrtonosnog dejstva HE bojevih glava sadrži modul za određivanje vjerovatnoće onesposobljavanja čiju osnovu čini američki model "U.S. Vulnerability Model for Military Personnel", a čiji zadatak je predviđanje vjerovatnoće onesposobljavanja vojnika na terenu i određivanje koeficijenta efikasnosti.

Modul za predviđanje krivih izogustina podrazumijeva predviđanje rasporeda gustine efikasnih fragmenata u prostoru oko bojeve glave, u funkciji od polarnog ugla. Ovaj modul omogućava procjenu rasporeda gustine efikasnih fragmenata u funkciji od polarne zone za konstantne vrijednosti udaljenosti od centra detonacije, predviđanje 3D modela gustine efikasnih fragmenata u prostoru, predviđanje gustine efikasnih fragmenata za različite vrijednosti udaljenosti od centra detonacije u funkciji od polarne zone i definisanje krivih izogustina.

Interface za CAD modeliranje smrtonosne zone omogućava 2D i 3D vizualizaciju zone smrtonosnog dejstva, izračunavanje površine zone smrtonosnog dejstva za različite nivoe bojišta, te predviđanje zone smrtonosnog dejstva za različite padne uglove bojeve glave.

Na osnovu obimnih eksperimentalnih istraživanja (izvršeno je oko 130 fragmentacionih testova, sa šest vrsta artiljerijskih projektila, 3 tipa minobacačkih projektila, i dva tipa bojevih glava raketnih projektila), matematičkih modela i metoda numeričkog modeliranja procjenjeni su parametri masene i prostorne distribucije fragmenata, analizirana je dinamika leta fragmenata, te izvršena numerička simulacija naprezanja projektila u toku kretanja kroz cijev oružja.
Razvijeni su modularne programske skripte, korištenjem programskog jezika MatLab©, koje je moguće nadograđivati i povezati u jedan univerzalni model za predviđanje parametara efikasnosti HE bojevih glava.

PREDICTION OF LETHAL ZONE FOR HE WARHEADS WITH NATURAL FRAGMENTATION

Abstract

Research of HE warheads lethal zone is very complex topic because of large number of controlled and independent, sometimes correlated, influencing factors. Capability for prediction of lethal zone is based on complexity of databases regarding natural fragmentation parameters, which should contain data about warhead body material characteristics, types of explosive charge, number, mass, initial velocity and spatial distribution of fragments, condition of battlefield, distribution of soldiers on battlefield, etc.

Model for prediction of HE warheads lethal zone is defined, and it consists of three main modules: Module for determination of incapacitation probability, Module for prediction of Isodensity curves, and Interface for CAD modelling of lethal zones.

Basics of Module for determination of incapacitation probability makes american model "U.S. Vulnerability Model for Military Personnel", whose task is prediction of incapacitation probability of soldier and determination of efficiency coefficient, somewhere reffered as lethal area.

Module for prediction of Isodensity curves enables prediction of efficient fragment density distribution in space around the warhead as a function of polar angle. This module also enables assessment of efficient fragment density distribution as a function of polar angle for constant distances from the center of detonation, prediction of 3D model of efficient fragment density in space, assessment of efficient fragment density distribution for different values of distances from the center of detonation, and defining Isodensity curves which connect the points with equal value of fragment density.

Interface for CAD modelling of lethal zones enables 2D and 3D visualization of lethal zone, determination of lethal zone area for different levels of battlefield terrain, and prediction of HE warheads lethal zone for different impact angles of projectile.

Based on large experimental research (around 130 fragmentation test in Pit and Arena are conducted, with six types of artillery projectiles, three types of mortar projectiles and two types of rocket warheads), developed mathematical models and numerical methods, parameters of mass and spatial distibution of fragments are analized, as well as fragment flight dynamics, and numerical simulation of stresses in projectile during its flight through the weapon barrel.

Modular program scripts are developed, using program language MatLab©. These scripts can be further modified and connected into one universal model for prediction of relevant paramaters regarding the efficiency of HE warheads.

POGLAVLJE 1

UVOD

Zona smrtonosnog djelovanja predstavlja osnovni parametar efikasnosti bojeve glave. Povećanjem efikasnosti smanjuje se potreban broj bojevih glava za neutralisanje ili uništenje nekog cilja, što je od dalekosežnog taktičko-operativnog i ekonomskog značaja pri izvođenju borbenih dejstava protiv neprijatelja. Zato je od velikog interesa proučavanje svih relevantnih faktora koji utiču na zonu smrtonosnog dejstva i definisanje modela kojim se ta zona može predvidjeti.

Proces analize sposobnosti preživljavanja, smrtonosnog djelovanja i ranjivosti je obuhvatan, integrativni proces koji ima za cilj povećanje sposobnosti preživljavanja, smanjenja osjetljivosti ili ranjivosti vojnika.

Preživljavanje u borbi definira se kao sposobnost vojnika da izbjegne ili izdrži, od neprijateljski nastrojenog čovjeka, okruženja bez patnje, odustajanja ili pogoršanja sposobnosti dovršenja određene misije [39] i da smanji efekte prirodnih fenomena koji mogu uticati na slabljenje sposobnosti da nastavi efektivno provoditi propisanu misiju [40].

Osjetljivost je definirana kao stepen do kojeg je vojna formacija otvorena na efektivan napad zbog postojanja jedne ili više prisutne slabosti. Osjetljivost je funkcija borbene taktike, kontra mjera, vjerovatnoće postojanja neprijateljskih prijetnji, itd. Osjetljivost opada sa porastom sposobnosti preživljavanja.

Ranjivost se definiše kao karakteristika sistema prouzrokovana degradirajućim gubicima (smanjenje ili slabljenje sposobnosti da se izvede projektovana misija) kao rezultat neprijateljskog djelovanja efektima, izazvanim ljudskim djelovanjima na subjekt koji ima definiran nivo pouzdanosti. Ranjivost raste sa porastom sposobnosti preživljavanja. Ranjivost je određena tokom dizajniranja sistema i to je karakteristika koja pokazuje koliko će se smanjiti vrijednost i kakve će biti posljedice oštećenja kada je sistem pogođen sa jednim ili više hitaca.

Izmjena tehnike ratovanja i primjena sredstava lične zaštite vojnika utjecale su na to da je bilo potrebno angažiranje sve značajnijih resursa da bi se onesposobio neprijateljski vojnik. Da bi onesposobili jednog vojnika, prema podacima američke vojske, tokom drugog svjetskog rata bilo je potrebno ispaliti 1100 kg municije, tokom korejskog rata ta količina porasla je na 5600 kg, a tokom vijetnamskog rata šezdesetih godina na 17800 kg [42].

Iz dostupnih analiza najpoznatijih vojnih operacija u dvadesetom stoljeću poznato je da je razlog 75-80% svih smrtonosnih povreda od fragmenata (parčadi), dok je 20-25% povreda nastalo ranjavanjem projektilima iz pješadijskog oružja.

Opšte pravilo je da stepen oštećenja ciljeva nastalih fragmentacijom bojeve glave zavisi od kinetičke energije fragmenata. Pretpostavlja se minimalna kinetička energija od 100 J (ili 80 J) za neutralizaciju vojnika. U prvom približenju to je energija sa kojom raspolaže projektil kalibra

5,56 mm, ispaljen iz puške brzinom od 300 m/s. Sljedeći nivo oštećenja je 1000 J, koji korespondira sa energijom kojom raspolaže projektil sa mekim omotačem, kalibra 9 mm ispaljen brzinom od 425 m/s. Ovi projektili su smrtonosni za nezaštićene osobe (zavisno od udaljenosti sa koje su ispaljeni). Projektili sa kinetičkom energijom od 4000 J imaju višak energije za probijanje zaštitnih balističkih prsluka. Ova energija ekvivalentna je energiji koju imaju projektili 7,62 mm sa metalnim omotačem ili oklopno probojni projektili 7,62 mm sa brzinom ispaljenja od 900 m/s. U skladu sa takvim pristupom, izvršena je podjela ciljeva na *lako otporne ciljeve* za čije oštećenje je potrebna kinetička energija od 100 J, *srednje otporne ciljeve* sa potrebnom energijom oštećenja od 1000 J i *teške otporne ciljeve* sa potrebnom energijom oštećenja od 4000 J [41].

Namjena bojevih glava sa prirodnom fragmentacijom (parčadnim dejstvom) je borba protiv lako otpornih ciljeva (vojnici, lako oklopljena vozila i laki fortifikacijski objekti).

Oblast istraživanja zone smrtonosnog dejstva vrlo je složena zbog velikog broja kontrolisanih i nezavisnih, a često međusobno koreliranih uticajnih faktora. Još uvijek ne postoji univerzalan model koji uzima u obzir sve faktore koji utiču na zonu smrtonosnog dejstva jedne bojeve glave. Trenutno se u svijetu intenzivno radi na definisanju različitih modela kojima se pokušava procjeniti efikasnost bojevih glava i njihove zone smrtonosnog djelovanja. Glavna istraživanja usmjerena su na razvoj softvera pomoću kojih se može predvidjeti efikasnost bojevih glava.

Sa jedne strane postoje softveri kao što je PRODAS©, kojim se može predvidjeti trajektorija bojeve glave, ili njen otpor, i koji ima srednju grešku od 8%, potom softver PA FRAG© koji se koristi u analizi veličine i broja fragmenata, a koji ima grešku od 4%, te softver CALE© koji se upotrebljava za određivanje brzine fragmenata, i ima srednju grešku od 7,3% . Sa druge strane, softveri CASRED©/MPD3D© i MUVES© kojima se pokušava predvidjeti efikasnost bojeve glave, još uvijek nemaju u potpunosti definisan model zone smrtonosnog djelovanja koji bi uzeo u obzir sve parametre koji utiču na nju, te se za svaku bojevu glavu moraju programirati drugačije verzije programa [45].

Sposobnost predviđanja zone smrtonosnog djelovanja zasniva se na kompleksnosti sopstvene baze podataka parametara prirodne fragmentacije bojevih glava koja treba da sadrži podatke o karakteristikama materijala tijela bojeve glave, eksplozivnog punjenja, o broju, masi, početnoj brzini i prostornoj distribuciji fragmenata, uvjetima bojišta, rasporedu vojnika na terenu, itd.

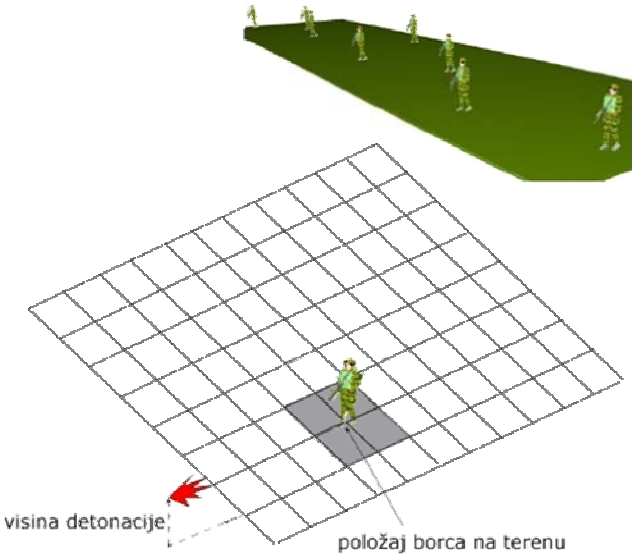
Faktori koji utiču na zonu smrtonosnog djelovanja mogu se uslovno podijeliti na:

- parametre bojeve glave i
- parametre bojišta

Parametre bojeve glave predstavljaju: parametri oružja i uvjeti lansiranja (pritisak u cijevi oružja, brzina bojeve glave na ustima cijevi, ugaona brzina bojeve glave), geometrija bojeve glave (spoljašnja i unutrašnja trasa, odnos mase eksploziva i mase tijela bojeve glave), mehaničke karakteristike materijala tijela bojeve glave (gustina, granica razvlačenja, zatezna čvrstoća, modul elastičnosti materijala), vrsta i mase detonatora, detonacioni parametri eksplozivnog punjenja (gustina, detonaciona brzina, detonacioni pritisak), te vrsta i karakteristike upaljača bojeve glave (udarni, blizinski, vremenski).

Spomenuti parametri bojeve glave direktno utiču na: geometriju fragmenata (oblik i dimenzije fragmenata), brzine fragmenata (supersonične brzine 1,5 - 5 Mach), otpor fragmenta (u općem slučaju neregularnog oblika), masenu distribucija fragmenata (raspored masa i broj fragmenata nakon detonacije), i prostornu distribucija fragmenata (ukupni broj fragmenata, gustina efikasnih fragmenata) koja utiče na vjerovatnoću onesposobljavanja, koeficijent efikasnosti i zonu smrtonosnog djelovanja bojeve glave.

Parametre bojišta predstavljaju: uvjeti djelovanja bojeve glave na cilju (visina detonacije bojeve glave, padni ugao, brzina udara bojeve glave u metu, ugaona brzina bojeve glave na cilju), konfiguracija terena (geometrija terena, fizikalne karakteristike terena/bojišta), karakteristike prostornog rasporeda vojnika na terenu (broj vojnika, formacijski raspored - slika 1), gustina vojnika, izložena površina vojnika prema centru detonacije bojeve glave - zavisno od položaja borca u borbenim dejstvima: stojeći, jurišni, klečeći, ležeći ili zaklonjen položaj vojnika, korištenje zaštitnih sredstava - zaštitna kaciga (šljem), balistički prsluk, kao i druga sredstva zaštite).



Slika 1. Rastresit raspored vojnika na terenu i uvjeti dejstva bojeve glave [11]

Potrebno je modelirati interakciju parametara bojeve glave i bojišta, kao i njihov uticaj na zonu smrtonosnog djelovanja, inkorporirati sve faktore u realne uvjete udara bojeve glave u cilj, gdje cilj predstavlja borbenu površinu na kojoj se nalazi slučajno raspoređen ili unaprijed definisan raspored vojnika u prostoru, sa različitim stepenom izloženosti svoje površine prema centru detonacije, a vodeći računa o kriterijima onesposobljavanja. Kriteriji onesposobljavanja mogu biti izabrani da se simuliraju različite taktičke situacije (napad, odbrana, ili logistika) i maksimalno vrijeme poslije ranjavanja nakon kojeg nastaje onesposobljavanje (30 sekundi, 5 minuta, ili pola dana) [46].

Osnovni zadatak magistarskog rada, pored upoznavanja sa spomenutim parametrima koji utiču na efikasnost bojeve glave, jeste pokušaj da se napravi jednostavan model za predviđanje zone smrtonosnog djelovanja koji će uzeti većinu tih parametara u obzir, kao i formiranje sopstvene baze podataka o svim važnim faktorima fragmentacije nevođenih projektila i stvaranje pretpostavki za budući rad na numeričkoj simulaciji procesa prirodne fragmentacije.

U okviru rada, jedan od ciljeva bio je proučavanje uticaja geometrijskih konfiguracija i vrsta materijala tijela bojevih glava i eksplozivnih punjenja (eksperimentalna istraživanja) na parametre fragmentacije i njenu efikasnost sa stanovišta prostorne distribucije i energije fragmenata na odgovarajućoj udaljenosti od centra detonacije.

U radu je bilo potrebno i modelirati jednostavnu numeričku simulaciju kako bi se moglo odrediti naponsko-deformaciono stanje tijela bojeve glave u trenutku detonacije. Nastali model poslužio bi kao osnova za daljnja istraživanja usmjerena u pravcu razmatranja procesa nastajanja i širenja pukotina na tijelu bojeve glave.

Jedan od zadataka bio je i da se razmotre osnove balistike rana, naznače terminalni efekti prirodne fragmentacije na čovjeka, odnosno ozlijede koje nastaju na ljudskom tkivu, kao i načini zaštite od efekata fragmenata (zaštitne kacige, balistički prsluci). Fragmenti bojevih glava imaju kinetičku energiju koja zavisi od mase i brzine fragmenata. Parčadi male mase mogu imati veliku moć i izazvati oštećenja tkiva značajno većih razmjera nego dimenzije samog fragmenta. Tokom kretanja fragmenta kroz tijelo, koje je nehomogeno, može se desiti da fragmenta luta kroz tijelo vojnika i da izazove unutarnje povrede na mjestima za koje se ne bi moglo ni pretpostaviti da su moguća. Poseban problem predstavljaju sekundarni ostaci kako dijelova fragmenta, tako i dijelova kostiju nastalih tokom kretanja fragmenta kroz njih [43].

U magistarskom radu koristiće se eksperimentalne metode, teoretski pristup i metode numeričkog modeliranja.

Eksperimentalna istraživanja u okviru rada izvršiće su ispitivanjem nekoliko modela bojevih glava u Pit testu i Arena testu, sa ciljem određivanja masene i prostorne distribucije fragmenata.

Kod Pit testa, bojeva glava se rasprskava u zatvorenom prostoru (jami), ispunjenom pjeskom. Nakon fragmentacije bojeve glave, iz pjeska se izdvajaju fragmenti, mjeri im se masa, oblik, i vrši njihovo razvrstavanje po masenim grupama.

U Arena testu, u zavisnosti od tehnoloških i materijalnih mogućnosti, moguće je odrediti prostornu distribuciju fragmenata, eksperimentalno odrediti brzinu pojedinih fragmentima u različitim sektorima arene, te izvršiti "hvatanje" fragmenata pomoću panela. Izvršiće se ispitivanja i u drugom tipu arene, a eksperimentalni rezultati poslužiće za određivanje radijusa efikasnosti bojevih glava.

Stvorena baza podataka, bazirana na brojnim eksperimentalnim ispitivanjima, poslužiće kao osnov za dalju analizu performansi ispitivanih bojevih glava.

Teoretska istraživanja u radu obuhvatiće proučavanje uticaja komponenti bojeve glave (materijal tijela bojeve glave, vrsta eksplozivnog punjenja, detonator i upaljač) na proces fragmentacije, razmatranja o detonacionim parametrima eksploziva, početne brzine fragmenata i ugla vektora brzine fragmenata, osnove dinamike leta fragmenata i balistike rana, te teoretska razmatranja o masenoj i prostornoj distribuciji fragmenata.

Koristit će se softver, baziran na metodi konačnih elemenata, kako bi se napravila numerička simulacija naponsko - deformacionog stanja bojeve glave u cijevi oružja i na cilju - prilikom detonacije bojeve glave. Numeričkim metodama analizirat će se prostorna distribucija fragmenata, definisat će se funkcija gustine efikasnih fragmenata, predvidjet će se vjerovatnoća onesposobljavanja za različite uvjete na bojištu, koeficijent efikasnosti, te konačno - zona smrtonosnog dejstva. Za ove proračune isprogramiraće se kodovi u MatLab©-u, koji mogu poslužiti kao dobra osnova za dalji rad na ovom problemu i modifikacija postojećih modela.

Na osnovu postavljenih ciljeva, a koristeći spomenute metode istraživanja, u okviru magistarskog rada očekuju se slijedeći rezultati: formiranje opsežne baze podataka koja se temelji na eksperimentalnim istraživanjima, istraživanje uticaja geometrije bojevih glava i vrsta materijala tijela bojevih glava i eksplozivnih punjenja na parametre prirodne fragmentacije, definisanje modela za numeričku simulaciju naponsko-deformacionog stanja bojeve glave nakon lansiranja u cijevi oružja i prilikom njene detonacije na cilju, analiziranje dinamike leta fragmenata, predviđanje masene distribucije fragmenata za različite bojeve glave, a na osnovu eksperimentalnih podataka iz Pit testa, analiziranje prostorne distribucije fragmenata za različite bojeve glave, na osnovu eksperimentalnih podataka iz Arena testova, procjenit će se gustina efikasnih fragmenata, vjerovatnoća onesposobljavanja vojnika za različite izložene površine vojnika i padni ugao bojeve glave.

Konačan rezultat rada bit će definisanje modela kojim se predviđa zona smrtonosnog djelovanja za različite bojeve glave u funkciji geometrijskih parametara bojeve glave, masene i prostorne distribucije fragmenata, uvjeta na bojištu, rasporeda vojnika, vjerovatnoće onesposobljavanja, itd.

Većina parametara koju utiču na zonu smrtonosnog djelovanja ima stohastičan karakter, te je definisanje egzaktnog modela zone smrtonosnog djelovanja nemoguće. Ipak, koristeći eksperimentalne rezultate, analitički pristup i metode numeričkog modeliranja, u okviru magistarskog rada, definisat će se model kojim se kvalitativno i kvantitativno mogu predvidjeti zone smrtonosnog djelovanja za različite tipove bojevih glava.

1.1 Predmet istraživanja

Generalno govoreći, municija je kompletan sistem koji sadrži eksploziv, pogonsko punjenje, pirotehničku smješu, inicijalne kompozicije ili nuklearne, biološke ili hemijske materijale koje se koriste u vojnim operacijama, uključujući i sredstva za razaranje (DOD, NATO). Municija je dio oružanog sistema čija osnovna svrha je neposredno obavljanje funkcije za koji je dati sistem projektovan.

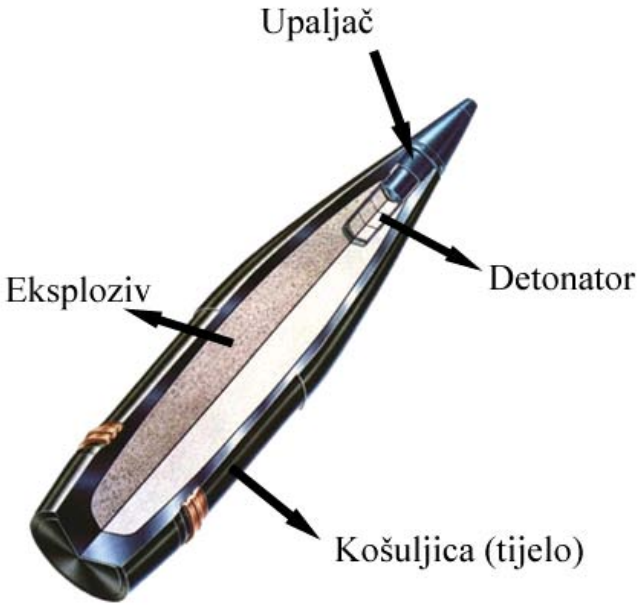
Sva municija, bez obzira na sistem oružja čiji je ona izvršni dio, posjeduje određene sastavne elemente koji omogućavaju izvršenje zadatka za koji je namjenjena. Ti elementi su:

- Pogonski elementi (barutno punjenje kod klasičnih artiljerijskih projektila, raketni motor i sl.),
- Elementi za aktiviranje pogonskog punjenja (topovska kapisla, pripala, pripalni elementi raketnog motora, i sl.),
- Elementi za vođenje (prstenovi, vođice, sistem elektronskog vođenja i upravljanja, i sl.),
- Elementi za stabilizaciju (krilca za aerodinamičku stabilizaciju, elementi za žiroskopsku stabilizaciju),
- Elementi za obezbjeđenje mehaničke čvrstoće (košuljica projektila, spoljni elementi, i sl.),
- Elementi za dejstvo na cilj (eksplozivno punjenje, tijelo projektila, kumulativni lijevak),
- Elementi za aktiviranje na cilju (upaljač, izbacno punjenje, i sl.).

Pored ovih, svakako osnovnih elemenata, kod nekih vrsta projektila mogu se sresti i neki drugi elementi: za praćenje (traseri), za aerodinamičko oblikovanje (balističke kape, aerodinamičke oplate), za samouništenje (samolikvidatori) i drugi specijalni elementi i uređaji čija je svrha da se poboljšaju performanse, sigurnost i eksploatacione osobine projektila, odnosno čitavog sistema oružja [5].

1.1.1 Artiljerijski projektili

Tipičan artiljerijski projektil, prikazan na slici 1.1.1, sastoji se od upaljača, detonatora, tijela projektila (košuljice) i glavnog eksplozivnog punjenja.



Slika 1.1.1 Klasični artiljerijski projektil [52]

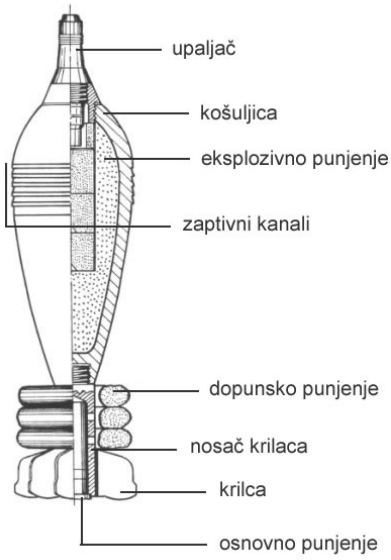
Tijelo projektila koje sadrži centrirajući i vodeći prsten, objedinjava eksplozivno punjenje i upaljač, štiti eksplozivno punjenje od vanjskih mehaničkih i atmosferskih utjecaja, preuzima na

sebe opterećenje prilikom kretanja projektila kroz cijev oružja i prilikom udara u cilj, potpomaže uspostavljanju žiroskopske stabilnosti kod rotirajućih projektila, i konačno, omogućava da se ostvari traženi efekt na cilju.

Artiljerijski projektil ispaljuje se iz cijevi (ožlijebljene) oružja uslijed dejstva produkata sagorijevanja barutnog (pogonskog) punjenja na dno projektila iz cijevi oružja. Pritisak u cijevi oružja može dostići vrijednost i do 5000 bara. Translatorno ubzanje artiljerijskih projektila veoma je veliko, za razliku od minobacačkih i raketnih projektila, te može imati vrijednost i do 200 000 m/s^2. Uslijed ovako velikog ubrzanja tijelo artiljerijskih projektila trpi velika naprezanja prilikom kretanja kroz cijev oružja, te je prvi korak pri dizajniranju ovih projektila - proračun naponskog stanja artiljerijskih projektila i provjera sigurnosti prilikom eksploatacije u cijevi oružja. Tek poslije toga vrše se analiza stabilnosti projektila, aerodinamička analiza, i analiza efikasnosti [52].

1.1.2 Projektili za minobacače

Projektil za minobacače lete relativno malim brzinama, uglavnom u podzvučnoj oblasti, zbog čega im se daje kapljasti oblik koji pri ovim brzinama pruža najmanji aerodinamički otpor. Na slici 1.1.2.a prikazane su komponente klasičnog minobacačkog projektila, dok je na slici 1.1.2.b prikazano nekoliko modernih minobacačkih projektila, različitih kalibara.



a.) Shematski prikaz komponenti projektila za minobacače

b.) Moderni projektili za minobacače

Slika 1.1.2 Projektili za minobacače [5]

Minobacački projektili lansiraju se iz oružja sa glatkom cijevi. Ubrzanja projektila u cijevi minobacača mnogo su manja nego kod artiljerijskih oružja, pa tijelo minobacačkih projektila ima manju debljinu stjenke i manju masu metalne strukture. Zbog toga projektili za minobacače imaju povoljniji odnos mase eksploziva i mase tijela projektila nego artiljerijski projektili.

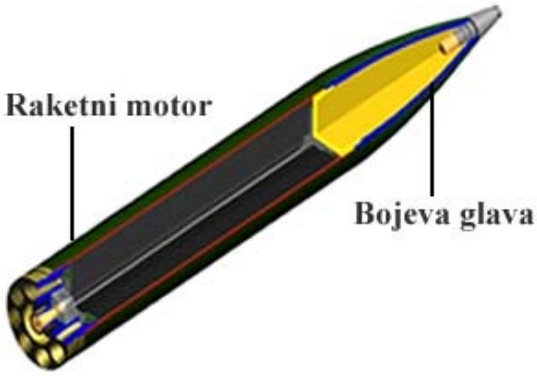
Na spoju prednjeg i zadnjeg aerodinamičkog dijela projektil ima cilindrični dio koji služi kao prednji centrirajući prsten i istovremeno ostvaruje funkciju zaptivanja produkata sagorijevanja pogonskog punjenja preko niza labirintskih kanala ili pomoću termoplastičnog prstena. Funkcija drugog centrirajućeg prstena postignuta je preko vanjskih rubova stabilizatora projektila koji imaju maksimalni razmah jednak kalibru projektila. Na zadnji aerodinamički dio tijela projektila nastavlja se nosač stabilizatora koji u svojoj unutrašnjosti sadrži osnovno pogonsko punjenje s

inicijalnom kapislom, dok su dopunska punjenja smještena oko nosača stabilizatora ili između stabilizatora.

Projektili za minobacače mogu imati fiksne stabilizatore, razmaha jednakog kalibru projektila, ili sklapajuće stabilizatore čiji razmah u otvorenom položaju može biti veći od kalibra projektila (time se ostvaruje bolja stabilnost i preciznost u letu projektila). Domet projektila koji se lansiraju iz minobacača značajno je manji nego kod artiljerijskih oružja istog kalibra, ali se povećanje dometa može ostvariti primjenom dopunskog raketnog motora [52].

1.1.3 Raketni projektili

Raketni projektil kreće se zahvaljujući reaktivnoj sili koja nastaje tokom isticanja produkata sagorijevanja pogonskog punjenja (raketnog motora) kroz mlaznicu. Raketni projektil sastoji se od bojeve glave raketnog projektila i raketnog motora (Slika 1.1.3).



Slika 1.1.3 Klasični raketni projektil

Ubrzanje raketnih projektila mnogo je manje nego kod artiljerijskih i minobacačkih projektila, i može dostići vrijednost do 1000 m/s^2. Iz toga proizilazi da su i naprezanja tijela bojeve glave raketnog projektila mnogo manja u poređenju sa artiljerijskim projektilima. Zbog toga tijelo bojeve glave raketnih projektila može imati značajno manju debljinu u odnosu na tijelo artiljerijskog projektila. Ta fleksibilnost u procesu dizajna raketnih projektila predstavlja veliku prednost u procesu dizajna.

Raketni projektili najčešće se lansiraju se iz cijevnih ili šinskih lansera. Pri lansiranju iz cijevi vođenje projektila kroz cijev ostvaruje se preko cilindričnih površina na projektilu i mlazniku odnosno tijelu komore raketnog motora. Kod projektila koji se lansiraju sa šinskih lansera vođenje se ostvaruje preko posebnih klizača. Stabilizacija raketnih projektila postiže se primjenom žiroskopskog efekta (velika uzdužna rotacija projektila) ili pomoću aerodinamičnih površina. Projektili sa stabilizatorima mogu da imaju blagu rotaciju radi kompenzacije odstupanja od idealnih mjera i oblika do kojih neizbježno dolazi u procesu proizvodnje. Raketni projektili koji se lansiraju iz cijevi moraju imati stabilizatore na sklapanje koji se otvaraju nakon napuštanja lansera [52].

1.2. Pojam i vrste HE bojevih glava

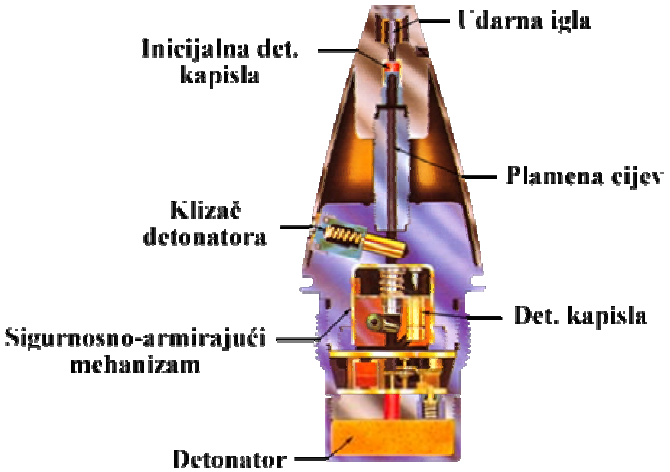
Bojeva glava (eng. Warhead) predstavlja koristan teret municije, a njen zadatak je da ostvari odgovarajući efekat na cilju, i to na definisanom odstojanju i u odgovarajuće vrijeme. Od pouzdanosti i efikasnosti bojeve glave direktno zavisi i pouzdanost i efikasnost municije. Generalno govoreći, iako koristan teret jednog sistema municije predstavlja bojeva glava, ponekad postoje i posebne jedinice ili mehanizmi koji služe za osiguranje i armiranje sistema [29].

U većini slučajeva, pojam bojeva glava predstavlja sinonim pojmu projektil, osim kod raketnih projektila koji se sastoji od bojeve glave i pogonskog punjenja, koji se zajedno kreću prema cilju.

Najbrojnija kategorija bojevih glava su HE bojeve glave ili bojeve glave u kojima se nalazi jaki sekundarni eksploziv (eng. High Explosive). Glavne komponente HE bojeve glave su: upaljač, eksplozivni lanac i tijelo bojeve glave (košuljica).

1.2.1 Upaljač

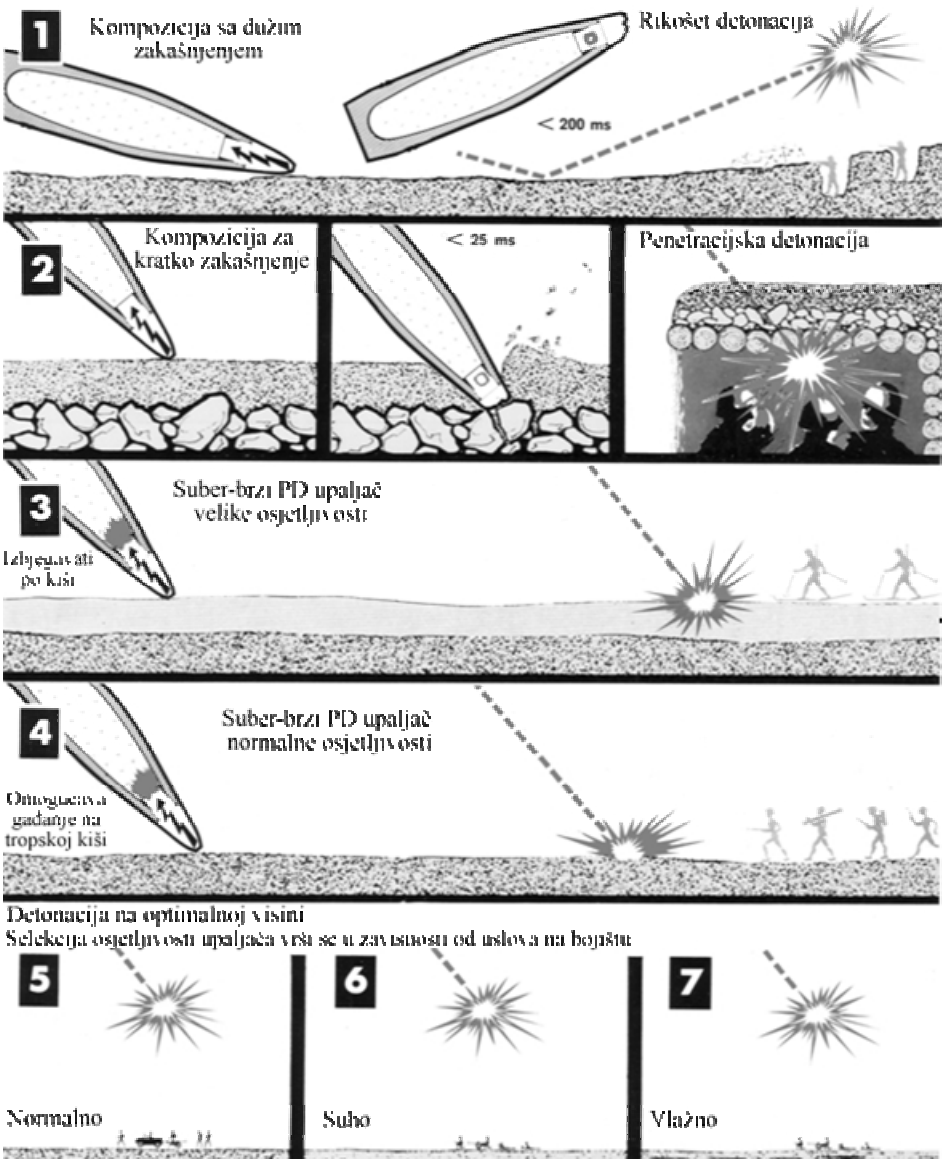
Funkcija upaljača je da zadrži sigurnim oružje u cjelini, odnosno da projektil sigurno napusti oružje, zatim da omogući armiranje (stvori pretpostavke da upaljač može da dejstvuje), da prepozna ili detektuje cilj, pokrene proces detonacije bojeve glave i u specifičnim uvjetima usmjeri pravac detonacije. Upaljač je podsistem projektila i njegove osnovne komponente su izvršni mehanizam (udarna igla), inicijalna detonatorska kapsla, prenosno eksplozivno punjenje, sigurnosno-armirajući uređaji, detonatorska kapsla i detonator (slika 1.2.1.1)



Slika 1.2.1.1 Komponente upaljača (prednji detonirajući) [52]

Upaljači koji se najviše upotrebljavaju kod HE bojevih glava mogu se, prema načinu funkcionisanja, podijeliti na: udarne i blizinske upaljače.

Udarni upaljači se armiraju (dovode svoje podsisteme u položaj za iniciranje detonacije) nakon predviđenog vremenskog intervala i detoniraju prilikom udara u metu. Postoje dva glavna tipa udarnih upaljača: prednji detonirajući (eng. Point detonating) i zadnji detonirajući (eng. Base detonating), zavisno od položaja na bojevoj glavi. Vrijeme potrebno da udarni upaljači dejstvuju reda je 10^{-5} s. Ovi upaljači mogu imati mehanizme za duže ili kraće usporenje prilikom procesa iniciranja (eng. Delay), zavisno od položaja mete (slike 1.2.1.2-1 i 1.2.1.2-2), a mogu biti i super-brzi sa velikom ili normalnom osjetljivosti, zavisno od uvjeta na bojištu (slika 1.2.1.2-3 i 1.2.1.2-4).



Slika 1.2.1.2 Primjena različitih upaljača, u zavisnosti od uvjeta na bojištu

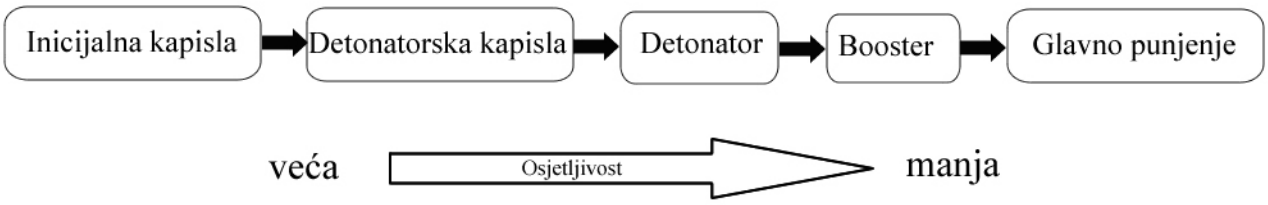
Blizinski upaljači armiraju se nakon podešenog vremenskog intervala i detoniraju na određenoj (predefinisanoj) udaljenosti od mete. Ovi upaljači ne moraju doći u kontakt sa metom da bi se aktivirali, njihovi senzori detektuju fizičko prisustvo mete na određenoj udaljenosti (slike 1.2.1.2-5, 1.2.1.2-6 i 1.2.1.2-7). Blizinskim upaljačima može se postići mnogo veća efikasnost nego korištenjem drugih tipova upaljača jer oni detoniraju na određenoj visini iznad mete čime se povećava izložena površina mete. Time se ujedno povećava i zona smrtonosnog djelovanja HE bojeve glave.

1.2.2 Eksplozivni lanac

HE bojeve glave kod kojih je postignut optimalan odnos između mase metala i eksploziva sa stanovišta broja fragmenata, može ostvariti puni učinak samo pri maksimalnom iskorištenju eksploziva, odnosno pri detonacionom obliku eksplozivne reakcije. Svrha eksplozivnog lanca je da postigne kontrolisano povećanje relativno malog energetskog impulsa do dovoljne energije potrebne da uzrokuje detonaciju glavnog eksplozivnog punjenja.

Pobuđivanje detonacije glavnog eksplozivnog punjenja ostvaruje se početnim impulsom izazvanim detonacijom detonatora, koji prenosi i pojačava početni impuls inicijalne, odnosno

detonatorske kapisle, smještene u upaljaču. U vojnim konstrukcijama proces pobuđivanja detonacije glavnog eksplozivnog punjenja ostvaruje se eksplozivnim lancem, koji se u praksi javlja u različitim konstrukcionim varijantama.



Slika 1.2.2.1 Elementi eksplozivnog lanca bojeve glave

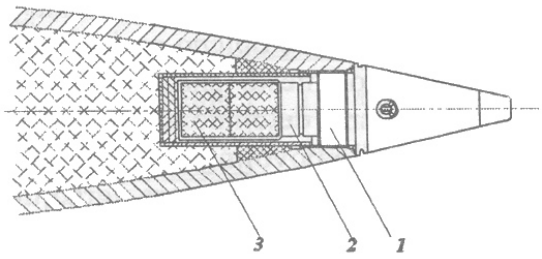
Prvi eksplozivni element eksplozivnog lanca (sl. 1.2.2.1) je inicijalna kapisla u koju je upresovan jaki primarni eksploziv vrlo male mase. Do iniciranja kapisle dolazi na razne načine: udarom (šok) nastalim dejstvom udarne igle, plamenom (toplota) iz upaljača, toplotom uslijed hemijske reakcije - kao što je dejstvo kiseline na reaktivni metal, toplotom od trenja uslijed kretanja preko grube površine, toplotom ili šokom uslijed električne iskre, itd. Inicijalna kapisla je relativno mala i osjetljiva komponenta eksplozivnog lanca koja sama po sebi nije dovoljna da inicira glavno punjenje eksploziva. Kapisle se generalno klasificiraju u skladu sa metodom iniciranja, pa imamo: udarne, ubodne, električne, frikcione, hemijske kapisle.

Drugi elemenat eksplozivnog lanca je detonatorska kapisla (sl. 1.2.2.1) koja predstavlja pojačivač dejstva inicijalne kapisle. Eksplozivno punjenje ove kapisle najčešće je sastavljeno iz dva presovana sloja: prvi - odgovarajući primarni jaki eksploziv i drugi - sekundarni jaki eksploziv ili odgovarajuća eksplozivna smjesa.

Treći elemenat eksplozivnog lanca je detonator (sl. 1.2.2.1) - pojačnik dejstva detonatorske kapisle (izrađuje se obično od iste vrste eksploziva kao i glavno eksplozivno punjenje ili od nešto snažnijeg jakog eksploziva). Inicijalna i detonatorska kapisla, odnosno detonatorska kapisla i detonator, nisu u neposrednom kontaktu, iako bi to bilo povoljnije sa stanovišta pouzdanog pobuđivanja i prenošenja detonacije. U ove međuprostore ugrađuju se mehanizmi osiguranja koji u fazi skladištenja, transporta i rukovanja, sve do faze korištenja (na primjer, do lansiranja projektila i kretanja u cijevi oruđa), onemogućuju funkcionisanje eksplozivnog lanca.

Za eksplozivno punjenje postoji optimalan detonator koji osigurava najpovoljniji tok eksplozivne reakcije, odnosno daje dovoljni početni impuls za praktično trenutno postizanje pune brzine detonacije. Kod bojevih glava gdje detonator upotrijebljenog upaljača nije dovoljan da omogući trenutno ostvarenje pune brzine detonacije, upotrebljavaju se detonatorski pojačnici (eng. Booster), obično izrađeni od istog eksploziva kao i osnovno eksplozivno punjenje, ali manje gustine (sl. 1.2.2.2).

Booster eksplozivi su eksplozivne komponente eksplozivnog lanca čija se detonacija prenosi do glavnog eksplozivnog punjena. Booster eksplozivi su manje osjetljivi na udar, trenje i elektrostatička pražnjenja nego primarni eksplozivi [2].



Slika 1.2.2.2 Vrh bojeve glave sa ugrađenim upaljačem

(1 - Upaljač; 2 - Detonator; 3 - Pojačnik/Booster)

Posljednji i glavni element eksplozivnog lanca je glavno eksplozivno punjenje koje se nalazi unutar košuljice bojeve glave. To je komponenta eksplozivnog lanca koja obezbjeđuje većinu energetskog izlaza bojeve glave. Glavno eksplozivno punjenje je jaki sekundarni eksploziv kojeg karakterizira detonacija kao osnovni oblik eksplozivne hemijske transformacije.

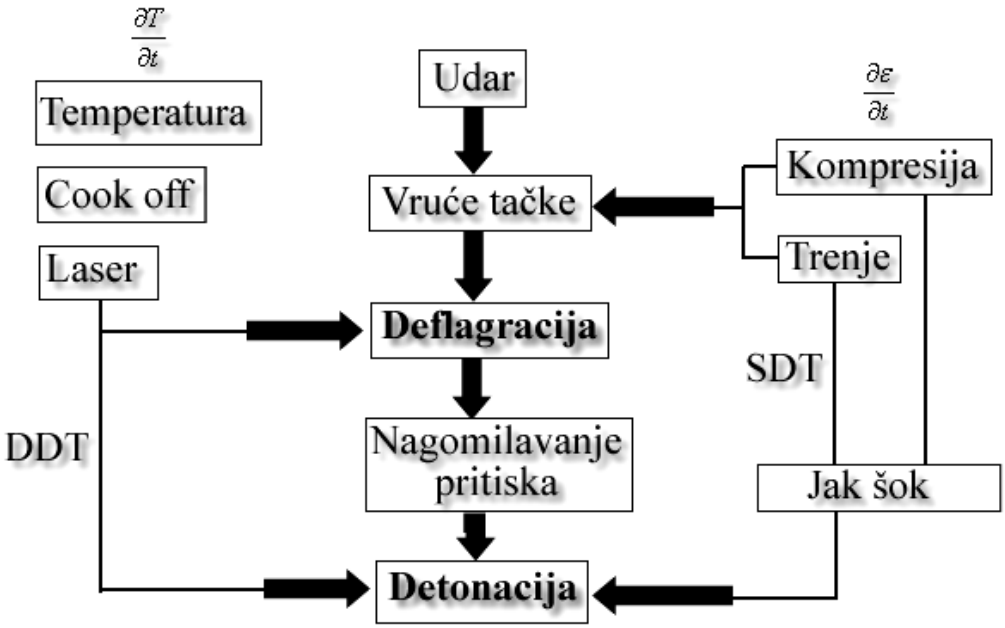
Zahtjevi koji se postavljaju pred sekundarne jake eksplozive su:

- najveća moguća energija po jedinici volumena punjenja,
- najveća moguća brzina detonacije,
- maksimalna stabilnost, odnosno nepromjenljivost fizičkih, hemijskih i eksplozivnih karakteristika za određeni (što duži) vremenski period,
- da se dobro ulivaju pri livenju, presuju, odnosno povoljno prerađuju i dobro pune predviđeni prostor,
- da im je što manja osjetljivost na spoljnja dejstva, i
- da je sirovinska baza dovoljno široka i jeftina, a proizvodnja bezbjedna.

Reakcija detonacije može se izazvati transferom energije na dva načina:

- DDT (eng. Deflagration-to-Detonation-Transition) - prelazak deflagracije u detonaciju, i
- SDT (eng. Shock-to-Detonation-Transition) - prelazak šoka u detonaciju.

Kod DDT metode (sl. 1.2.2.3) eksploziv deflagrira, i interferencijom udarnih talasa ta deflagracija prelazi u detonaciju. Glavni parametri koji su odgovorni za ubrzanje reakcije su, između ostalih, energija oslobođena reakcijom i brzina generisanja gasova. Ova dva parametra direktno su povezana sa sastavom eksploziva i hemijskom strukturom njegovih komponenti. Metalno tijelo bojeve glave igra, također, važnu ulogu u ovom procesu. Tijelo bojeve glave spriječava prijevremeni izlazak gasova tokom procesa. Pritisak produkata detonacije se povećava, što ubrzava reakciju do deflagracije, a zatim dovodi i do detonacije.



Slika 1.2.2.3 Shema metoda iniciranja eksploziva, DDT i SDT mehanizam

Mehanizam iniciranja eksplozivnog punjenja kod HE bojevih glava baziran je na iniciranju udarnim talasom. Za ovaj tip iniciranja, poznat kao SDT (sl. 1.2.2.3) mehanizam iniciranja, definiše se kritična energija potrebna za inicijaciju. Važni parametri kod SDT mehanizma inicijacije su gustina eksplozivnog materijala i brzina zvuka kroz dati materijal. Punjenja manje gustine je lakše inicirati SDT mehanizmom. Zbog ove činjenice booster punjenja u inicijalnom lancu obično imaju manje gustine.

1.2.3 Tijelo bojeve glave (košuljica)

Omotač, tijelo ili košuljica bojeve glave služi za smještanje energetskog dijela bojeve glave, eksplozivnog punjenja, i upaljača. Istovremeno, košuljica štiti eksplozivno punjenje od vanjskih, mehaničkih i atmosferskih uticaja, a u toku kretanja kroz cijev vatrenog oružja, odnosno na aktivnom dijelu putanje, osigurava strukturalni integritet bojeve glave, odnosno projektila.

Na tijelu bojeve glave nalaze se obično dva centrirajuća prstena. To su cilindrične, fino obrađene površine na tijelu, čije dimenzije omogućavaju projektilu da klizi po unutrašnjim poljima cijevi oružja. Prva centrirajuća površina je na spoju prednjeg aerodinamičnog profila i srednjeg cilindričnog dijela tijela projektila, dok druga centrirajuća površina spaja srednji cilindrični dio projektila i zadnji konusni dio projektila.

Kod artiljerijskih projektila, na zadnjem dijelu projektila u tijelo je utisnut vodeći prsten, izrađen najčešće od bakra. Osnovna funkcija vodećeg prstena je da ostvari obrtno kretanje projektila oko njegove uzdužne ose pri kretanju projektila kroz cijev. To se postiže tako što se dio vodećeg prstena (vanski prečnik je veći od kalibra projektila i maksimalnog prečnika u žlijebovima cijevi oružja) pod dejstvom produkata sagorijevanja pogonskog punjenja deformira i urezuje u zavojne žlijebove cijevi oružja. Pored toga, vodeći prsten sprečava prodor produkta sagorijevanja pogonskog punjenja između unutrašnje površine cijevi oružja i spoljašnje površine projektila.

Metalni fragmenti nastali razaranjem tijela bojeve glave imaju dovoljnu energiju da probiju metu i nanesu velika oštećenja neprijatelju. Udarni talasi i talasi impulsnog pritiska, nastali detonacijom bojeve glave smatraju se sekundarnim efektom. Pri dizajniranju bojeve glave naglasak se stavlja na oblik fragmenata, gustinu, masu i njihovu brzinu. Konstruktor bojeve glave pri njenom dizajniranju teži odabiru takvog materijala tijela bojeve glave da se ona prilikom procesa fragmentacije dezintegriše u fragmente specifične veličine koji osiguravaju maksimalnu štetu protivniku [1].

Mehaničke karakteristike materijala tijela bojeve glave, gustina, dostupnost i cijena igraju značajnu ulogu u odabiru materijala.

Od mehaničkih faktora koji utiču na fragmentaciju košuljice od najvećeg uticaja su:

- žilavost,
- čvrstoća, i
- granica razvlačenja materijala košuljice.

Fragmenti nastali fragmentacijom materijala velike žilavosti imaju uglavnom oblik sječiva, s oštrim ivicama, i redovno su mnogo teži nego fragmenti nastali od krtog materijala. Krt materijal daje fragmente oblika kocke i paralelepipeda, manjih dimenzija i težine, a znatan dio početne mase košuljice gubi se u fragmente veoma malih dimenzija i u prašinu.

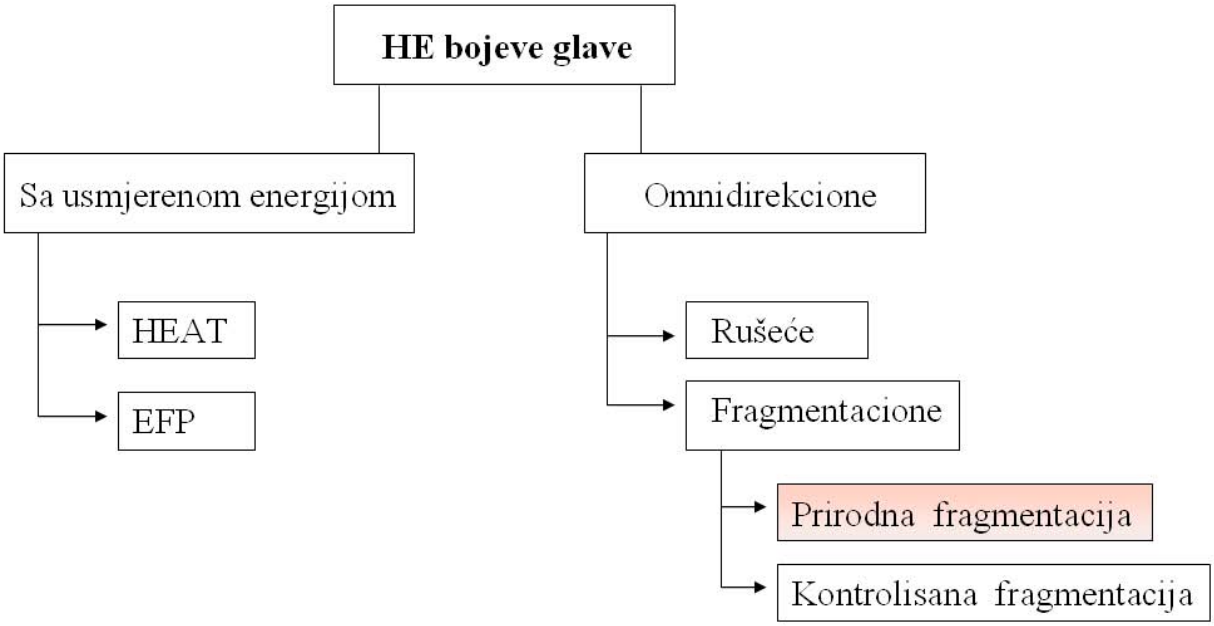
Termička obrada čelika može znatno uticati na fragmentaciju. Određivanje optimalnog režima obrade, za svaku vrstu municijskog čelika i dimenzije bojeve glave, redovno zahtjeva obimna eksperimentalna istraživanja.

Najpopularniji materijal koji se koristi za izradu košuljica HE bojeve glave svakako je čelik. Čelik je dostupan materijal, lako se obrađuje, a njegova gustina čini ga pogodnim za odabir kod košuljica bojevih glava čiji fragmenti imaju veliku moć probijanja.

Pri procesu dizajniranja, kod odabira materijala za izradu košuljice, moraju se razmatrati i karakteristike mete. Kod određenih meta nije potrebna velika brzina fragmenata za njihovo probijanje, dok druge zahtjevaju fragmente velikih brzina i velike moći probijanja.

1.2.4 Vrste HE bojevih glava

HE bojeve glave mogu generalno se klasificirati u dvije kategorije [2]: bojeve glave sa usmjerenom energijom i omnidirekcione bojeve glave, kao što se vidi sa slike 1.2.4.



Slika 1.2.4 Klasifikacija HE bojevih glava

U bojeve glave sa usmjerenom energijom spadaju kumulativne bojeve glave (HEAT - eng. High Explosive Anti Tank) i eksplozivno formirani penetratori (EFP - eng. Explosively Formed Penetrator).

Omnidirekcione bojeve glave odlikuju se dejstvom u svim pravcima oko bojeve glave. Mogu se klasificirati kao bojeve glave sa udarnim (rušećim) efektom (eng. Blast Warheads) i bojeve glave sa fragmentacionim (parčadnim) dejstvom (eng. Fragmentation Warheads).

Bojeve glave s rušećim dejstvom koriste udarni talas nastao detonacijom eksploziva, što rezultira velikim povećanjem pritiska u prostoru oko bojeve glave i uzrokuje značajna oštećenja na meti. Ove bojeve glave obično imaju i ograničenu sposobnost fragmentacije.

Bojeve glave sa fragmentacionim dejstvom ili fragmentacione bojeve glave spadaju u omnidirekcione bojeve glave. One koriste energiju eksploziva za širenje košuljice i njeno razaranje u veliki broj fragmenata.

Fragmenti ovih bojevih glava mogu nastati na tri načina:

- prirodnom fragmentacijom, u kojoj je veličina fragmenta kontrolisana samo prirodnim mehaničkim osobinama materijala komponenata bojeve glave,
- kontrolisanom fragmentacijom, kod kojih je košuljica dizajnirana tako da proizvede fragmente odabrane veličine, i
- preformiranjem fragmenata, kod koje su fragmenti već proizvedeni i ugrađeni u matricu košuljice bojeve glave.

Za razliku od kumulativnih bojevih glava, bojeve glave sa fragmentacionim dejstvom imaju izotropnu fragmentaciju. Prilikom detonacije, eksploziv u veoma kratkom vremenu (reda mikrosekundi) širi košuljicu bojeve glave koja se razara u veliki broj fragmenata u prostoru oko bojeve glave.

1.2.5 Bojeve glave sa kontrolisanom fragmentacijom

Kod omnidirekcionih HE bojevih glava sa kontrolisanom fragmentacijom postoje različite metode kojim se kontroliše oblik i veličina fragmenata.

Jedan od najočiglednijih pristupa je upotreba postojeće bojeve glave sa prirodnom fragmentacijom. Potrebno je napraviti ureze u stjenku košuljice bojeve glave sa prirodnom fragmentacijom kako bi dobili područja većeg naprezanja koja omogućavaju da se košuljica fragmentira na već određenim lokacijama. Time se može kontrolisati veličina i oblik fragmenata. Eksperimentalni podaci pokazuju da su unutrašnji urezi daleko superiorniji od spoljašnjih u mogućnosti da proizvedu kontrolisanu veličinu fragmenata. Također se pokazalo da geometrija ureza igra veliku ulogu.

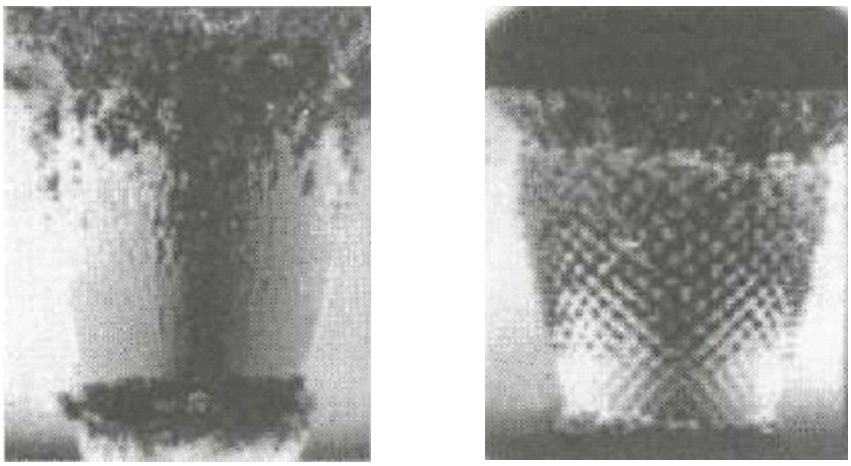
Druga metoda je korištenje preformiranih fragmenata. Ustvari, korištenje preformiranih fragmenata u obliku sfera, blokova, kocki i šipki omogućava značajnu slobodu u izboru broja i veličine fragmenata. U praksi, preformirani fragmenti su, ili ugrađeni u matricu materijala kao što je plastika, ili se nalaze između dvije tanke stjenke košuljice. Obje spomenute tehnike daju niži strukturalni integritet tijela bojeve glave. Zbog prijevremenog isticanja eksplozivnih produkata kroz matricu u košuljici bojeve glave postižu se manje brzine fragmenata, u poređenju sa bojevim glavama sa prirodnom fragmentacijom [3].

U tabeli 1.2.5 prikazani su prednosti i nedostaci omnidirekcionih HE bojevih glava sa prirodnom i kontrolisanom fragmentacijom.

Tabela 1.2.5 Prednosti i nedostaci HE bojevih glava sa fragmentacionim dejstvom [3]

Tip fragmentacije	Prednosti	Nedostaci
Prirodna fragmentacija	Jednostavna struktura, niski troškovi, visok strukturalni integritet	Fragmenti različite geometrije i mase
Kontrolisana fragmentacija	Fragmenti optimalne veličine, nizak strukturalni integritet	Veličina fragmenata zavisna od debljine zida košuljice, manje brzine fragmenata, visoki troškovi izrade

Proces proizvodnje bojevih glava sa kontrolisanom fragmentacijom mnogo je skuplji od procesa proizvodnje bojevih glava sa prirodnom fragmentacijom. Zbog toga bojeve glave sa prirodnom fragmentacijom trenutno čine najbrojniju skupinu omnidirekcionih HE bojevih glava.



a) Prirodna fragmentacija *b) Kontrolisana fragmentacija*

Slika 1.2.5. Snimak procesa prirodne (a) i kontrolisane (b) fragmentacije bojeve glave ultra-brzom kamerom [1]

Na sl. 1.2.5 prikazani su snimci ultra-brzom kamerom procesa prirodne i kontrolisane fragmentacije. Slika 1.2.5a. predstavlja početak procesa dezintegracije tijela bojeve glave sa prirodnom fragmentacijom, dok se na sl. 1.2.5.b mogu uočiti fragmenti sličnog oblika i veličine, što je karakteristično za bojeve glave sa kontrolisanom fragmentacijom.

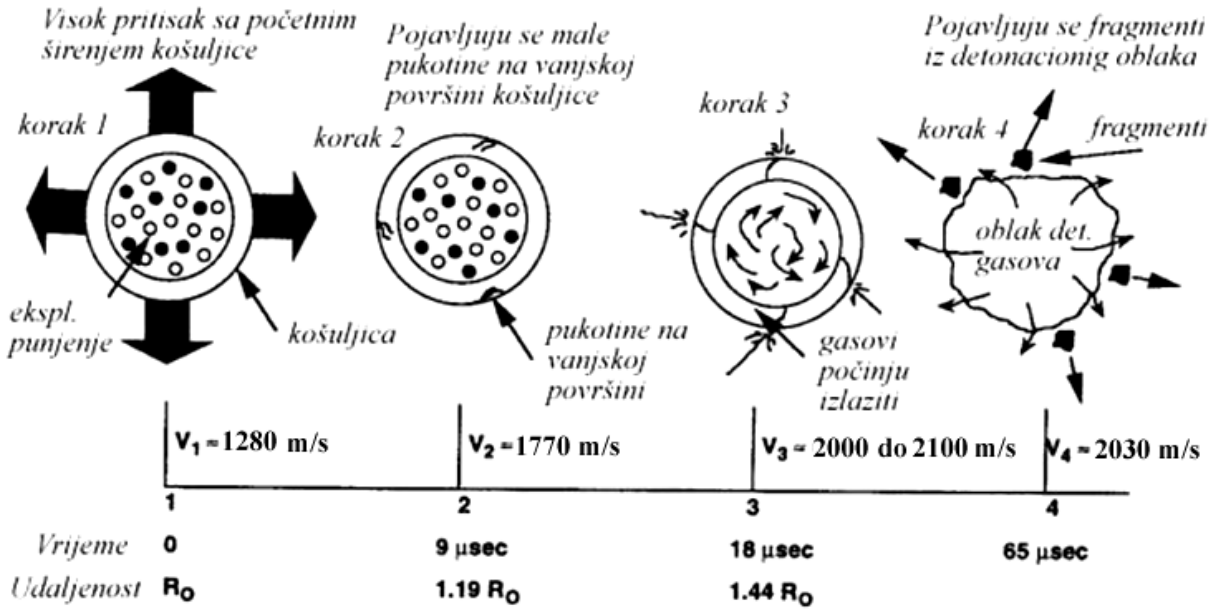
1.2.6 Bojeve glave sa prirodnom fragmentacijom

Kod HE bojevih glava sa prirodnom fragmentacijom, kao posljedica početnog detonirajućeg impulsa u upaljaču, dolazi do pretvaranja hemijske energije eksplozivnog punjenja, smještenog u tijelu (košuljici) bojeve glave, u toplotnu energiju produkata detonacije visoke temperature (reda oko 5000° C) i pritiska, u veoma kratkom vremenskom intervalu. Prilikom detonacije eksploziva unutar bojeve glave generira se veoma visok detonacioni pritisak (20 - 40 GPa) koji djeluje na košuljicu bojeve glave u vremenu od nekoliko mikrosekundi i generira napone koji su mnogo veći od zatezne čvrstoće materijala košuljice. Kao posljedica takve transformacije energije, dolazi do širenja tijela bojeve glave i njegove fragmentacije.

Prema eksperimentalnim istraživanjima, prvobitni prečnik bojeve glave povećava se i do tri puta, te dolazi do prirodne fragmentacije tijela bojeve glave. Dio energije apsorbira tijelo bojeve glave, dio se gubi dekompresijom produkata detonacije, a samo oko 30% ukupne energije produkata detonacije transformira se u kinetičku energiju fragmenata.

Pored kinetičke energije fragmenata, u zoni neposredno oko mjesta eksplozije javlja se udarni talas produkata detonacije bojeve glave. Destruktivna sposobnost udarnog talasa iz konvencionalne HE bojeve glave opada značajno sa povećanjem udaljenosti od detonacijske tačke.

Proces prirodne fragmentacije klasične bojeve glave je proces koji počinje radijalnom ekspanzijom (širenjem) tijela bojeve glave (sl. 1.2.6). Nakon iniciranja eksplozivnog punjenja (prva faza procesa) i tokom kretanja fronta detonacije duž bojeve glave, dolazi do ekstremnog povećanja pritiska u veoma kratkom vremenskom periodu. U drugoj fazi procesa tijelo bojeve glave počinje se širiti u zoni koja je zahvaćena detonacionim procesom i za otprilike 10μs počinju se pojavljivati mikro-pukotine u metalnoj strukturi bojeve glave. Pritisak produkata detonacije unutar tijela bojeve glave raste.



Slika 1.2.6 Shematski prikaz procesa prirodne fragmentacije [1]

Tijelo bojeve glave nastavlja se širiti, pri čemu su radijalna pomjeranja tijela dominantna u odnosu na aksijalna i, nakon približno 20μs (druga faza procesa), gasoviti produkti detonacije počinju izlaziti kroz pukotine na tijelu bojeve glave. Dolazi do formiranja novih pukotina i razvoja postojećih pukotina. Materijal tijela bojeve glave izložen je dinamičkom opterećenju, sa brzinom deformacije do 10^4 s^{-1}. Tijelo se nastavlja širiti sve dok unutrašnji pritisak, nastao ekspanzijom gasovitih produkata eksploziva, ne premaši strukturalnu otpornost tijela bojeve glave.

Poslije otprilike 65μs (četvrta faza) slijedi dezintegracija cjelokupnog tijela bojeve glave i nastupa proces prirodne fragmentacije (sl. 1.2.6) [1].

Prirodna fragmentacija HE bojevih glava najviše je zastupljena kod nevođenih raketnih, minobacačkih i artiljerijskih projektila. Prilikom prirodne fragmentacije bojeve glave proizvodi se veliki broj fragmenata različite mase, geometrije i brzine, čija energija probijanja zavisi od njihove mase, početne brzine i geometrijskog oblika. Zavisno od karakteristika materijala tijela bojeve glave, geometrijskog oblika unutrašnje i vanjske trase tijela bojeve glave, odnosa mase eksploziva i mase tijela bojeve glave, vrste eksplozivnog punjenja (detonacione brzine i gustine), te strukture detonacionog lanca, fragmenti imaju različitu masu, oblik i vektore brzina.

Za analizu bojevih glava sa prirodnom fragmentacijom u cilju procjene zone smrtonosnog djelovanja potrebno je poznavati:

- Geometrijske i masene karakteristike bojeve glave,
- Mehaničke karakteristike materijala tijela bojeve glave,
- Detonacione parametre eksplozivnog punjenja,
- Brzine fragmenata u trenutku fragmentacije,
- Dinamiku leta fragmenata,
- Masenu distribuciju fragmenata, i
- Prostornu distribuciju fragmenata.

Parametri procesa prirodne fragmentacije određuju se analitičkim metodama, eksperimentalnim istraživanjima, i metodama numeričkog modeliranja.

Broj fragmenata, njihova masena i prostorna distribucija određuju se eksperimentalnim metodama, kao što su Pit test (fragmentacija bojeve glave u jami) i Arena test.

Od 1970, slijedeća tri područja istraživanja dramatično su uticala na razvoj tehnologija bojevih glava:

- Razvoj i korištenje računarskih simulacionih tehnika za eksplozivne procese i terminalnu balistiku,
- Karakterizacija materijala kao odgovor na dinamičko naprezanje, kao i prepoznavanje važnosti kontrolisanih metalurških osobina i precizne obrade, i
- Korištenje eksploziva veće energije i gustine.

Korištenje dvo- i tro- dimenzionalnih računarskih kodova za mehaniku kontinuuma, tzv. hidrokodovi, značajno je uticalo na razvoj modernih bojevih glava. Ovi programi omogućuju simulaciju procesa u bojevoj glavi koji uključuju ekstremne pritiske (reda 50 GPa) tokom veoma kratkog vremena (5-100 μs). Metode hidro-dinamičkog modeliranja su postale nezamjenljiv dio u procesu dizajna bojevih glava [3].

POGLAVLJE 2

DOSADAŠNJA ISTRAŽIVANJA

2.1 Historijski prikaz istraživanja efikasnosti bojevih glava

Efikasnost HE bojevih glava, kao i drugih vrsta bojevih glava, predstavlja mjeru njihovog učinka na cilju. Kvalitetan pregled o istraživanju efikasnosti HE bojevih glava kroz historiju dali su poznati stručnjaci iz ove oblasti: Sutterlin, Dehn, i Sperazza. Uvjetno se historijski prikaz istraživanja efikasnosti ovih bojevih glava može podijeliti na period istraživanja do II svjetskog rata i period istraživanja poslije II svjetskog rata.

2.1.1 Period do II svjetskog rata

Relativno malo pažnje posvećeno je efikasnosti HE bojevih glava do II svjetskog rata. Jedan od prvih istraživača iz ove oblasti bio je francuski pukovnik Journee, koji je u članku objavljenom 1880. godine razmatrao odnos između energije puščanog projektila i stepena ranjavanja koju taj projektil može da proizvede. On je vršio opite sa duguljastim ili sfernim projektilima od olova ili od olova obloženog košuljicom od legure cinka, bakra i nikla, ili od čelika obloženog niklom. Ciljeve su predstavljali leševi ljudi ili konja.

U to vrijeme, dejstvo projektila protiv konja smatralo se isto tako važnim kao dejstvo protiv čovjeka, s obzirom na značaj konja u konjici i artiljeriji. Iz toga je proistekla tendencija da se procjeni njihova ubitačna moć, pošto su oba objekta imala istu važnost. Ljudi koji su vršili eksperimente bili su iznenađeni činjenicom da su se projektili od olova (bez košuljice) lako lomili pri udaru u tvrde prepreke, a čak i u veće kosti. Rezultati opita predstavljeni su kao funkcija količnika kinetičke energije projektila i njegovog najvećeg poprečnog presjeka, za sferne olovne projektile, sa i bez košuljice, i za duguljasta projektile. Udarne brzine su bile veoma rijetko veće od 200 m/s. Na osnovu ovih opita Journee je došao do korisnih zaključaka, a iz njih je kasnije proizašla ideja da se poveže ubitačno dejstvo sa mjerenjem prodiranja fragmenta u drvo [9].

Jedan od prvih istraživača koji je temeljito izučavao dejstvo fragmenata bio je R. H. Kent (1933. godina). On je kao mjeru efikasnosti bojevih glava sa fragmentacijom uzimao broj vojnika izbačenih iz borbenog stroja. Njegova pažnja bila je usmjerena na jednostavan slučaj vertikalne cilindrične bojeve glave koja detonira na tlu sa beskonačno dugim poljem uniformno raspoređenih, nezaklonjenih, stojećih ljudskih meta. Meta koja se nalazi na određenoj udaljenosti od centra detonacije zamijenjena je srednjom površinom svoga poprečnog presjeka, normalnom na datu udaljenost, a koju je Kent nazvao izložena površina borca.

N. A. Tolch je 1937. godine razmatrao efektivnu površinu ili efektivni radijus rasprskavanja. Efektivnu površinu je definisao kao površinu unutar koje svaka meta u prosjeku primi barem jedan smrtonosan pogodak, dok je efektivni radijus - radijus kruga efektivne površine. Generalno, smatrao je da će ova površina biti više ili manje eliptična ukoliko se osa bojeve glave nalazi pod određenim uglom, i to zbog dominantnog bočnog snopa fragmenata. Razmatrao je i uticaj padne brzine bojeve glave, i procijenio da ona utiče na efikasnost na taj način da se bočni snop fragmenata pomjeri prema prednjem dijelu bojeve glave, što za posljedicu ima to da je snop fragmenata iz zadnjeg dijela bojeve glave još manje efikasan. Tolch je zaključio da visina mete bitno utiče na efektivnu površinu djelovanja, ali se zadovoljio sa srednjom vrijednošću izložene površine borca. Dvije godine kasnije Tolch je objavio izvještaj u kojem razmatra efekte terena (rikošet, vrsta terena) na efikasnost bojeve glave, kao i trajektoriju fragmenta. On je naznačio da model koji definiše efikasnost bojeve glave na osnovu idealiziranih testova u Areni neće u potpunosti odgovarati realnoj slici na bojištu. Međutim, iz takvih analiza mogu se izvući važni zaključci, usporediti relativne efikasnosti različitih bojevih glava, pod različitim uvjetima primjene.

G. Birkhoff, W. F Davidson, D. R. Inglis, J. V. Neumann i W. Weaver su 1942. godine napisali studiju o vjerovatnoći onesposobljavanja bojevim glavama sa vremenskim i blizinskim upaljačima. Oni su koristili Gausovu distribuciju kako bi opisali vjerovatnoću da će se detonacija bojeve glave dogoditi neposredno u blizini mete. Također su koristili Poasonovu distribuciju kako bi predstavili uslovnu vjerovatnoću da će barem jedan pogodak fragmentom u metu biti smrtonosan, slijedeći praksu Pearson-a i Welch-a u Engleskoj. Koristili su zakon otpora fragmenta prilikom njegovog kretanja kroz atmosferu.

Nedugo nakon toga, D. G. Kendal napisao je sličan rad o efikasnosti bojevih glava sa vremenskim i blizinskim upaljačima, ali za raketne projektile. Zaključio je da zbog toga što su naprezanja strukture raketnih projektila u cijevi mnogo manja nego kod artiljerijskih, umjesto bojeve glave sa prirodnom fragmentacijom, može se koristiti prefragmentirana bojeva glava.

E. S. Pearson i D. J. Bishop su 1942. godine diskutovali rezultate ispaljenja fragmenata različitih veličina i oblika (pravougle ploče različite veličine i mase) iz topova namijenjenih za takvu vrstu testiranja. Primjetili su linearnu promjenu brzine fragmenata sa udaljenosti. G. I. Taylor je 1940. godine primjetio da de će pravougli blokovi dimenzija *a*, *b* i *c*, nakon ispaljenja iz topova, vjerovatno rotirati tako da će se sve izložene površine, relativne na putanju leta, pojaviti otprilike sa istom frekvencijom. Taylor je dao izraz za prosječnu izloženu površinu takvih fragmenata kao jednu četvrtinu njegove ukupne površine, na osnovu koje su Pearson i Bishop pokušavali da procjene vrijednost faktora oblika *k* fragmenata za čelične fragmenate. Njihov bazični rad kasnije je korišten od strane mnogih engleskih naučnika, gdje su varirani različiti oblici, veličine i početne brzine fragmenata kako bi se odredio koeficijent oblika fragmenata.

N. F. Mott je 1942. godine napisao je rad o metodama odabira fragmenata optimalne veličine koji bi se koristili kod bojevih glava sa kontrolisanom fragmentacijom. Mott je pretpostavio da bojeva glava koja detonira ima uniformnu, slučajnu distribuciju *N* identičnih fragmenata gdje se svaki fragment kreće do određene udaljenosti, prije nego postane neefikasan. Koristio je poasonovu distribuciju za određivanje vjerovatnoće onesposobljavanja. Usvojio je kriterij smrtonosnosti baziran na momentu kretanja potrebnom da se probije meta određene debljine. U kasnijem radu, 1943. godine, Mott je uporedio efikasnost fragmenata kod kontrolisane i prirodne fragmentacije. Zaključio je da je vjerovatnoća oštećenja veoma neosjetljiva na promjenu srednje veličine fragmenta, te da se ne može poboljšati za više od 20% koristeći metod kontrolisane fragmentacije.

U međuvremenu slične studije provodio je prof. Marston Morse, u Vašingtonu od 1943-1945. godine. On je razmatrao metodu određivanja masene distribucije kod bojevih glava sa prirodnom fragmentacijom. Morse i saradnici su 1943. godine poredili efikasnost bombe od 225kg

napunjene eksplozivom na deset različitih načina. Vršena su testiranja u Pit testu, Arena testu, i određivali su, također, broj prodora, zadora, mjerili brzine fragmenata, itd.

Blizinski upaljači bili su dostupni već 1943. godine, pa se pojavilo nekoliko radova koji opisuju optimalnu visinu detonacije kod bojevih glava sa takvom vrstom upaljača koje djeluju protiv trupa na terenu. Birkhoff i Lewy su poredili rezultate četiri takva izvještaja sa eksperimenalnim podacima i našli zadovoljavajuće slaganje o optimalnoj visini detonacije. Izvjestili su da se sve studije slažu da će varijacija od ± 20% u optimalnoj visini detonacije smanjiti efikasnost HE bojeve glave najviše do 10%. Unutar ovih granica, rezultati sve četiri studije dobro se slažu, iako su studije koristile drugačije matematičke formulacije.

R. W. Gurney je 1943. godine, koristeći izraz za energetski balans (energija eksploziva pretvara se u kinetičku energiju metalnih fragmenata i kinetičku energiju produkata detonacije) izveo analitičke izraze za početnu brzinu fragmenata kod cilindričnih i sferičnih bojevih glava napunjenih jakim sekundarnim eksplozivom. Njegova metoda i danas je u primjeni, i za različite geometrije bojeve glave postoje različiti oblici Gurney formule.

U SAD-u su Schwartzschild i Sachs 1943. godine, koristeći kamere sa ultrabrzim snimcima, pokušavali da eksperimentalno odrede početne brzine fragmenata i njihov otpor prilikom kretanja kroz atmosferu. Orijentacija fragmenata u letu nije se mogla odrediti zbog velike udaljenosti između kamera i tačke detonacije. W. F. Braun, L. H. Thomas i A. C. Charters su 1943. godine istraživali otpor fragmenata baziran na minimalnoj i maksimalnoj mogućoj površini fragmenata, kao i otpor prosječne površine fragmenta aproksimiranog kao elipsoida, kao što su sugerisali Schwartzschild i Sachs. Iako je primjećena rotacija fragmenta u letu, njenu pravu prirodu nisu mogli objasniti.

Na prijedlog Morsa i saradnika, 1944. godine, mnogi istraživači počeli su da mjere srednju izloženu površinu fragmenata, prihvatajući hipotezu o njihovoj slučajnoj rotaciji tokom leta. Tako su 1944. godine M. H. Simpson i A. V. Bushkovitch napravili aparat za mjerenje dvadeset uniformno distribuiranih orijentacija fragmenata u letu, projektujući sjenu fragmenata prema smjerovima koji odgovaraju stranicama ikosahedrona, poliedra sa dvadeset stranica. Bio je to prvi sistematičan način da se eksperimentalno odredi srednji koeficijent oblika fragmenta. Paralelna istraživanja vršena su i u Engleskoj.

Englezi su uzeli aktivno učešće kod definisanja efikasnosti HE bojevih glava protiv ljudskih meta. Pearson i saradnici su 1944. godine uveli naziv smrtonosna površina (eng. Lethal Area). Smrtonosna površina je izračunata integrirajući funkciju vjerovatnoće onesposobljavanja za sve moguće položaje na terenu, koristeći poasonovu distribuciju. Definisali su smrtonosnu površinu kao parametar efikasnosti (ili indeks žrtava) koji kada se pomnoži sa brojem meta po jedinici površine daje očekivani broj žrtava [48].

Tokom II svjetskog rata u Engleskoj, N. F. Mott i E. H. Linfoot su 1943. godine pokušavali da procjene broj fragmenata nastalih detonacijom HE bojevih glava. Koristili su eksperimentalnu statistiku, naime, razmatrali su idealiziran slučaj kružnog metalnog cilindra gdje su analizirali srednju masu sakupljenih fragmenata. Metodologija analiziranja masene distribucije fragmenata po Mott-u i danas je u upotrebi, uz određene modifikacije i proširenja [49].

2.1.2 Period poslije II svjetskog rata

Poslije II svjetskog rata dosta pažnje bilo je usmjereno na proučavanje efikasnosti protiv-avionske municije i njihove efikasnosti. Ranjivost komponenti aviona, kao što su spremnik za goriva ili municiju, bili su važni parametri prilikom tih istraživanja.

Godine 1946, V. Fano zaključio je da pouzdana procjena efikasnosti nije moguća zbog nedovoljnog znanja o karakteristikama ranjivosti meta, te da se svaka meta mora prvo

okarakterisati dostupnim informacijama, pa tek onda vršiti procjenu efikasnosti date bojeve glave.

W. C. Taylor i S. Kravitz su 1951. godine modifikovali radove Lewy-ja i Gurney-a, mijenjajući integracione varijable u njihovim proračunima. Oni su aproksimirali funkciju vjerovatnoće onesposobljavanja upotrebljavajući empirijske konstante.

Kent je 1951. godine istraživao uticaj geometrije bojevih glava na njihovu efikasnost. Razmatrao je mogućnost da ako su ljudske mete uniformno raspoređene na terenu, onda je od praktičnog interesa da se dizajnira bojeva glava koja ima uniformno raspoređene fragmente nakon procesa detonacije. Razmatrao je, također, padanje bojevih glava vertikalno, i detonaciju bojeve glave na određenoj visini. Njegova ideja o promjeni oblika bojeve glave stimulisala je mnoge autore koji su krenuli istim pravcem istraživanja.

H. K Weiss je 1952. godine, koristeći slične pretpostavke kao i Kent, razmatrao metode određivanja optimalne ugaone distribucije fragmenata. Njegov zaključak bio je da broj fragmenata treba da se poveća idući od ugla mjerenim od vrha projektila. U kasnijim radovima Weiss je razmatrao uticaj padnih brzina bojeve glave na njenu efikasnost. Zaključio je da zbog toga što efikasnost zavisi od broja fragmenata i njihove brzine, smatrao je da mora za datu masu bojeve glave postojati optimalan odnos mase eksploziva prema masi košuljice, jer veća masa eksploziva daje veće brzine fragmenata, a veća masa košuljice daje veći broj fragmenata.

Myers je 1963. godine kodificirao i modifikovao izraze Weiss-a, te uključio rušeće efekte HE bojeve glave. Koristio je numeričke metode i njegov rad je postao svojevrsni standard u svijetu. Njegov model uključivao je skoro sve faktore za koje se smatralo da su bitni u analizi efikasnosti bojevih glava.

Da bi se razmatrala kompleksnost problema, druga metoda (metoda Monte Carlo) usvojena je umjesto različitih analitičkih metoda koje su važile do 50-tih godina XX vijeka. F. G. King je opisao primjenu metode Monte Carlo 1950. godine. Njegov rad (King-ov Lotto metod) smatra se pretečom tzv. End-game analiza koje se koriste i danas u vojnim aplikacijama širom svijeta.

Godine 1953. M. L. Juncosa i D. M. Young kompjuterizirali su King-ovu metodu nakon zamjene jednog njenog dijela matematičkim pretpostavkama. Oni su usvojili pretpostavku koju su pripisali von Neumann-u da smrtonosna zona komponenti aviona bude zamijenjena elipsoidima koji liče na njegove dijelove (spremnik goriva, krila i motori). Zamijenili su sve ranjive komponente tačkama kako bi pojednostavili model gdje su dijelova aviona predstavljeni kao elipsoidi.

A. D. Steigler je 1960. godine modificirao metod Juncosa i Young-a, a njegov rad modifikovao je B. G. Monks 1965. godine, čije različite tehnike i modeli se koriste i danas. On je smatrao da prilikom upotrebe bilo kojeg metoda za procjenu efikasnosti bojeve glave, postoji potreba za informacijama o ranjivim površinama mete ili vjerovatnoćama onesposobljavanja, jer se municija i mete neprestano mijenjaju [48].

M. Held je 1968. godine, koristeći rendgenske fotografije i eksperimentalna istraživanja, analizirao masenu distribuciju fragmenata. Held je uveo empirijske izraze koji definišu zavisnost između kumulativne mase fragmenata i broja fragmenata, te zavisnost mase fragmenta od kumulativnog broja fragmenata. Held-ova metodologija i danas se koristi jer daje odličan opis masene distribucije kod bojevih glava sa prirodnom fragmentacijom.

R. Sutterlin je u svojoj knjizi "Cours de munitions", objavljenoj 1966. godine, naveo eksperimente dr. Schall-a koji je koristio šuplje staklene cilindre laborisane eksplozivom, i koji su inicirani sa jedne strane, kako bi analizirao ugao vektora početne brzine fragmenata. Rendgenskom fotografijom određen je poluugao otvora stjenki nakon detonacije za različite vrijednosti odnosa mase stjenki od stakla prema masi eksploziva.

Lukanov je proširio opite na čelične košuljice za odnose mase stjenki prema masi eksploziva do 12. Zaključio je da pri spomenutom odnosu većem od 2 dolazi do većeg uticaja žilavosti materijala stjenke; žilavi materijali zahtijevaju veći utrošak energije. Naglasio je i to da početna brzina fragmenata, u funkciji odnosa mase stjenke prema masi eksploziva, opada brže za žilavi čelik nego za staklo ili krti čelik.

Lukanov i Moritz razradili su teoriju o početnoj brzini fragmenata u kojoj dolazi do izražaja energija eksploziva po jedinici mase, koeficijent iskoristivosti energije eksplozivnog punjenja i deformaciona energija po jedinici mase košuljice. Inače, Lukanov i Moritz bili su saradnici poznate njemačko-francuske laboratorije za balistička istraživanja u Saint Louis-u, osnovane poslije II svjetskog rata.

Mjerenja ugla vektora početne brzine fragmenata vršili su u SAD-u F. E. Allison i R. W. Watson, 1960. godine. Oni su rasprskavali šuplji čelični cilindar, laborisan jakim sekundarnim eksplozivom, u jednom limenom cilindru, u kojem su cilindar sa eksplozivom postavljali ekscentrično. Fragmenti su vršili niz probijanja koja se nalaze između dva eliptična presjeka cilindra. Iz toga su približno određivali ugao vektora početne brzine fragmenata koji su se dosta dobro poklapali sa teoretskim proračunima [9].

Gabeaud je razmatrajući problem efikasnosti razornih projektila, opisao postupak određivanja početne brzine fragmenata na osnovu pritiska produkata detonacije u određenom trenutku, gustine materijala košuljice i debljine zida košuljice bojeve glave. On je razmatrao već formirane fragmente, zanemarujući rad produkata detonacije utrošen na razaranje košuljice.

Stanjukovičeva metoda određivanja početne brzine fragmenata zasnivala se na hipotezi o trenutnoj detonaciji. On je posmatrao cilindričnu košuljicu ispunjenu eksplozivom, zatvorenu sa oba kraja, i zanemarujući gubitke energije. Stanjukovič je razmatrao i uticaj dužine cilindrične košuljice na početnu brzinu fragmenata, gdje je uzeo u obzir i uticaj talasa razrijeđenja na veličinu pritiska u produktima detonacije, odnosno vrijednost impulsa koji se prenosi na košuljicu [6].

Sutterlin u svojoj knjizi analizira pojam efikasnog fragmenta, i tvrdi da je potrebno definirati minimalnu vrijednost neke dinamičke karakteristike fragmenta (brzina, količina kretanja, ili sl.). Razumljivo je da ubitačna moć mora da zavisi od mjesta udara u čovječje tijelo, kao i od sredine kroz koju prolazi. Mali fragment može biti ubitačan ako prolazi kroz neki vitalni organ tijela, dok veliki fragment može prouzrokovati samo ograničeno oštećenje ako pogodi manje važan organ. U Francuskoj se koristila metoda "sve ili ništa", koja kaže da je fragment efikasan ukoliko raspolaže određenom energijom, ili ako ima moć probijanja u drvenu metu utvrđene debljine koja predstavlja model čovjeka. Prema američkoj metodi može se posmatrati fragment, kome se odredi vjerovatnoća onesposobljavanja protivnika (između 0 i 1), zatim se ona statistički korelira, za razne vrste fragmenata, sa jednim od parametara koji ih karakterišu (broj fragmenata, početna brzina, količina kretanja, i sl.) [9].

W. P. Johnson u radu 1975. godine naglašava da je za datu masu fragmenta koji pogađa metu pod određenim uglom vjerovatnoća pogađanja - funkcija brzine udara. Smatrao je da postoji granična brzina fragmenata ispod koje je vjerovatnoća onesposobljavanja mete jednaka nuli [48].

Zadnjih trideset godina intenzivno se radi na razvoju kompjuterskih programa koji na različite načine pokušavaju predvidjeti efikasnost HE bojevih glava. I pored mnogo eksperimentalnih podataka, analitičkih i numeričkih metoda, još uvijek ne postoji univerzalni model kojim se opisuju svi parametri koji utiču na zonu smrtonosnog efekta HE bojevih glava sa prirodnom fragmentacijom.

Kompleksnost problematike određivanja efikasnosti bojevih glava najbolje je opisao G. C. Capillo koji je 1976. godine rekao da procjena smrtonosne zone bojevih glava predstavlja empirijsko razmatranje koje se bazira na interpretaciji historijskih podataka, eksperimentalnih testova, ograničenih analitičkih metoda, inžinjerskog iskustva i sopstvene procjene istraživača.

2.2 Parametri eksplozivnih materija HE bojeve glave

2.2.1 Uvod

Eksplozija se u općem smislu definira kao proces vrlo brze fizičke ili hemijske pretvorbe sistema uz prijelaz njegove potencijalne energije u mehanički rad (Baum et al., 1975). Rad koji izvrši eksplozija rezultat je naglog širenja gasova ili para, neovisno o tome jesu li oni postojali prije ili su nastali tijekom eksplozije. Najvažnije obilježje eksplozije jest nagli skok pritiska u sredini koja neposredno okružuje mjesto eksplozije. To je ujedno i uzrok snažnog razornog djelovanja eksplozije [58].

Eksplozije uzrokovane hemijskom pretvorbom, tj. brzim hemijskim reakcijama u kojima se oslobađa toplota i stvara velika količina gasovitih produkata, nazivaju se hemijske eksplozije. Pri hemijskoj eksploziji dolazi do odvijanja brzih hemijskih reakcija rezultat kojih je nastajanje gasovitih produkata i oslobađanje toplotne energije. Brzina odvijanja tih reakcija ekstremno je velika, a time i brzina nastajanja gasovitih produkata. Primjera radi, brzina nastajanja gasovitih produkata pri detonaciji toliko je velika (~100 $dm^3/\mu s$) da se prije završe reakcije po cijeloj eksplozivnoj materiji nego što nastali produkti uspiju značajnije ekspandirati na okolinu. Temperatura na koju su zagrijani nastali produkti iznosi nekoliko hiljada stepeni, i u trenutku završetka hemijskih reakcija nastali gasoviti produkti nalaze se pod vrlo visokim pritiskom - do nekoliko stotina hiljada bara. Zbog toga, u narednom trenutku oni naglo i snažno ekspandiraju vršeći snažno udarno djelovanje na okolnu sredinu [58].

Hemijski spojevi kod kojih se pod djelovanjem nekog vanjskog impulsa (npr. topline, udara, trenja i sl.) može izazvati brza hemijska pretvorba praćena oslobađanjem topline i nastajanjem vrlo zagrijanih gasovitih produkata, nazivaju se eksplozivnim materijama. Često se koristi i naziv energetske materije, čime se naglašava da su eksplozivne materije samo izvor specifičnog oblika energije - energije visoke volumne i vremenske koncentracije [58].

Brzina procesa je najkarakterističnije obilježje eksplozivnog procesa. Primjera radi, eksplozivna pretvorba 1 kg trinitrotoluena završi se za oko 10^{-5} s, dok 1 kg nafte sagorijeva 5 - 10 minuta, a 1 kg drveta 10 - 15 minuta. Otuda slijedi da je snaga (snaga = rad/vrijeme) koja se dobije eksplozivnom pretvorbom 1 kg trinitrotoluena oko $5 \cdot 10^8$ kW, dok je snaga koja se dobije sagorijevanjem 1 kg drveta oko 15 kW, a nafte oko 18 kW. Iz ovih podataka vidljivo je koliko se golema koncentracija energije ostvaruje pri eksplozivnom procesu. Visoka koncentracija energije upravo je to što eksplozivne materije čini specifičnim izvorom energije [58].

Ovisno o uvjetima iniciranja hemijskih reakcija, svojstvima eksplozivne materije te nekim drugim faktorima, reakcije eksplozivne hemijske pretvorbe mogu se odvijati preka tri osnovna mehanizma: sagorijevanjem, deflagracijom i detonacijom. Ta su tri mehanizma bitno različita, ne samo po brzini odvijanja, nego i po načinu prenošenja dijela oslobođene energije na neizreagirani dio eksplozivne materije [58].

2.2.2 Sagorijevanje eksplozivnih materija

Projektili se ispaljuju iz cijevi oružja uslijed dejstva produkata sagorijevanja barutnog punjenja na dno projektila iz cijevi oružja. Zato je razumijevanje parametara procesa sagorijevanja važno u procesu dizajna municije.

Pod pojmom sagorijevanje u najširem smislu riječi podrazumijeva se svaka oksidacijska reakcija, pa i ona koja se odvija uz sudjelovanje kisika iz okolne atmosfere (Kohler i Meyer, 1993). Međutim, pod pojmom sagorijevanje eksplozivne materije misli se na egzotermne oksidacijske reakcije koje se odvijaju po površini eksplozivne materije, a energetski se

podržavaju prijenosom topline s vrućih gasovitih materija odvija bez sudjelovanja kisika iz atmosfere [58].

Sagorijevanje eksplozivnih materija odvija se relativno sporo – od nekoliko milimetara do nekoliko metara u sekundi. Teoretski je gornja granica brzine sagorijevanja jednaka brzini zvuka kroz datu eksplozivnu materiju. Kako brzina zvuka u kondenziranim eksplozivnim materijama može premašiti i 1000 m/s, to znači da i brzina njihovog sagorijevanja može iznositi i preko 1000m/s. Sagorijevanje eksplozivnih materija na atmosferskom pritisku odvija se relativno sporo i nije praćeno značajnijim zvučnim efektom. U ograničenom volumenu sagorijevanje se odvija znatno energičnije i karakterizira se, manje ili više, brzim porastom pritiska i sposobnošću gasovitih produkata da obave rad kao što je npr. izbacivanje projektila iz cijevi oružja.

Kvantitativno se brzina sagorijevanja može izraziti na dva načina – putem linearne brzine sagorijevanja (koja se definira kao brzina prostiranja hemijskih reakcija, odnosno fronte plamena u unutrašnjost eksplozivne materije, okomito u odnosu na bilo koju površinu sagorijevanja) i putem volumne ili masene brzine sagorijevanja (volumna brzina sagorijevanja definira se kao brzina smanjenja volumena eksplozivne materije, a masena brzina kao brzina smanjenja mase eksplozivne materije) [58].

2.2.3 Deflagracija eksplozivnih materija

Deflagracija je prelazno stanje između sagorijevanja i detonacije. Kod energetskih materijala sa velikom površinom sagorijevanja, kod konventivnog procesa gorenja, moguć je razvoj reakcije u deflagraciju. Tada se vrijednost linearne brzine sagorijevanja povećava i ona postiže brzinu zvuka u materijalu. Javljaju se prvi udarni talasi u materijalu.

Reakcija deflagracije fizički je nestabilna i teško ju je držati pod kontrolom. Zavisno od tipa eksploziva, njegove površine sagorijevanja u tom momentu i metalnog tijela projektila, može se desiti da se reakcija nastavi ubrzavati do supersoničnih brzina kada nastupa detonacija [58].

2.2.4 Detonacija eksplozivnih materija

Pri susretu HE bojeve glave sa ciljem dolazi do detonacije glavnog eksplozivnog punjenja koje se nalazi unutar tijela bojeve glave, a nakon toga i do fragmentacije tijela bojeve glave. Zato je razumijevanje procesa detonacije od velike važnosti prilikom procjene parametara koji utiču na efikasnost HE bojeve glave.

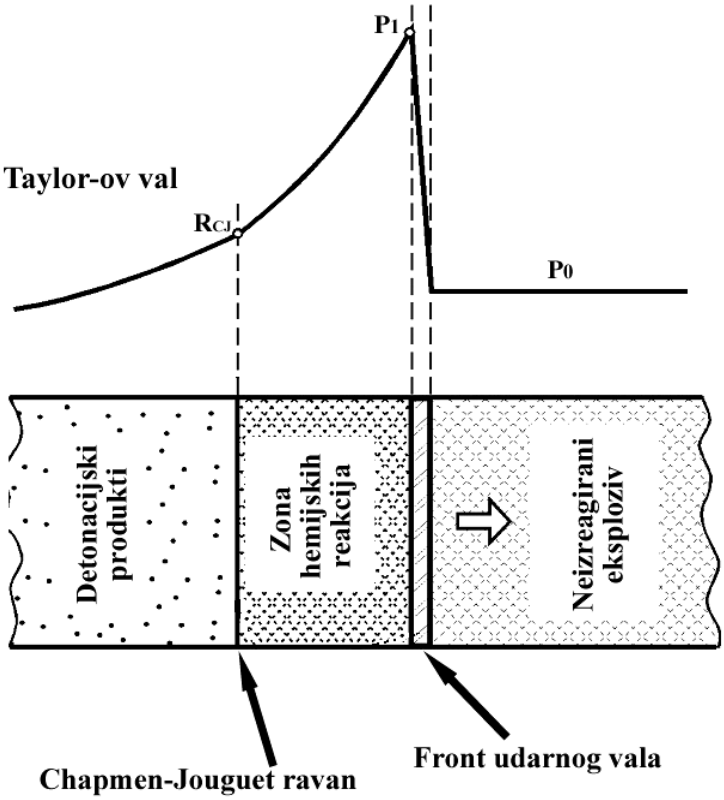
Detonacija je proces slojevitog prostiranja hemijskih reakcija po eksplozivnoj materiji nadzvučnom brzinom (Baum et al., 1975). Pri detonaciji se hemijske reakcije u neizreagiranom sloju eksplozivne materije iniciraju djelovanjem udarnog vala. Udarni val svojim udarnim djelovanjem (tj. udarnom kompresijom) izaziva adijabatsko zagrijavanje uskog sloja eksplozivne materije, što rezultira trenutnom hemijskom reakcijom u komprimiranom sloju. Potom se hemijske reakcije odvijaju tako brzo (u vremenu reda veličine mikrosekunda) da se sva toplotna energija oslobodi prije značajnijeg širenja nastalih gasovitihh produkata. U trenutku završetka hemijskih reakcija, gustina nastalih gasovitih produkata u zoni reakcija veća je za oko 30% od gustine same eksplozivne materije. Zbog tako visoke gustine i visoke temperature na koju su zagrijani, nastali se gasoviti detonacijski produkti nalaze pod ogromnim pritiskom - reda veličine 10^5 bara. Kod procesa detonacije bitno je i to da se, za razliku od sagorijevanja, nastali gasoviti produkti kreću u pravcu prostiranja detonacije [58].

Brzina kretanja zone hemijskih reakcija po eksplozivnoj materiji, tj. detonacijska brzina, uvijek je veća od brzine zvuka, a kod danas poznatih eksplozivnih materija može iznositi i preko 9000 m/s. Hemijske reakcije odvijaju se u vrlo uskom sloju eksplozivne materije (koji je kod većine jednokomponentnih eksplozivnih materija širine 20 – 100 μm), neposredno iza fronte udarnog

vala (Zukas i Walters, 1998). Front udarnog vala i zona hemijskih reakcija zajedno čine detonacijski val.

Prema prihvaćenom Zeljdovič–von Neuman–Doering modelu detonacije (tzv. ZND modelu) hemijske reakcije se odvijaju nekom konačnom brzinom unutar zone hemijskih reakcija konačnih dimenzija, a iniciraju se dinamičkim djelovanjem udarnog talasa (Mader, 1998). Sukladno ZND modelu, struktura detonacijskog procesa obuhvata (slika 2.2.4.1):

- front udarnog vala (hemijski pik ili von Neuman-ov pik)
- stacionarnu zonu hemijskih reakcija
- tzv. Chapman-Jouguet ravan
- Taylor-ov talas izentropijske ekspanzije detonacijskih produkata [58].



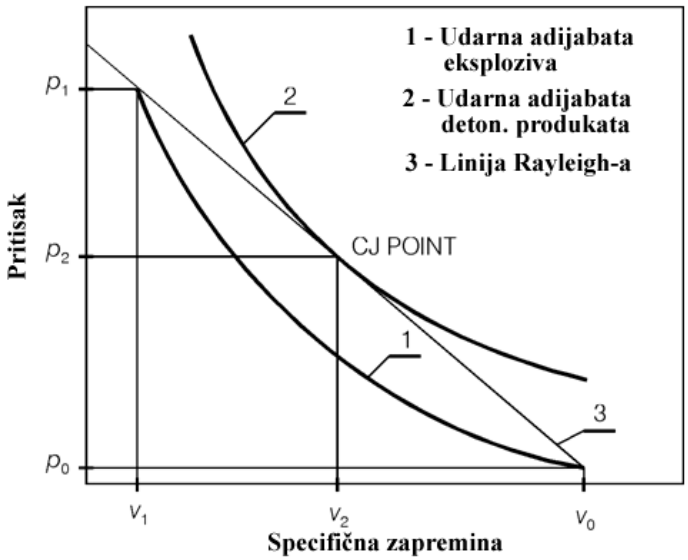
Slika 2.2.4.1 Struktura detonacijskog procesa (ZND model) [58]

Udarni val dovoljnog intenziteta u čvrstim materijama može inducirati fizičke procese (npr. pretvaranje jednog strukturnog oblika materije u drugi - faznu pretvorbu) i/ili hemijske reakcije. Ako su tako inicirane hemijske reakcije praćene oslobađanjem topline, udarni val će se moći energetski samoodržavati. Eksplozivne tvari upravo tako reagiraju na djelovanje udarnog vala (Dremin, 1990).

Pod djelovanjem udarnog vala dolazi do udarne kompresije uskog sloja eksplozivne materije (jer pri djelovanju udarnog opterećenja materijal zbog inercijskih sila ne reaguje kao cjelina, nego njegov dio po dio, od početnog volumena V_0 ($V_0 = 1/\rho_0$ – gdje je ρ_0 gustina polazne eksplozivne materije) do volumena V_1 (slika 2.2.4.2), u skladu s udarnom (ili Hugoniot-ovom) adijabatom za datu eksplozivnu materiju [58].

Zbog toga pritisak unutar komprimiranog sloja raste od početne vrijednosti p_0 do vrijednosti p_1, a temperatura od početne vrijednosti T_0 do T_1. Zbog naglog (skokovitog) rasta temperature (do 3000K) dolazi do iniciranja hemijskih reakcija u komprimiranom sloju eksplozivne materije (sl. 2.2.4.2).

Po završetku hemijskih reakcija volumen i pritisak nastalih gasovitih produkata imaju vrijednosti V_2 i p_2. To stanje odgovara točki koja leži na krivulji udarne adijabate detonacijskih produkata. Nakon toga slijedi izentropijska ekspanzija detonacijskih produkata u okolnu sredinu [58].



Slika 2.2.4.2 Udarna adijabata eksplozivne tvari i detonacijskih produkata [58]

Prema ZND modelu stacionarne detonacije, tačke (V_0, p_0), (V_1, p_1) i (V_2, p_2) leže na jednom pravcu. Taj se pravac naziva Rayleightov ili Miheljsonov pravac (Mader, 1998). Nagib Rayleight-ovog pravca određen je brzinom detonacije dotičnog eksploziva. Prema Chapman-Jouguet hipotezi, Rayleight-ov pravac je tangenta na udarnu adijabatu detonacijskih produkata u tački (V_2, p_2), koja odgovara završetku hemijskih reakcija. Ta se tačka naziva Chapman-Jouguet tačka (CJ tačka) [58].

Detonacijski se proces može opisati primjenom termodinamičkih i hidrodinamičkih zakonitosti. Stanje i kretanje materije u detonacijskom valu može se opisati zakonima o očuvanju mase, količine kretanja i energije (Mader, 1998; Baum et al., 1975):

$$\rho_0 D = \rho(D - u)$$

$$p - p_0 = \rho_0 D u$$

$$E - E_0 = \frac{1}{2}(p + p_0)(V_0 - V) \qquad (2.2.4.1)$$

gdje su:
D - detonacijska brzina,
u - brzina detonacijskih produkata, i
E - unutrašnja energija detonacijskih produkata

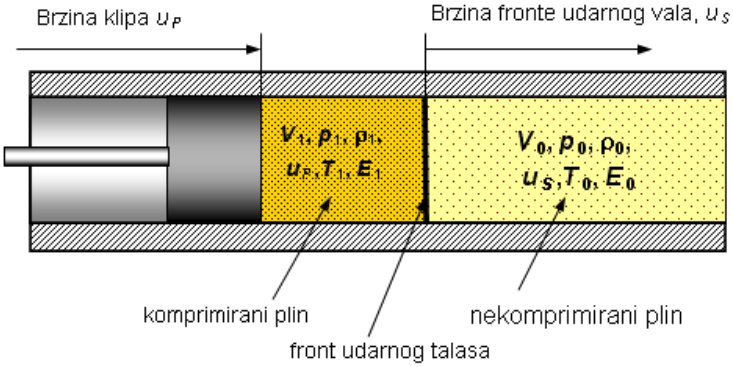
2.2.4.1. Udarni talasi

Prilikom detonacije eksplozivnog punjenja detonacijski produkti djeluju udarno na okružujuću sredinu stvarajući u njoj udarni talas - poremećaj koji se nadzvučnom brzinom kreće kroz sredinu.

To se može modelirati promatranjem stvaranja udarnog talasa u udarnoj cijevi (slika 2.2.4.1.1). Kretanje klipa sa gornje slike uzrokuje komprimiranje čestica plina u neposrednoj blizini klipa i njihovo kretanje u pravcu kretanja klipa, brzinom jednakom brzini klipa (u_P).

Komprimirani plin ima gustinu ρ_1 ($\rho_1 > \rho_0$), pritisak p_1 ($p_1 > p_0$), temperaturu T_1 ($T_1 > T_0$) i unutrašnju energiju E_1 ($E_1 > E_0$). Pritom se prijelaz iz nekomprimiranog stanja (stanje "0") u

komprimirano stanje (stanje "1") događa unutar uske fronte - fronte udarnog talasa, koja se kreće u smjeru nekomprimiranog plina brzinom u_S [58].



Slika 2.2.4.1.1 Mehanizam stvaranja udarnog talasa u udarnoj cijevi [58]

Prostiranje zvučnog talasa u zraku praćeno je malim longitudinalnim kretanjem molekula - dakle nema toka plina, a bilo kakve fizičke promjene pritome su reverzibilne. Brzina takvog talasa, tzv. lokalna brzina zvuka, određena je brzinom sudara čestica plina - dakle, približno je jednaka srednjoj kinetičkoj brzini molekula i ovisi, prije svega, o temperaturi plina.

Potpuno drugačiju situaciju imamo kada neki poremećaj djeluje na plin brzinom većom od lokalne brzine čestica plina. Evidentno je da u tom slučaju u plinu dolazi do stvaranja talasa sasvim drugačije prirode i drugačijih svojstava. Kako se čestice plina pod djelovanjem supersoničnog poremećaja (većim od lokalne brzine zvuka) mogu kretati samo brzinom zvuka, to na čelu (prednjoj fronti) tog poremećaja dolazi do porasta pritisaka, gustoće i temperature. Takav talas, koji se pomoću nekog nadzvučnog poremećaja (npr. udarom klipa koji se kreće nadzvučnom brzinom, udarom detonacijskih produkata, itd.) generira u plinu naziva se udarni talas. Njegova je fronta (čelo) vrlo strma, a karakteriziraju je nagli porast gustine, pritiska i temperature [58].

Prilikom detonacije eksplozivnog punjenja detonacijski produkti djeluju udarno na okolnu sredinu, stvarajući u njoj udarni talas - poremećaj koji se nadzvučnom brzinom kreće kroz sredinu. Detonacijski produkti imaju ulogu ″klipa″ koji udarno djeluje na okolni zrak uzrokujući stvaranje udarnog talasa. Kako se time dio energije detonacijskih produkata utroši na stvaranje udarnog talasa, oni počinju zaostajati za stvorenim udarim talasom već na odstojanju 2 - 2,5 poluprečnika eksplozivnog punjenja, a na odstojanju 10 - 15 poluprečnika punjenja njihovo kretanje u pravcu udarnog talasa praktično prestaje, te njihov pritisak poprima vrijednost pritiska okolnog zraka. Udarni se talas nastavlja kretati i energija detonacije može se prenijeti i na veća rastojanja. Tokom širenja, gubi se dio energije udarnog talasa, što rezultira postupnim padom njegove brzine i pritiska sa odstojanjem od središta detonacije. Konačno, na nekom većem rastojanju udarni talas prerasta u zvučni talas [58].

2.2.4.2 Detonacioni parametri eksploziva

Ekspanzija produkata detonacije složen je proces, zavisan od pritiska, gustine, temperature i energije produkata detonacije. Detonacija može biti opisana ili modelirana preko jednačine stanja produkata detonacije.

Jednačina stanja koju su postavili Jones, Wilkins i Lee (JWL jednačina stanja) prihvaćena je kao jednačina koja najbliže opisuje ekspanzioni proces za eksplozive koji predstavljaju gotovo idealne eksplozive, a ima oblik [2]:

$$p = A \cdot \left[1 - \left(\frac{\omega}{R_1 \cdot \bar{v}}\right)\right] \cdot e^{-R_1 \cdot \bar{v}} + B \cdot \left[1 - \left(\frac{\omega}{R_2 \cdot \bar{v}}\right)\right] \cdot e^{-R_2 \cdot \bar{v}} + \frac{\omega \cdot E_0}{\bar{v}} \qquad (2.2.4.2.1)$$

$$p_s = A \cdot e^{-R_1 \cdot \bar{v}} + B \cdot e^{-R_2 \cdot \bar{v}} + C \cdot \bar{v}^{-(\omega+1)}$$

gdje su:
p - pritisak produkata detonacije pri njihovoj ekspanziji,
p_s - pritisak produkata detonacije pri izentropskoj ekspanziji,
A, B, C - linearni koeficijenti,
R_1, R_2, ω - nelinearni koeficijenti,
E_0 - detonaciona energija po jedinici volumena,
$\bar{v} = V_1 / V_0$ - odnos volumena produkata detonacije i početnog volumena eksplozivnog punjenja.

Navedeni koeficijenti određuju se upoređivanjem JWL jednačine stanja sa eksperimentalnim podacima tokom procesa ekspanzije produkata detonacije. Ovi podaci dobijaju su primjenom Cylex testa (ekspanzija cilindričnog eksplozivnog punjenja). U tabeli 2.2.4.2.1 prikazani su parametri JWL jednačine stanja [2].

Tabela 2.2.4.2.1 Parametri JWL jednačine stanja [2]

C-J parameters			JWL EOS parameters						
Explosive	E_0, GPa-m^3/m^3	γ	A, GPa	B, GPa	C, GPa	R1	R2	ω	Ref.
Molecules			Molecules						
HMX	10.50	2.74	778.3	7.071	0.643	4.2	1	0.3	50
HNS	4.10	2.468	162.7	10.82	0.658	5.4	1.8	0.25	51
	6.00	2.881	366.5	6.75	1.163	4.8	1.4	0.32	51
	7.45	2.804	463.1	8.873	1.349	4.55	1.35	0.35	51
PETN	7.19	2.831	573.1	20.16	1.267	6	1.8	0.28	50
	8.56	2.788	625.3	23.29	1.152	5.25	1.6	0.28	50
	10.10	2.64	617	16.926	0.699	4.4	1.2	0.25	50
Tetryl	8.20	2.798	586.8	10.671	0.774	4.4	1.2	0.28	49
TNT	7.00	2.727	371.2	3.231	1.045	4.15	0.95	0.3	49
TNT-based			TNT-based						
Comp B[a]	8.50	2.706	524.2	7.678	1.082	4.2	1.1	0.34	49
Cyclotol 77/23	9.20	2.731	603.4	9.924	1.075	4.3	1.1	0.35	49
H-6	10.30	3.092	758.07	8.513	1.143	4.9	1.1	0.2	52
Octol 78/22	9.60	2.83	748.6	13.38	1.167	4.5	1.2	0.38	49
Pentolite	8.10	2.78	540.94	9.3726	1.033	4.5	1.1	0.35	53
	8.00	2.78	531.77	8.933	0.976	4.6	1.05	0.33	5
Pressed explosives			Pressed explosives						
Comp A-3	8.90	2.79	611.3	10.65	1.08	4.4	1.2	0.32	50
Other classical explosives			Other classical explosives						
Comp C-4	9.00	2.838	609.77	12.95	1.043	4.5	1.4	0.25	1
Castable PBXs			Castable PBXs						
PBXN-106	8.20	–	570.2	6.13	1.325	4.45	1.0	0.38	54
PBXN-109	10.20	–	1341.3	32.7	1.334	6.00	2.0	0.2	5
PBXN-110	8.70	3.2	950.4	10.98	1.816	5.00	1.4	0.4	55
PBXN-114	9.50	3.371	1122.2	8.684	15.8	5.20	1.2	0.3	55
PBXN-115	6.00	3.819	812.99	−134.98	3.424	5.00	3.5	0.6	55
Pressed PBXs			Pressed PBXs						
LX-10-1	10.50	2.868	880.7	18.36	1.296	4.62	1.32	0.38	1
LX-14-0	10.20	2.841	826.1	17.24	1.296	4.55	1.32	0.38	1
PBXN-5[b]									

Za potpunu karakterizaciju eksplozivnog punjenja bojeve glave potrebno je poznavati detonacionu brzinu, detonacioni pritisak i detonacionu energiju. Određivanje ovih parametara veoma je složeno i pri tome se obično koriste kombinacije eksperimentalnih tehnika i simulacionih metoda.

Detonaciona brzina obično se određuje eksperimentalnim putem primjenom jonozirajučih iglica raspoređenih uzduž eksplozivnog punjenja (mjerenjem vremena proteklog između ″pikova″ električnih impulsa unutar iglica koji se javljaju u trenutku nailaska detonacionog talasa) ili tehnikom snimanja ultra-brzom kamerom.

Detonacioni pritisak mjeri se Manganin ili Lagrange senzorskom tehnikom (senzori raspoređeni tako da mjere pritisak direktno u detonacionom talasu) ili mjerenjem u akvarijumu (mjerenje propagacije udarnog talasa u vodi nakon snimanja udarnog talasa u vodi).

Detonaciona energija ili toplota detonacije eksploziva određuje se eksperimentalno za ograničen broj vojnih eksploziva [2].

Tri veličine, pritisak (p), detonacijska brzina(D) i detonacijska energija (Q_D) povezane su izrazima:

$$p = \frac{\rho \cdot D^2}{1+\gamma} \qquad (2.2.4.2.2)$$

$$Q_D = \frac{D^2}{2 \cdot \left(\gamma^2 - 1\right)} \qquad (2.2.4.2.3)$$

gdje su:
p - detonacijski pritisak,
ρ - gustina eksploziva,
D - detonacijska brzina,
Q_D- detonacijska energija ili toplota detonacije,
γ - adijabatski eksponent (definira nagib krive pritisak-volumen kod adijabatske ekspanzije detonirajućih gasova) [2].

Aditivni princip, primjenjen od strane Urizara [2], koristi se za predviđanje detonacijske brzine eksplozivnih smjesa:

$$D_{sm} = \sum \varphi \cdot D \qquad (2.2.4.2.4)$$

$$\sum \varphi = 1 \qquad (2.2.4.2.5)$$

gdje su:
D_{sm} - detonacijska brzina smjese
φ - volumni udio *i* - te komponente mješavine eksplozivnih komponenti smjese
D - detonacijska brzina čistih eksploziva koji čine smjesu

U smjesama TNT/RDX ili TNT/HMX, gdje su RDX i HMX dodani u obliku praha u tečni TNT, detonacijska brzina može se izračunati na slijedeći način [2]:

$$D_{sm} = \varphi_{TNT} \cdot D_{TNT} + \varphi_{HE\ praha} \cdot D_{HE\ praha} \qquad \varphi_{TNT} \cdot + \varphi_{HE\ praha} = 1 \qquad (2.2.4.2.6)$$

Karakteristične brzine nekih često korištenih komponenti eksplozivnih smjesa (vosak, polieteilen, teflon, itd) date su u tabeli 2.2.4.2.2.

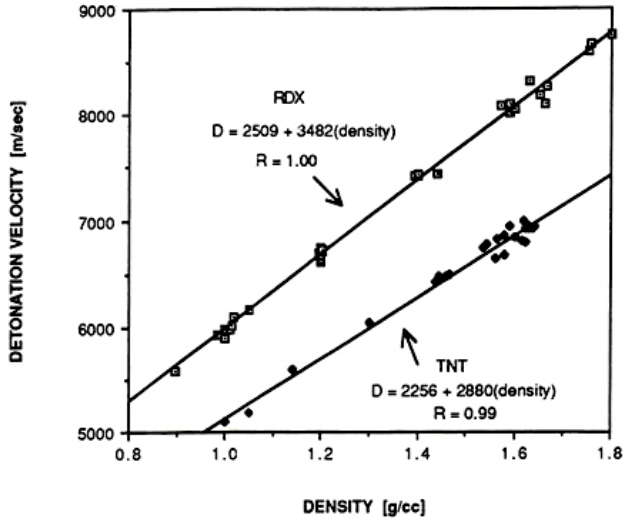
Ovaj model bazira se na principu da se i inertne komponente ponašaju kao detonabilni materijali [2].

Tabela 2.2.4.2.2 Karakteristične brzine najčešćih komponenti eksplozivnih smjesa [2]

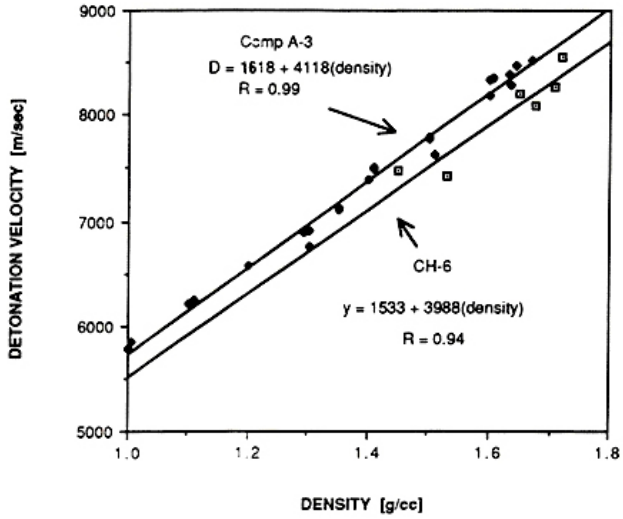
Materijali	**Gustina [g/cm^3]**	**Karakteristična brzina [m/s]**
Pčelinji vosak	0,92	6,500
Estan	1,20	5,520
Polietilen	0,93	5,550
Teflon	2,15	5,330
Viton A	1,82	5,390
Vazduh ili šupljine	0,26	1,500
Aluminij	2,70	6,850
AP	1,95	6,250

Detonaciona brzina bitno zavisi od gustine eksploziva, tako da su ustanovljene određene zavisnosti (slika 2.2.4.2.1 i slika 2.2.4.2.2) pomoću kojih je moguće procijeniti detonacionu brzinu za određenu gustinu eksploziva ρ [2]:

$$D = A_1 + B_1 \cdot \rho = A_1\left(1 + C_1 \cdot \rho\right) \qquad (2.2.4.2.7)$$



Slika 2.2.4.2.1 Zavisnost detonacijske brzine od gustine eksploziva za čiste eksplozive RDX i TNT [2]



Slika 2.2.4.2.2 Zavisnost detonacijske brzine od gustine eksploziva za kompoziciju A-3 i eksploziv CH-6 [2]

Vrijednosti parametara A_1, B_1 i C_1 eksperimentalno (tabela 2.2.4.2.3) određuju su mjerenjem detonacione brzine velikih eksplozivnih punjenja različitih gustina.

Za pojedine eksplozive određene su vrijednosti parametara A_1, B_1 i C_1, s tim da za određene eksplozive postoji više vrijednosti ovih parametara, s obzirom na različite izvore podataka o eksperimentalnim istraživanjima [2].

Tabela 2.2.4.2.3 Vrijednosti parametara A, B i C za različite vrste eksploziva [2]

Detonation velocity-density equations for explosives
$D = A_1 + B_1(density)$; $D = A_1[1 + C_1(density)]$

Explosive	Density equation parameters A_1	B_1	C_1	Density range of validity From	To	Ref	TMD, g/cc	D(TMD) m/s
CH-6	1533	3988	2.601	1.450	1.720	88[a], 8	1.774	8608
Comp A-3	1618	4118	2.545	1.000	1.670	88, 3, 5, 8, 102	1.672	8503
DATB	2512	2834	1.128	1.210	1.790	88	1.837	7718
	2495	2834	1.136	–	–	1	1.837	7701
Explosive D	2323	2921	1.257	1.490	1.550	88, 94	1.717	7338
HBX-1	540	3960	7.333			102	1.717	7339
	−63	4305				64	1.717	7329
HMX	621	4506	7.256	1.770	1.900	88, 94	1.905	9205
Octol (75/25)	2525	3265	1.293	1.210	1.810	88, 1, 3, 94	1.835	8516
	2120	3330	1.571			102	1.835	8231
Pentolite	2506	3022	1.206	0.998	1.780	88, 1, 40, 94	1.715	7689
	2330	3170	1.361			102	1.715	7767
PBXN-7	2932	2668	0.910	1.560	1.830	109[b]	1.885	7961
PETN	1839	3700	2.012	0.250	1.780	88, 40, 94	1.78	8425
	1608	3933	2.446	0.570	1.590	5	1.78	8609
	1820	3700	2.033			103, 104	1.78	8406
RDX	2509	3482	1.388	0.900	1.800	88, 3, 94	1.806	8797
	2490	3590	1.442			102	1.806	8974
	2560	3470	1.355	>1.00		1	1.806	8827
RDX/TNT (60/40)	2713	3073	1.133	1.020	1.720	88, 1, 94, 102	1.742	8066
RDX/TNT (75/25)	2568	3264	1.271	1.000	1.760	88, 1, 2, 94	1.765	8329
TATB	4813	1571	0.326	1.800	1.895	88, 3, 94	1.938	7858
	343	3940	11.487	>1.2		1	1.938	7979
	2480	2852	1.150			2	1.938	8007
Tetryl	2610	3020	1.157	1.000	1.730	88, 3, 8, 40, 94	1.73	7835
	2742	2935	1.070			2	1.73	7820
	2375	3225	1.358			103, 104	1.73	7954
TNT	2256	2880	1.277	1.000	1.650	88, 94, 3	1.654	7020
	1785	3225	1.807			103, 104	1.654	7119
	1873	3187	1.702			2	1.654	7144

[a]Ref. 88 calculated the given result from experimental or compiled data reported in the other cited references.
[b]Calculated by the author from data presented in cited reference.

Pritisak detonacije naročito zavisi od gustine eksploziva, tako da se može koristiti i slijedeći odnos:

$$p(\rho) = A_p \cdot \rho^{n_p} \qquad (2.2.4.2.8)$$

Koeficijenti A_p i n_p za različite eksplozive određuju se eksperimentalnim putem (tabela 2.2.4.2.4) [2].

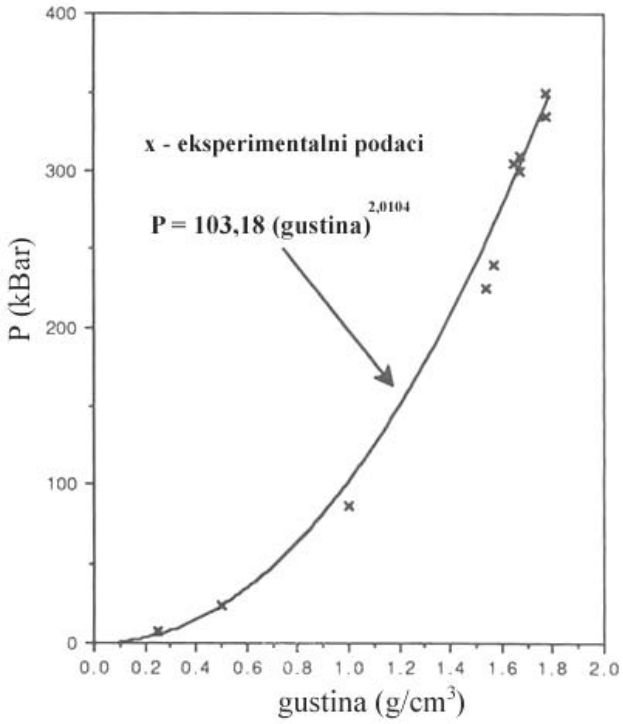
Tabela 2.2.4.2.4 Koeficijenti A_p i n_p, maksimalne teoretske gustine eksploziva, i det. pritisak eksploziva sa maksimalnom teoretskom gustinom [2]

Eksploziv	**Koeficijenti**		**ρ_{TMD}**	**$P_{(TMD)}$**
	A_p	**n_p**	**g/cm^3**	**kBar**
TNT	75,975	1,9663	1,654	204
RDX	103,152	2,1185	1,806	329
Tetryl	56,843	2,8846	1,73	276
PETN	103,18	2,0104	1,78	329
TATB	65,634	2,3543	1,983	361

Parametar ρ_{TMD} (eng. Theoretical Maximal Density), predstavlja maksimalnu moguću (teoretsku) gustinu eksploziva. U eksplozivu se obično nalaze šupljine koje smanjuju njegovu gustinu, ali ako pretpostavimo da u eksplozivu nema šupljina, tada je njegova gustina jednaka teoretskoj maksimalnoj gustini datog materijala. Vrijednost teoretske maksimalne gustine eksploziva određuje se experimentalno - rendgenskim kristalografskim tehnikama za standardne materijale,

ili se može za nove materijale procjeniti koristeći aditivne metode bazirane na atomskim volumenima [2]. Parametar P_{TMD} predstavlja pritisak detonacije pri maksimalnoj teoretskoj gustini eksploziva

Na s. 2.2.4.2.3 prikazana je zavisnost detonacionog pritiska od gustine eksploziva za eksploziv TNT.



Slika 2.2.4.2.3 Zavisnost detonacionog pritiska od gustine eksploziva (TNT) [2]

Prečnik eksplozivnog punjenja utiče takođe na detonacionu brzinu eksploziva. Što je veći prečnik eksplozivnog punjenja to će detonaciona brzina da se približava nekoj svojoj graničnoj brzini. Zavisnost detonacione brzine od prečnika zavisi od eksploziva i taj utjecaj je najveći kod PBX eksploziva. Zavisnost detonacione brzine od prečnika eksplozivnog punjenja određuje se eksperimentalnim putem. Kritični prečnik eksplozivnog punjenja zavisi i od gustine punjenja. Što se gustina punjenja približava teoretskoj maksimalnoj vrijednosti gustine eksploziva, i vrijednost kritičnog prečnika se smanjuje. Za eksploziv TNT kritični prečnik punjenja kreće se od 13 - 40 mm za ρ = 1,62 g/cm^3, kod Tetrila on iznosi 0,6 mm za ρ = 1,65 g/cm^3, a kod RDX je 2,0 mm za ρ = 1,20 g/cm^3 [2].

2.2.5 Glavne karakteristike vojnih eksploziva

Savremene eksplozivne materije koje se koriste za vojnu upotrebu prije svog korištenja u municiji moraju biti ispitane prema postojećim vojnim standardima. Postoji niz osnovnih zahtjeva koje mora ispunjavati savremeni eksplozivi za vojnu upotrebu, a oni su:

Brizantnost. Brzina kojom eksploziv tokom procesa detonacije postiže maksimalni detonacijski pritisak mjera je njegove brizantnosti. Brizantnost eksploziva pokazuje njegovu sposobnost ukupnog rada. Ova karakteristika veoma je važna za procjenu efikasnosti eksplozije kod HE bojevih glava. Koristi se za komparaciju efikasnosti dva ili više eksploziva.

Osjetljivost. Veličina koja pokazuje osjetljivost eksploziva na pripalu ili detonaciju zavisno od intenziteta šoka, trenja ili zahtjevane toplote. Ako je eksploziv suviše osjetljiv tada nije siguran za rukovanje, a ako je neosjetljiv onda se javlja problem kako ga inicirati. Koriste se određene test metode za ocjenu osjetljivosti eksploziva, kao što slijedi:

- Osjetljivost na udar je izražena preko izraza za udaljenost sa koje uteg standardne mase, prilikom pada na uzorak eksploziva, uzrokuje njegovu eksploziju (zbog sigurnosti ne želimo da dođe do pojave eksplozije ako se izvrši mehaničko probijanje tijela bojeve glave ili projektila).
- Osjetljivost na trenje je izražena preko ocjene ponašanja eksploziva kada klatno određene mase stvara trenje preko površine materijala eksploziva (pucketanje, prštanje sa pojavom iskri, paljenje i/ili detoniranje).
- Osjetljivost na toplotu se izražava preko temperature pri kojoj se javlja plamen ili nastupa eksplozija (tzv. Cook off tačka).

Statički elektricitet. Mjera osjetljivosti iniciranja eksploziva pri pojavi naelektrisanja statičkim elektricitetom.

Stabilnost. Stabilnost je sposobnost nekog eksploziva da bude skladišten bez umanjenja njegovih performansi. Postoji više faktora koji utiču na stabilnost eksploziva:

- Hemijski sastav. Postoji brojni podaci koji ukazuju da se mnoge hemijske supstance ponašaju nestabilno i eksplodiraju kada su podvrgnute uticaju toplote.
- Temperatura skladištenja. Brzina dekompozicije eksploziva povećava se sa porastom temperature. Svi standardni vojni eksplozivi moraju biti stabilni na temperaturama -10°C do +35 °C. Pri temepraturama od oko 70 °C mnogi eksplozivi postaju veoma nestabilni.
- Izloženost UV sunčevim zracima. Ako su eksplozivi, posebno oni bazirani na nitro grupama, direktno izložen UV zrakama sunca, tada nastupa njihova ubrzana dekompozicija i stabilnost im značajno opada. Način na koji vršimo pakovanje eksploziva utiče na njegovu stabilnost.
- Električna pražnjenja. Mnogi eksplozivi osjetljivi su na elektrostički naboj ili na elektro-iskrenje, pa statičko ili drugo električno pražnjenje može biti dovoljan razlog da dođe do detonacije.

Snaga. Pojam snage ili performansi eksploziva odražava njegovu sposobnost da ostvari određeni rad u jedinici vremena i pokazuje koliko energije pri tome može biti realizirano na cilju (u obliku brzine fragmenata, pritiska u udarnom talasu, brzine kumulativnog mlaza, itd). Eksplozivna snaga ili performanse procjenjuju se preko niza testova pomoću kojih se procjenjuje ponašanje eksploziva. Najpoznatiji testovi su: test širenja cilindra, test fragmentacije cilindra i test širenja udarnog talasa.

Gustina. Postoji više metoda za određivanje gustine eksplozivnog punjenja pri čemu se, zavisno od primjenjene metode, srednja gustina punjenja kreće u okviru 80-95% maksimalne gustine eksplozivnog punjenja *TMD* (eng - Theoretical Maximal Density). Povećanje gustine eksplozivnog punjenja utiče na smanjenje osjetljivosti. Povećanje gustine punjenja osigurava i značajno povećanje mase eksploziva unutar strukture bojeve glave, a što direktno povećava efikasnost bojeve glave.

Isparljivost. Eksploziv ne bi trebao da posjeduje supstance koje isparavaju ili treba da ih sadrži u neznatnoj količini, kako bi eksplozivno punjenje moglo izdržati temperaturne promjene tokom skladištenja. Isparljivost može prouzrokovati pojavu neželjenog pritiska unutar strukture bojeve glave ili projektila. Isparljivost utiče na smanjenje stabilnosti eksploziva, a što značajno povećava opasnost tokom rukovanja sa municijom. Maksimalna dozvoljena isparljivost je 2 ml gasa tokom 48 sati.

Higroskopnost. Higroskopnost je mjera sposobnosti smjese eksplozivnih materija da apsorbiraju vodu i ona je nepoželjna kod svih vojnih eksploziva. U eksplozivne materije dodaju se inertni materijali radi poboljšanja procesa proizvodnje i sigurnosti, ali istovremeno ti dodaci značajno utiču na smanjenje snage eksploziva, brzine detonacije i osjetljivosti. Isparavajuće supstance inertnih dodataka tokom procesa detonacije uzrokuju pojavu hlađenja i smanjenje temperature produkata reakcije. Na stabilnost, također, utiču inertni dodaci koji potpomažu proces

dekompozicije eksploziva, a što za posljedicu može imati koroziju metalnih dijelova kontejnera za municiju.

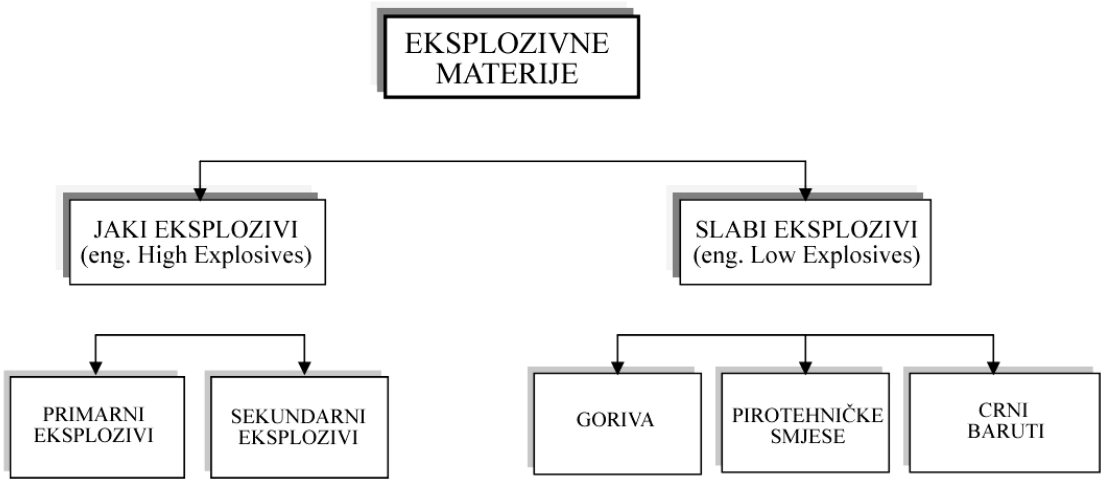
Toksičnost. Zavisno od hemijske strukture eksploziva, stepen njihove toksičnosti je različit, tako da se efekat toksičnosti na čovjeka, tokom procesa livenja eksplozivnog punjenja, kreće od pojave glavobolje pa do ozbiljnih oštećenja unutrašnjih organa. Cilj je da stepen toksičnosti vojnih eksploziva bude što manji.

Dostupnost i cijena. Eksplozivi se moraju proizvesti od jeftinih sirovih materijala, dostupnih u velikim količinama. Proizvodnja mora biti s razlogom jednostavna i jeftina.

2.2.6 Klasifikacija eksplozivnih materija

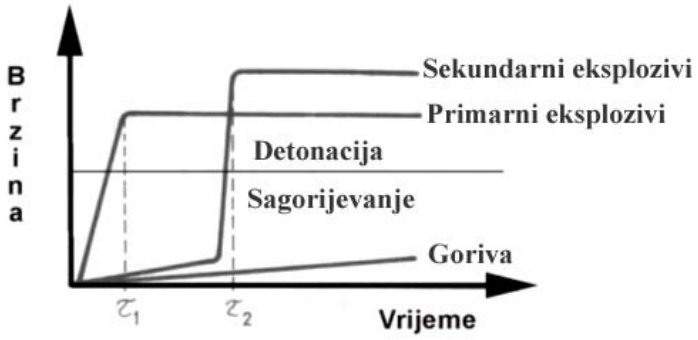
Eksplozivne materije razlikuju se po hemijskom sastavu, fizičko-hemijskim i eksplozivnim svojstvima, načinu obavljanja rada nad okolinom itd. Prema američkom konceptu, eksplozivne materije podijeljene su u dvije kategorije (sl. 2.2.6.1):

- Jaki eksplozivi (primarni i sekundarni)
- Slabi eksplozivi (goriva, pirotehničke smjese i crni baruti).



Slika 2.2.6.1 Podjela eksplozivnih materija

Ova klasifikacija zasnovana je na osjetljivost eksplozivnih materija i njihovoj sposobnosti da odgovore na vanjske impulse. Jaki eksplozivi (primarni i sekundarni) odlikuju se detonacijom kao osnovnim oblikom eksplozivne hemijske pretvorbe. Stoga se i njihovo djelovanje na okolinu očituje u vidu snažnog udara detonacijskih produkata i stvaranja udarnog vala.



Slika 2.2.6.2 Mogućnosti stabilnog sagorijevanja različitih tipova eksplozivnih materija

Slabi eksplozivi (goriva, crni baruti i pirotehničke smjese) imaju mogućnost stabilnog sagorijevanja i kod vrlo visokog pritiska (premda ako se iniciraju snažnim udarnim valom pojedini tipovi baruta mogu detonirati). Mogućnost stabilnog sagorijevanja eksplozivnih materija prikazana je na slici 2.2.6.2.

2.2.7 Jaki eksplozivi

Jake eksplozivne materije karakterizira detonacija kao osnovni oblik eksplozivne hemijske transformacije (iako jake eksplozivne materije mogu u određenim uvjetima stabilno sagorijevati). Njihovo djelovanje na okolinu izražava se u vidu snažnog udara detonacijskih produkata i stvaranja udarnog talasa. Jaki eksplozivi su hemijske eksplozivne materije koje imaju ekstremno veliku brzinu reakcije, praćenu naglim porastom pritiskom. U zapadnoj literaturi primarni i sekundarni eksplozivi nazivaju se zajedničkim imenom jaki (snažni) eksplozivi (eng. - High Explosives), s obzirom na to da je njihova snaga reda veličine 10^8 - 10^9 kW/kg.

Primarni jaki eksplozivi izuzetno su osjetljivi na vanjske impulse i stoga je rad s njima vrlo opasan i iziskuje veliki oprez. Nazivaju se primarne jake eksplozivne materije, jer započinju eksplozivni proces. Njihova je osjetljivost na vanjske impulse takva da čak i lagani udar, plamen ili iskra mogu dovesti do njihovog iniciranja i potpune detonacije. Međutim, iznenađujuće visok stupanj sigurnosti postiže se kada se primarna eksplozivna materija presuje u metalnu čašicu (kapislu), kao što je npr. slučaj kod detonatora. Bez obzira na to, grubim rukovanjem ili bilo kakvim ubodom u presovani sloj inicijalne eksplozivne materije može se izazvati detonacija punjenja u detonatoru.

Proizvodnja primarnih eksplozivnih materija obavlja se u posebnim uvjetima, uz poduzimanje vrlo strogih mjera za spriječavanje eventualnih neželjenih slučajnih eksplozija. Da bi se neka eksplozivna materija mogla svrstati u skupinu primarnih jakih eksplozivnih materija, te kao takva mogla koristiti za ugradnju u inicirajuće sredstvo (inicirajuću kapslu, detonator i sl.), uvjet je da pri njenom iniciranju (plamenom, udarom, ubodom, i sl.) dođe do razvoja potpune detonacije na razmaku od svega nekoliko milimetara duž naboja.

Osnovni zahtjevi koji se postavljaju u proizvodnji i upotrebi primarnih eksplozivnih materija su:

- visoka inicirajuća sposobnost, odnosno da što manja količina materije daje što veći početni impuls,
- visoka osjetljivost na slabi početni impuls, odnosno visoka sposobnost prihvatanja početnog impulsa,
- mali kritični prečnik, odnosno debljina sloja eksplozivne materije, što znači mala količina inicirajuće eksplozivne materije za izradu eksplozivnog punjenja,
- dobra sipkost i visoka sposobnost presovanja,
- visoka fizička i hemijska stabilnost,
- stabilnost fizičkih, hemijskih i detonacionih performansi za definirani rok skladištenja, odnosno upotrebe,
- jednostavna proizvodnja, maksimalna sigurnost i zaštita u proizvodnji,
- dostupna i jeftina sirovinska baza.

Sposobnost primarne eksplozivne materije da sa određenom malom količinom materije izazove detonaciju druge eksplozivne materije, naziva se inicirajuća sposobnost. Ta sposobnost izražava se količinom primarne eksplozivne materije. Različite primarne eksplozivne materije imaju različite inicirajuće sposobnosti, odnosno za iniciranje iste sekudnarne eksplozivne materije potrebne su različite količine različitih primarnih eksplozivnih materija. Minimalna količina primarne eksplozivne materije, koja je sposobna da izazove stabilnu detonaciju kod sekudnarnih eksplozivnih materija, naziva se granična količina eksplozivne materije, a punjenje - granično inicirajuće eksplozivno punjenje. Inicirajuća sposobnost određene eksplozivne materije zavisi od niza faktora: gustine punjenja, stepena čistoće, veličine kristala, uslova laboracije, itd.

Najpoznatiji primarni jaki eksplozivi su: Olovo - azid, Živin - fulminat, Olovo - stifinat, Srebro - azid, Tetrazen, itd.

Sekundarni jaki eksplozivi teže se dovode, za razliku od primarnih, u režim detonacije pa je stoga rad s njima manje opasan. Tu prednost poništava činjenica da se koriste obično u velikim količinama. Sekundarne jake eksplozivne materije nazivaju se sekundarnim jer proces njihove detonacije započinje detonacijom primarnih eksploziva. Sekundarni eksplozivi čine glavno punjenje HE bojevih glava sa prirodnom fragmentacijom.

Zahtjevi koji se postavljaju pred sekundarne jake eksplozive su:

- najveća moguća energija po jedinici volumena punjenja,
- najveća moguća brzina detonacije,
- maksimalna stabilnost, odnosno nepromjenljivost fizičkih, hemijskih i eksplozivnih karakteristika za određeni (što duži) vremenski period.
- da se dobro ulivaju pri livenju, presuju, odnosno povoljno prerađuju i dobro pune predviđeni prostor,
- da im je što manja osjetljivost na spoljašnja dejstva, i
- da je sirovinska baza dovoljno široka i jeftina, a proizvodnja bezbjedna.

Prema sastavu, sekundarne jake eksplozivne materije možemo podijeliti na jednokomponentne (čiste eksplozive) i eksplozivne smjese. Čisti, jednokomponentni, jaki eksplozivi koji su od veće važnosti za vojnu upotrebu, prikazani su u tabeli 2.2.7.1, u kojoj su prikazane teoretske maksimalne gustine (ρ_{TMD}), i hemijske formule čistih eksploziva.

Tabela 2.2.7.1 Čisti sekundarni jaki eksplozivi [2]

Eksploziv	**ρ_{TMD} g/cm^3**	**Hemijska formula**			
		C	**H**	**N**	**O**
DATB	1,837	6	5	5	6
Eksploziv D	1,717	6	6	4	7
HMX	1,905	4	8	8	8
HNS	1,740	14	6	6	12
NQ	1,810	1	4	4	2
NTO	1,930	2	2	4	3
PETN	1,780	5	8	4	12
RDX	1,806	3	6	4	6
TATB	1,938	6	6	6	6
Tetril	1,730	7	5	5	8
TNT	1,654	7	5	3	6

Smjese jakih sekundarnih ekspl. materija predstavljaju smjese najmanje dva jednokomponentna jaka sekundarna eksploziva (tabela 2.2.7.2). Uslovno, smjese možemo podjeliti na vojne i privredne, međutim, i jedne i druge se mogu upotrijebiti i za jednu i drugu svrhu. Ipak, eksplozivne materije visoke brizantnosti koristimo prije svega za vojne potrebe.

Smjese eksplozivnih materija na bazi trinitrotoluena i amonijevog nitrata u različiti odnosima su amatoli, a ako amatoli sadrže još aluminijum u prahu, to su amonali.

Smjese trinitrotoluena sa drugim sekundarnim jakim eksplozivima su pentoliti (TNT + Pentrit), heksoliti (TNT + Heksogen), oktoliti (Oktogen + TNT).

Grupe eksplozivnih materija na bazi TNT-a i Heksogena, u Engleskoj nazvanih Cyclotol, standardizirane su pod nazivom Kompozicije B: B-2, B–3, B–4.

Kompozicija A predstavlja smjesu heksogena i pčelinjeg voska (flegmatizator), u odnosu 91/9. Kasnije je pčelinji vosak zamijenjen sintetičkim, a smjesa je standardizirana pod oznakom: A–2, A–3, A–4 i A–5.

Kompozicija C predstavlja heksogen plastificiran određenim plastifikatorom. Grupa eksplozivnih materija ovog sastava nosi oznake C-2, C-3 i C-4.

Smjese trinitrotoluena, heksogena i pentrita u omjerima 28/44/28 su PTX-2 smjese.

Smjesa pentrita, heksogena, heksanitrostilbena, diaminotrinitrobenzena ili oktogena sa plastifikatorom, i uz dodatak aluminija u prahu, koristi se za raketna eksplozivna punjenja, nosi naziv PBX – Plastic Bonded Explosives.

HEX (eng. High Energy Explosive) predstavlja smjesu heksogena, kalijevog perhlorata i aluminija u prahu. Smjesa je namijenjena za laboraciju protiv-avionske municije.

LX smjese su na bazi oktogena i poliuretana, odnosno smjese fluorpropilena i vinilfluorida u odnosu 1:2.

Smjese eksplozivnih materija mogu biti i na bazi goriva i tečnog kisika ili na primjer, smjese goriva i vazduha, takozvane aerosolne eksplozivne materije ili FAE (eng. Fuel Air Explosive).

Tabela 2.2.7.2 Komponente eksplozivnih smjesa [2]

Composition of TNT-based, pressed, and other classical explosives

A. Composition of TNT-based explosives

Explosive	% HMX	% RDX	% TNT	% Al	% D-2
Comp B	—	59.50	39.50	—	—
Cyclotol 75/25	—	75.00	25.00	—	—
Cyclotol Type I	—	25.00	75.00	—	—
Cyclotol Type II	—	29.00	71.00	—	—
Destex	—	—	74.70	18.70	4.70
H-6	—	45.10	29.20	21.00	4.70
HBX-1	—	40.40	37.80	17.10	4.70
HBX-3	—	31.30	29.00	34.80	4.90
HTA-3	49.00	—	29.00	22.00	—
Minol II	—	—	40.00	20.00	—
Minol IV(Q)	—	—	40.00	20.00	—
Octol 70/30	70.00	—	30.00	—	—
Octol 75/25	75.00	—	25.00	—	—
Pentolite	—	—	50.00	—	—
Picratol	—	—	48.00	—	—
TNT	—	—	100.00	—	—
Tritonal	—	—	80.00	20.00	—

B. Composition of pressed explosives

Explosive	% Pure molecule	% RDX	% Wax	% Al	% Calcium stearate
CH-6	—	97.50	—	—	1.50
Comp A-3	—	91.00	9.00	—	—
Comp A-3 (Aluminized)	—	63.70	6.30	30.00	—
Comp A-3 (Type I)(Q)	—	91.00	9.00	—	—
Comp A-4(Q)	—	97.00	3.00	—	—
Comp A-5	—	99.00	—	—	—
Comp A-5 (Type I)(Q)	—	98.50	—	—	—
Explosive D	100.00	—	—	—	—
Tetryl	100.00	—	—	—	—

PIB = polyisobutylene PE = polyethylene

U eksperimentima koji su korišteni za izradu magistarskog rada najviše su upotrebljavani eksplozivi TNT i kompozicija B.

TNT (Trotil)

Trinitrotoluen (TNT) se upotrebljava za razorna eksplozivna punjenja. Potpuno se topi u toluenu, acetonu i benzenu. Vrlo je stabilan, neutralan i ne reagira sa metalima. Lako se laborira livenjem, presovanjem. Dovoljno je neosjetljiv i ne zahtjeva flegmatizaciju. Upotrebljava se čist ili u smješama s amonijevim nitratom (amatoli), aluminijevim prahom (tritonali), s heksogenom (heksotoli), oktogenom (oktoli), pentritom (pentoliti) i drugi [2].

TNT je postojan na povišenim temperaturama. Pri zagrijavanju na temperaturi od 145°C do 150°C sniženje tačke topljenja zavisi od dužine zagrijavanja. TNT je teško zapaljiv. Zagrijavan direktnim plamenom počinje prvo da se topi, a samo zapaljenje nastaje iznad 300°C. Suh ili u vlažnom stanju TNT ne reaguje sa metalima [55].

U SAD-u TNT je dostupan u obliku čvrstih blokova. TNT je eksploziv s nižim performansama od RDX-a (detonacijska brzina i pritisak). Detonacioni parametri TNT-a prikazani su u tabeli 6.1.3.1.2 TNT se koristi se kod bojevih glava gdje je niska cijena glavni kriterij. Ima razmjerno nisku tačku topljenja (80,8° do 80,9°C), te se zato relativno sigurno topi i nalijeva u municiju. TNT ima gubitak volumena od 10,5% prilikom hlađenja iz tečnog stanja (ρ = 1,48 g/cm^3) do čvrstog stanja (ρ = 1,654 g/cm^3). Zbog toga je uvijek potrebno tokom nalivanja eksploziva u tijelo bojeve glave imati tzv. livnu glavu koja služi kao rezervoar tečnog eksploziva tokom procesa očvršćivanja, odnosno hlađenja eksploziva i čime se spriječava pojava pukotina i lunkera unutar strukture eksplozivnog punjenja. Primjenjuju se posebne tehnologije kontroliranog hlađenja tijela bojeve glave sa ciljem da se spriječe pojave šupljina u jezgru eksplozivnog punjenja. Tokom tog procesa nije moguće postići teoretsku vrijednost kristalne gustine TNT, tako da je realna vrijednost gustine eksploziva TNT u punjenju bojeve glave između 91% do 97% TMD.

TNT se koristi kao prvi izbor za sve eksplozive koji se liju. Njegova točka topljenja je relativno niska, a otopljen ima karakteristike nisko-viskoznog fluida koji se može puniti sa drugim eksplozivom u prahu većih energetskih performansi kao što su RDX i HMX. TNT je hemijski kompatibilan sa velikim brojem eksplozivnih materijala, tako da je moguće formirati jako širok spektar eksplozivnih smjesa baziranih na TNT.

Relativno niska tačka topljenja eksploziva baziranih na TNT je prednost u procesu pripreme, punjenja bojeve glave eksplozivom i tokom demilitarizacije, a postaje nedostatak u slučajevima kada se bojeve glave nalaze u okruženju sa velikim temperaturama (slučaj kod supersoničnih projektila velikog dometa kada se javlja značajno zagrijavanje tijela bojeve glave).

TNT je toksična materija. Izaziva ozbiljna oštećenja jetre, nadražaj probavnog trakta, aplastičnu anemiju, boji kožu u žuto, itd [55].

TNT je, u čistom stanju, ili u različitim smjesma vojnih eksplozivnim materija, još uvijek osnovna vojna eksplozivna materija, i prema svjetskim standardima, zavisno od tačke solidifikacije, primjenjuje se za artiljerijsku municiju, minobacačke projektile, minsko eksplozivna sredstva, detonatorske pojačivače, ručne bombe, itd [55].

Kada se traže bolje performanse eksploziva, koriste se isključivo RDX ili HMX. Njihove performanse su nešto bolje u odnosu na TNT, ali na račun njihove cijene. RDX se topi na 205°C sa burnom, egzotermičnom dekompozicijom. Tačka topljenja HMX neobično je velika (285°C). Oba ova eksploziva su preosjetljiva da se koriste u čistom stanju kao glavno punjenje ili buster punjenje bez flegmatizacije (desenzitizacije). Zbog toga se RDX i HMX spajaju u mješavine sa TNT ili plastičnim vezivima, da bi se dobilo flegmatizovanije punjenje i materijal koji je praktičan za upotrebu [2].

U tabeli 2.2.7.3 prikazani su detonacioni parametri najpoznatijih jakih eksploziva.

Tabela 2.2.7.3 Detonacioni parametri jakih eksploziva [2]

Explosive	Detonation velocity: Charge density, g/cc	Velocity, m/sec	Ref.	Detonation pressure: Charge density, g/cc	Pressure, kbars	Ref.
Molecules						
DATB	1.80	7600	5	1.80	251	5
	1.78	7600	2	1.78	251	2
Explosive D	1.48	6700	5			
HMX	1.89	9110	1	1.90	387	1
				1.90	395	2
HNS	1.70	7000	70	1.69	208	70
NQ	1.78	8592	5	1.72	245	5
NTO	1.871	8120	71	1.853	260	6
	1.855	8200	71			
PETN	1.77	8310	72	1.77	320	72
				1.77	340	1
RDX	1.806	8950	5	1.767	337.9	61
				1.80	341	60
TATB	1.847	7660	65	1.847	259	65
Tetryl	1.73	7720	5	1.61	226.4	73
				1.68	239	69
TNETB	1.78	8460	5	1.69	265	5
TNT	1.64	6950	60	1.637	189.1	61
				1.64	177	60
lead azide	4.00	5180	4	3.7	158	74
	3.80	4500	75			
	4.60	5300	75			
lead styphnate	2.90	5200	74			
TNT-based						
Comp B	1.713	8018	61	1.67	264	
	1.717	7990	52	1.713	292.2	
Cyclotol 75/25	1.62	7950	5	1.62	265	
Destex	1.69	6745	5	1.695	179	5
H-6	1.76	7490	62	1.76	245	
HBX-1	1.712	7307	64	1.712	220.4	63, 64
HBX-3	1.85	7530	65	1.85	206	65
HTA-3	1.90	7866	4			
Minol II	1.82	6925	5			
Minol IV(Q)	–	5900	66			
Octol 75/25	1.81	8364	67	1.821	343.7	68
Pentolite	1.64	7530	5	1.66	280	1
	1.68	7650	69	1.68	246	5
				1.68	251	69
Picratol	1.63	6970	4			
Tritonal	1.69	6520	52			
Pressed explosives						
CH-6	1.72	8550	5			
Comp A-3	1.67	8520	5		260	5
Comp A-4	1.65	8956	5			
Comp A-4 Alum.	1.79	7140	5			
Comp A-5—I	1.65	8931	5		298	5

Kompozicija B

Homogene smjese RDX i TNT nazvane kompozicija B, odnosno heksotoli, uvedeni su u vojnu upotrebu u Engleskoj i Njemačkoj još prije drugog svjetskog rata.

Kompozicija B je smjesa RDX i TNT u omjeru 60% RDX i 40% TNT (sa dodatkom 1% voska kao sredstva za smanjenje osjetljivosti smjese). Heksotoli su mješavine RDX i TNT sa većim udjelom RDX u smjesi (tabela 2.2.7.4).

Kompozicija B ima bolje energetske performanse od TNT, veću gustinu, veću brzinu detonacije i veći detonacioni pritisak.

Tabela 2.2.7.4 Parametri smjesa baziranim na RDX i TNT [55]

	Kompenzacija B		Heksotoli		
	B	B-2	75/25	70/30	65/35
Heksogen u masenim %	60	60	75	70	65
Trotil u masenim %	40	40	25	30	35
Sintetički vosak na 100%	1	–	–	–	–
Bilans kiseonika u %	–43	–43	–35	–37	–40
Toplota sagorevanja k/j g	11,78	11,78	10,97	11,22	11,51
Toplota stvaranja kJ/mol	5,78	5,28			
Toplota detonacije kJ/g	4,99	4,99	5,12	5,12	5,05
Brzina detonacije m/s	7840	7900	8035	8060	7975
pri gustini g/cm^3	1,68	1,68	1,71	1,71	1,71
Pritisak detonacije GPa	18,9		25,9		
pri gustini g/cm^3	1,68		1,71		
Temperatura topljenja ^{o}C	80,0	79–80	79–80	79–80	79–80
Specifična zapremina gasova l/kg	845	845	862	854	845
Relativna osetljivost na udar (TNT = 100)	60	60	40		
Relativna energija u odnosu na TNT (TNT = 100)					
– olovni blok	133	133			
– balistički merzer	130	133	137	135	133
Viskozitet GPa.s pri	0,31	1,23	21,0	5,32	3,02
temperaturi ^{o}C	83	85	85	90	85
Higroskopnost u % na 30°C i 90% r.v.v.	0,2	n i s u h i g r o s k o p n i			
Stabilnost u vakuumu na 120°C 1 g izdvoji za 48 č na cm^3 gasa	0,29	0,29	0,41		

Napomena: industrijski se proizvodi i heksotol 90/10, koji se koristi kao polazna sirovina za izradu različitih sastava heksotola.

Kompozicija B upotrebljava se kao glavno eksplozivno punjenje u bojevim glavama artiljerijskih, raketnih i kumulativnih projektila [2].

2.2.8 Proizvodnja eksplozivnih materija

Eksplozivno punjenje mora biti neosjetljivo tokom cjelokupnog životnog ciklusa i na kraju eksplozivno punjenje mora detonirati na poticaj impulsa detonacionog pojačivača. Pored toga eksplozivna punjenja moraju se jednostavno proizvoditi i ugrađivati, biti hemijski i termički stabilna, uz osiguranje fizičkog integriteta eksplozivnog punjenja u širokom temperaturnom intervalu (-54°C do 71°C - temperaturni interval vojne upotrebe) tokom minimalno deset godina od trenutka proizvodnje [2].

Eksplozivi se često klasficiraju i prema načinu njihove proizvodnje. Postoje četiri načina proizvodnje eksploziva:

- presovanje
- livenje
- ekstrudiranje
- injekciono formiranje

S obzirom na obim proizvodnje, tehnologije livenja i presovanja se najviše koriste u procesu proizvodnje municije. Kombinacijom ove dvije tehnologije moguće je dobiti sve potrebne eksplozivne proizvode. Eksplozivi koji se proizvode ekstrudiranjem i injekcionim formiranjem su specijalni eksplozivi i ne proizvode se u velikim količinama [2].

Svim proizvodnim metodama eksploziva nastoji se postići što veća gustina i što veća homogenost eksplozivnog punjenja. Sa povećanjem gustine poboljšavaju se i performanse eksploziva (veća detonaciona brzina i detonacioni pritisak), a time i efikasnost bojeve glave.

2.2.9 Mehaničke karakteristike eksploziva

U analizama naprezanja eksplozivnog punjenja u toku kretanja kroz cijev oružja bitno je poznavati mehaničke karakteristike eksploziva: modul elastičnosti (E), zateznu čvrstoću (σ_m), rel. izduženje (ε), itd.

Starija istraživanja [56] daju orijentacione vrijednosti mehaničkih karakteristika nekih eksploziva. U tabeli 2.2.9.1 prikazane su vrijednosti mehaničkih karakteristika eksploziva. Modul elastičnosti za TNT iznosi 6,42 GPa, a za kompoziciju B (sa 1% voska) on iznosi 9,05 GPa [56].

Tabela 2.2.9.1 Vrijednosti mehaničkih karakteristika eksploziva [56]

Eksploziv	ρ (g/cm^3)	% TMD	Modul elastičnosti (GPa)	Modul klizanja (GPa)
TNT	1,628	98,4	6,42	2,48
Komp. B	1,70	98,8	9,93	3,92
Komp. B + 1% voska	1,685	97,7	9,05	4,16
Komp. B + 2% voska	1,674	97,8	9,97	3,96
Komp. B + 3% voska	1,659	97,8	9,68	3,86
75/25 Cyclotol	1,712	97,4	10,8	4,17
50/50 Pentolit	1,675	98,0	8,66	3,34
H-6	1,730	96,8	11,1	4,25
HBX-1	1,718	98,0	10,5	3,97
67/33 Baratol	2,514	98,5	13,0	5,17

Međutim, novija istraživanja ([38], [57]) ukazuju na nešto drugačije vrijednosti mehaničkih karakteristika eksploziva. U tabelama 2.2.9.2 i 2.2.9.3 prikazane su vrijednosti mehaničkih karakteristika nekih eksploziva.

Tabela 2.2.9.2 Mehaničke karakteristike eksploziva [38]

Eksploziv	Modul elastičnosti (GPa)	Zatezna čvrstoća (MPa)	Relativno izduženje (%)
Komp. B	0,5 ÷ 2,2	10 - 15	< 0,1
Komp. B/vosak	-	12 - 14	< 0,1
PBX - liveni	6 - 8	0,3 - 0,5	5 - 7
PBX - presovani	130 - 400	10 - 15	1

Tabela 2.2.9.3 Mehaničke karakteristike eksploziva [57]

Eksploziv	Modul elastičnosti - E (GPa)	Tvrdoća (MPa)
LX 14	0,77	55,2
PBX N5	0,55	39,1
P31	0,17	18,6

Modul elastičnosti za kompoziciju B iznosi maksimalno 2,2 GPa, sa maksimalnom zateznom čvrstoćom od 15 MPa i relativnim izduženjem manjim od 0,1%. Eksplozivna smjesa RDX/TNT u odnosu 80/20 ima zateznu čvrstoću od 1,43 MPa, a relativno izduženje od 0,02 % [38].

2.2.10 Osjetljivost eksplozivnih materija

Pri proizvodnji, prijevozu, skladištenju, manipuliranju i sličnim radovima eksplozivne su materije često podvrgnute djelovanju topline, udara, trenja i sl. Njihova sposobnost da reagiraju na ta vanjska djelovanja uz pojavu sagorijevanja ili detonacije definira se kao osjetljivost, a vanjski impuls kojim se iniciraju reakcije eksplozivne hemijske pretvorbe naziva se inicijalni ili početni impuls (Baum et. al., 1975). Što je manji iznos inicijalnog impulsa, to je eksplozivna materija osjetljivija na početni impuls.

Postoje dva aspekta osjetljivosti eksplozivnih materija:
- sigurnost pri skladištenju i upotrebi (eng. hazard aspects, or safety aspects)
- pouzdanost iniciranja (eng. reliability aspects)

Municija se dizajnira tako da se aktivira u željenom trenutku - posredstvom paljbenog lanca dizajniranog da proizvede točno definirani izlaz u obliku plamenog impulsa, udarnog vala i sl.. Zahtjev koji se postavlja pred paljbeni lanac jest da pouzdano funkcionira u praktično 100% slučajeva. Pouzdanost pojedinog sredstva ispituje se tako što se traže uvjeti u kojima će doći do funkcije u 100 % slučajeva [58].

Osjetljivost eksplozivnih materija na vanjske impulse različita je. Što više, osjetljivost jedne te iste eksplozivne materije može se mijenjati u dosta širokim granicama, ovisno o njenom fizičkom stanju, te vrsti početnog impulsa. Često je upravo osjetljivost parametar koji može biti odlučujući za mogućnost praktične primjenljivosti neke eksplozivne materije. Naime, sa stajališta sigurnosti pri radu eksplozivna materija ne smije biti suviše osjetljiva, dok sa stajališta mogućnosti njene inicijacije u praktičnoj primjeni ona ne smije biti suviše neosjetljiva - inertna. Drugim riječima, da bi se mogla praktično primijeniti, osjetljivost eksplozivne materije mora biti u nekim granicama, prihvatljivim sa oba spomenuta stajališta [58].

Problem osjetljivosti eksplozivnih materija potencira se mogućnošću da eksplozivne materije mogu i neočekivano reagirati u procesu njihove proizvodnje, ispitivanja, skladištenja, transporta ili primjene. U tim uvjetima eksplozivne materije izložene su nizu mehaničkih, toplotnih i drugih djelovanja, koja mogu izazvati neželjeno iniciranje eksplozivne materije i time ugroziti ljude i materijalna dobra. Do nepredviđenog ponašanja eksplozivnih materija, prema tome, dolazi i u uvjetima koji se normalno smatraju "sigurnim". Proučavanje mehanizma iniciranja važno je kako bi se objasnilo kako je moguće da neki oblik mehaničke ili toplotne energije, energije udara, električne ili neke druge vrste energije u formi početnog impulsa izazove hemijske reakcije eksplozivnog karaktera [58].

Kako je fenomen inicijacije eksplozivnih materija različitim oblicima inicirajućih impulsa vrlo složen, to je teško definirati neki apsolutni pokazatelj osjetljivosti – na primjer, energiju potrebnu za iniciranje. Razlog tome je činjenica da energija potrebna za iniciranje reakcija eksplozivne pretvorbe ne ovisi samo o svojstvima eksplozivne materije i vrsti inicijalnog impulsa, nego i od prirode prijenosa tog impulsa na eksploziv. Upravo zbog toga količina inicijalnog impulsa, tj. količina energije potrebne za iniciranje, može znatno varirati. Primjera radi, pri brzom zagrijavanju eksplozivne materije izvorom visoke temperature do inicijacije dolazi pri znatno manjem utrošku energije nego u uvjetima sporog i dugotrajnog zagrijavanja izvorom manje temperature. Nadalje, pri djelovanju statičkog opterećenja mnoge eksplozivne materije neće se inicirati ni pri vrlo visokim vrijednostima pritiska (tj. velikim kompresijskim radom), dok pri naglom udaru do inicijacije može doći kod znatno nižih pritisaka, i s mnogo manjim utroškom rada. Tako se npr. trinitrotoluen neće inicirati pri djelovanju statičkog pritiska od 4,9 GPa, a inicirat će se pri slobodnom padu utega mase 1 kg s visine 1,5 m na sloj eksploziva smještenog između dva čelična cilindra, promjera 10 mm (Kohler i Mayer, 1993).

Gornji podaci zapravo govore o tome da ravnomjerna raspodjela izvana dovedene energije po cjelokupnom volumenu eksplozivne materije (što je slučaj kod statičkog djelovanja) nije prikladna za uspješnu i brzu inicijaciju, nego da je visoka koncentracija energije (kakav je slučaj

kod dinamičkog djelovanja) u vremenu i volumenu eksplozivne materije preduvjet za uspješnu inicijaciju [58].

Iniciranje reakcija eksplozivne hemijske pretvorbe moguće je različitim vanjskim impulsima, kao što su:

- djelovanjem topline
- mehaničkim djelovanjem (udarima malih brzina, trenjem i sl.)
- udarnim valom i udarom krhotina
- električnim impulsom
- djelovanjem laserskih zraka, itd.

Važno je naglasiti da je mehanizam iniciranja, bez obzira na to o kojem se inicirajućem impulsu radi, u konačnici uvijek toplotne prirode. Naime, pri udaru, trenju, djelovanju udarnog vala ili električnog impulsa, prvo dolazi do pretvaranja mehaničkog rada (ili nekog drugog oblika energije) u toplotnu energiju, zatim do porasta temperature eksplozivne materije na račun te toplotne energije i do iniciranja reakcija eksplozivne hemijske pretvorbe. Dakle, porast temperature eksplozivne materije neposredni je uzrok inicijacije [58].

2.3 Materijali za tijelo bojeve glave

2.3.1 Uvod

Poboljšanje smrtonosnog dejstva HE bojevih glava postiže se primjenom novog dizajna bojeve glave (optimalna unutrašnja i vanjska trasa) sa optimalnom masom eksploziva prema masi tijela bojeve glave, primjenom glavnom eksplozivnog punjenja većeg energetskog potencijala (veća gustina, detonacijska brzina i detonacijski pritisak), te primjenom novih materijala za tijelo bojeve glave, sa izvrsnim fragmentacijskim osobinama.

Materijal koji se najviše koristi za izradu tijela HE bojeve glave svakako je čelik. Čelik je vrlo dostupan materijal, lako se proizvodi i obrađuje, a njegova gustina čini ga pogodnim za odabir kod tijela HE bojevih glava čiji fragmenti imaju veliku moć probijanja.

Moderni projektili, pred koje se stavlja zahtjev što većeg dometa i mobilnosti, sa što više eksplozivnog punjenja i odličnih fragmentacijskih osobina, zahtijevaju primjenu novih materijala za tijelo bojeve glave [59].

2.3.2 Vrste čelika za tijelo bojeve glave

Ugljični čelici uslovno se mogu podijeliti na nisko-, srednjo-, i visoko-ugljične čelike. Ugljik kao element, u postotku do 1%, povećava tvrdoću i čvrstoću čelika. Glavni elementi koji se nalaze u ugljičnom čeliku koji se upotrebljava za izradu tijela bojeve glave, pored ugljika, su mangan i silicijum. Elementi sumpor i fosfor ponekad se dodaju čeliku kada je potrebna dobra obradivost ugljičnih čelika. Ugljični čelici obično se upotrebljavaju za izradu tijela bojeve glave projektila velikog kalibra zbog dobrih mehaničkih osobina koje se postižu hladnom deformacijom ili toplotnim tretmanom. Takođe, ugljični čelici se jednostavno proizvode, nisu skupi, i njihove performanse su odlične [59].

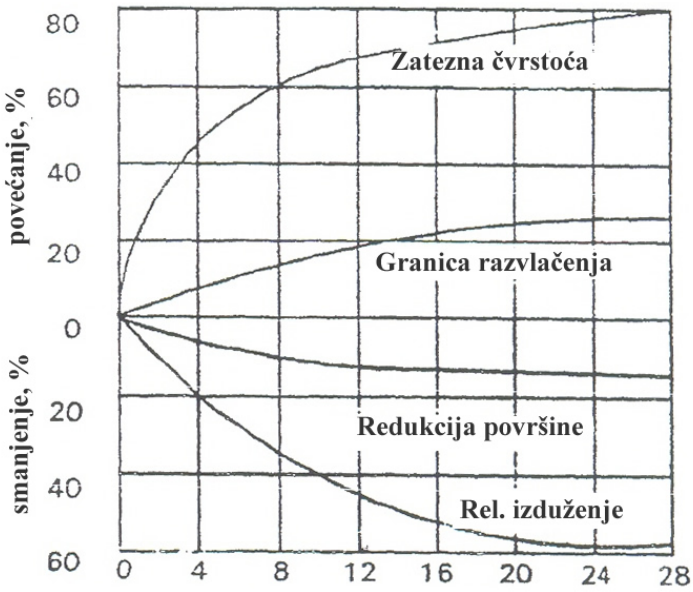
Nisko-ugljični čelici sadrže manje od 0,25% ugljika. Ponekad se za ovu vrstu čelika upotrebljava naziv *meki čelici*. Nisko-ugljični čelici imaju, u valjanom stanju, granicu razvlačenja od 170 MPa do 240 MPa, dok je zatezna čvrstoća u intervalu od 310MPa do 420 MPa. Oni su veoma pogodni za obradu hladnom deformacijom: savijanje, izvlačenje, ekstrudiranje [59].

Nisko-ugljični čelici koriste se uglavnom za izradu tijela bojeve glave i sličnih komponenti u procesu proizvodnje metalnih dijelova sistema municije. Kada se koriste za izradu tijela bojeve glave, nisko-ugljični čelici se pripremaju u obliku šipki, te obrađuju postupkom hladnog ili vrućeg izvlačenja. Mehaničke osobine date su u tabeli 2.3.2.1 [59].

Tabela 2.3.2.1 Osobine nisko-ugljičnih čelika, vruće valjanih, minimalne vrijednosti [59]

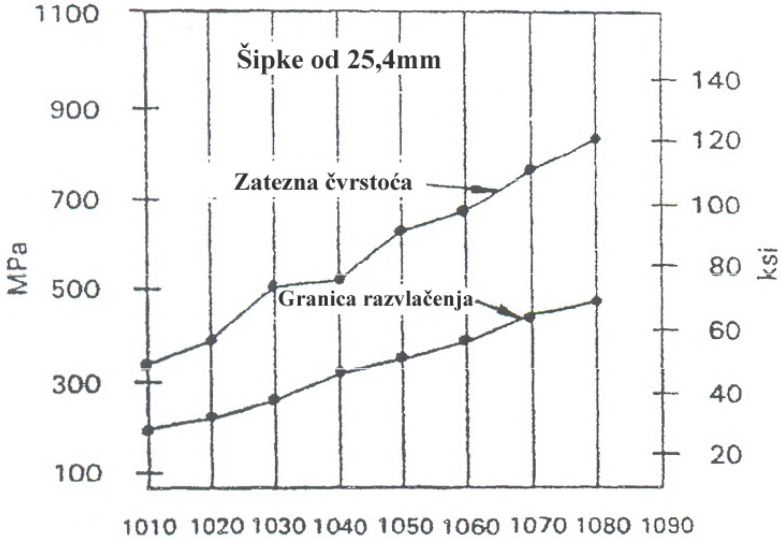
AISI	Granica razvlačenja σ_v (MPa)	Zatezna čvrstoća σ_m (MPa)	Rel. izduženje ε (%)	Rel. suženje ψ (%)	Tvrdoća (Brinnel)
1010	179	324	28	50	95
1015	186	345	28	50	101
1016	207	379	25	50	111
1018	221	400	25	50	116
1020	207	379	25	20	111
1022	234	427	23	47	121

Hladnom deformacijom nisko-ugljičnim čelicima povećava se granica razvlačenja i zatezna čvrstoća, a smanjuje relativno izduženje (slika 2.3.2.1).



Slika 2.3.2.1 Efekti hladne deformacije na mehaničke karakteristike nisko-ugljičnih čelika [59]

Srednje-ugljični čelici obično sadrže 0,25 do 0,55% ugljika. Mehaničke osobine ovih čelika u valjanom stanju su: granica razvlačenja u intervalu od 240 do 415 MPa, a zatezna čvrstoća od 415 do 689 MPa.



Slika 2.3.2.2 Zatezna čvrstoća i granica razvlačenja za različite srednje-ugljične čelike [59]

Termičkom obradom mehaničke karakteristike nisko-ugljičnih čelika se povećavaju (slika 2.3.2.2). Ovi čelici izvrsni su za obradu kovanjem [59].

Srednje-ugljični čelici koriste se najviše pri izradi čeličnih čahura, postupkom izvlačenja.

Visoko-ugljični čelici imaju postotak ugljika više od 0,55%. Za izradu komponenti municije koriste se visoko-ugljični čelici sa manje od 1% ugljika. Mehaničke karakteristike visoko-ugljičnih čelika koji se obrađuju kovanjem su veoma dobre, ali sa porastom sadržaja ugljika završna obrada je sve teža. Brzina hlađenja se kontroliše kako bi se dobila finija mikrostruktura i bolja obradivost visoko-ugljičnih čelika. Temperovani visoko-ugljični čelici imaju minimalnu granicu razvlačenja od 620 MPa.[59].

Srednje- i visoko-ugljični čelici su sirovi materijal najviše korišten za izradu tijela projektila.

Tabela 2.3.2.2 pokazuje podatke za srednje- i visoko-ugljične čelike i njihovu primjenu.

Tabela 2.3.2.2 Podaci za srednje- i visoko-ugljične čelike i njihova primjena

Standard	Naziv	Primjena
ASTM A576	Čelične šipke, ugljik, specijalni kvalitet	Otkovci za tijelo projektila kalibra manjeg od 105mm
ASTM A711	Čelične šipke, ugljične i legirane šipke, komadi za kovanje	Otkovci za tijelo projektila kalibra većeg od 105mm
MIL-S-3289	Čelik, ploče, diskovi, ugljik, kvalitet kovanja	Sferoidizirane ploče i disk za duboko izvlačenje čahura

Legirani čelici, prema AISI standardu, definišu se kao vrsta čelika u koji se dodaje jedan ili više legirajućih elemenata kako bi se dobio čelik specijalnih osobina. Legirani čelici koriste se kada se traže materijali veće čvrstoće, plastičnosti i tvrdoće u odnosu na ugljične čelike. Elementi koji se najviše koriste u legurama sa čelikom su: mangan (Mn), hrom (Cr), nikl (Ni), silicijum (Si), molibden (Mo) i vanadijum (V).

Termički tretirani, legirani čelici imaju dobre mehaničke osobine, sa granicom razvlačenja od 689MPa do 1100 MPa, zavisno od pojedinačnih zahtjeva i specifične kompozicije čelika. Legirani čelici koriste se za izradu tijela bojeve glave artiljerijskih projektila koje su izložene velikom naprezanju u toku faze lansiranja. Karakteristike kovanih legiranih čelika su izvrsne, i novi legirani čelici napravljeni su specijalno kako bi se poboljšale fragmentacijske osobine HE bojevih glava. U tabeli 2.3.2.3 prikazano je područje upotrebe za legirane čelike [59].

Tabela 2.3.2.3 Podaci za legirane čelike i njihova primjena [59]

Standard	Naziv	Primjena
ASTM A322	Čelične šipke, legura, standardni kvalitet	Otkovci za minobacačke projektile, komponente HEAT bojeve glave
ASTM A711	Čelična legura i ugljične šipke, komadi za kovanje	Otkovci za projektile većeg kalibra, sa visokim mehaničkim karakteristikama
MIL-S-50783	Čelik, legura, specijalna namjena za komponente municije (HF-1)	Otkovci za projektile sa visoko-fragmentacionim dejstvom

Visoko fragmentacioni čelici (HF čelici) su čelici koji, po svojoj strukturi i osobinama, kada su izloženi dejstvu detonacionih produkata, svojim fragmentacionim dejstvom nanose maksimalna oštećenja meti. Meta ovom slučaju su meki ciljevi (vojnici na terenu, lako oklopljena vozila, laki fortifikacijski objekti, i sl.). [59]

Mnogi ugljični i legirani čelici, najviše oni sa srednjim i visokim nivoem ugljika su ispitani. Vrste kao što su alatni čelici, čelici za ležajeve, standardni ugljični čelici, standardni ugljični čelici sa visokim postotkom fosfora, i specijalne legure su testirane. Ispitani su parametri standardnih termičkih tretmana, hladne i tople deformacije, itd [59].

Tankostjeni cilindri, napunjeni eksplozivom, ispituju se u Pit testu. Rezultati se kompariraju sa rezultatima dobijenim koristeći perlitno željezo, originalnim materijalom koji se koristi za fragmentaciono dejstvo. Materijali koji pokazuju bolje osobine testiraju su u Areni, gdje se mjere brzine fragmenata i njihova prostorna distribucija radi ocjene smrtonosnog dejstva.

Visoko-fragmentacioni čelici koji se koriste za izradu tijela bojeve glave su: AISI 52100 (čelik za ležajeve), AISI 1340 (čelik legiran manganom) i HF-1 (specijalni visoko-ugljični čelik legiran manganom i silicijem) [59].

Čelik za ležajeve, AISI 52100, koristi se u proizvodnji 152mm M409 projektila. Čelik legiran manganom, AISI 1340, najviše se koristi od svih čelika za fragmentaciju. Ima dobre mehaničke osobine, sa granicom razvlačenja od 552 MPa do preko 965 MPa [59].

HF-1 čelik koristi se za proizvodnju tijela projektila 155mm M549 sa raketnim motorom, tijela projektila 155mm M795 i projektila M650 sa raketnim motorom. HF-1 je jedini visoko-fragmentacioni materijal koji ima vlastiti standard: ograničeni koordinacijski vojni standard, MIL-S-50783. HF-1 ima minimalnu granicu razvlačenja od 965 MPa i minimalno relativno izduženje od 5%.

U tabeli 2.3.2.4 prikazan je sastav visoko-fragmentacionih čelika [59].

Tabela 2.3.2.4 Sastav HF čelika [59]

Čelici	**C, %**	**Mn, %**	**P, %**	**S, %**	**Si, %**	**Cr, %**
AISI 52100	0,95-1,10	0,25-0,45	0,025	0,025	0,15-0,30	1,30-1,60
AISI 1340	0,38-0,43	1,60-1,90	0,035	0,040	0,15-0,30	-
HF-1	1,00-1,15	1,60-1,90	0,035	0,040	0,70-1,00	-

Liveno gvožđe jedan je od materijala koji se koristi za izradu tijela bojeve glave. Perlitno gvožđe je legura gvožđa sa silikonom. Zbog toga što se lije kao bijelo gvožđe i termički tretira pod kontrolisanim uvjetima, dio ugljika prisutan je u obliku grafita, a ostatak se namjerno zadržava u kombinovanoj formi. Kombinovane forme ugljika pojavljuju se kao sferoidi, perlitne lamele, ili temperovani martenzitni produkti. Perlitno gvožđe sa tipičnom granicom razvlačenja od 372 MPa i relativnim izduženjem od 7% prvenstveno se upotrebljava za proizvodnju tijela projektila minobacačkih projektila, zbog malih naprezanja u cijevi tokom procesa lansiranja projektila. Materijal se koristi zbog svojih dobrih mehaničkih osobina i superiornih fragmentacijskim karakteristika. Proizvodnjom perlitnog gvožđe kontrolisanim procesom livenja dobija se kvalitetan produkt u skladu sa zahtjevima minobacačke municije. Zato se perlitno gvožđe koristi najviše za izradu tijela minobacačkih projektila [59].

Nodularni liv proizvodi se u procesu koji transformiše grafitne ljuspe, koje se obično nalaze u sivom gvožđu, u nodularni ili sferoidni oblik grafita. Nodularni liv dobija se dodavanjem malih količina magnezijuma u otopljeno liveno gvožđe. Nodule se formiraju tokom procesa solidifikacije. Zato nodularni liv ne zahtjeva ekstenzivan termički tretman kao, napr., perlitno gvožđe. Nodularni liv mnogo je plastičniji od sivog gvožđa, i ima poboljšane mehaničke karakteristike, a superiorniji je u mehaničkim osobinama i od perlitnog plastičnog gvožđa. Koristi se za izradu tijela raketa od 70mm zbog toga što dati materijal nije podvrgnut velikim naprezanjima u toku lansiranja, za izradu tijela aviobombi, i sl [59].

2.3.3 Termička obrada materijala tijela bojeve glave

Toplotni tretman tijela bojave glave neophodan je kako bi se dobile konačne mehaničke karakteristike materijala. Postoje tri osnovna koraka u procesu termičke obrade materijala za bojevu glavu: austenitizacija, kaljenje i popuštanje (temperiranje) [59].

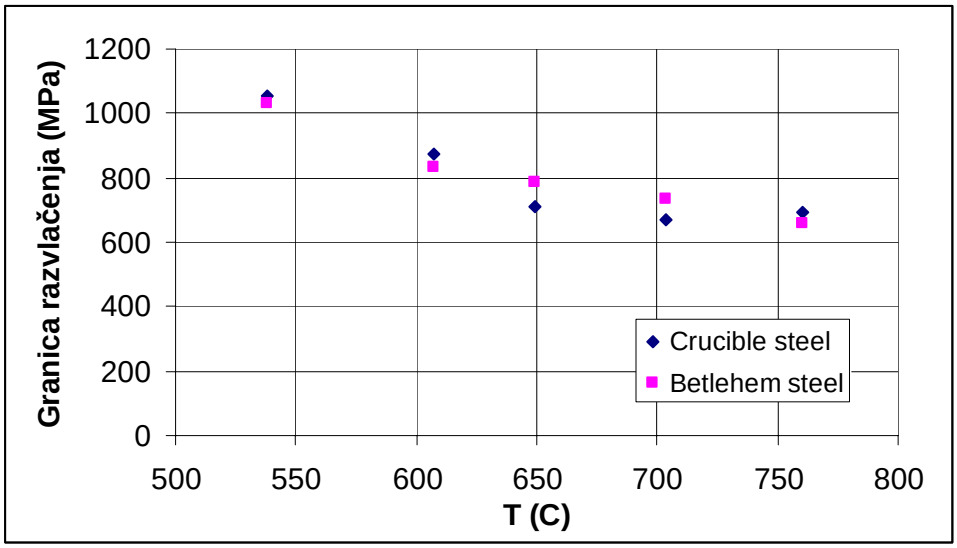
Austenitizacija se postiže zagrijavanjem tijela projektila na temperaturu od 788°C do 871°C kako bi se dobila uniformna austenitna struktura. Kada se projektil zagrije do uniformne temperature, onda se kali u uljanoj kupki [59].

Operacija kaljenja je kritičan korak u dobijanju željenih mehaničkih osobina materijala. Projektili se postave iznad uljane kupke i spuštaju u nju uz pomoć hidrauličnog mehanizma. Kada je projektil potpuno u kupki, ulje se pumpa kroz otvore projektila kako bi se uklonile

šupljine u materijalu i materijal zakalio. Uljana kupka održava se na temperaturi od 660°C do 121°C [59].

Nakon hlađenja na temperaturi kupke, projektil se podiže iznad uljne kupke, suši, i ispira deterdžentom kako bi se uklonio ostatak ulja. Projektili se zatim temperiraju (popuštaju). Popuštanjem se omekšava tvrda i krta martenzitna struktura nastala kaljenjem, kako bi se dobio materijal tražene čvrstoće i žilavosti. Popuštanje na većim temperaturama daje manju čvrstoću i veću žilavost. Normalni temperaturni opseg za temperovanje je od 316°C do 649°C. Temperatura se bira na osnovu sastava čelika i traženih mehaničkih osobina. Nakon procesa popuštanja, projektil se hladi na zraku ili kombinacijom zraka i vodenog mlaza [59].

U zavisnosti od termičke obrade mijenjaju si i mehaničke osobine HF čelika. Na slici 2.3.3.1 prikazana je promjena granice razvlačenja za visoko-fragmentacione čelike proizvedene u dvije kompanije, u zavisnosti od temperature termičkog tretmana [60].



Slika 2.3.3.1 Promjena mehaničkih osobina HF čelika u zavisnosti od temperature termičke obrade [60]

Durkin izvještava o istraživanju [60] čiji cilj je bio napraviti jeftiniji proces proizvodnje tijela bojeve glave OCSW (25mm), sa istom efikasnošću. Korišteno je pet vrsta čelika: AISI 9260, AISI 1340, AISI 1090, AISI 4340 i HF-1. Svaki čelik bio je podvrgnut različitom termičkom tretmanu

Čelik AISI 9260 bio je podvrgnut slijedećim termičkim tretmanima: kovanje i poboljšanje, normalizacija i poboljšanje, austenitizacija sa kaljenjem u ulju i poboljšanje.

Čelik AISI 1340 bio je podvrgnut termičkim tretmanima: kovanje i poboljšanje, austenitizacija sa kaljenjem u ulju i poboljšanje, hladno kovanje i smanjenje napona, hladno kovanje sa austenitizacijom i kaljenjem, te poboljšanjem.

Čelik AISI 1090 bio je podvrgnut slijedećim termičkim tretmanima: austenitizacija sa kaljenjem u ulju i poboljšanjem, te austenitizacija sa kaljenjem u vodi i poboljšanje.

Čelik AISI 4340 bio je podvrgnut termičkim tretmanima: kovanje i poboljšanje, te normalizacija i poboljšanje.

Čelik HF-1 bio je povrdgnut slijedećim termičkim tretmanima: visoko-temperaturna austenitizacija sa kaljenjem u vazduhu i poboljšanje.

Termički tretmani izabrani su tako da se dobije minimalna granica razvlačenja od 690 MPa, dok se varirala mikrostruktura materijala tijela bojeve glave.

Slika 2.3.3.2 Fragmenti dobijeni fragmentacijom čelika AISI 1340

Čelik AISI 1340, hladno kovani sa austenitizacijom i kaljenjem u ulju pokazao je najbolje fragmentacione osobine (slika 2.3.3.2) [47].

2.3.4 Mehaničke karakteristike čelika korištenih u izradi tijela bojeve glave

U našoj zemlji osvojene su vlastite tehnologije izrade košuljica bojevih glava. Čelici koji su se najviše primjenljivali za izradu tijela HE bojevih glava i njihove mehaničke karakteristike prikazani su u tabeli 2.3.4.1.

Tabela 2.3.4.1 Mehaničke karakteristike materijala primjenjivanih u našoj zemlji za izradu tijela projektila različitih kalibara ([62], [8])

Projektil	Materijal	Granica razvlačenja (MPa)	Zatezna čvrstoća (MPa)	Rel. izduženje (%)	Tvrdoća (HB)
60mm M73	Č.1534VP	325	-	-	-
82mm M74	Č.1737VP	441-549	731-837	20-22,5	
100mm M63P	Č.1737VP Č.9180VP	313,92 441,45	- -	- 15	- -
105mm M1	Č.9180VP Č.1635VP	522-540 591-632	787-812 770-784	18,1 24-25	- -
105 M60	Č.1635VP	478-567	744-841	20,1-25	-
120mm M77	Č.9180VP Č.4135VP Č.1737VP	523-627 874-966 441-549	760-861 973-1031 731-837	19-22 20-21 20-22,5	- - -
120mm M62P3	Č.1534VP	364-399	682-695	22,5-23,7	-
122mm M76	Č.9180VP	523-627	760-861	19-22	-
122mm OF-462	Č.1737VP	441-549	731-837	20-22,5	-
125mm OF26	Č.4135VP	1011-1051	1128-1156	13,3-14,3	-
125mm M82	Č.4135VP	920-1076	1051-1200	13,3-15	-
130mm M79	Č.1737VP	313,92	-	-	-
152mm M78	Č.4135VP Č.9180VP	698 516	895 737	21,8 19,3	270-320 214-220
152mm M84	Č.4135VP Č.4734VP	874-966 743-846	973-1031 898-1007	20-21 10-16,7	- -
155mm HEER	Č.4135VP	718,6	913,9	13,2	329-335
155mm M88	Č.1737VP	760	-	10	-
155mm M89	Č.4135VP	730	940	-	260-363

Iz tabele 2.3.4.1 može se zaključiti da je materijal tijela svakog projektila ima nešto drugačije mehaničke karakteristike, zavisno od zahtjeva za dati materijal (čelik).

U tabeli 2.3.4.2 dat je prikaz materijala (čelika) za tijela bojevih glava dalekometnih artiljerijskih projektila, njihov hemijski sastav, standard, oznaka i zemlja porijekla.

Tabela 2.3.4.2 Materijal za tijela projektila povećanog dometa (materijal, oznaka, standard, broj materijala, hemijski sastav i zemlja porijekla) [61],[63]

kalibar	Projektil	Materijal			Hemijski sastav								Država
		Čelik	Oznaka	Standard	C (%)	Si (%)	Mn (%)	max P (%)	max S (%)	Cr (%)	Mo (%)	Ni (%)	
155mm	1. HE ERFB - BB	SAE 9260	9260	SAE J404 - 1994.	0.56-0.64	1.80-2.20	0.75-1.00	0.030	0.040	max 0.20	max 0.060	max 0.25	SAD
	HE ERFB - BT		60C2-60S2	GOST 14959 - 1979.	0.57-0.65	1.50-2.00	0.60-0.90	0.035	0.035	max 0.30	-	max 0.25	Rusija
	2. WP Smoke ERFB - BB		60Si7	DIN 17221 - 1988	0.56-0.64	1.50-1.80	0.70-1.00	0.045	0.045	-	-	-	Njemačka
	WP Smoke ERFB - BT												
203 mm	HE ERFB - BB		Č.2133	JUS C.BO.551 - 1984.	0.52-0.60	1.50-1.80	0.70-1.00	0.040	0.040	-	-	-	ex. Yu
130 mm	HE ERFB - BB	55Cr3	5155-5160	SAEJ1249 - 1995	0.51-0.59	0.15-0.35	0.70-0.90	0.035	0.040	0.70-0.90	-	-	SAD
			50HGA	GOST 14959 - 1979.	0.47-0.52	0.17-0.37	0.80-1.00	0.025	0.025	0.95-1.20	-	max 0.35	Rusija
			55Cr3	DIN 17221 - 1988	0.52-0.59	0.25-0.50	0.70-1.00	0.030	0.030	0.70-1.00	-	-	Njemačka
			Č.4332	JUS C.BO.551 - 1984.	0.52-0.59	0.15-0.40	0.70-1.00	0.035	0.035	0.60-0.90	-	-	ex. Yu
155 mm	HE ERFB - BB	SAE4140	4140	SAE J404 - 1994.	0.38-0.43	0.15-0.35	0.75-1.00	0.030	0.040	0.80-1.10	0.15-0.25	max 0.25	SAD
	Mod 112		-	GOST 4543 - 1971.	-	-	-	-	-	-	-	-	Rusija
	MKE - Turkey		42CrMo4	DIN 17221	0.38-0.45	max 0.40	0.60-0.90	0.035	0.035	0.90-1.20	0.15-0.30	-	Njemačka
			Č.4732	JUS C.B9.021 - 1989.	0.38-0.45	max 0.40	0.60-0.90	0.035	0.030	0.90-1.20	0.15-0.30	-	ex. Yu

1. SAE9260, Silico-Manganese Steel - Čelik za opruge
2. 55Cr3, Chromium Steel - Čelik za opruge
3. SAE4140, Chromium-Molibdenum Steel - Čelik za poboljšanje

Neki od čelika koji se koriste za proizvodnju municije u Rusiji su:

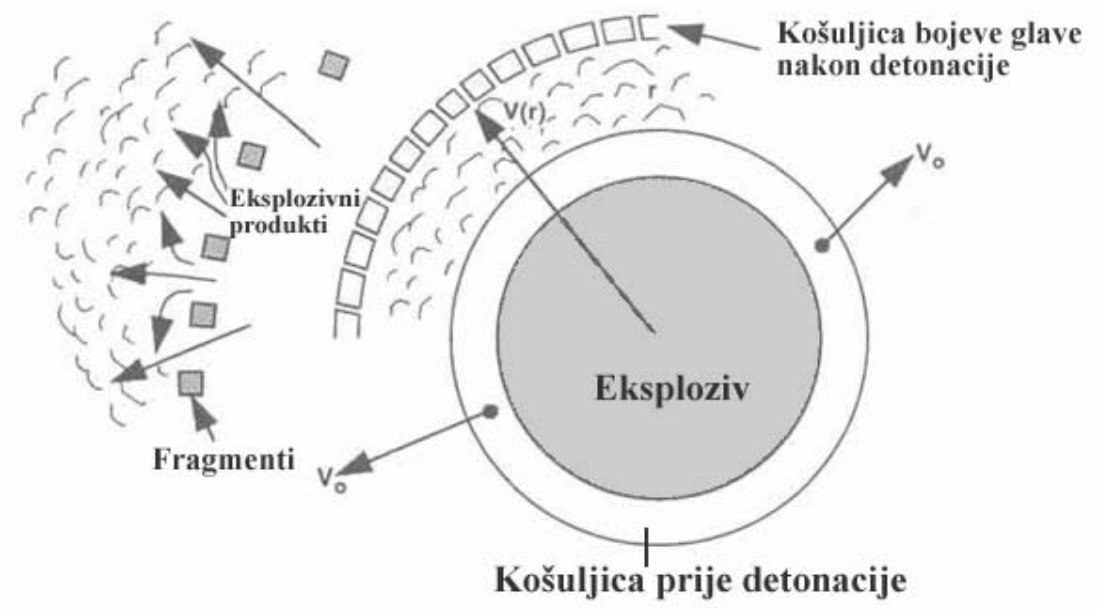
- za HE bojeve glave: S-55, S-60, 45Kh1, 60S2 (silicijumski opružni čelik), 80G2S (eutoktoidni perlitni čelik), 11OG2S (hipereutektoidni perlitno-cementitni čelik) [65],
- za HEAT bojeve glave: 45Kh1 i 45Kh3,
- za AP i HVAP projektile: 33KhGSA, 3EKh3NM, 35Kh3NM, 40KhFA, 35KhGSA i 03N17K10VMT-VD [64].

Što se tiče sastava i fizikalnih karakteristika, ruski čelici 60S2 i 11OG2S najsličniji su američkim visoko-fragmentacionim čelicima AISI 9260 i HF-1 [65].

2.4 Početna brzina fragmenata i ugao vektora brzine fragmenata

2.4.1 Uvod

U analizi HE bojevih glava sa prirodnom fragmentacijom neophodno je odrediti početnu brzinu fragmenata. Teoretska i eksperimentalna istraživanja pokazala su da početna brzina fragmenata (sl. 2.4.1) nastalih fragmentacijom HE bojevih glava zavisi od odnosa mase eksplozivnog punjenja i mase metala tijela (košuljice) bojeve glave, kao i od mehaničkih karakteristika materijala tijela bojeve glave, te vrste eksplozivnog punjenja i njegovih detonacionih parametara.



Slika 2.4.1 Proces detonacije bojeve glave [1]

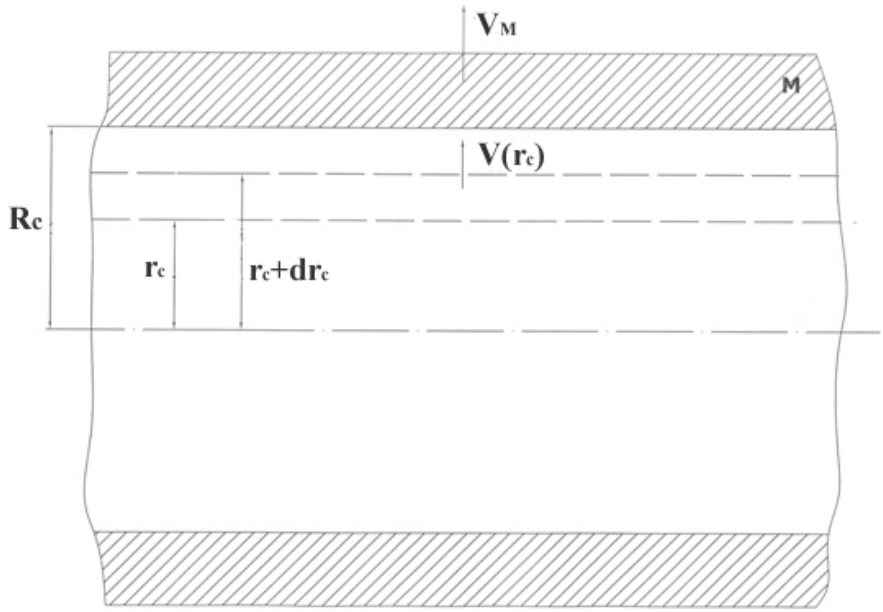
Koristeći podatak o početnoj brzini fragmenata možemo izračunati uglove vektora brzine fragmenata kod HE bojevih glava sa prirodnom fragmentacijom. Ugao vektora brzine fragmenata predstavlja ugao između vektora početne brzine fragmenata i normale na tijelo bojeve glave u određenoj tački.

Eksperimentalna istraživanja ([1], [66]) pokazuju dobro slaganje sa početnim brzinama i uglovima vektora brzina fragmenata, izračunatih analitičkim metodama.

2.4.2 Početna brzina fragmenata

Američki istraživač R. W. Gurney, još 1943. godine razvio je analitičke izraze koji se, uz manje modifikacije, i danas koriste za izračunavanje početne brzina fragmenata. Jednačina Gurney-a opisuje početnu brzinu fragmenata kao funkciju odnosa mase eksplozivnog punjenja i mase metala košuljice i empirijski određene konstante (Gurney-eva konstanta).

Razmatra se šuplji cilindar mase M, unutrašnjeg radijusa R_c, ispunjen eksplozivom mase C_{eks} i gustine ρ (sl. 2.4.2). Pretpostavlja se da je brzina fragmenata jednaka radijalnoj brzini gasovitih produkata u kontaktu sa metalnim tijelom cilindra i da je u svakoj tački radijalna brzina gasova proporcionalna udaljenosti r_c od ose simetrije cilindra [22].



Slika 2.4.2 Presjek cilindra korištenog za izračunavanje početne brzine fragmenata [22]

Gurney je pretpostavio da je ukupna hemijska energija eksploziva prije detonacije jednaka kinetičkoj energiji metala i gasovitih produkata eksploziva nakon detonacije:

$$E_{hem} = E_{Kmetal} + E_{Kgasovi} \tag{2.4.2.1}$$

Izraz (2.4.2.1) može sa napisati u obliku:

$$C_{eks} \cdot E = \frac{1}{2} M \cdot v_M{}^2 + \frac{1}{2} \int_0^{R_{ct}} [v(r_c)]^2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot r_c \cdot \rho(r_c) \cdot dr_c \tag{2.4.2.2}$$

gdje su:
C_{eks} - jedinična masa eksploziva,
E - unutrašnja energija eksploziva,
M - jedinična masa tijela cilindra,
v_M - radijalna brzina tijela cilindra,
$v(r_c)$ - brzina gasovitih produkata u nekoj tački (funkcija udaljenosti r_c),
$\rho(r_c)$ - gustina gasovitih produkata u nekoj tački (funkcija udaljenosti r_c),
R_{ct} - položaj metalnog tijela cilindra u trenutku *t* nakon detonacije ,
r_c - udaljenost gasovitih produkata od ose simetrije.

Masa gasovitih produkata između r_c i $r_c + dr_c$ za jediničnu dužinu cilindra može se izraziti formulom:

$$dM = 2 \cdot \pi \cdot r_c \cdot \rho(r_c) \cdot dr_c \tag{2.4.2.3}$$

Pretpostavlja se da je gustina eksploziva konstantna, te za jediničnu dužinu eksploziva vrijedi:

$$\rho(r_c) = \frac{C_{eks}}{R_c{}^2 \pi} \tag{2.4.2.4}$$

Brzina gasovitih produkata $v(r_c)$ u bilo kojoj tački proporcionalna je udaljenosti od ose simetrije cilindra:

$$v(r_c) = \frac{r_c}{R_c} \cdot v_M \tag{2.4.2.5}$$

Jednačina (2.4.2.2) sada se može napisati u obliku:

$$C_{eks} \cdot E = \frac{1}{2} M \cdot v_M{}^2 + \frac{1}{2} \int_0^{R_{cf}} \left[\frac{r_c}{R_c} \cdot v_M \right]^2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot r_c \cdot \frac{C_{eks}}{R_c{}^2 \cdot \pi} \cdot dr_c \qquad (2.4.2.6)$$

Nakon integracije jednačine (2.4.2.6) dobija se izraz:

$$C_{eks} E = \frac{1}{2} v_M{}^2 \left(M + \frac{1}{2} C_{eks} \right) \qquad (2.4.2.7)$$

Početna brzina fragmenata za cilindričnu konfiguraciju metalnog tijela i eksploziva konačno je

$$v_M = \frac{\sqrt{2E}}{\sqrt{\left(\frac{M}{C_{eks}} + \frac{1}{2} \right)}} = \sqrt{2E} \left[\frac{\frac{C_{eks}}{M}}{\left(1 + \frac{1}{2} \frac{C_{eks}}{M} \right)} \right]^{\frac{1}{2}} \qquad (2.4.2.8)$$

Izraz $\sqrt{2E}$ predstavlja tzv. konstantu Gurney-a, a u literaturi se često susreće i naziv karakteristična brzina Gurney-a. Veličina E (energija Gurney-a) ima dimenziju energije po jediničnoj masi (J/kg), tako da $\sqrt{E}$ ima dimenziju brzine [22].

Konstanta Gurney-a može se predstaviti i u slijedećem obliku [4]:

$$\sqrt{2 \cdot E} = 0{,}338 \cdot D(\rho) \qquad (2.4.2.9)$$

gdje je D - detonacijska brzina eksploziva koja zavisi od gustine eksploziva. U tabeli 2.4.2 [23] prikazane su vrijednosti gustine, detonacijske brzine i karakteristične brzine Gurney-a za različite vrste eksploziva.

Istraživanjima je utvrđeno da se početna brzina fragmenata, izračunata formulom Gurney-a, veoma dobro slaže sa eksperimentalnim podacima.

U realnim uslovima upotrebe, stvarna početna brzina fragmenta v_{ps} predstavlja rezultantu početne brzine fragmenata (Gurney jednačina) v_M, translatorne brzine projektila u trenutku udara u metu v_{tr} i obimne brzine rotirajuće bojeve glave v_ω (ako bojeva glava ima rotaciju).

Tabela 2.4.2 Gustina, detonacijska brzina i karakteristična brzina Gurney-a za različite vrste eksploziva [23]

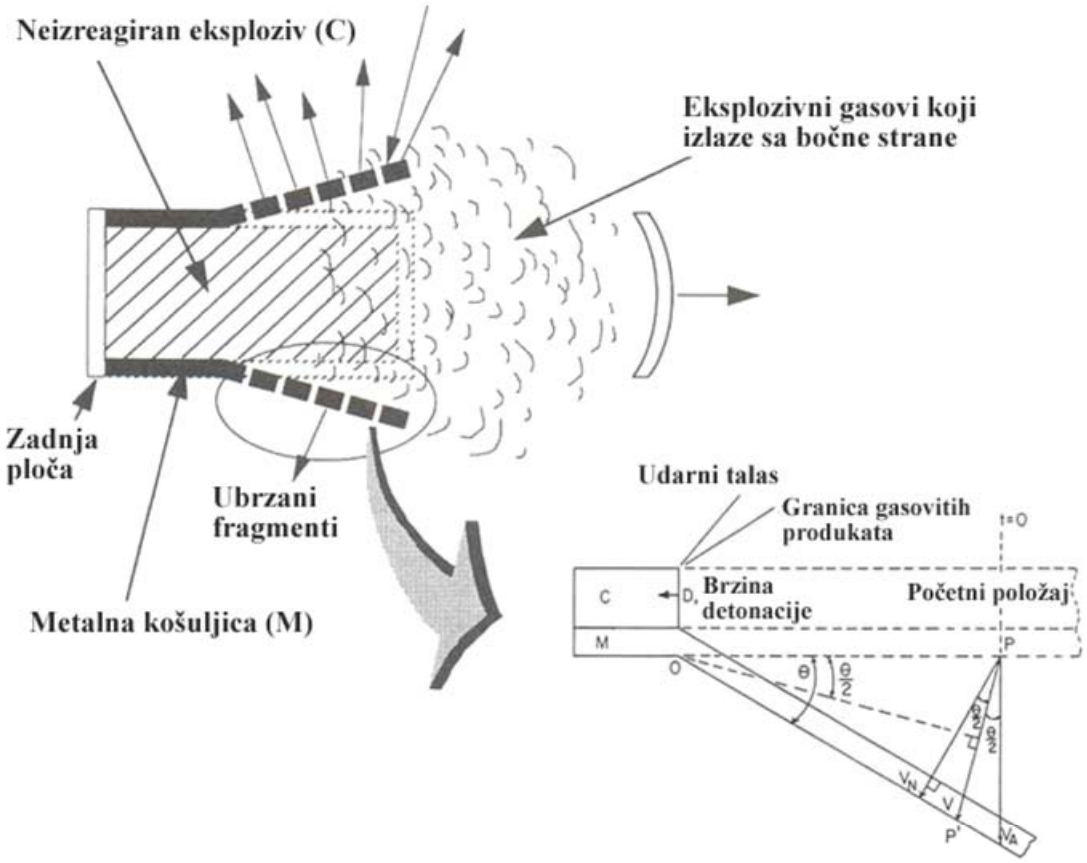
Gustina, detonacijska brzina i karakteristična brzina Gurney-a

Explosive	Density (g/cm^3)	D (km/s)	$\sqrt{2E}$ (km/s) Prompt 5–7 mm	Terminal 19–26 mm
Comp A-3	1.61	8.47	2.402	
	1.59			2.63
Comp B	1.71			2.70
	1.717	7.89	2.35	2.756–2.821
	1.717			2.71
Cast	1.68		2.402	
	1.62		2.32	
Pressed	1.59		2.335	
Comp C-4	1.52	8.37	2.176	
Comp C-3	1.60	7.63		2.68
Cyclotol 75/25	1.754	8.2–8.3		
Cast	1.69		2.286	
Pressed	1.64		2.362	
DATB	1.68	7.52	1.975	
Explosive D	1.50	6.85	1.942	
HBX-1	1.70	7.31	2.213	
HBX-3	1.81	6.9–7.1	1.984	
HMX	1.89	9.11		2.97
LX-14	1.835	8.83		2.80
NM	1.14	6.35		2.41
NQ	1.44	7.65	1.896	
Octol 75/25	1.81	8.48		2.80
	1.821			2.83
DETASHEET C				
(Du Pont)	1.48	6.8		2.1–2.3
(BRL)		7.0		2.8
PBX-9011	1.77	8.5	2.82	
PBX-9404	1.84	8.8		2.90
PBX-9502	1.885	7.71		2.377
Pentolite 50/50				
Cast	1.64	7.52	2.301	
Pressed	1.57		2.317	
PETN	1.76	8.26		2.93
RDX	1.59	8.25	2.451	
	1.77	8.70		2.93
TACOT	1.61	7.25		2.12
Tetryl	1.63	7.5	2.274	
	1.62			2.50
TNT	1.63		2.039	2.419–2.505
	1.63			2.37
Cast	1.61	6.73	2.097	
Pressed	1.54	6.93	2.103	

2.4.3 Ugao vektora brzine fragmenata

Analitički izraz za određivanje ugla vektora brzine fragmenata prilikom fragmentacije HE bojeve glave razvio je Taylor [23].

Neka je metalno tijelo bojeve glave pomjereno, uslijed dejstva detonacionih produkata, za ugao θ od svog početnog položaja. Pretpostavlja se da je ubrzanje metala do konačne brzine trenutačno, i da je proces stacionaran. Na sl. 2.4.3.1 prikazano je da se element na početku procesa nalazio u tački *P*, a nakon vremena *t* u tački *P'*. Realna brzina fragmenta je *v*.



Slika 2.4.3.1 Pravac fragmenata nakon nailaska detonacionog fronta [1], [23]

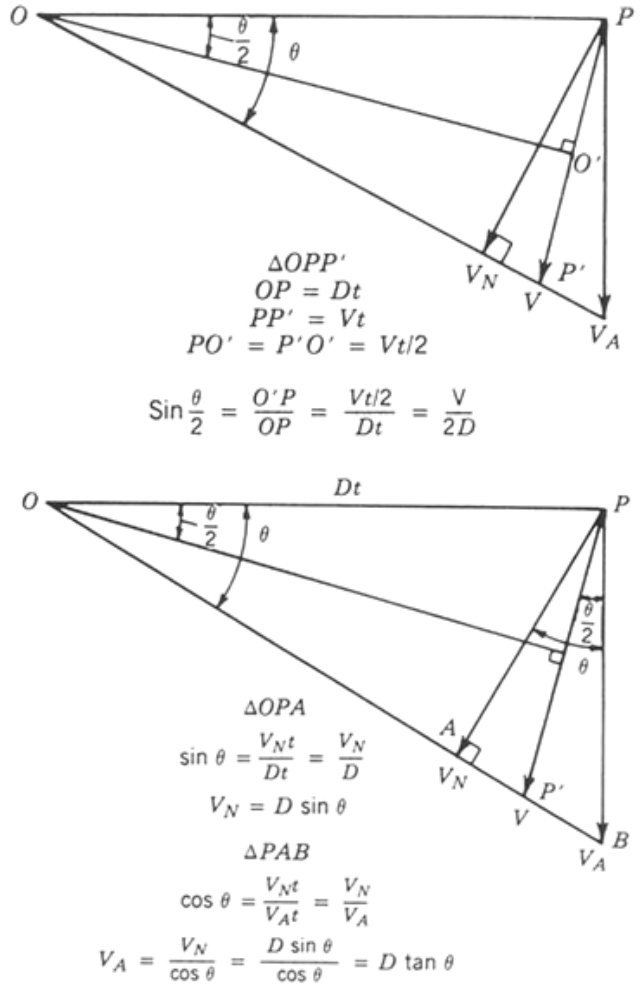
Dužina *OP* jednaka je dužini *OP'*. Linija koja polazi iz tačke *O* okomita je na pravac *PP'*. Ona predstavlja simetralu ugla θ jer je trougao *OPP'* jednakostranični. Ako je *t* vrijeme, proteklo od početka procesa detonacije, onda važe relacije:

$\overline{OP} = D \cdot t$ i $\overline{PP'} = v \cdot t$, pa se može pisati

$$\sin\frac{\theta}{2} = \frac{PP'/2}{OP} = \frac{v \cdot t}{2 \cdot D \cdot t} = \frac{v}{2 \cdot D} \qquad (2.4.3.1)$$

Izraz (2.4.3.1) predstavlja Taylor-ovu formulu za izračunavanje ugla vektora brzine fragmenata, a ugao $\theta/2$ naziva se Talor-ov ugao [23].

Na sl. 2.4.3.2 prikazani su geometrijski parametri korišteni pri izračunavanju Taylor-ovog ugla. Prikazan je i postupak izvođenja veličina v_N - normalne komponente brzine na izvodnicu tijela bojeve glave, i v_A - prividne brzine fragmenata.

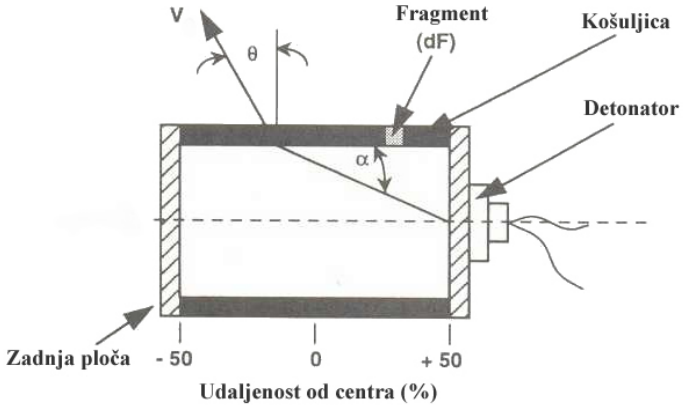


Slika 2.4.3.2 Postupak izvođenja Taylorovog ugla $\delta = \theta/2$, normalne komponete brzine v_N, i prividne brzine fragmenata v_A [23]

Taylor-ova jednačina polazi od pretpostavke da je brzina fragmenta uniformna, i da fragment nema ubrzanja nakon fragmentacije bojeve glave. Takođe, pretpostavlja se da je gustina eksplozivnih gasova uniformna i da je cijeli proces stacionaran.

Ako se pretpostavi da je bojeva glava detonirana sa detonatorom koji se nalazi na desnoj strani bojeve glave, ugao vektora brzine fragmenata (sl. 2.4.3.3) izračunava se formulom:

$$\theta = \arcsin\left(\frac{v}{2 \cdot D}\cos\alpha\right) \tag{2.4.3.2}$$



Slika 2.4.3.3 Taylor-ov ugao u slučaju kada se razmatra tačkasto iniciranje sa jedne strane [1]

Ugao α na slici 2.4.3.3 predstavlja ugao između tačke iniciranja detonacije i elementa na tijelu bojeve glave. Svaki element *dF* na košuljici bojeve glave ima specifičan položaj, relativan u odnosu na tačku iniciranja, i za dati ugao vektora brzine fragmenata, može se izračunati početna brzina fragmenta. Taylor-ova aproksimacija pri kraju bojeve glave ne modelira precizno uglove vektora brzine fragmenata.

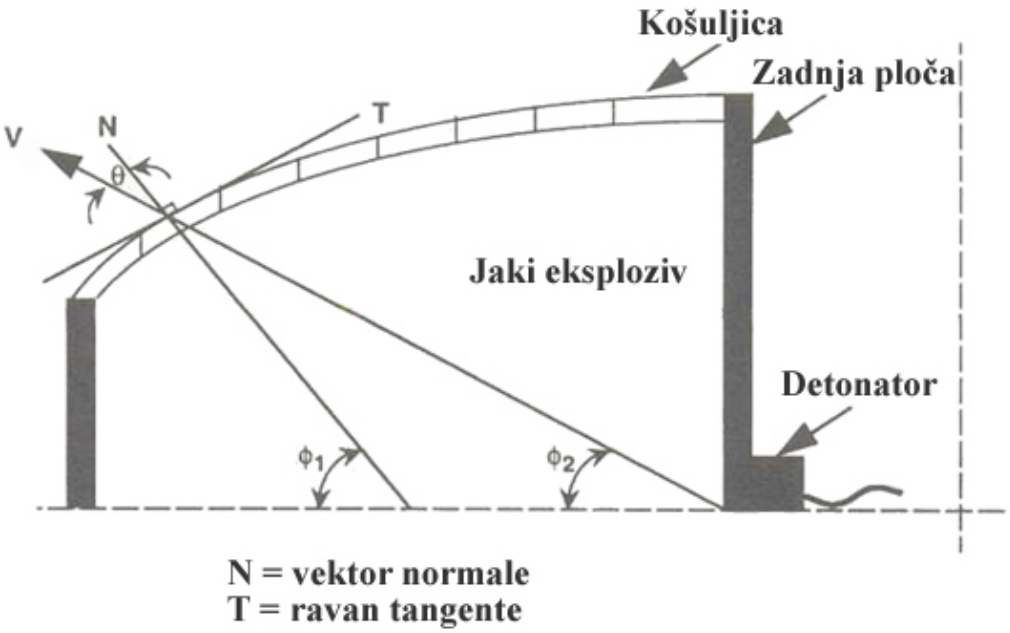
Shapiro je razvio izraz za ugao vektora brzine fragmenata koji uzima u obzir oživalni oblik prednjeg dijela bojeve glave [1]:

$$\theta = arctg\left[\left(\frac{v}{2\cdot D}\right)\cdot\cos\left(\frac{\pi}{2}+\phi_2-\phi_1\right)\right] \qquad (2.4.3.3)$$

Gdje su:

ϕ_1 - ugao koji normala na tijelo bojeve glave (u datoj tački) zaklapa sa osom simetrije,

ϕ_2 - ugao koji normala na detonacioni talas zaklapa sa osom simetrije.



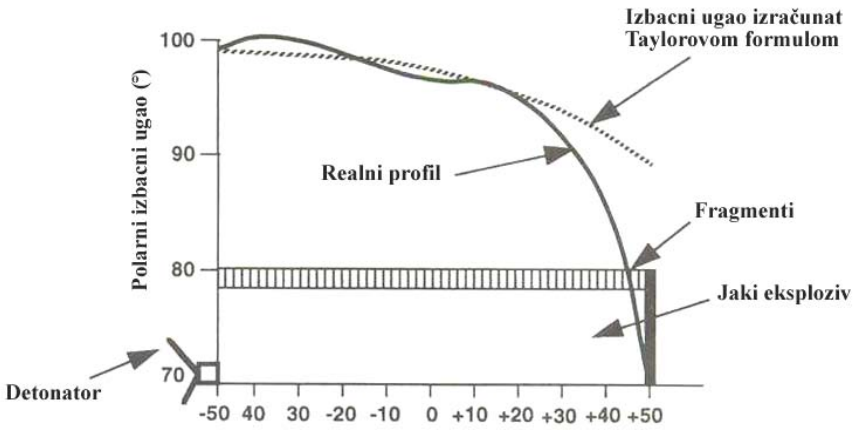
Slika 2.4.3.4 Izbacni ugao kod košuljice oživalnog oblika [1]

Izraz Shapira omogućava dizajnerima da procjene uglove vektora brzine fragmenata kod oživalnih oblika (košuljice), na osnovu početne brzine fragmenata (slika 2.4.3.4). Svaki fragment ima odgovarajući ugao vektora brzine fragmenata, uniforman oko ose bojeve glave.

Svaki ugao fragmenta može se dobiti ako bojevu glavu zarotiramo za 360°. Ovo se dešava samo ako se sistem iniciranja nalazi tačno na osi simetrije bojeve glave. Generalno, košuljica bojeve glave sa oživalnim oblikom ne izbacuje fragmente istom brzinom kao one cilindričnog oblika. Uglovi vektora brzine fragmenata će biti veći kod oživalnih oblika košuljica. Sa druge strane, oživalni oblik košuljica daje širi snop fragmenata u prostoru oko centra detonacije bojeve glave [1].

2.4.4 Primjenljivost formula Gurney-a i Taylor-a

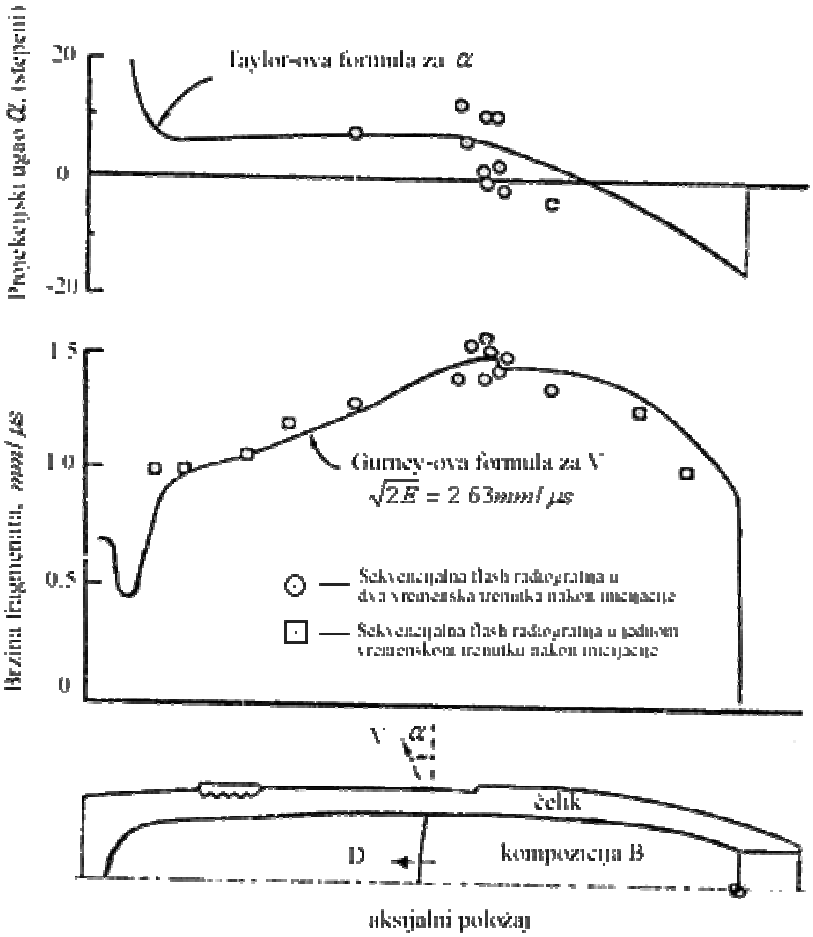
Usporedba između dobijenih eksperimentalnih rezultata i rezultata dobijenih Taylor-ovim izrazom [1] za ugao vektora brzine fragmenata prikazana je na sl. 2.4.4.1



Slika 2.4.4.1 Komparacija rezultata dobijenih Taylor-ovom jednačinom i eksperimentalnim putem [1]

Slika 2.4.4.1 prikazuje uglove vektora brzine fragmenata za cilindričnu konfiguraciju metala i eksplozivnog punjenja.

Na slici 2.4.4.2 prikazana je komparacija eksperimentalnih rezultata i rezultata dobijenih Taylor-ovim izrazom [1] za ugao vektora brzine fragmenata, te eksperimentalnih rezultata i rezultata dobijenih Gurney-evim izrazom za početnu brzinu fragmenata, i to za projektil 105mm M1.



Slika 2.4.4.2 Poređenje formule Gurney-a i Taylor-a sa eksperimentalnim podacima [66]

Sa slike 2.4.4.2 vidi se da se početne brzine i uglovi vektora brzina fragmenata, izračunati formulom Gurney-a i Taylor-a, respektivno, dobro slažu sa eksperimentalim podacima za dati projektil [66].

2.5 Dinamika leta fragmenata

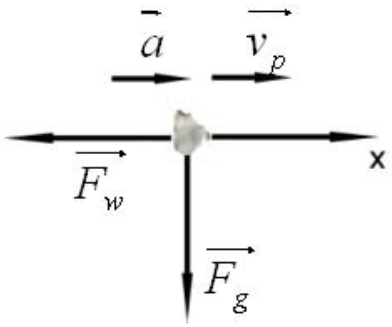
2.5.1 Uvod

Po završetku procesa detonacije eksplozivnog punjenja i fragmentacije tijela projektila, fragmenti se kreću slobodno kroz prostor. Početna brzina fragmenata određuje se metodom Gurney-a. Geometrijske i masene karakteristike nastalih fragmenata zavise od segmenta tijela bojeve glave na kojem je nastao fragment, mehaničkim karakterstikama materijala tijela bojeve glave (odnos zatezne čvrstoće i granice razvlačenja), detonacionim parametrima eksploziva, odnosu mase eksploziva i mase tijela bojeve glave na pojedinim segmentima, itd.

2.5.2 Brzina fragmenata

U toku leta kroz prostor na fragmente djeluju sila otpora atmosfere i sila gravitacije. U analizi brzine fragmenata pretpostavlja se da se fragment kreće pravolinijski.

Fragmenti nastali detonacijom bojeve glave usporavaju kretajući se kroz atmosferu.



Slika 2.5.2 Sile koje djeluju na fragment

Sila otpora atmosfere F_w koja djeluje na fragment (sl. 2.5.2) koji se kreće kroz atmosferu može se izraziti u obliku:

$$F_w = \frac{1}{2} \cdot C_x \cdot S \cdot \rho_w \cdot v^2 \qquad (2.5.2.1)$$

Gdje su:
C_x - aerodinamički koeficijent otpora atmosfere,
S - maksimalni poprečni presjek fragmenta, okomit na njegovo kretanje,
ρ_w - gustina vazduha,
v - brzina fragmenta na udaljenosti *x* od centra detonacije.

Kada neka sila *F* djeluje na tijelo, ono će ili ubrzavati ili usporavati. U slučaju fragmenta dolazi do usporavanja prilikom njegovog kretanja kroz atmosferu, pa se može pisati:

$$m \cdot a = -F \qquad (2.5.2.2)$$

Vektor ubrzanja fragmenta kolinearan je sa vektorom sile otpora atmosfere. Izraz (2.5.2.2), za fragment mase *m*, može se transformirati u slijedeći oblik:

$$m \cdot \frac{d\dot{x}}{dt} = m \cdot \frac{d\dot{x}}{dx} \cdot \frac{dx}{dt} = m \cdot \frac{dv}{dx} v = -\frac{1}{2} \cdot C_x \cdot S \cdot \rho_w \cdot v^2 \qquad (2.5.2.3)$$

Nakon razdvajanja varijabli u izrazu (2.5.2.3) dobija se

$$\frac{dv}{v} = -\frac{1}{2} \cdot C_x \cdot \frac{S}{m} \cdot \rho_w \cdot dx \tag{2.5.2.4}$$

Početni uslovi za integraciju jednačine (2.5.2.4) su:

za x = 0, v = v_0, i za x = x, v = v, pa se može napisati

$$\int_{vo}^{v} \frac{dv}{v} = -\int_{0}^{x} \frac{1}{2} \cdot C_x \cdot \frac{S}{m} \cdot \rho_w \cdot dx \tag{2.5.2.5}$$

Ako se pretpostavi da je aerodinamički koeficijent otpora atmosfere C_x = const, nakon integracije izraza (2.5.2.5) dobija se

$$\ln \frac{v}{v_0} = -\frac{1}{2} \cdot C_x \cdot \frac{S}{m_p} \cdot \rho_w \cdot x \tag{2.5.2.6}$$

Konačan izraz za promjenu brzine fragmenta u funkciji pređenog puta fragmenta je:

$$v = v_0 \cdot e^{-\frac{1}{2} \cdot C_x \cdot \frac{S}{m} \cdot \rho_w \cdot x} \tag{2.5.2.7}$$

Iz izraza (2.5.2.7) može se zaključiti da, za date početne uslove, brzina fragmenta zavisi od početne brzine fragmenta v_0, aerodinamičkog koeficijenta otpora atmosfere C_x, poprečnog presjeka fragmenta S, njegove mase m, gustine atmosfere ρ_w i pređenog puta fragmenta x.

2.5.3 Projekcija površine fragmenta

Prilikom procesa prirodne fragmentacije HE bojevih glava, zbog stohastičnosti procesa, nastaju fragmenti složenog nepravilnog oblika (sl. 2.5.3.1). Njihovo kretanje kroz atmosferu je složeno, a efekti prevrtanja fragmenata igraju bitnu ulogu u procesu njihovog usporavanja prilikom kretanja kroz prostor. Jedan od načina analize projekcije površine fragmenta okomito na pravac njegovog kretanja je da se pretpostavi oblik fragmenta i na osnovnu toga odredi projekcija površine fragmenta okomito na pravac njegovog kretanja.

Slika 2.5.3.1 Fragmenti različitog oblika [47]

Maksimalni poprečni presjek fragmenta *S*, okomit na kretanje fragmenta, može se, prema teoremi Cauchy-ja [6], aproksimirati slijedećim izrazom:

$$S = \frac{1}{4} S_p \tag{2.5.3.1}$$

gdje je S_p je ukupna vanjska površina fragmenta.

Prilikom dinamičke analize leta fragmenata kroz atmosferu mogu se pretpostaviti različiti oblici fragmenata: kocka, sfera, pravougli paralelepiped različitih dimenzija, cilindar, itd.

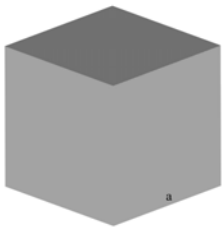
Za pretpostavljene oblike fragmenta, njegovu masu *m* i gustinu materijala fragmenta ρ_k, mogu se izvesti izrazi za projekcije površine fragmenta i njegove mase *S/m*, te ekvivalentne dimenzije fragmenta a_{ekv}.

Oblik fragmenta aproksimiran kockom stranice a_{ekv}

Zapremina tijela: $V = a_{ekv}^{\ 3}$ (2.5.3.2)

Površina tijela: $S_p = 6 \cdot a_{ekv}^{\ 2}$ (2.5.3.3)

Masimalni poprečni presjek fragmenta: $S = \frac{S_p}{4} = \frac{3}{2} a_{ekv}^{\ 2}$ (2.5.3.4)



Slika 2.5.3.2 Oblik fragmenata aproksimiran kockom stranice a_{ekv}

Odnos projekcije površine i njegove mase: $\frac{S}{m} = \frac{3 \cdot a_{ekv}^{\ 2}}{2 \cdot \rho_k \cdot V} = \frac{3 \cdot a_{ekv}^{\ 2}}{2 \cdot \rho_k \cdot a_{ekv}^{\ 3}} = \frac{3}{2 \cdot \rho_k \cdot a_{ekv}}$ (2.5.3.5)

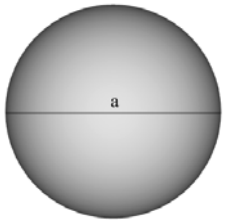
Ekvivalentna dimenzija fragmenta: $a_{ekv} = \sqrt[3]{\frac{m}{\rho_k}}$ (2.5.3.6)

Oblik fragmenta aproksimiran sferom prečnika aekv

Zapremina tijela: $V = \frac{4}{3} \cdot \frac{a_{ekv}^{\ 3}}{8} \cdot \pi = \frac{a_{ekv}^{\ 3} \cdot \pi}{6}$ (2.5.3.7)

Površina tijela: $S_p = 4 \cdot \frac{a_{ekv}^{\ 2}}{4} \cdot \pi = a_{ekv}^{\ 2} \cdot \pi$ (2.5.3.8)

Maksimalni poprečni presjek fragmenta: $S = \frac{S_p}{4} = \frac{1}{4} a_{ekv}^{\ 2} \cdot \pi$ (2.5.3.9)



Slika 2.5.3.3 Oblik fragmenata aproksimiran sferom prečnika a_{ekv}

Odnos projekcije površine fragm. i njegove mase: $\frac{S}{m} = \frac{1 \cdot a_{ekv}^{\ 2} \cdot \pi \cdot 6}{4 \cdot \rho_k \cdot a_{ekv}^{\ 2} \cdot \pi} = \frac{3}{2 \cdot a_{ekv} \cdot \rho_k}$ (2.5.3.10)

Ekvivalentna dimenzija fragmenta: $a_{ekv} = \sqrt[3]{\frac{6 \cdot m}{\rho_k \cdot \pi}}$ (2.5.3.11)

Oblik fragmenta aproksimiran cilindrom sa visinom jednakoj prečniku (aekv) baze cilindra

Zapremina tijela: $V = \frac{a_{ekv}^{\ 2}}{4} \pi \cdot a_{ekv} = \frac{a_{ekv}^{\ 3} \cdot \pi}{4}$ (2.5.3.12)

Površina tijela: $S_p = 2 \cdot \frac{a_{ekv}}{2} \cdot \pi \cdot \left(\frac{a_{ekv}}{2} + a_{ekv} \right) = \frac{3}{2} \cdot a_{ekv}^{\ 2} \cdot \pi$ (2.5.3.13)

Maksimalni poprečni presjek fragmenta: $S = \frac{S_p}{4} = \frac{3}{8} a_{ekv}^{\ 2} \cdot \pi$ (2.5.3.14)

Slika 2.5.3.4 Oblik fragmenata aproksimiran cilindrom sa visinom jednakoj prečniku a_{ekv} baze cilindra

Odnos projekcije površine fragm. i njegove mase: $\frac{S}{m} = \frac{3}{8} \frac{a_{ekv}^{\ 2} \cdot \pi \cdot 4}{\rho_k \cdot a_{ekv}^{\ 3} \cdot \pi} = \frac{3}{2 \cdot \rho_k \cdot a_{ekv}}$ (2.5.3.15)

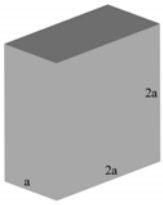
Ekvivalentna dimenzija fragmenta: $a_{ekv} = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot m}{\rho_k \cdot \pi}}$ (2.5.3.16)

Oblik fragmenta aproksimiran pravouglim paralelepipedom (aekv x 2aekv x 2aekv)

Zapremina tijela: $V = a_{ekv} \cdot 2a_{ekv} \cdot 2a_{ekv} = 4 \cdot a_{ekv}^{\ 3}$ (2.5.3.17)

Površina tijela: $S_p = 2\left(a_{ekv} \cdot 2a_{ekv} + a_{ekv} \cdot 2a_{ekv} + 2a_{ekv} \cdot 2a_{ekv}\right) = 16 \cdot a_{ekv}^{\ 2}$ (2.5.3.18)

Maksimalni poprečni presjek fragmenta: $S = \frac{S_p}{4} = 4a_{ekv}^{\ 2}$ (2.5.3.19)



Slika 2.5.3.5 Oblik fragmenata aproksimiran pravouglim paralelepipedom sa dimenzijama: a_{ekv} x $2a_{ekv}$ x $2a_{ekv}$

Odnos projekcije površine fragm. i njegove mase: $\frac{S}{m} = \frac{4 \cdot a_{ekv}^{2}}{\rho_k \cdot 4a_{ekv}^{3}} = \frac{1}{\rho_k \cdot a_{ekv}}$ (2.5.3.20)

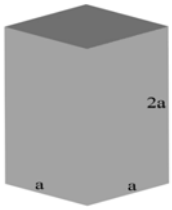
Ekvivalentna dimenzija fragmenta: $a_{ekv} = \sqrt[3]{\frac{m}{4 \cdot \rho_k}}$ (2.5.3.21)

Oblik fragmenta aproksimiran pravouglim paralelepipedom (aekv x aekv x 2aekv)

Zapremina tijela: $V = a_{ekv} \cdot a_{ekv} \cdot 2a_{ekv} = 2 \cdot a_{ekv}^{3}$ (2.5.3.22)

Površina tijela: $S_p = 2\left(a_{ekv} \cdot a_{ekv} + a_{ekv} \cdot 2a_{ekv} + a_{ekv} \cdot 2a_{ekv}\right) = 10 \cdot a_{ekv}^{2}$ (2.5.3.23)

Maksimalni poprečni presjek fragmenta: $S = \frac{S_p}{4} = \frac{5}{2} a_{ekv}^{2}$ (2.5.3.24)



Slika 2.5.3.6 Oblik fragmenata aproksimiran pravouglim paralelepipedom sa dimenzijama: a_{ekv} x a_{ekv} x $2a_{ekv}$

Odnos projekcije površine fragm. i njegove mase: $\frac{S}{m} = \frac{5 \cdot a_{ekv}^{2}}{2 \cdot \rho_k \cdot 2a_{ekv}^{3}} = \frac{5}{4 \cdot \rho_k \cdot a_{ekv}}$ (2.5.3.25)

Ekvivalentna dimenzija fragmenta: $a_{ekv} = \sqrt[3]{\frac{m}{2 \cdot \rho_k}}$ (2.5.3.26)

Gađanjima je provjereno da fragment izduženog oblika teži da se postavi u takav položaj gdje je površina poprečnog presjeka, normalna na pravac kretanja, najveća, ili da se okrene najvećom površinom u pravcu kretanja [9].

Prema novom zajedničkom (američko-britansko-njemačkom) standardu za statičko ispitivanje prostorne distribucije fragmenata bojevih glava [13] u analizi fragmentacije potrebno je odrediti odnos srednje izložene površine fragmenta i njegove mase.

Ovaj faktor predstavlja se na slijedeći način:

$$\frac{\overline{S}}{m} = f_k \cdot m^{-1/3} \qquad (2.5.3.27)$$

gdje su:
$\overline{S}$ - srednja izložena površina fragmenta,
m - masa fragmenta, i
f_k - faktor prilagođavanja [13].

Za preformirane fragmente (nastale kontrolisanom fragmentacijom bojeve glave), npr. oblika kocke, pravouglog paralelepipeda, ili sfere, faktor f_k može se odrediti analitički na osnovu dimenzija fragmenta i gustine materijala fragmenta. Tako je [13]:

$f_k = 1{,}5 \cdot \rho^{-2/3}$ - za fragmente oblika kocke,

$f_k = 0{,}5 \cdot (1 + 2 \cdot q) \cdot (q \cdot \rho)^{-2/3}$ - za fragm. oblika pravouglog paralelepipeda ($a_x a_x b$, odnos q = b/a),

$f_k = \frac{\pi}{4} \cdot \left(\frac{\pi \cdot \rho}{6} \right)^{-2/3}$ - za fragmente oblika sfere.

Za čelične fragmente (ρ = 7,9 g/cm^3), vrijednost faktora f_k je:

f_k = 0,037816 - za fragmente oblika kocke,

f_k = 0,039704 - za fragmente oblika pravouglog paralelepipeda (q = 2),

f_k = 0,030479 - za fragmente oblika sfere [13].

Za fragmente, nastale prirodnom fragmentacijom, f_k se mora aproksimirati. Razvijene su procedure za određivanje odgovarajućeg faktora f_k za fragmente nastale prirodnom fragmentacijom HE bojevih glava [13].

Za određivanje faktora f_k potrebno je:

a. Izabrati reprezentativni uzorak fragmenata u svim masenim grupama,
b. Odrediti masu svakog fragmenta (m_i),
c. Procjeniti dimenzije fragmenta pretpostavljajući da je njegov oblik pravougli paralelepiped, stranica a_i, b_i i c_i,
d. Procjeniti ukupnu vanjsku površinu (S_p) svakog aproksimiranog fragmenta:

$$S_p = 2 \cdot (a_i \cdot b_i + c_i \cdot b_i + a_i \cdot c_i) \qquad (2.5.3.28)$$

e. Izračunati srednju površinu poprečnog presjeka (koristiti Košijevu teoremu za tijela sa konveksnim površinama):

$$\overline{S} = \frac{S_p}{4} \qquad (2.5.3.29)$$

Za *i*-ti fragment važi slijedeća relacija:

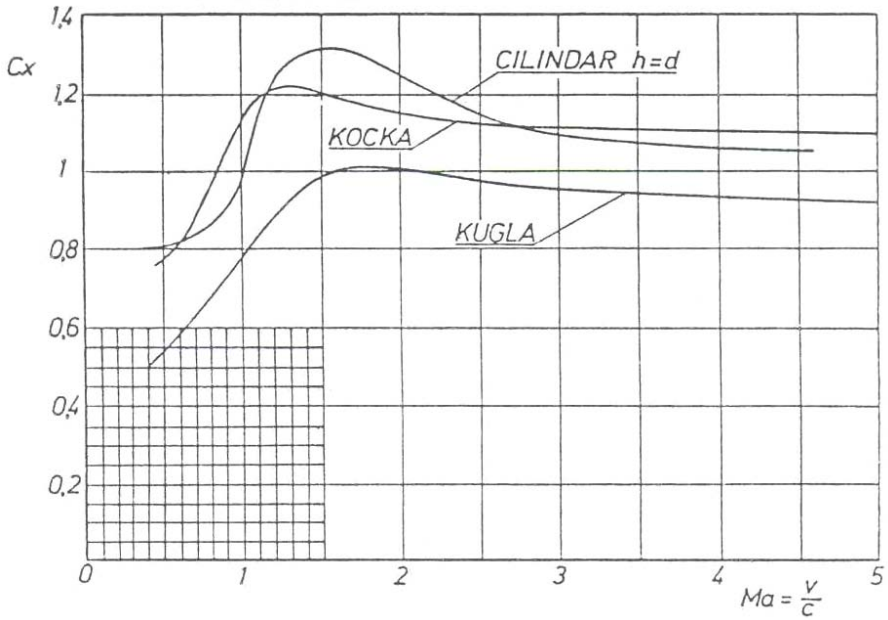
$$\frac{\overline{S_i}}{m_i} = f_k \cdot m_i^{-1/3} \qquad (2.5.3.30)$$

f. Odrediti faktor f_k regresionom analizom dobijenih podataka [13].

2.5.4 Aerodinamički otpor fragmenata

Prvi dostupni podaci o otporima fragmenata pojavili su se u radovima Sutterlin-a. Iz mjerenja koja su vršena u SAD sa modelom fragmenata oblika kocke ili pravog cilindra i čiji su rezultati upoređivani sa koeficijentom otpora fragmenata sferičnog oblika, proizilazi da nema bitnijih razlika između fragmenata oblika kocke i cilindra, sa malom prednosti sferičnih oblika fragmenata.

Istraživanja koeficijenta otpora fragmenta, oblika kocke, cilindra i sfere, daju slijedeću zavisnost koeficijenta otpora C_x od Mach-ovog broja M_a (slika 2.5.4.1) [9].



Slika 2.5.4.1 Koeficijent otpora C_x u funkciji od Mach-ovog broja - M_a za karakteristične oblike fragmenata [9]

Takođe, Sutterlin izvještava o mjerenjima koeficijenta otpora C_x vršenim u SAD za fragmente dobijene fragmentacijom raznih projektila. Fragmenti su izbacivani pomoću nosača od plastične mase.

Za oblasti nadzvučnih brzina dobijeni su rezultati:

- za fragmente od čelika, $C_x \cong 1{,}3$,
- za fragmente od kovanog livenog gvožđa, $C_x \cong 1{,}25$ [9].

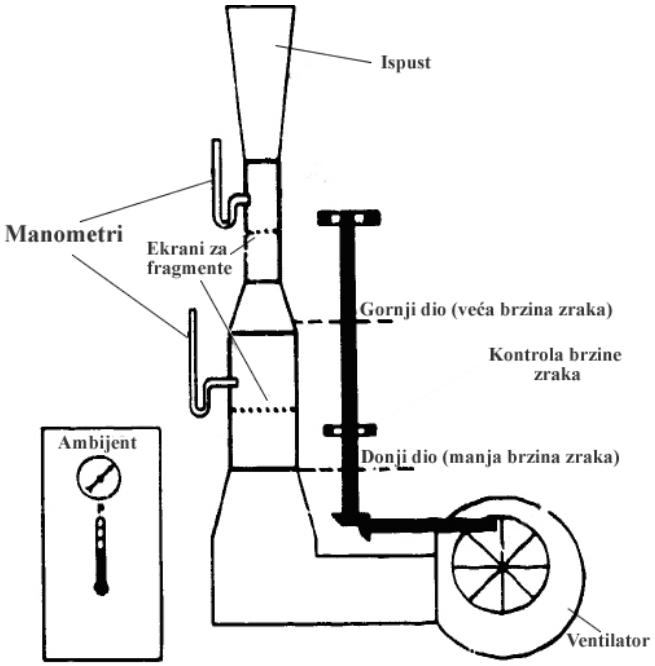
Mehaničke karakteristike materijala tijela bojeve glave (odnos zatezne čvrstoće i granice razvlačenja) bitno utiču na geometriju formiranih fragmenata, a samim time i na otpor atmosfere u toku kretanja fragmenta kroz atmosferu.

Istovremeno su vršena mjerenja mase i spoljašne površine svakog fragmenta. Potvrđeno je da je oblik fragmenata od kovanog gvožđa veoma blizak obliku kocke, dok su fragmenti od čelika mnogo više izduženi [9].

Fragmenti nikada nemaju pravilan oblik. Kada se izbacuju fragmenti oblika paralelepipeda ili cilindra, a naročito u slučaju izbacivanja pomoću eksplozivnog punjenja, često se dešava da se od glavnog fragmenta odvajaju manji dijelovi u obliku ljuspica (odvajanje ravnih listića ili uglastih fragmenata, bez računanja mogućih deformacija fragmenata koja se mogu spljoštiti u toku izbacivanja).

Za fragmente paralelepipednog ili heksagonalnog oblika, za nadzvučne brzine i, uzimajući u obzir pojavu ljuspanja i deformacije, C_x je bliže vrijednosti 1,6 nego 1,1 do 1,2, kako je objavljeno na američkim ispitivanjima sa pravilnim kockama i cilindrima. Povoljnije je ostaviti $C_x = 1{,}20$ i za fragmente čiji je oblik "a priori" pravilan i pomnožiti njihov koeficijent otpora sa 4/3 kako bi se uzelo u obzir ljuspanje koje se neizbježno pojavljuje [9].

McKleskey [67] izvještava o testovima izvršenim u vertikalnom zračnom tunelu (slika 2.5.4.2), gdje je ispitivan koeficijent otpora C_x za male Mach-ove brojeve ($M_a \cong 0{,}1$). Mach-ov broj definiše se kao odnos brzine tijela u lokalnom mediju i brzine prostiranja zvuka u tom mediju.



Slika 2.5.4.2 Uređaj za mjerenje koeficijenta otpora zraka - C_x

Fragmenti oblika sfere, kocke i šipke testirani su u vertikalnom zračnom tunelu. Brzina zračne struje se u ovom uređaju povećava sve dok fragment ne počne lebdjeti na skoro konstantnoj visini. U tom ravnotežnom položaju, otpor zraka i sila gravitacije koji djeluju na fragment su jednaki. Iz zračnog tunela, koristeći postavljene senzore, izračunava se brzina zračne struje. Gustina zraka određuje se na osnovu ambijentalnog pritiska i temperature. Poprečni presjek fragmenta i njegova masa su, takođe, poznati. Koeficijent otpora zraka možemo odrediti na slijedeći način. Iz uslova ravnoteže sile otpora zraka i sile gravitacije slijedi [67]:

$$\frac{1}{2} \cdot C_x \cdot S \cdot \rho_w \cdot v^2 = m \cdot g \tag{2.5.4.1}$$

$$C_x = \frac{2 \cdot m \cdot g}{v^2 \cdot S \cdot \rho_w} \tag{2.5.4.2}$$

Dunn i Porter [67] istraživali su vrijednosti C_x za gornju subsoničnu regiju ($M_a \cong 0{,}75$).

Tabela 2.5.4.1 Komparacija rezultata za C_x (Zračni tunel, Dunn i Porter) [67]

Oblik	**C_x (Zračni tunel) $M_a \cong 0{,}1$**	**C_x (Dunn i Porter) $M_a \cong 0{,}75$**	**Razlika**
Sfera	0,42	0,60	+ 0,18
Kocka	0,64	0,88	+ 0,24
Šipka	0,94	1,12	+ 0,18

U tabeli 2.5.4.1 prikazana je usporedba rezultata za dva spomenuta testa (vertikalni zračni tunel, te Dunn i Porter test) [67].

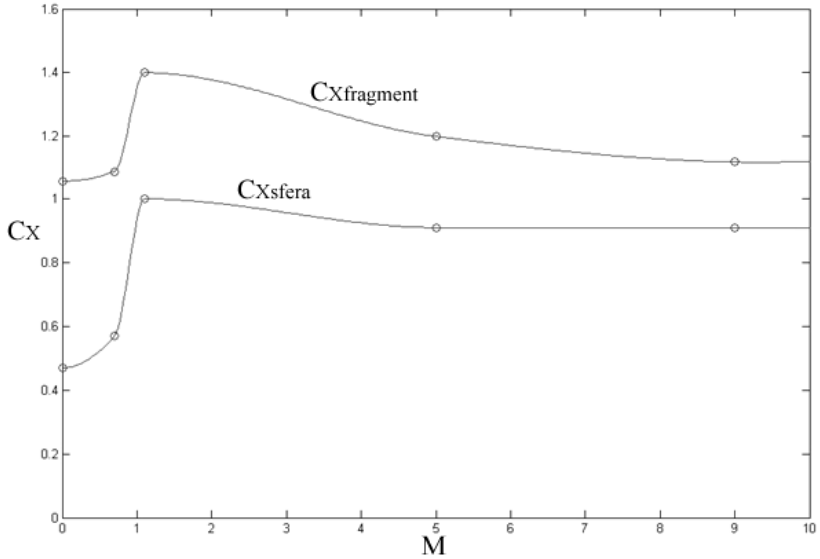
U novije vrijeme izvršena su testiranja holandskih istraživača radi utvrđivanja koeficijenta otpora C_x, u sklopu programa MISDAC [24]. Detaljniji opis ovih eksperimenata nije dostupan široj javnosti, ali rezultati tih testova mogu se vidjeti u tabeli 2.5.4.2.

Tabela 2.5.4.2 Vrijednosti C_x za realne fragmente i fragmente oblika sfere [24]

M_a	0,0	0,70	1,10	5,0	9,0
$C_{x(fragment)}$	1,06	1,09	1,40	1,20	1,12
$C_{x(sfere)}$	0,47	0,57	1,0	0,91	0,91

U tabeli 2.5.4.2 prikazani su rezultati testova u kojima je određena zavisnost koeficijenta otpora C_x od Mach-ovog broja.

Na slici 2.5.4.3 predstavljeni su dijagrami koeficijenta otpora za realne fragmente i fragmente oblika sfere, u zavisnosti od Mach-ovog broja, a koji se odnose na tabelu br. 2.5.4.2 [24].



Slika 2.5.4.3 Dijagrami koeficijenta C_x otpora za realne fragmente i fragmente oblika sfere [24]

Generalno govoreći, fragmenti, posebno oni iz bočnog snopa, kreću se supersoničnim brzinama (1,5 < Ma < 5). Regresionom analizom podataka može se procjeniti funkcija koja najbolje odgovara datim podacima. Na taj način može se procjeniti funkcionalna zavisnost koeficijent otpora C_x od Mach-ovog broja M_a, za dati intreval Mach-ovih brojeva.

Istraživanje koeficijenta otpora fragmenata u toku leta kroz atmosferu je kompleksna oblast, a eksperimentalna ispitivanja veoma skupa. Koeficijent otpora fragmenta zavisi ne samo od njegove mase, brzine i površine poprečnog presjeka, već i od dizajna bojeve glave (tipa projektila), ambijentalnih uslova na cilju, itd.

2.5.5 Domet fragmenata

Udaljenost fragmenta od centra detonacije bojeve glave može se odrediti koristeći izraz (2.5.2.3). On se može transformirati u oblik:

$$dx = -\frac{2 \cdot m}{C_x \cdot S \cdot \rho_w} \cdot \frac{dv}{v} \qquad (2.5.5.1)$$

Nakon integracije izraza (2.5.5.1), uz pretpostavku da je $C_x = const$, i uz početne uvjete da je za x = 0, v = v_0, i za x = x, v = v dobija se slijedeći izraz:

$$\int_0^x dx = -\int_{v_0}^{v} \frac{2 \cdot m}{C_x \cdot S \cdot \rho_w} \cdot \frac{dv}{v} \qquad (2.5.5.2)$$

Konačan izraz za domet fragmenata *x* u funkciji od brzine fragmenata *v* je

$$x = \frac{2 \cdot m}{C_x \cdot S \cdot \rho_w} \ln \frac{v_0}{v} \qquad (2.5.5.3)$$

Ovdje su:
v_0 - početna brzina fragmenata,
v - brzina fragmenata u tački *x*,
ρ_w - gustina vazduha.

Iz izraza (2.5.5.3) može se izvesti zaključak da je udaljenost fragmenta od centra detonacije direktno proporcionalna njegovoj masi *m*, a obrnuto proporcionalna aerodinamičkom koefijentu otpora C_x, površini poprečnog presjeka fragmenta *S* okomito na pravac kretanja, i gustini vazduha ρ_w.

2.5.6 Kriterij onesposobljavajućeg nivoa kinetičke energije fragmenta

Fragmenti u toku svog kretanja prema meti imaju odgovarajuću kinetičku energiju. Neki fragmenti onesposobe vojnika, neki nemaju dovoljno energije. Postoji više kriterija onesposobljavajućeg nivoa kinetičke energije fragmenta.

U Francuskoj se vrši ispitivanje efikasnosti bojevih glava u areni koja se sastoji od četiri polukružna sektora od topolovog drveta debljine 41mm. Za fragmente koji probiju ove panele (debljine 41mm) smatra se da imaju minimalnu kinetičku energiju od 150J, što se ujedno usvaja i kao potrebni minimum da bi se obezbjedila onesposobljavajuća moć fragmenta prilikom dejstva na meke ciljeve, kao što je borac na terenu [9].

Trenutno u SAD-u važi kriterij onesposobljavajućeg nivoa kinetičke energije fragmenta koji je usvojio američki DDESB (Department of Defense Explosives Safety Board), a prema kojem kinetička energija fragmenta mora biti minimalno 80J da bi se onesposobio borac (meki ciljevi) na terenu [12].

Prilikom ispitivanja efikasnosti HE bojevih glava u Areni mogu se usvojiti različiti kriteriji onesposobljavajućeg nivoa kinetičke energije fragmenta, i to prema uslovima ispitivanja (debljina mete, vrsta drveta, itd.). Tako je u našoj zemlji vrijednost od 100J usvojena kao kriterij onesposobljavajućeg nivoa kinetičke energije fragmenta, i u skladu sa tim, debljina i vrsta drvene mete u Areni. Pri proračunu efikasnosti bojeve glave, uvijek se mora voditi računa o tome koji kriterij onesposobljavajućeg nivoa kinetičke energije fragmenta se usvaja.

Ukoliko se koristi američki DDESB vojni standard, kojim se usvaja onesposobljavajući nivo kinetičke energije fragmenta E_{KS} od 80J, može se izvesti izraz za minimalnu smrtonosnu brzina fragmenta za dati kriterij.

Fragment mase *m*, ima (onesposobljavajuću) kinetičku energiju od 80J, ako tokom kontakta sa ciljem ima minimalnu brzinu v_{min}, dobijenu iz slijedećeg izraza:

$$E_{KS} = 80J = \frac{m \cdot v_{\min}^{2}}{2} \qquad (2.5.6.1)$$

Iz ovoga slijedi da je, za spomenuti kriterij onesposobljavajućeg nivoa kinetičke energije E_{KS}, minimalna smrtonosna brzina v_{min} fragmenta mase *m* jednaka:

$$v_{\min} = \sqrt{\frac{2 \cdot E_{KS}}{m}} \qquad (2.5.6.2)$$

Koristeći izraze (2.5.6.1) i (2.5.6.2) može se izvesti izraz za smrtonosni domet x_s pojedinačnog fragmenta mase m, koristeći kriterij onesposobljavajućeg nivoa kinetičke energije fragmenta od E_{KS} = 80J:

$$x_s = \frac{2 \cdot m}{C_x \cdot S \cdot \rho_w} \ln \frac{v_0}{\sqrt{\frac{2 \cdot E_{KS}}{m}}} \tag{2.5.6.3}$$

Na osnovu izraza (2.5.6.3), za različite mase i oblik fragmenata, moguće je procjeniti maksimalnu udaljenost fragmenta na kojoj on posjeduje onesposobljavajuću kinetičku energiju.

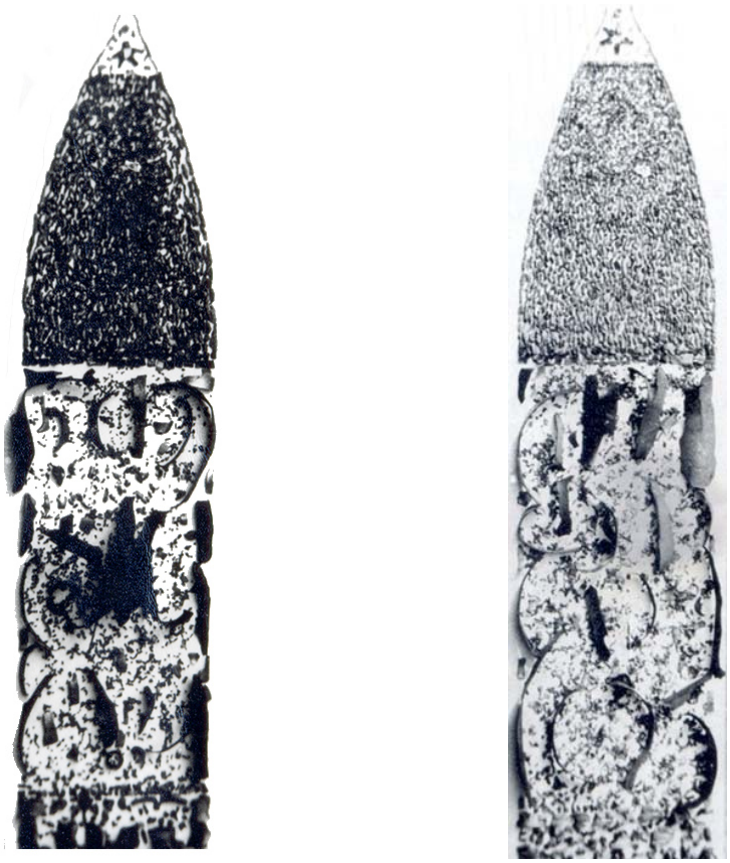
U izrazu (2.5.6.3) koeficijent aerodinamičkog otpora fragmenta C_x je promjenljiv u rasponu brzina v_0 i v_{min} (onesposobljavajuća brzina fragmenta prilikom udara u cilj) i obično se usvaja da se koeficijent otpora mijenja veoma malo u tom intervalu nadzvučnih brzina.

2.6 Masena distribucija fragmenata

2.6.1 Uvod

Na strukturu masene distribucije fragmenata kod HE bojevih glava sa prirodnom fragmentacijom utiče geometrija bojeve glave, prečnik i dužina eksplozivnog punjenja, debljina tijela bojeve glave, materijal tijela bojeve glave (mehaničke karakteristike, tip termičke obrade) i materijal eksplozivnog punjenja (detonacioni parametri).

Sposobnost predviđanja masene distribucije bojevih glava zasniva se na kompleksnosti sopstvene baze podataka parametara prirodne fragmentacije bojevih glava koja treba da sadrži podatke o broju, masi, i obliku fragmenata o ispitanim projektilima.



a) 128mm M87, TNT *b) 128mm M87, Komp. B*

Slika 2.6.1 Fragmenti nastali prirodnom fragmentacijom bojeve glave rakete 128mm M87, napunjene eksplozivom TNT (a) i kompozicijom B (b)

Broj, masa i oblik fragmenata, odnosno njihova masena distribucija, određuju se eksperimentalnom metodom, i to Pit testom ili testom fragmentacije bojeve glave u jami. U Pit uređaju bojeva glava se rasprskava u zatvorenom prostoru, obložena pjeskom, nakon čega se vrši mjerenje geometrijskih i masenih karakteristika fragmenata.

Na sl. 2.6.1 prikazani su fragmenti nastali prirodnom fragmentacijom bojeve glave raketnog projektila 128mm M87, napunjenu sa eksplozivom TNT (sl. 2.6.1.a) i kompozicijom B (slika 2.6.1.b).

Procjena mase i broja fragmenata obično se vrši primjenom metodologije Mott-a ili Held-a. Zakonitosti masene distribucije fragmenata su empirijske, i bazirane su na eksperimentalnim istraživanjima, kao posljedica fragmentacije u Pit uređajima.

2.6.2 Analiza masene distribucije po Mott-u

Mott je razvio model za predviđanje masene distribuciju fragmenata HE bojeve glave. Metodologija Mott-a u SAD-u koristi se već duži niz godina za predviđanje masene distribucije fragmenata nastalih rasprskavanjem bojevih glava sa prirodnom fragmentacijom [1].

Formula Mott-a koja opisuje zavisnost kumulativnog broja fragmenata *N(m)* od mase fragmenta *m* može se predstaviti u obliku [1]:

$$N(m) = \left[\frac{M}{(2\cdot\mu)}\right]\cdot e^{\left(-\frac{m}{\mu}\right)^{1/2}} \qquad (2.6.2.1)$$

gdje je *m* masa fragmenta *i*-te grupe, a

$$\mu = B_e^{\,2}\cdot t_i^{\frac{5}{3}}\cdot d_i^{\frac{2}{3}}\cdot\left(1+\frac{t_i}{d_i}\right)^2 \qquad (2.6.2.2)$$

N(m) - kumulativni broj fragmenata (broj fragmenata sa masom većom od *m*),
μ - srednja masa fragmenta,
M - masa tijela bojeve glave,
B_e - konstanta eksploziva,
t_i - debljina segmenta tijela bojeve glave,
d_i - prečnik segmenta eksplozivnog punjenja [1].

Konstanta B_e zavisi od vrste eksplozivnog punjenja (tabela 2.6.2.1), i povećava se sa smanjenjem detonacione brzine eksploziva [49].

Tabela 2.6.2.1 Vrijednost konstanti B_e i A_e za neke eksplozive [1]

Eksploziv	**Konstanta B_e $[(gr)^{1/2}/(m)^{7/6}]$**	**Konstanta B_e $[(oz)^{1/2}/(in)^{7/6}]$**	**Konstanta A_e $(g/in^3)^{1/2}$**
Baratol	197,18	0,51	-
Kompozicija B	85,06	0,22	1,3
Cyclotol	77,33	0,20	-
H-6	108,26	0,28	-
HBX-1	100,52	0,26	-
HBX-3	123,72	0,32	-
Pentolit (50/50)	96,66	0,25	1,3
PTX-2	88,93	0,23	-
TNT	115,98	0,30	1,7

Gurney i Sarmousakis [1] razvili su izraz za parametar μ kod tankostjenih cilindričnih bojevih glava:

$$\mu^{1/2} = \frac{A_e\cdot t_i\cdot(D_0-t_i)^{3/2}}{d_i}\cdot\sqrt{1+\frac{1}{2}\cdot\frac{C_{eks}}{M}} \qquad (2.6.2.3)$$

Konstante A_e i B_e u izrazu (2.6.2.3) zavise od tipa eksploziva (tabela 2.6.2.1). Parametar D_0 predstavlja prečnik bojeve glave, C_{eks} je masa eksplozivnog punjenja, a *M* je masa tijela bojeve glave [1].

Bojeva glava smatra se tankostjenom ako je debljina tijela bojeve glave manja ili jednaka od 15,24mm (0,6 in).

Ako je tijelo bojeve glave deblje od te vrijednosti, onda se za izračunavanje kumulativnog broja fragmenata *N(m)* koristi izraz:

$$N(m) = N_0 \cdot e^{\left(-\frac{m}{\mu}\right)^{1/3}} \qquad (2.6.2.4)$$

U izrazu (2.6.2.4) N_0 predstavlja ukupan broj fragmenata [1].

2.6.3 Modifikacija Mott-ove formule

Norveški istraživači Stromse i Ingebritsen [69] predstavili su formulu Mott-a u slijedećem obliku:

$$N(m) = \left[\frac{M_{0f}}{\left(2 \cdot M_k^2\right)}\right] \cdot e^{\left(-\frac{m^{1/2}}{M_k}\right)} \qquad (2.6.3.1)$$

Ovdje su:
N(m) - kumulativni broj fragmenata (broj fragmenata sa masom većom od *m*),
m - masa fragmenta,
M_{0f} - ukupna masa sakupljenih fragmenata, a
M_k - parametar koji karakterizira masenu distribuciju fragmenata.

Parametar M_k zavisi od debljine košuljice t_i, prečnika eksplozivnog punjenja d_i i vrste eksplozivnog punjenja. Može se definisati izrazom:

$$M_k = B_e \cdot t_i^{\frac{5}{6}} \cdot d_i^{\frac{1}{3}} \cdot \left(1 + \frac{t_i}{d_i}\right) \qquad (2.6.3.2)$$

gdje su:
B_e - konstanta eksploziva (tabela 2.6.2.1),
t_i - debljina tijela projektila,
d_i - prečnik eksplozivnog punjenja.

Mott-ova formula (2.6.3.1) daje dobru procjenu za fragmente srednje veličine. Međutim, ona ne uzima u obzir uticaj fragmenata veće mase.

Postoji nekoliko načina da se modificira Mott-ova formula kako bi se uzeli u obzir i fragmenti veće mase. Jedan od načina je primjenom formule [69]:

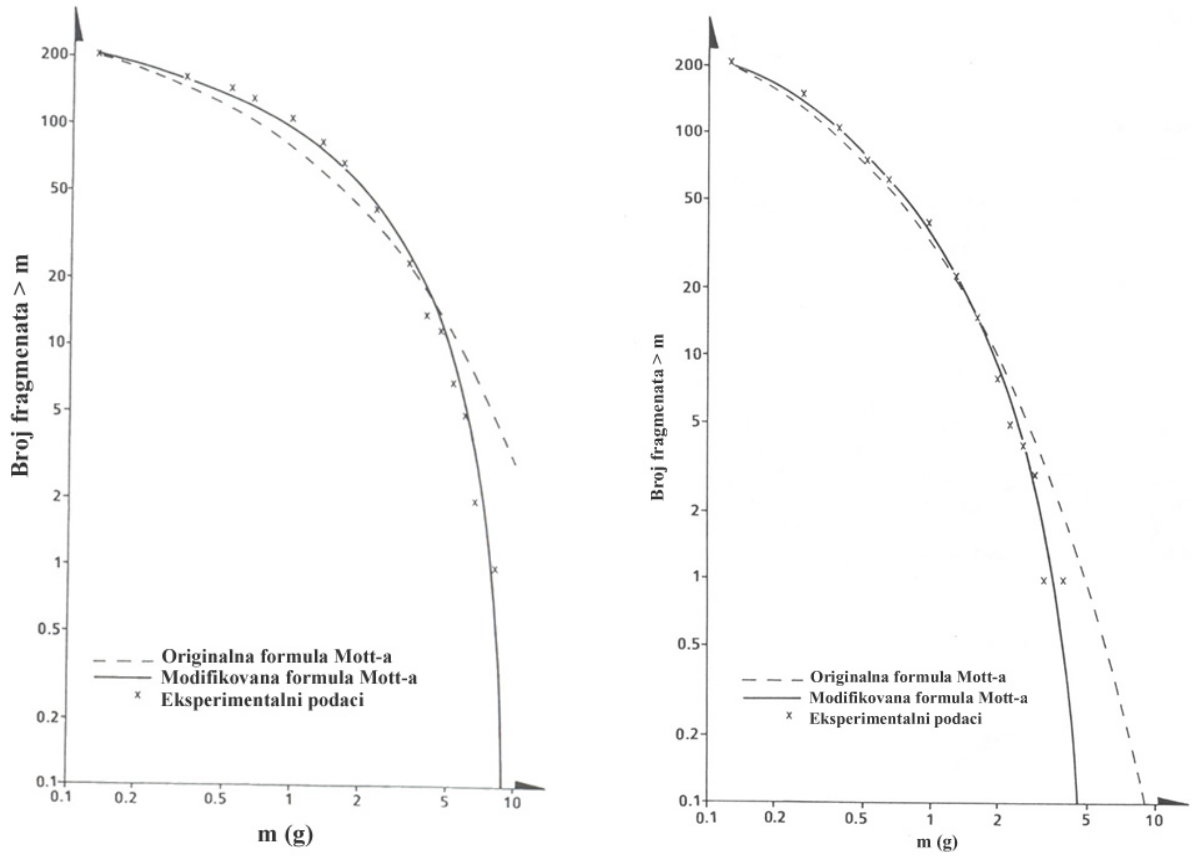
$$N(m) = \frac{\mu_0}{2 \cdot \mu_k^{\,2}} \cdot \left(1 - \sin\left(\frac{\pi \cdot m}{2 \cdot m_{\max}}\right)\right) \cdot e^{\left(-\frac{m^{1/2}}{\mu_k}\right)} \quad \text{za } m < m_{\max} \qquad (2.6.3.3)$$

U izrazu (2.6.3.3) parametri masene distribucije μ_0, μ_k i m_{max} određuju se tako da dati izraz najbolje odgovara eksperimentalnim podacima [69].

Iz eksperimentalnih istraživanja [69] Stromse i Ingebritsen dobili su podatke o broju fragmenata koji su pronađeni u pojedinim (polarnim) sektorima Arene, te nakon postupka mjerenja, klasificirali fragmente prema masenih grupama.

Eksperimentalni podaci iskorišteni su da se odredi srednja masa fragmenata u svakoj masenoj grupi. Srednja vrijednost mase fragmenata određuje se kao geometrijska sredina unutar granice datih masenih grupa. U najnižoj masenoj grupi, gdje je donja masena granica nula, srednja vrijednost mase fragmenta uzima se kao 2/5 vrijednosti gornje granice date masene grupe [69].

Na osnovu dostupnih eksperimentalnih podataka i prijašnjem iskustvu usvaja se nekoliko proizvoljnih vrijednosti za μ_0, μ_k i m_{max}. Prema istraživanju [69] potrebno je odrediti vrijednosti ovih veličina tako da funkcija masene distribucije fragmenata (2.6.3.3) najbolje odgovara eksperimentalnim podacima dobijenim u opitu. Veličine μ_0, μ_k i m_{max} mogu se odrediti statističkom analizom ili softverskim putem.



a.) Minobacački projektil A, bočni snop fragmenata od 98,16° do 114,52°

b.) Minobacački projektil B, bočni snop fragmenata od 101,25° do 112,5°

Slika 2.6.3.1 Komparacija dijagrama masene distribucije po Mott-u (originalna i modifikovana formula) sa eksperimentalnim podacima [69]

Na slici 2.6.3.1 prikazana je komparacija dijagrama masene distribucije po Mott-u (originalna i modifikovana formula) sa eksperimentalnim podacima, i to za dva minobacačka projektila:

- Minobacački projektil A, bočni snop fragmenata od 98,16° do 114,52°, i
- Minobacački projektil B, bočni snop fragmenata od 101,25° do 112,5° [69].

Može se zaključiti da modifikacija Mott-ove formule, izvedena od strane norveških istraživača, daje veoma dobra slaganja sa eksperimentalnim podacima, čak i za veće masene grupe fragmenata.

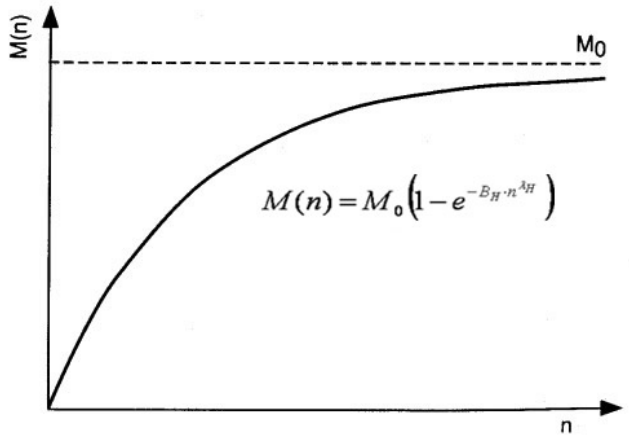
2.6.4 Analiza masene distribucije po Held-u

Njemački istraživač Manfred Held razvio je eksperimentalni pristup u kojem je masena distribucija fragmenata bojeve glave predstavljena kao funkcija kumulativnog broja fragmenata *n*. Held je uspostavio relaciju:

$$M(n) = M_0\left(1 - e^{-B_H \cdot n^{\lambda_H}}\right) \qquad (2.6.4.1)$$

gdje su:
M(n) - kumulativna masa fragmenata,
M_0 - ukupna masa svih pronađenih fragmenata,
n - kumulativni broj fragmenata,
B_H, λ_H - empirijski određene konstante [2].

Grafički prikaz funkcije zavisnosti kumulativne mase fragmenata od kumulativnog broja fragmenata dat je na sl. 2.6.4.1.



Slika 2.6.4.1Grafički prikaz Held-ove funkcije [2]

Konstante B_H i λ_H u izrazu (2.6.4.1) mogu se odrediti na slijedeći način. Transformiranjem izraza (2.6.4.1) dobija se

$$\frac{M_0 - M(n)}{M_0} = e^{-B_H \cdot n^{\lambda_H}} \tag{2.6.4.2}$$

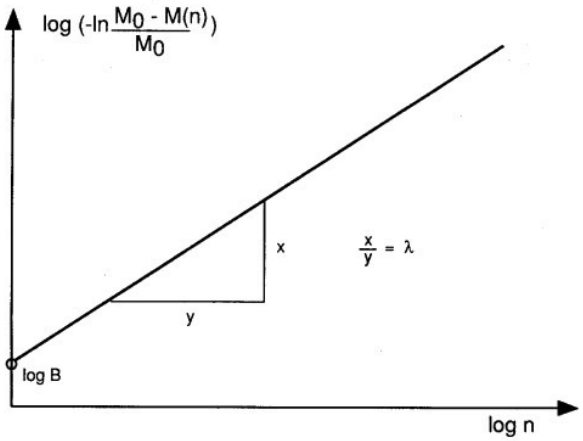
Logaritmiranjem jednačine (2.6.4.2) dolazi se do izraza:

$$\ln \frac{M_0 - M(n)}{M_0} = -B_H n^{\lambda_H} \tag{2.6.4.3}$$

Vrijednosti B_H i λ_H određuju se ponovnim logaritmiranjem, i to izraza (2.6.4.3), te se dobija:

$$\log\left(-\ln \frac{M_0 - M(n)}{M_0}\right) = \log B_H + \lambda_H \cdot \log n \tag{2.6.4.4}$$

Logaritmska reprezentacija tačke presjeka n = 1 ili log(n) = 0 daje konstantu *log(B_H)* direktno na ordinati, a eksponent λ_H određuje se kao nagib pravca (sl. 2.6.4.2) [2].



Slika 2.6.4.2 Određivanje konstani B_H i λ_H iz log-log dijagrama [2]

Diferenciranjema izraza (2.6.4.1) po *n* moguće je dobiti izraz za masu fragmenta *m*, u zavisnosti od kumulativnog broja fragmenata *n*:

$$m = \frac{dM(n)}{dn} = M_0 \cdot B_H \cdot \lambda_H \cdot n^{\lambda_H - 1} \cdot e^{-B_H n^{\lambda_H}} \qquad (2.6.4.5)$$

Iz dijagrama masene distribucije fragmenata određuju se konstante B_H i λ_H sve dok se ne dobije zadovoljavajući koeficijent korelacije. Ako u dobijenom log-log dijagramu podaci značajno odstupaju od regresione krive, to znači da ukupna masa dragmenata M_0 nije optimalna masa za tu masenu distribuciju [2]. Pristupa se određivanju optimalne mase M_{0opt}, i to slijedećim izrazom:

$$M_{0opt} = \frac{M(n)}{\left(1 - e^{-B_H \cdot n^{\lambda_H}}\right)} \qquad (2.6.4.6)$$

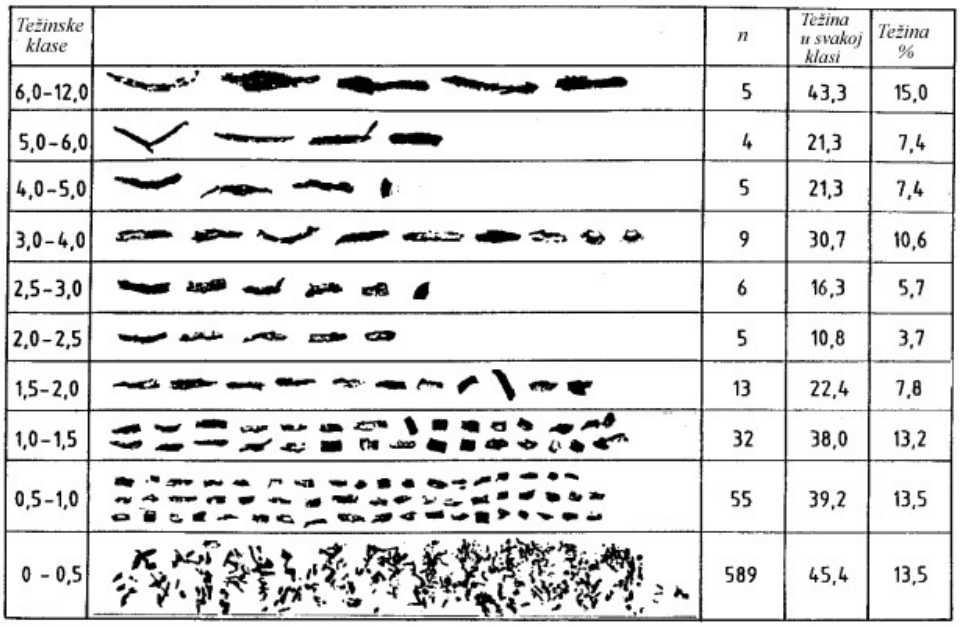
Konstante B_H i λ_H određene su na osnovu originalne mase metalnog tijela bojeve glave.

Nove konstante B_{Hn} i λ_{Hn} određuju se uz pomoć optimalne mase M_{0opt}:

$$M(n) = M_{0opt} \cdot \left(1 - e^{-B_{Hn} \cdot n^{\lambda_{Hn}}}\right) \qquad (2.6.4.7)$$

Ova procedura ponavlja se sve dok se ne dobije zadovoljavajući koeficijent korelacije [2].

Na slici 2.6.4.3 prikazani su fragmenti nastali prirodnom fragmentacijom Hispano Suiza 30-mm × 170 UIA HE projektila, klasificirani po masenim grupama [2].

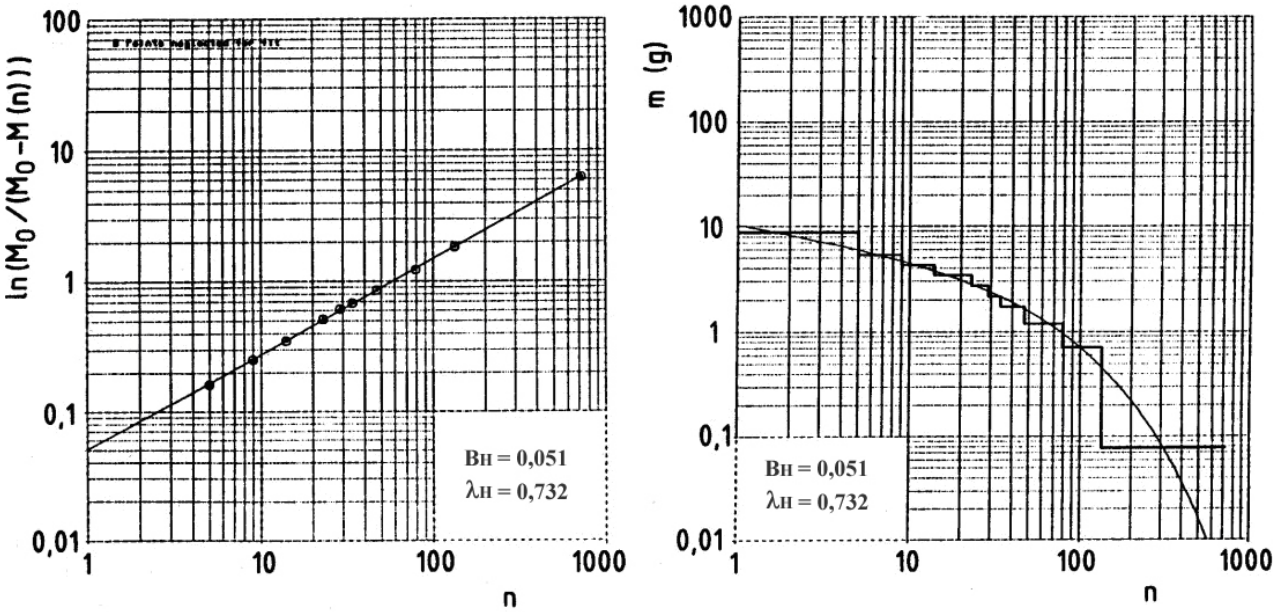


Težinske klase		n	Težina u svakoj klasi	Težina %
6,0–12,0		5	43,3	15,0
5,0–6,0		4	21,3	7,4
4,0–5,0		5	21,3	7,4
3,0–4,0		9	30,7	10,6
2,5–3,0		6	16,3	5,7
2,0–2,5		5	10,8	3,7
1,5–2,0		13	22,4	7,8
1,0–1,5		32	38,0	13,2
0,5–1,0		55	39,2	13,5
0 – 0,5		589	45,4	13,5

Slika 2.6.4.3 Masena distribucija HE projektila HISPANO SUIZA 30-mm × 170 UIA [2]

Analiza masene distribucije fragmenata za projektil Hispano Suiza 30-mm koristeći izraze izvedene metodom Held-a prikazana je na dijagramima sa slike 2.6.4.4.

Regresionom analizom dobijeni su rezultati za koeficijente B_H= 0,051 i λ_H = 0,732 koji najbolje odgovaraju datim podacima (slika 2.6.4.4.a). Na slici 2.6.4.4.b prikazana je zavisnost kumulativne mase fragmenata *m* od kumulativnog broja fragmenata *n*. Tako se iz dijagrama 2.6.4.4.b može zaključiti, npr., da ima oko 80 fragmenata sa masom većom od 1g, dok fragmenata sa masom većom od 0,1g ima oko 300.



a.) Određivanje Held-ovih koeficijenata B_H i λ_H

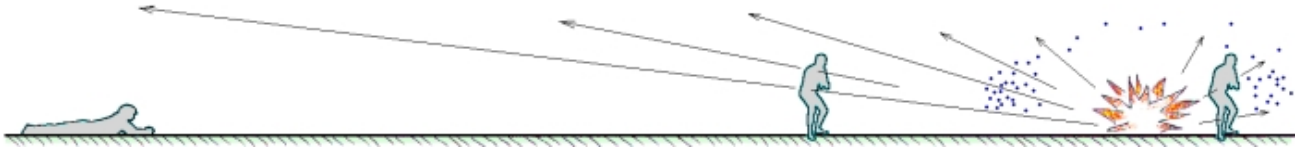
b.) Zavisnost mase fragmenata od kumulativnog broja fragmenata

Slika 2.6.4.4 Masena distribucija fragmenata za HISPANO SUIZA 30-mm HE projektil [2]

2.7 Prostorna distribucija fragmenata

2.7.1 Uvod

Prostorna efikasnost HE bojevih glava sa prirodnom fragmentacijom predstavlja mjeru učinka bojeve glave na cilju. Prilikom procjene prostorne efikasnosti HE bojevih glava koriste se eksperimentalni rezultati dobijeni u Arena testovima (test fragmentacije bojeve glave u prostoru).



Slika 2.7.1 Djelovanje fragmenata projektila na borce na terenu [10]

Procjena prostorne distribucije fragmenata pri procesu prirodne fragmentacije HE bojevih glava (slika 2.7.1), prema dosadašnjim istraživanjima, bazira se na poznavanju:

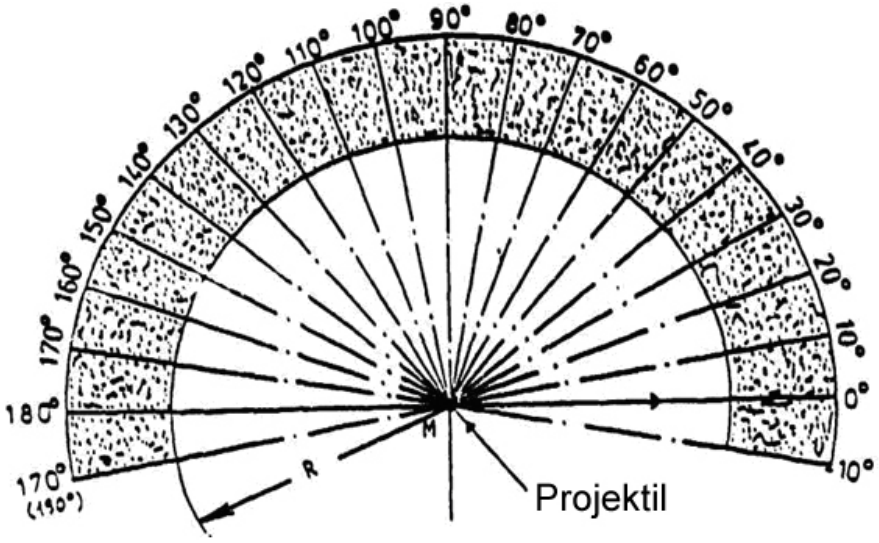
- ukupnog broja fragmenata nastalih fragmentacijom bojeve glave
- gustine efikasnih fragmenata u funkciji polarnog ugla i rastojanja od centra detonacije
- minimalne kinetičke energije fragmenta potrebne za onesposobljavanje borca
- gustine boraca na površini cilja i izloženoj površini borca na cilju
- padnog ugla i visine detonacije bojeve glave

Na osnovu poznavanja navedenih parametara pristupa se određivanju radijusa ubojnog dejstva bojeve glave, vjerovatnoće onesposobljavanja vojnika na terenu, koeficijenta efikasnosti, itd.

2.7.2 Određivanje ukupnog broja fragmenata

Predviđanje ukupnog broja fragmenata u prostoru, nastalih fragmentacijom HE bojeve glave, vrši se na osnovu eksperimentalnih podataka dobijenim u polukružnoj Areni.

Poslije izvršenog testa u Areni, određuje se broj fragmenata (proboji i zadori) koji su udarili u određeni segment (panel) Arene, i to za definisane polarne zone arene (slika 2.7.2.1).



Slika 2.7.2.1 Prikaz polarnih zona polukružne arene [13]

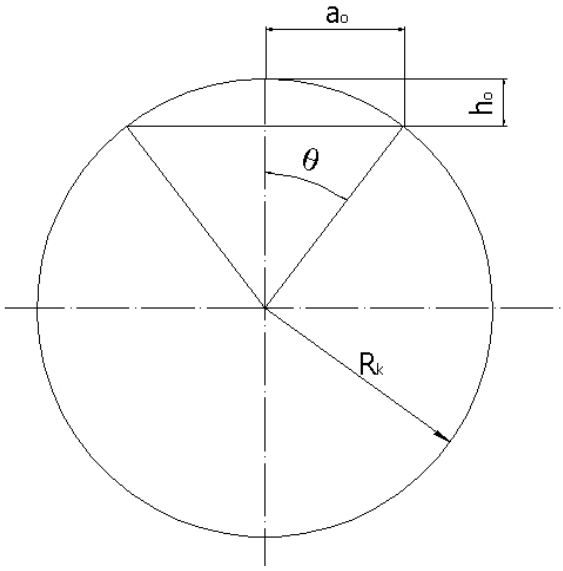
Ukupni broj fragmenata u prostoru može se odrediti na osnovu jednačina:

$$N_{uk} = \sum_{j=1}^{n} N_j \tag{2.7.2.1}$$

$$N_j = n_j \cdot \frac{S_{\Omega j}}{S_m} \tag{2.7.2.2}$$

gdje su:
N_{uk} - ukupni broj fragmenata u prostoru oko bojeve glave,
N_j - ukupni broj fragmenata u *j*-toj polarnoj zoni arene,
n_j - broj registrovanih fragmenata (prodori i zadori) u *j*-toj polarnoj zoni arene,
$S_{\Omega j}$ - površina dijela sfere koju odsjeca prostorni ugao u *j*-toj polarnoj zoni arene,
S_m - površina panela arene (Konstantna za određeni sektor arene).

Odnos $S_{\Omega j}/S_m$ u zapadnoj literaturi naziva se faktor multiplikacije, a predstavlja odnos površine dijela sfere koju odsjeca prostorni ugao u *j*-toj polarnoj zoni arene sa površinom panela arene [13]. Veličina $S_{\Omega j}$ određuje se matematičkom procedurom koja uzima u obzir geometrijske karakteristike sfere [17].



Slika 2.7.2.2 Geometrijske karakteristike sfere [15]

Steradijan je prostorni ugao koji na sferi radijusa R_k formira odsječak površine omotača R_k^2. Površina tog odsječka visine h_o, na sferi radijusa R_k (slika 2.7.2.2), može se izraziti preko formule [15]:

$$A_o = 2 \cdot \pi \cdot R_k \cdot h_o \tag{2.7.2.3}$$

Visina odsječka h_o jednaka je (slika 2.7.2.2):

$$h_o = R_k - R_k \cdot \cos\theta \tag{2.7.2.4}$$

Steradijan, prostorni ugao konusa Ω koji potiče iz centra sfere, radijusa R_k, može se odrediti formulom:

$$\Omega = \frac{A_o}{R_k^{\ 2}} \tag{2.7.2.5}$$

Zamjenom izraza (2.7.2.3) u izrazu (2.7.2.4) dobija se:

$$\Omega = \frac{2 \cdot \pi \cdot R_k \cdot h_o}{R_k^{\ 2}} = \frac{2 \cdot \pi \cdot R_k \cdot \left(R_k - R_k \cdot \cos\theta\right)}{R_k^{\ 2}} = 2 \cdot \pi \cdot \left(1 - \cos\theta\right) \qquad (2.7.2.6)$$

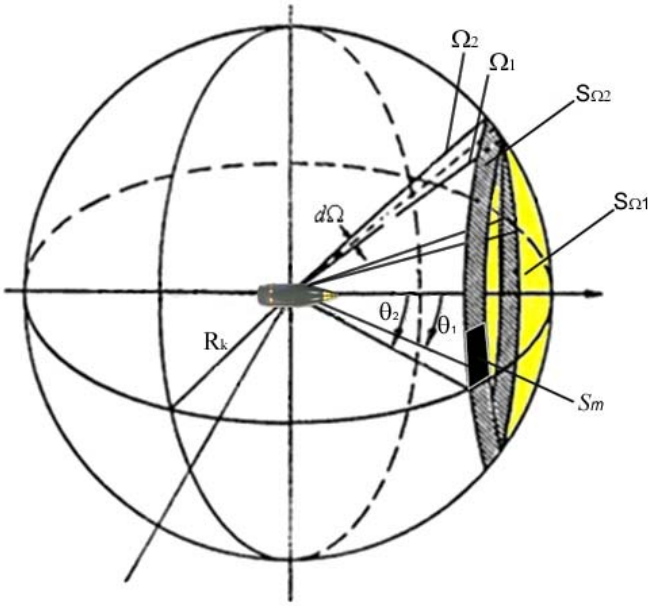
U izrazu (2.7.2.6) ugao θ je polarni ugao arene (ugao u ravni tla).

Izraz (2.7.2.5) predstavlja formulu za određivanje prostornog ugla za prvu polarnu zonu arene. To je ugao konusa (slika 2.7.2.3) koji je ograničen sferom poluprečnika R_k (R_k je ujedno i poluprečnik sektora Arene) i prvom polarnom zonom arene (θ_1).

Sada se može napisati izraz za površinu odsječka sfere koju odsjeca prvi prostorni ugao:

$$S_{\Omega 1} = 2\pi R_k^{\ 2}(1 - \cos\theta_1) \qquad (2.7.2.7)$$

Na slici 2.7.2.3 prikazani su geometrijski parametri potrebni za određivanje ukupnog broja fragmenata. Nakon što je izvedena formula za određivanje prostornog ugla za prvu polarnu zonu arene i površine dijela sfere koju odsjeca prvi prostorni ugao, slijedeći korak je definisanje izraza za određivanje prostornog ugla slijedeće polarne zone arene, kao i određivanje površine dijela sfere koju odsjeca slijedeći prostorni ugao.



θ_1 - Polarni ugao prvog segmenta arene

θ_2 - Polarni ugao drugog segmenta arene

$d\Omega$ - Razlika dva susjedna prostorna ugla

S_m - Površina mete u datom sektoru arene

Ω_1 - Prostorni ugao prve polarne zone

Ω_2 - Prostorni ugao druge polarne zone

$S_{\Omega 1}$ - Površina dijela sfere koju odsjeca prvi prostorni ugao

$S_{\Omega 2}$ - Površina dijela sfere koju odsjecaju prvi i drugi prostorni ugao

Slika 2.7.2.3 Geometrija koja se koristi u analizi ukupnog broja fragmenata

Sa slike 2.7.2.3 može se uočiti da je potrebno odrediti razliku uglova Ω_2 i Ω_1, kako bi se odredila veličina $d\Omega$. Tako se razlika dva prostorna ugla Ω_2 i Ω_1 može predstaviti u obliku:

$$\Delta\Omega = \Omega_2 - \Omega_1 \qquad (2.7.2.8)$$

Iz prethodne analize [izraz (2.7.2.6)] može se napisati:

$$\Omega_2 = 2 \cdot \pi \cdot (1 - \cos\theta_2) \tag{2.7.2.9}$$

Na osnovu izraza (2.7.2.8) i (2.7.2.9) vrijedi:

$$\Delta\Omega = 2 \cdot \pi \cdot (1 - \cos\theta_2) - 2 \cdot \pi \cdot (1 - \cos\theta_1) = 2 \cdot \pi \cdot (\cos\theta_1 - \cos\theta_2) \tag{2.7.2.10}$$

Sada se može napisati formula za površinu dijela sfere $S_{\Omega 2}$ koju odsjecaju prostorni uglovi Ω_2 i Ω_1 (slika 2.7.2.3), preko izraza:

$$S_{\Omega 2} = \Delta\Omega \cdot R_k^{\ 2} = 2\pi R_k^{\ 2}(\cos\theta_1 - \cos\theta_2) \tag{2.7.2.11}$$

Opšti izraz za definisanje površine dijela sfere koju odsjecaju dva susjedna prostorna ugla, za *j*-tu polarnu zonu može se napisati u obliku:

$$S_{\Omega j} = 2\pi R_k^{\ 2}(\cos\theta_j - \cos\theta_{j+1}) \tag{2.7.2.12}$$

Konačna formula za određivanje ukupnog broja fragmenata na određenom radijusu (R_k) od centra detonacije je:

$$N_{uk} = \sum_{j=1}^{n} N_{jk} = \sum_{j=1}^{n} n_j \cdot \frac{2\pi R_k^{\ 2}(\cos\theta_i - \cos\theta_{i+1})}{S_m} \tag{2.7.2.13}$$

2.7.3 Radijus ubojnog dejstva

Za određivanje radijusa ubojnog dejstva koriste se eksperimentalni podaci dobijeni testom fragmentacije bojevih glava u četvrtkružnoj Areni.

Ovaj test koristi se u fazi provjere reproduktivnosti procesa proizvodnje i za jednostavnu usporedbu performansi sličnih bojevih glava. Svaki sektor sastoji se iz određenog broja drvenih panela, a efikasan fragment je onaj koji ima dovoljnu kinetičku energiju da probije etalonsku drvenu metu (koja može biti različite debljine, zavisno od kriterija onesposobljavajuće kinetičke energije).

Nakon fragmentacije bojeve glave u četvrtkružnoj Areni, u protokol fragmentacije unose se podaci podaci o broju proboja, koji se koriste kao polazna tačka za određivanje radijusa ubojnog dejstva bojeve glave.

Nakon rasprskavanja bojeve glave, za svaki sektor četvrtkružne Arene procjenjuje se gustina efikasnih fragmenata d_s (fragmenti koji su probili drvenu metu) korištenjem izraza:

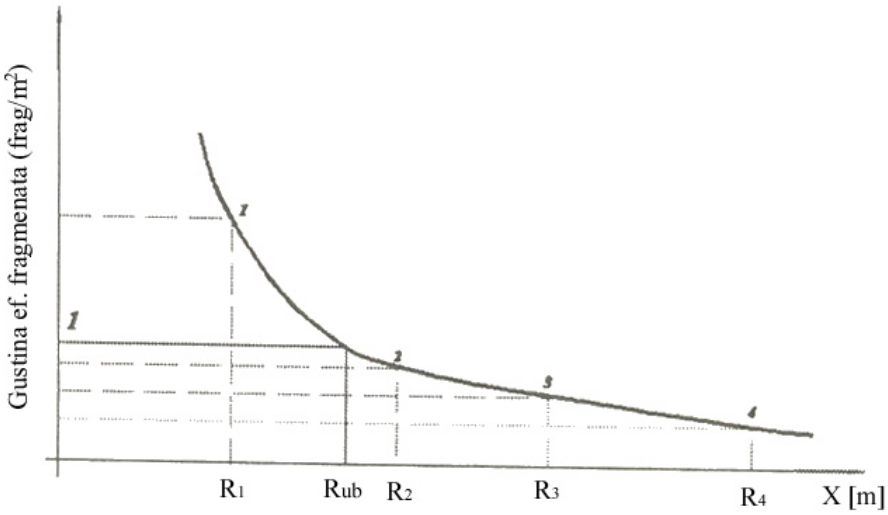
$$d_s = \frac{n_s}{S_s} \tag{2.7.3.1}$$

Ovdje su:
n_s - broj efikasnih fragmenata (broj proboja kroz dati sektor) za četvrtkružnu arenu,
S_s - izložena površina sektora koja se može odrediti formulom:

$$S_s = ½\ R_k \cdot \pi \cdot h \tag{2.7.3.2}$$

gdje je R_k radijus datog sektora, a h_s njegova visina - visina segmenta/panela.

Nakon što se odredi gustina efikasnih fragmenata za sva četiri sektora Arene, radijus ubojnog dejstva R_{ub} definiše se kao udaljenost od centra detonacije na kojoj je gustina efikasnih fragmenata jednaka jednom fragmentu po m^2 površine (slika 2.7.3).



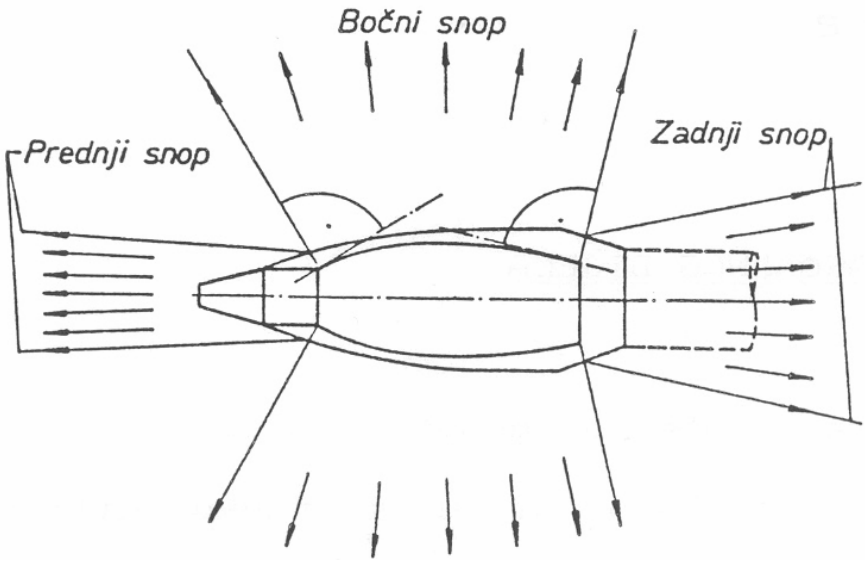
Slika 2.7.3 Određivanje radijusa ubojnog dejstva [6]

Vrijednost radijusa ubojnog dejstva dobija se postupkom interpolacije krive koja pokazuje zavisnost gustine efikasnih fragmenata od udaljenosti od centra detonacije. Dobijena kriva uvijek je opadajuća funkcija.

2.7.4 Gustina efkasnih fragmenata

HE Bojeva glava rasprskava se u fragmente promjenljive geometrije i mase. Ovi se fragmenti shematski dijele u tri snopa (slika 2.7.4.1):

1. Prednji snop fragmenata se uglavnom sastoji od dosta velikih fragmenata, jer njegov gornji dio (ispunjen donjim dijelom upaljača) praktično ne sadrži eksploziv, tako da odnos mase eksploziva i tijela bojeve glave nije povoljan
2. Bočni snop sadrži najveći broj fragmenata (obično 70 - 90%, u zavisnosti od konfiguracije bojeve glave) različitih dimenzija.
3. Zadnji snop obično sadrži fragmente nastale rasprskavanjem dna bojeve glave i vezivnih elemenata strukture projektila. Dno bojeve glave obično ima veću debljinu iz konstrukcionih razloga (da bi izdržalo naprezanja pri prolazu kroz cijev), radi čega je odnos mase eksploziva i zida košuljice nepovoljan [29].



Slika 2.7.4.1 Rasprskavanje bojeve glave [29]

Funkcija gustine efikasnih fragmenata definira se poslije ispitivanja fragmentacije u areni koja se sastoji od četiri polukružna sektora postavljena na odgovarajućem rastojanju od mjesta eksplozije, i u dva visinska nivoa.

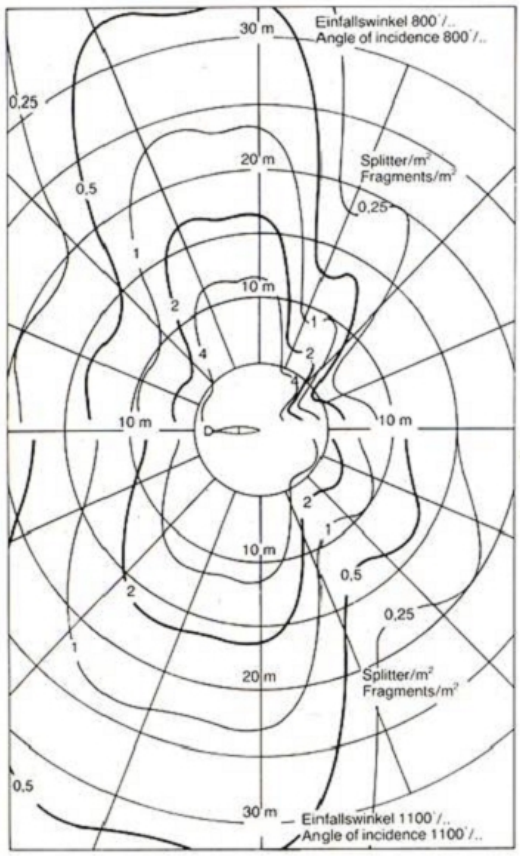
Pri izvršenju opita, poslije svake detonacije bojeve glave, broje se udari fragmenata kroz panele po svakom segmentu i unose u protokol rasprskavanja, i pri tome se registruje broj prodora i broj zadora. Na taj način moguće je odrediti promjenu gustine efikasnih fragmenata u funkciji polarnog ugla arene za svaku polarnu zonu arene.

Gustina efikasnih fragmenata d_{sp} na određenom rastojanju može se procjeniti za svaki segment polukružne arene koristeći slijedeći izraz:

$$d_{sp} = \frac{n_{sp}}{S_{sp}} \tag{2.7.4.1}$$

Ovdje su:
n_{sp} - broj efikasnih fragmenata za datu polukružnu arenu
S_{sp} - izložena površina segmenta/panela u polukružnoj areni ($S_{sp} = a_{sp} \cdot h_{sp}$, gdje je a_{sp} širina segmenta, a h_{sp} visina segmenta).

Eksperimentalno određene tačke gustine efikasnih fragmenata u polarnom dijagramu spajaju se primjenom metode interpolacije spline funkcijom.



Slika 2.7.4.2 Gustina efikasnih fragmenata za minobacački projektil 81mm [46]

Na slici 2.7.4.2 predstavljene su krive koje povezuju tačke sa istim gustinama efikasnih fragmenata (0.25, 0.5, 1, 2 i 4 frag/m^2) u funkciji od polarnog ugla i udaljenosti od centra detonacije za minobacački projektil 81mm.

Osa gustine efikasnih fragmenata u ovakvim polarnim dijagramima obično se predstavlja u logaritamskoj skali radi jasnijeg prikaza.

2.7.5 Koeficijent efikasnosti

Američki istraživači za definisanje efikasnosti HE bojevih glava sa prirodnom fragmentacijom trenutno koriste *U.S. Vulnerability model for military personel*, koji predstavlja klasificiranu informaciju i opširni podaci o tom modelu nisu dostupni [53].

Ipak, iz različitih izvora, u okviru ovog magistarskog rada naznačene su opšte postavke datog modela.

Kod definisanja terminalne efikasnosti HE bojeve glave, očekivani broj žrtava (*N*) može se odrediti koristeći slijedeći izraz:

$$N = \int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty} \sigma(x,y)\cdot P(x,y)\cdot dx\cdot dy \qquad (2.7.5.1)$$

gdje su:
σ(x, y) - površinska gustina vojnika u određenoj tački (x,y), a
P(x, y) - vjerovatnoća onesposobljavanja vojnika koji se nalazi u datoj tački (x,y) [53].

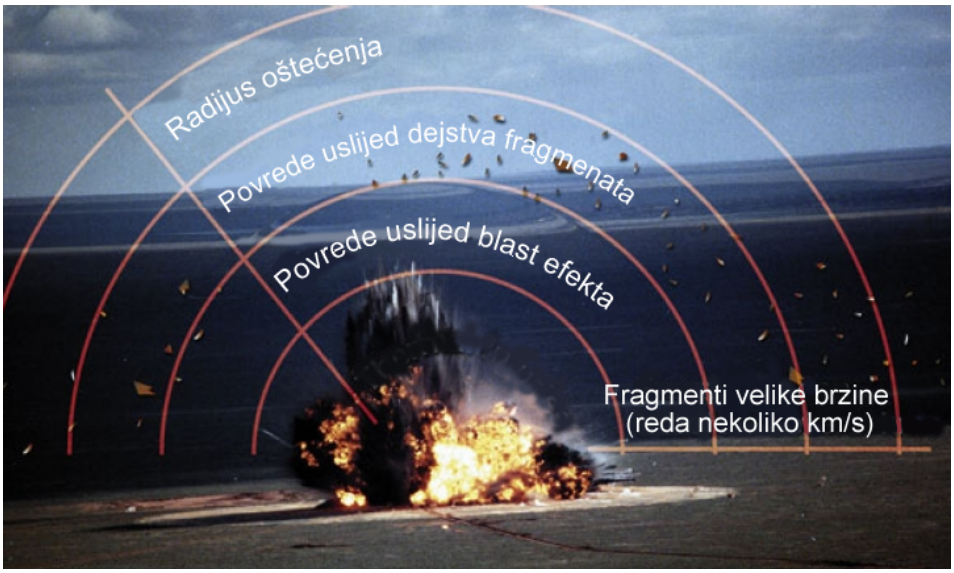
Prema američkom modelu, vjerovatnoća onesposobljavanja *P* u tački (x,y) dobija se preko izraza:

$$P(x,y) = 1 - \left[1 - P_B(x,y)\right]\cdot\left[1 - P_F(x,y)\right] \qquad (2.7.5.2)$$

gdje su:
P_B(x, y) - vjerovatnoća onesposobljavanja uslijed rušećeg (eng. Blast) efekta produkata detonacije, a
P_F(x, y) - vjerovatnoća onesposobljavanja uslijed djelovanja fragmenata [46].

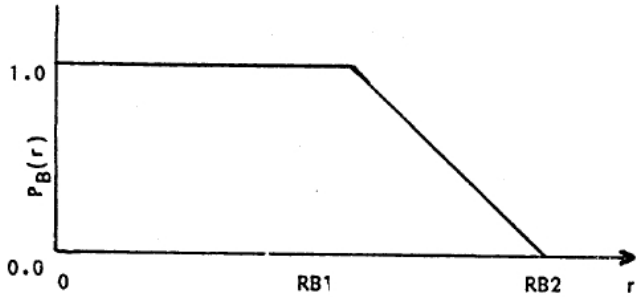
Rušeći efekt definisan je kao funkcija udaljenosti od centra detonacije. Blast (rušeći) efekt koji se javlja tokom procesa detonacije bojeve glave manifestuje se u pojavi nadpritiska produkata detonacije. U trenutku eksplozije, pritisak produkata detonacije za eksploziv TNT je oko 200.000 bara i temperature od više od 3000°C.

Nadpritisak udarnog talasa u relativno velikoj zoni oko centra eksplozije može izazvati značajna oštećenja ljudskog tkiva ili rušenje fortifikacionih objekata. Na slici 2.7.5.1 prikazane su zone oštećenja uslijed blast efekta i dejstva fragmenata nakon eksplozije bojeve glave.



Slika 2.7.5.1 Zone oštećenja uslijed blast efekta i dejstva fragmenata nakon eksplozije bojeve glave

Onesposobljavanje vojnika uslijed rušećeg efekta određuje se korištenjem dvostepene funkcije (sl. 2.7.5.2) koja zavisi od vrste i mase eksploziva.



Slika 2.7.5.2 Dvostepena funkcija vjerovatnoće onesposobljavanja uslijed blast efekta [46]

Sa sl. 2.7.5.2 može se zaključiti da je je vjerovatnoća onesposobljavanja vojnika na terenu uslijed blast efekta do tačke na udaljenosti R_{B1} od centra detonacije jednaka $P_B = 1$, a od tačke R_{B1} do R_{B2}, P_B opada linearno do R_{B2} gdje je vjerovatnoća onesposobljavanja vojnika uslijed blast efekta jednaka $P_B = 0$ [46].

Iz dosada rečenog, može se napisati:

$$P_B = 1 \quad \text{kada je} \quad r \le R_{B1} \tag{2.7.5.3}$$

$$P_B = 1 - \frac{r - R_{B1}}{R_{B2} - R_{B1}} \quad \text{kada je} \quad R_{B1} < r < R_{B2} \tag{2.7.5.4}$$

$$P_B = 0 \quad \text{kada je} \quad r \ge R_{B2} \tag{2.7.5.5}$$

U izrazima (2.7.5.3), (2.7.5.4) i (2.7.5.5) su:
R_{B1} - radijus oko tačke detonacije za koju je vjerovatnoća onesposobljavanja vojnika uslijed rušećeg efekta jednaka 1,
R_{B2} - radijus oko tačke detonacije za koju je vjerovatnoća onesposobljavanja vojnika uslijed rušećeg efekta jednaka 0.

Određivanje R_{B1}, radijusa oko tačke detonacije za koju je vjerovatnoća onesposobljavanja vojnika uslijed rušećeg efekta jednaka 1, vrši se korištenjem tzv. skaliranog rastojanja Z_s [77].

To znači, ako se poznaju karakteristike jednog eksploziva mase m_1 na rastojanju R_1, sa nadpritiskom p_1, tada je moguće pri promjeni mase eksploziva sa m_1 na m_2, odrediti napr. udaljenost od centra eksplozije R_2 pri kome će pik nadpritiska udarnog talasa ostati nepromjenjen.

Na sličan način mogu se odrediti i ostali parametri udarnog talasa novog eksploziva. Skalirana vrijednost Z_s može se izraziti u obliku [77]:

$$Z_s = \frac{R_{B1}}{\sqrt[3]{C_{eksp}}} \tag{2.7.5.6}$$

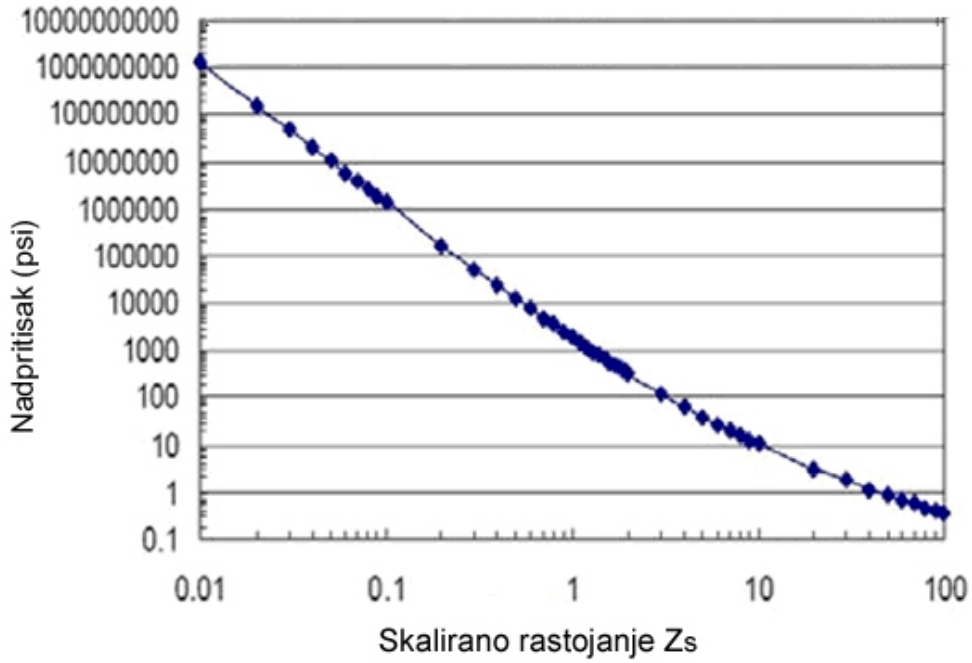
U izrazu (2.7.5.6) je R_{B1} - radijus oko tačke detonacije za koju je vjerovatnoća onesposobljavanja vojnika uslijed rušećeg efekta jednaka 1, a C_{eksp} - ekvivalentna masa eksploziva TNT.

U slučaju korištenja drugog tipa eksploziva vrši se procjena ekvivalentne mase datog eksploziva pomoću izraza:

$$C_{ekv_TNT} = C_{eksp} \cdot P_{rel} \tag{2.7.5.7}$$

gdje je:

P_{rel} - relativna snaga eksploziva u odnosu na standardni vojni eksploziv TNT (broj veći ili manji od jedan). Vrijednost veličine P_{rel} za kompoziciju B u odnosu na eksploziv TNT je 1,75 [77].



Slika 2.7.5.3 Pik nadpritiska u funkciji rastojanja od centra eksplozije izražen preko skalirane distance Z [73]

(Konverzija jedinica: 10 psi ekvivalentno je 0,689474 bar)

Vrijednost Z_s određuje se grafički (slika 2.7.5.3), a na osnovu vrijednosti nadpritiska produkata detonacije.

Prma istraživanjima [71] kriterij za teška oštećenja disajnih organa je veličina nadpritiska od 2,7 bara, a za extremitete 15 bara.

Vjerovatnoća onesposobljavanja uslijed dejstva fragmenata dobija se korištenjem izraza:

$$P_F(x,y) = 1 - e^{-d(x,y)\cdot A_t} \tag{2.7.5.8}$$

gdje su:
d(x, y) - srednja gustina efikasnih fragmenata,
A_t - izložena površina mete na određenoj udaljenosti od centra detonacije [46].

Prilikom određivanja efikasnosti HE bojevih glava, neophodno je napraviti analizu za simulirane uslove bojišta. Za to je nužno poznavati podatke o broju fragmenata bojeve glave, sakupljenih u toku statičkih ispitivanja (Arena testovi). Podaci se trebaju modifikovati kako bi se simulirala dinamička situacija na terenu (različiti padni uglovi, visina detonacije, izložene površine vojnika, odnosno različiti borbeni položaji vojnika).

Prema američkom modelu srednja gustina efikasnih fragmenata iz izraza (2.7.5.8) je:

$$d(x,y) = \frac{\sum_{j=LZ}^{UZ} \sum_{i=1}^{k} \frac{N(i,j)}{S(j)} P_{I/H}(i,j)}{r^2} \tag{2.7.5.9}$$

gdje su:
i - masena grupa fragmenta,
j - polarna zona fragmentacije tokom statičkih ispitivanja,
UZ, LZ - zadnja i prva polarna zona arene,
k - broj masenih grupa efikasnih fragmenata unutar *j*-te polarne zone,
N(i, j) - broj fragmenata u *i*-toj masenoj grupi unutar *j*-te polarne zone,
S(j) - broj steradiana za *j*-tu polarnu zonu na udaljenosti *r*,
r - udaljenost od centra detonacije,
$P_{I/H}$ - uslovna vjerovatnoća onesposobljavanja, pretpostavljajući pogodak mete jednim fragmentom [46].

Uslovna vjerovatnoća onesposobljavanja $P_{I/H}$ iz izraza (2.7.5.9) definiše se matematički kao:

$$P_H = 1 - e^{-a\cdot\left(m\cdot V_r^{3/2} - b\right)^n} \qquad (2.7.5.10)$$

gdje su:
a, b, n - tzv. konstante ranjivosti (eng. Casualty Constants), određene eksperimentalnim istraživanjima, koje definišu izabranu taktičku situaciju i maksimalno vrijeme nakon ranjavanja poslije kojeg nastupa onesposobljavanje vojnika,
m - masa fragmenta,
V_r - brzina fragmenta prilikom udara u metu [46].

Konstante *a*, *b* i *n* zavise od slijedećih parametara:
- Pogodak u određeni dio tijela vojnika: ako su pogođeni npr. glava, vrat, grudni koš, abdomen, pelvis, ruke ili noge vojnika, koriste se različiti podaci,
- Odjeća: vojnik može imati zimsku ili ljetnu odjeću, zaštitni šljem, zaštitni prsluk, i sl.,
- Taktička situacija: kriteriji koji se koriste su - *napad* $\leq$ *5 min* i *odbrana* $\geq$ *30 sek*. Prvi kriterij (napad $\leq$ 5 min) znači da vojnik koji napada neće biti u stanju da izvodi borbeno dejstvo u okviru 5 minuta nakon što je pogođen fragmentom. Drugi kriterij (odbrana $\geq$ 30 sek) znači da vojnik u defanzivnoj situaciji neće biti u stanju da izvodi borbeno dejstvo 30 sekundi nakon što je pogođen efikasnim fragmentom [53].

Detaljne podatke o konstantama ranjivosti iz izraza (2.7.5.10) nije moguće pronaći u javnim publikacijama jer predstavljaju povjerljive podatke koji su dostupni samo ograničenom broju zemalja i korisnika.

Ako se pretpostavi da je u izrazu (2.7.5.1) σ (x,y) = const (konstantna gustina ciljeva - vojnika na bojištu), može se napisati:

$$\frac{N}{\sigma} = \int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty} P(x,y)\cdot dx\cdot dy = A_L \qquad (2.7.5.11)$$

Vrijednost dvostrukog integrala (2.7.5.11) predstavlja tzv. koeficijent efikasnosti, i označava se sa A_L. Koeficijent efikasnosti A_L predstavlja mjeru fragmentacionog potencijala HE bojeve glave protiv ljudskih meta (vojnika) [46].

Kako je vjerovatnoća onesposobljavanja bezdimenziona veličina, a integraljenje vršimo po površini, to i koeficijent efikasnosti ima dimenziju površine. Fizički smisao ove veličine je da je to očekivani broj unesposobljenih ciljeva (vojnika izbačenih iz stroja) nakon dejstva jedne bojeve glave pri definisanoj (konstantnoj) gustini ciljeva (broj vojnika po m^2 terena).

Treba napomenuti da se u pojedinim zemljama koriste različiti koncepti definisanja površinske gustine vojnika $\sigma(x,y)$ na bojištu. Američki istraživači koriste različite vrijednosti površinske gustine vojnika za određene taktičke situacije (kolona vojnika, cik-cak formacija, defanzivna formacija, itd), pa vrijednost $\sigma(x,y)$ može biti npr. 8 vojnika na površini terena od 500m^2, što predstavlja površinsku gustinu vojnika od 0,016 vojnika/m^2. Bivša Jugoslavija koristila je

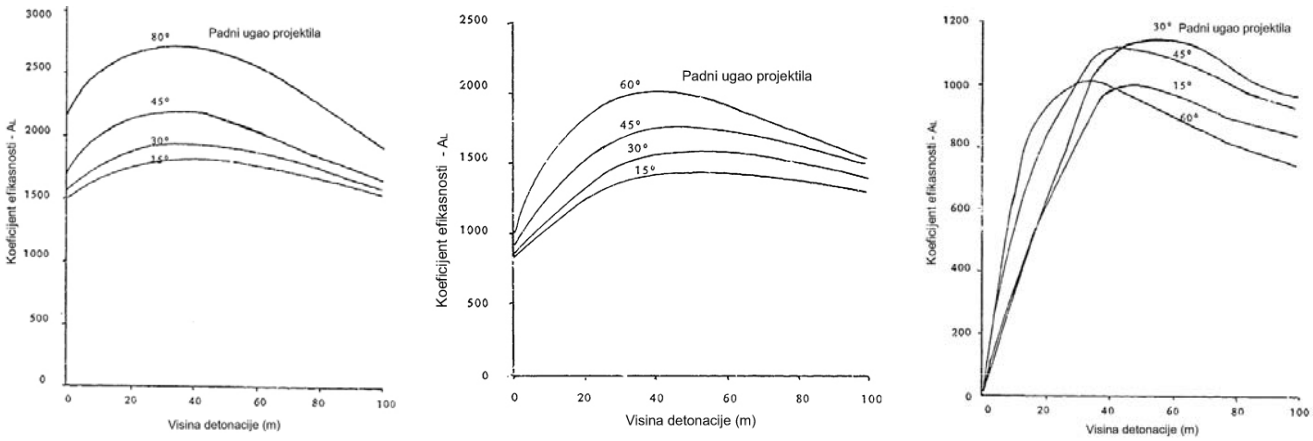
konstantnu vrijednost površinske gustine vojnika, i to jediničnu gustinu vojnika na terenu (1 vojnik/m^2). Iz ovoga proizilazi slijedeće: različit (manji) očekivani broj onesposobljenih ciljeva *N* koristeći američku metodu, nego, npr., koristeći jugoslovenski način definisanja površinske gustine vojnika.

Pri proračunu veličine A_L mogu se varirati padni uglovi bojeve glave, visina tačke detonacije, kao i položaj vojnika u trenutku udara fragmenta.

Ovako definisan koeficijent efikasnosti A_L izračunava se uz pomoć računara, koristeći metode numeričke matematike (numerička integracija dvostrukog integrala). Kao ulaz za software kojim se izračunava koeficijent efikasnosti unose se uslovi kao što su visina detonacije, brzina i ugao pada bojeve glave), kao i fragmentacioni i blast parametri bojeve glave.

Fragmentacijski parametri odnose se na podatke o prostornoj distribuciji fragmenata dobijene statičkim ispitivanjem u Areni, a blast karakteristike procjenjuju se u zavisnosti od eksplozivnog punjenja (i njegove mase) koje je korišteno u bojevoj glavi. Svi fragmenti imaju, po pretpostavci, istu brzinu. Pretpostavlja se da su trajektorije fragmenata pravci, a primjenjuje se model sa aerodinamičkim otporom fragmenata. Meta je u ovom modelu predstavljena kao površina sa dodjeljenim parametrima ranjivosti i vrijednostima izložene površine [46].

Na slikama 2.7.5.4.a, 2.7.5.4.b i 2.7.5.4.c prikazani su rezultati [46] koji pokazuju zavisnost koeficijenta efikasnostii A_L od različitih parametara (visine detonacije, ugla pada, taktičke situacije, položaja trupa i terena, itd.), koristeći američki model za određivanje vrijednosti A_L.



a.) taktička situacija A, položaj trupa A, teren A

b.) taktička situacija A, položaj trupa B, teren A

c.) taktička situacija A, položaj trupa C, teren A

Slika 2.7.5.4 Koeficijent efikasnosti A_L vs visina detonacije[46]

Nekada je je nepraktično određivati koeficijent efikasnosti A_L za sve moguće terminalne uslove, pa se najčešće izabiraju samo oni uslovi koji su od većeg taktičkog značaja.

Za određene bojeve glave, proračuni koeficijenta efikasnosti dovoljni su za procjenu efikasnosti protiv ljudskih meta. Direktna komparacija vrijednosti A_L određene bojeve glave sa vrijednostima referentne bojeve glave može pokazati relativno povećanje (ili smanjenje) efikasnosti ispitivane bojeve glave [46].

U našoj zemlji, za određivanje koeficijenta efikasnosti A_L korišten je model koji je opisao francuski istraživač Suterlin, još prije četrdeset godina. Osnovna razlika između ovog modela i američkog modela je u načinu određivanja vjerovatnoće onesposobljavanja vojnika.

Tako se, koristeći metodu Suterlin-a, koeficijent efikasnosti A_L određuje izrazom:

$$A_L = \frac{N}{\sigma(x,y)} = \int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty} P_F(x,y)\cdot dx\cdot dy \qquad (2.7.5.12)$$

U izrazu (2.7.5.12) $P_F(x,y)$ je vjerovatnoća onesposobljavanja vojnika u tački (x,y) dejstvom fragmenata, ili vjerovatnoća pogađanja boraca bar jednim efikasnim fragmentom [9].

Dakle, ovaj model ne uzima u obzir uticaj vjerovatnoće onesposobljavanje uslijed rušećeg efekta glavnog eksplozivnog punjenja u bojevoj glavi.

Vjerovatnoća onesposobljavanja vojnika dejstvom fragmenata P_F predstavlja vjerovatnoću pogađanja vojnika bar jednim efikasnim fragmentom.

Prema Suterlin-u, vjerovatnoća onesposobljavanja vojnika dejstvom fragmenata može se izraziti kao:

$$P_F = 1 - e^{-d_{sp}\cdot A_t} \qquad (2.7.5.1)$$

gdje su:
d_{sp} - gustina efikasnih fragmenata
A_t - izložena površina borca vidljiva iz tačke detonacije [9].

U našoj zemlji, gustina efikasnih fragmenata određivala se korištenjem izraza (2.7.4.1), i to na osnovu ispitivanja prostorne fragmentacije bojeve glave u polukružnoj areni.

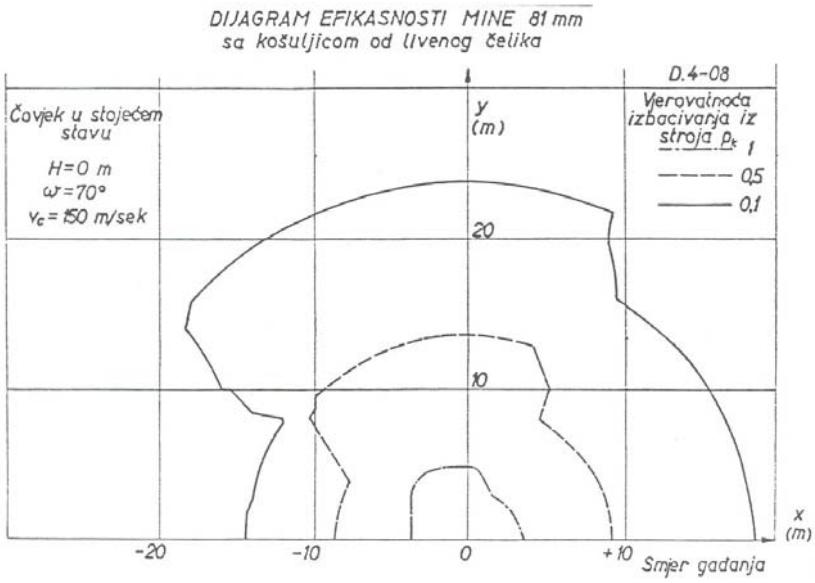
Izložena površina vojnika A_t predstavlja srednju površinu vojnika okomitu na pravac dejstva fragmenta; najveća je kada je vojnik u stojećem stavu, a najmanja kada je on u ležećem stavu. Ona zavisi i od visine detonacije bojeve glave, kao i od udaljenosti od tačke detonacije - što je veća udaljenost to je manja vrijednost izložene površine vojnika [14].

Prilikom proračuna vjerovatnoće onesposobljavanja uslijed dejstva fragmenata potrebno je usvojiti vrijednost izložene površine vojnika A_t na osnovu odgovarajućeg vojnog standarda, ili izračunati je koristeći matematičke metode. Prema STANAG 4512 (NATO standard), izložena površina vojnika A_t u jurišnom položaju, vidljiva iz tačke detonacije, jednaka je 0,37m^2 [10].

Slika 2.7.5.5 Zamišljeni raspored boraca na terenu [11]

Na slici 2.7.5.5 prikazan je zamišljeni raspored boraca na terenu. Slika 2.7.5.5 pokazuje postavku testnih lutki (eng Test Dummies) u areni kako bi se simuliralo dejstvo fragmenata bojeve glave na vojnika na terenu, i to na različitim udaljenostima od tačke detonacije i sa različitim vrijednostima izložene površine vojnika A_t.

Prema modelu Suterlin-a, spajanjem tačaka na terenu u kojima vjerovatnoća onesposobljavanja vojnika ima istu vrijednost dobijaju su krive kao na slici 2.7.5.6. Tako se, npr., mogu spojiti tačke u kojima je vjerovatnoća onesposobljavanja vojnika jednaka 1 ili 0,5 (slika 2.7.5.6), zavisno od toga šta se želi postići analizom podataka.



Slika 2.7.5.6 Raspodjela vjerovatnoća P_F na terenu za minobacački projektil 81mm [29]

Krive sa istim vrijednostima vjerovatnoće onesposobljavanja (slika 2.7.5.6) mogu se dobiti interpolacijom podataka o vjerovatnoći onesposobljavanja spline funkcijom.

Nakon određivanja vjerovatnoće onesposobljavanja uslijed dejstva fragmenata u svakoj tački terena koristeći izraz (2.7.5.11) moguće je, postupkom numeričke integracije dvostrukog integrala (2.7.5.10), odrediti vrijednost koeficijenta efikasnosti A_L, koristeći model Suterlin-a.

2.8 Osnove balistike rana

2.8.1 Uvod

Tijelo čovjeka veoma je osjetljivo na vanjske uticaje koji mogu biti zasnovani na mehaničkom dejstvu (udar, spoljne i unutrašnje povrede), toplotnom dejstvu, hemijskom dejstvu na pojedine organe, biološkom dejstvu, radioaktivnom zračenju, itd.

Mehaničko dejstvo na čovječje tijelo izučava se veoma dugo i dosadašnja istraživanja ponašanja čovječjeg tijela prilikom prodora fragmenta u tkivo pokazuju slijedeće:

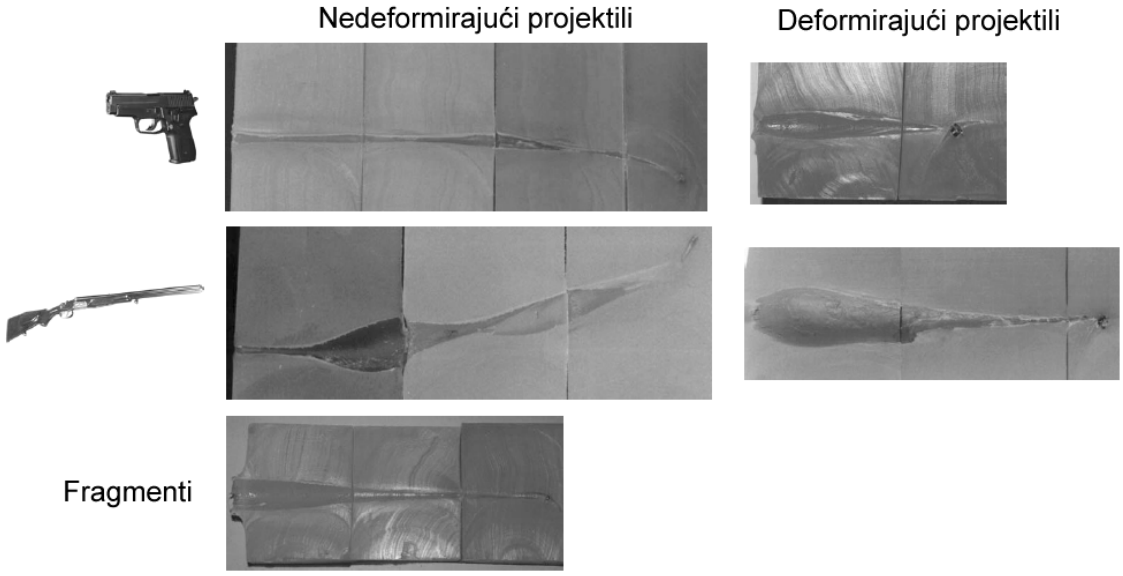
- Oblik i masa fragmenta utiču značajno na karakter povrede
- Čovječje tijelo mora se posmatrati kao složen nehomogen cilj, jer nije svejedno u koji će dio tijela čovjek biti pogođen i kakav će učinak izazvati
- Brzina projektila u trenutku udara utiče na karakter povrede
- Prilikom prodora fragmenta u tkivo dolazi do pojave udarnog talasa koji se širi ispred fragmenta i u stranu, te izaziva efekt sličan podvodnoj eksploziji. Pri daljem prodiranju fragment prenosi ostatak kinetičke energije na tkivo savladujući kohezione i inercione sile čestica tkiva, kidajući ih i odbacujući dalje u smjeru kretana i bočno. Iza fragmenta se stvara šupljina konusnog oblika koja se skuplja i širi sa frekvencijom do 500Hz. Daljim kretanjem fragmenta, šupljina se smanjuje i pulsiranje tkiva prestaje ubrzo nakon što fragment napusti tkivo [29].

Balistika rana (eng. Wound ballistics) predstavlja dio terminalne balistike koji se bavi proučavanjem terminalne efikasnosti projektila malog kalibra, fragmenata HE bojevih glava, ili nekog drugog ubojnog sredstva na čovjeka i povredama tkiva. Taj proces karakteriziraju visoki lokalni pritisci i velike brzine deformacije tkiva [Tikka 1989].

Na sl. 2.8.1 prikazane su kategorije penetracionih rana po Kneubuehl-u, četiri tipa rana od projektila malog kalibra (nedoformirajući i deformirajući projektili), i rane nastale od fragmenata HE bojevih glava.

Kneubuehl je definirao slijedeće kategorije penetracionih rana:

- Rane od municije malog kalibra (sa i bez deformiranja tijela projektila)
- Rane nastale od fragmenata bojevih glava



Slika 2.8.1 Kategorije rana [32]

Prema Arwidsson-u [31] moguća su dva načina onesposobljavanja čovjeka: pogotkom u centralni nervni sistem, kada nastupa trenutno onesposobljavanje, neovisno o tipu projektila ili fragmenata, i onesposobljavanje uslijed gubitka krvi, nastalo zbog masovnog krvarenja (kada projektil ili fragmenti uzrokuju velike rane).

Potrebno je naglasiti da onesposobljavanje čovjeka nije trenutačan proces, već traje određeno vrijeme.

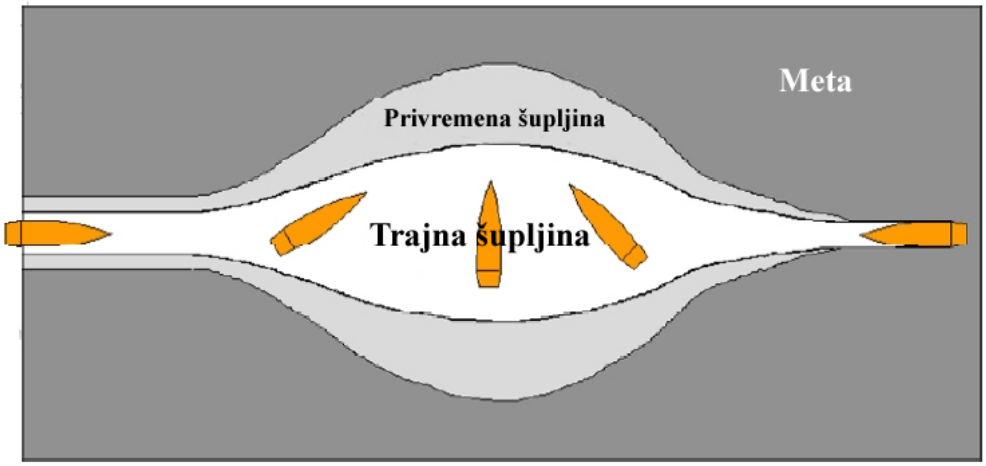
Opitni mediji koji se koriste u balistici rana, u cilju proučavanja efekta projektila i fragmenata na čovjeka najčešće su:

- Drvo,
- Nakvašeni papir,
- Glina,
- Voda,
- Balistički želatin, i
- Glicerinski sapun [31].

2.8.2 Povrede uzrokovane penetracijom projektila malog kalibra

2.8.2.1 Povrede mekog tkiva

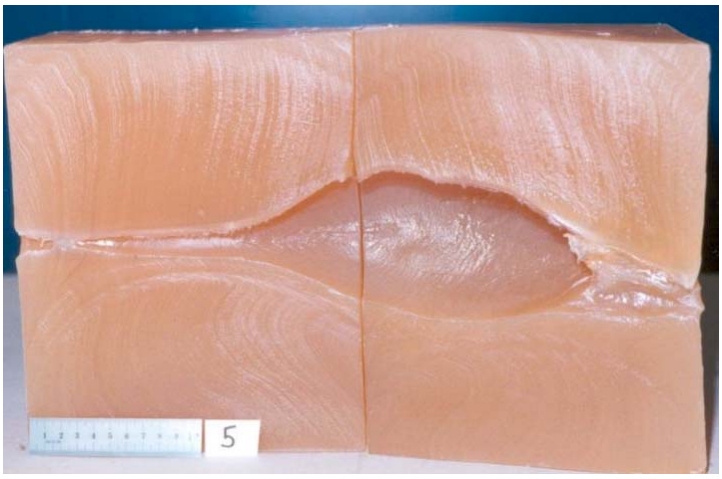
Kada projektil malog kalibra počinje da probija tkivo, otpor tkiva usporava kretanje projektila koji gubi kinetičku energiju. Projektil koji prodire uzrokuje mrvljenje, naizmjenično istezanje i kompresiju, te kontuziju tkiva, ispred i iza sebe. Ulazna rana ne mora biti velika jer je obično projektil tokom udara u metu nedeformisan i stabilan. Kada uđe u unutrašnji dio tkiva, pritisak u tkivu, uzrokovan ulaskom projektila proizvodi tzv. privremenu šupljinu (sl. 2.8.2.1.1), koju je prvi put spomenuo Woodruff 1898. godine. Isto tako, u tkivo u tom trenutku nastaju pulsiranja. Pritisak radijalno ubrzava i isteže tkivo, čiji dominantan sastojak je voda, do tačke prekida, to jest granice elastičnosti tkiva.



Slika 2.8.2.1.1 Prevrtanje projektila u tkivu i stvaranje trajnih i privremenih šupljina

Kada dostigne maksimalne dimenzije, privremena šupljina kolapsira zbog elastičnosti tkiva. Maksimalna ekspanzija šupljine pojavljuje se u tkivu nakon što je projektil izlašao iz tkiva. Uslijed potpritiska dolazi do povlačenja dijelova kože i odjeće (i prljavštine), kao i drugih stranih materija u ulaznu ranu, što je čini ranjivom na bakterijsku infekciju.

Kada se pulsacije privremene šupljine smire, u tkivu ostaje trajna šupljina (sl. 2.8.2.1.2). Može se reći da su privremene šupljine uzrokovane hidrodinamičkim udarnim talasom, a trajne šupljine predstavljaju razoreno tkivo.



Slika 2.8.2.1.2 Penetracija projektila u glicerinskom sapunu [32]

Tokom penetracije, projektil može izgubiti svoju stabilnost i početi se prevrtati. Može se isto tako deformisati ili biti dizajniran tako da se kontrolisano širi unutar tijela čovjeka. Projektil koji se deformira promjeniti će svoj oblik i centar mase. Penetraciono ponašanje zavisi od dizajna projektila, kao i sile otpora unutar tkiva. Gubitak stabilnosti i prevrtanje projektila dovodi do povećanja njegovog poprečnog presjeka i otpora njegovom kretanju, te tkivo trpi veća oštećenja.

Dio kinetičke energije koja se prenosi na tkivo ne zavisi samo od brzine ili mase projektila, već i od toga kako se projektil ponaša tokom penetracije, da li se prevrće, deformira i kolika je sila otpora. Veličina efekata ranjavanja jako zavisi i od lokacije rane. Kavitacija (stvaranje šupljina) je uzrokovana velikim pritiskom u tkivu koji uzrokuje pulsiranje. Privremena kavitacija može pokidati krvne sudove i unutrašnje organe.

Različiti tjelesni organi pokazuju različitu tolerantnost na penetracione rane. Pluća imaju malu specifičnu masu i veoma su fleksibilna. Daju mali otpor kretanju projektila što kao rezultat ima disipaciju energije projektila. Privremena kavitacija u jetri uzrokuje ozbiljna oštećenja (kidanja) jer je jetra veoma osjetljiv organ.

Koža je veoma otporna na balističke povrede. Može doći do kidanja kože uslijed penetracije, ali obično veoma malo devitalizirane kože treba da se ukloni. Mattoo [1984] je izvršio testove sa olovnim sferama prečnika 9,14mm, mase 4,5g, i utvrdio da se granična brzina penetracije kože za takav materijal i geometrijski oblik kreće oko 65 m/s.

2.8.2.2 Povrede kostiju

Kosti imaju veću gustinu, teže su i čvršće od okolnog tkiva. Kosti nisu elastične kao tkivo. Direktan pogodak (slika 2.8.2.2) i kavitacijski pritisak mogu uzrokovati teške povrede kostiju.

Slika 2.8.2.2 Penetracija sintetičke kosti [32]

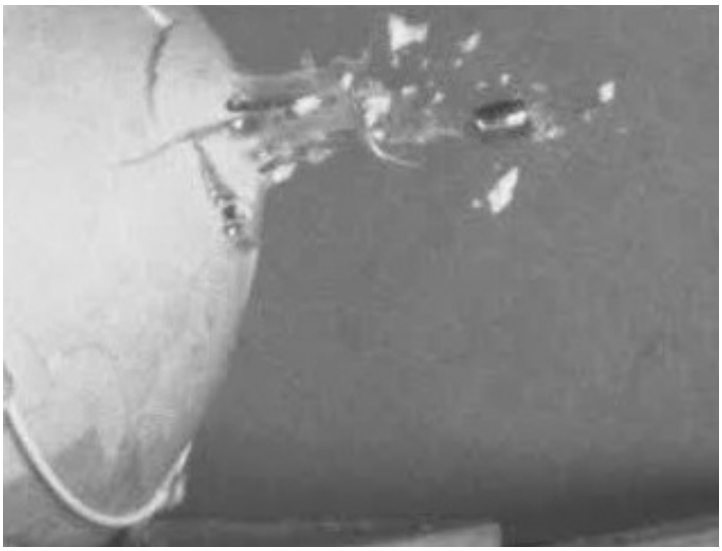
Kod direktnog pogotka, projektil počinje stvarati privremenu šupljinu prilikom ulaska u meko tkivo ispred kostiju. Šupljina se širi duž kosti, pri tome izazivajući podpritisak, a što uzrokuje infiltraciju prašine i prljavštine između mekog tkiva i kostiju.

Projektil će u direktnom kontaktu sa kostima izazvati lom kostiju, a udar projektila može izazvati potiskivanje dijelova kostiju u pravcu kretanja projektila. Smrskane kosti će se pomjerati prema naprijed zajedno sa privremenom šupljinom formiranom u okolnom mekom tkivu. Postoje izvještaji o fragmentima (dijelovima) kostiju iz kosti natkoljenice koji su penetrirali u adbomen, pa čak i da su nađeni u grudnom košu ili plućima.

2.8.2.3 Povrede lobanje i kičme

Lobanja se sastoji od 22 kosti, spojene zajedno u strukturalnu jednicu koja štiti mozak čovjeka. Mozak se sastoji od cerebruma (veliki mozak), cerebeluma (mali mozak) i moždane tečnosti, zajedno sa produženom moždinom (Medulla Oblongata). Iako se retardacijske osobine mozga ne razlikuju mnogo od osobina mišićnog tkiva, čvrstoća mozga mnogo je manja. Primarne povrede glave su kategorizirane kao: frakture lobanje, fokalne povrede i difuzne povrede mozga.

Direktan pogodak projektila (slika 2.8.2.3) uvijek uzorkuje ozbiljne povrede mozga. Tangencijaan pogodak lobanje može, također, uzrokovati ozbiljna oštećenja, kroz šok, pritisak i kavitaciju. Tangencijalan pogodak u lobanju, također, uzrokuje torziono kretanje glave što može dovesti do ozbiljnih povreda, čak i u slučaju kada se nosi zaštitna kaciga.



Slika 2.8.2.3 Simulacija povrede lobanje (izlazna rana) [32]

Penetracija kičme projektilom uvijek predstavlja veoma ozbiljnu povredu koja se teško liječi.

2.8.3 Povrede uzrokovane fragmentima HE bojeve glave

HE bojeve glave koje svojim rasprskavanjem generišu fragmente pokazale su se efikasne ne samo u onesposobljavanju boraca, već i su u isto vrijeme sposobne da nanesu oštećenja materijalim sredstvima, što je često važnije u artiljerijskim misijama.

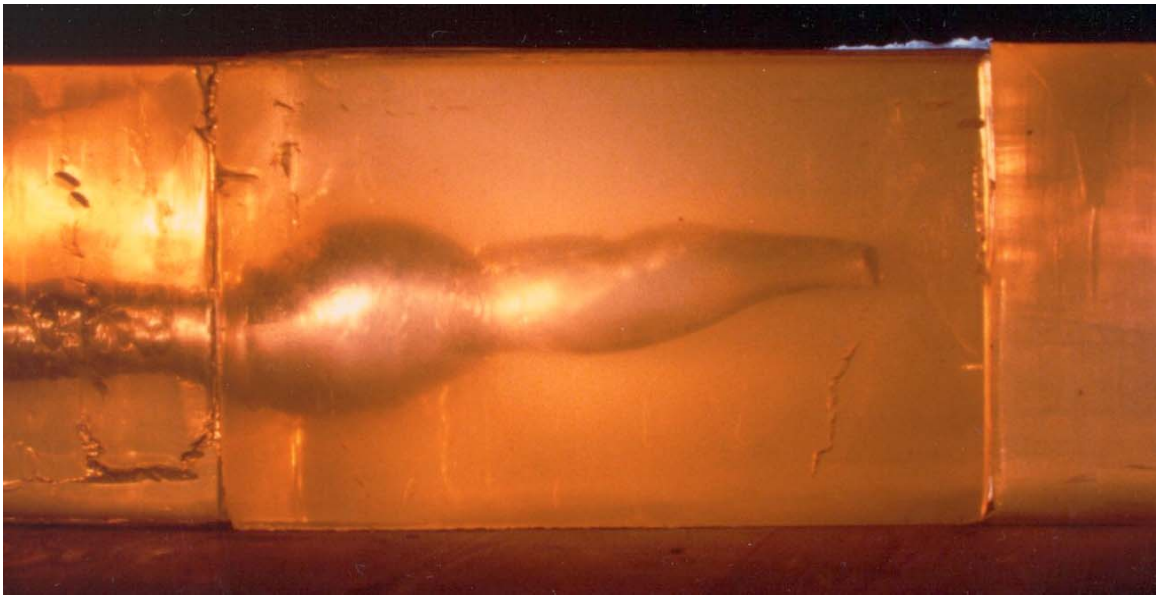
Povrede nastale od fragmenata su, u opštem slučaju, veoma teške povrede, jer su fragmenti oštri, nepravilnog oblika (najčeće izduženi i manjih dimenzija), i velikih brzina (do 2000 m/s) koje su mnogo veće nego udarne brzine projektila malog kalibra.

Slika 2.8.3.1Simulacija penetracije fragmenta u glicerinskom sapunu [32]

Fragmenti zbog svojih velikih brzina, male mase i nepravilnog (oštrih ivica) oblika mogu biti locirani relativno daleko od ulaznog otvora rane.

Takvi fragmenti čine povredu opasnijom, i to zbog nekoliko činjenica [Bowyer et al. 1997]:

- Djeluju kao žarište moguće infekciju (slika 2.8.3.2). Fragmenti koji su penetrirali u crijeva mogu uzrokovati jake infekcije sa ozbiljnim posljedicama;
- Mogu dospjeti u krvotok, i uzrokovati embolizam (začepljenje krvnog suda) [Corbett et al. 2003];
- Mogu osloboditi metalne jone koji uzrokuju promjenu krvnog sistema. Ako fragment sadrži otrovne materijale, povreda je još opasnija [McQuirter et al. 2004];
- Povećavaju površinu rane;
- Mogu se nalaziti na takvom mjestu u tijelu da se ne mogu ukloniti bez ozbiljnih posljedica po čovjeka (mozak, kičmena moždina, srce, itd) [30].



Slika 2.8.3.2 Simulacija infekcije u tijelu čovjeka uslijed penetracije fragmenta [32]

Većina rana u borbenim dejstvima nastaje uslijed fragmentacije HE bojevih glava. Tako je u II svjetskom ratu 65-84% rana bilo od fragmenata, u Korejskom ratu 68%, a u Vijetnamu 50% [33].

2.8.4 Zaštita borca od efekata fragmentacije

Razvoj zaštitne opreme značajno utiče na povećanje morala vojnika jer se time stvara osjećaj sigurnosti, a smanjuje se mogućnost ranjavanja pokrivenog dijela tijela. Međutim, uporedo sa tim razvojem teče i napredak pješadijskog naoružanja i novih materijala košuljice HE bojevih glava, koji posjeduju mogućnost suspenzije te zaštite. Najčešći vidovi individualne zaštite boraca u modernim armijama svijeta su zaštitni balistički prsluk i zaštitna kaciga.

2.8.4.1 Zaštitni balistički prsluk

Zaštitni balistički prsluci (eng. Body armor) u svim svjetskim armijama predmet su posebne brige i tehnološkog unaprijeđenja. Pješadija, kao najmasovniji, najuniverzalniji i najotporniji rod vojske predstavlja ključ uspješnog ishoda svakog borbenog dejstva i treba maksimalno biti zaštićena (koliko je to moguće) od neprijateljske vatre, streljačkog oružja, od fragmenata artiljerijskih i minobacačkih projektila, te nagaznih mina.

Moderne zaštitne prsluke možemo podijeliti u dvije kategorije:
- Tvrdi zaštitni prsluci (eng. Hard body armor)
- Meki zaštitni prsluci (eng. Soft body armor)

Tvrdi zaštitni prsluci, napravljeni od debelih keramičkih ili metalnih ploča, funkcionišu skoro na isti način kao željezni oklopi koje su nosili srednjovjekovni vitezovi; oklop (ploča) je dovoljne tvrdoće da odbije projektil manjeg kalibra, ili fragment. Oklopni materijal djeluje na projektil istom silom (ili približno istom) sa kojom projektil djeluje na oklop, tako da se oklop ne probija.

Keramika koja se koristi u tvrdim zaštitnim prslucima (sl. 2.8.4.1.1) naziva se alumina, sa hemijskom formulom Al_2O_3. U nekim tvrdim zaštitnim prslucima možemo naići i na tvrde ploče od plastičnog polietilena. One su nešto deblje od keramičkih, lakše su, ali nisu tako otporne na penetraciju.

Slika 2.8.4.1.1 Tvrdi zaštitni prsluk

Obično, tvrdi zaštitni prsluci nude veći stepen zaštite nego meki zaštitni prsluci, ali su mnogo glomazniji i teži. Policajci ili vojnici u borbenim situacijama nose ovaj tip prsluka samo ako postoji veoma velik rizik, ali za svakodnevnu upotrebu koriste se najčešće meki zaštitni prsluci, kao fleksibilan oblik zaštite koji možemo nositi ispod svakodnevne odjeće.

Meki zaštitni prsluci (slika 2.8.4.1.2) baziraju se na konceptu koji je dosta mistificiran. Kako mekano parče odjeće može zaustaviti metak?

Princip koji stoji iza toga je prilično jednostavan. U suštini, meki zaštitni prsluci sastoje se od veoma jake, guste mreže vlakana.

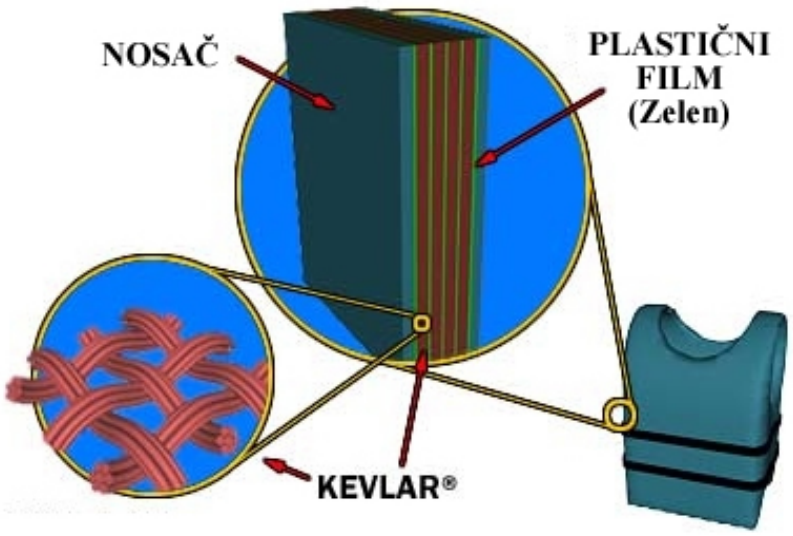
Da bi se opisao proces zaustavljanja metka mekim zaštitnim prslukom treba zamisliti fudbalski gol. Zadnji dio gola sastoji se od mreže tankih dugih konopaca, povezanih jedan sa drugim i pričvršćenim za okvir gola. Kada se pošalje lopta prema golu, ona ima određenu količinu energije. Kada lopta udari u mrežu, ona potiskuje dijelove mreže unazad do određene tačke. Svaki konopac podvrgnut je kompresiji i istezanju, od jedne strane okvira gola do druge. Na taj način vrši se disperzija energije u tački udara na veću površinu. Cijela mreža, zbog povezanosti konopaca, vrši absorpciju unutrašnje energije lopte, bez obzira gdje ona udari.

Slika 2.8.4.1.2 Meki zaštitni prsluci

Ako postavimo komad materijala otpornog na proboj metka ispod mikroskopa, vidjeli bi sličnu strukturu. Duge niti ovih vlakana povezane su kako bi formirale gustu mrežu. Projektili malog kalibra (ili fragmenti) kreću se brzinom mnogo većom nego lopta, tako da je, naravno, potreban jači i otporniji materijal, te gušća mreža vlakana.

Najčešći materijal koji se koristi u mekim zaštitnim prslucima je DuPont-ov Kevlar®. Kevlar je lagani materijal koji je pet puta jači od čelika iste težine. Kada se vlakna Kevlara isprepletu u gustu mrežu, ovaj materijal može absorbovati ogromnu količinu energije.

U mekim zaštitnim prslucima nalazi se sendvič od nekoliko slojeva materijala otpornog na proboj metka (Kevlar), i to unutar slojeva plastičnog filma (sl. 2.8.4.1.3). Ovi slojevi zašiveni su na nosač, tj. vanjski sloj koji predstavlja svakodnevni odjevni materijal.



Slika 2.8.4.1.3 Dijelovi mekog zaštitnog prsluka

Pored toga što mora zaustaviti proboj projektila u tijelo čovjeka, meki zaštitni prsluci moraju zaštiti tijelo od traume pretrpljene udarom projektila. Da udar ne bi bio fokusiran na jednu (udarnu) tačku, meki zaštitni prsluci moraju bti sposobni da izvrše disperziju udara po cijeloj površini prsluka.

Iako je Kevlar još uvijek najviše primjenjivan materijal u mekim zaštitnim prslucima, razvijaju se novi materijali, sa još boljim performansama. Tako sada imamo alternativu Kevlaru, materijal nazvan Vectran®, koji je dva puta jači od Kevlara, a pet do deset puta jači od čelika. Drugi materijal koji predstavlja alternativu Kevlaru je paukova svila. Naime, vrši se genetički inžinjering nad kozama koje proizvode konstituente paukove svile, a rezultujući materijal naziva se Biosteel®. Trake ovog materijala oko dvadeset puta su jače od ekvivalentnih čeličnih traka. Istraživači sa Univerziteta u Nebraski (Lincoln) razmatraju upotrebu kokošjeg perja kao moguću alternativu Kevlaru. Zbog toga što vlakna perja imaju finu hekasogonalnu strukturu, mogu se upotrijebiti kao materijal otporan na projektile malog kalibra i fragmente. Još jedan kandidat su karbonske nanocijevi (Carbon Nanotubes®). To je još uvijek rijedak materijal, i njegova cijena na tržištu kreće se oko $500/g. Ali, sa vremenom, cijene ovih materijala će opasti, i oni će se sigurno koristiti kao materijal u mekim zaštitnim prslucima.

2.8.4.2 Zaštitna kaciga (šljem)

Zaštitna kaciga (eng. Helmet) predstavlja osnovnu zaštitu glave vojnika u borbenim situacijama, te je stoga veoma važno odabrati odgovarajuću kacigu. Trenutno američka vojska koristi dva tipa najmodernijih zaštitnih kaciga:

- PASGT zaštitna kaciga (eng. Personnel Armor System for Ground Troops Helmet)
- ACH zaštitna kaciga (eng. Advanced Combat Helmet)

PASGT (Zaštitna kaciga za pješadiju) kaciga, također poznata kao "Fritz" kaciga, jer podsjeća na kacigu "Stahlhelm", korištenu od strane Nijemaca u II svjetskom ratu, je kaciga od kevlara koju danas koristi pješadija američke vojske. Napravljena je od aramidnih (sintetičko vlakno velike čvrstoće i elastičnosti) balističkih vlakana tretiranih sa fenolskim rezinom (sintetički polimer). Pruža zaštitu od fragmenata HE bojevih glava i projektila malog kalibra.

Slika 2.8.4.2.1 PASGT kaciga (kamuflažni uzorak za šumski teren)

PASGT kaciga (slika 2.8.4.2.1) može zaustaviti projektile malog kalibra, najčešće 7,62 x 39 mm (AK-47). Ova kaciga zamjenila je M1 američku kacigu tokom 1980-tih. Za razliku od M1 kacige, PASGT kaciga ne može se koristiti za kuhanje ili za umivanje jer voda degradira performanse Kevlara.

PASGT kaciga obično je maslinasto-zelene boje i može se opremiti različitim kamuflažnim uzorcima, što uključuje kamuflažu za šumski teren, šesto-bojnu i trobojnu pustinjsku kamuflažu, kao i novi dizajn za američke marince - MARPAT dizajn. Kacigu, također, koriste timovi specijalne policije (SWAT),čije kacige su obično crne boje i bez kamuflaže. I UN snage koriste PASGT kacigu, obojenu u njihovu preopznatljivu svjetlo-plavu boju.

PASGT kacigu trenutno zamjenuje ACH (eng. Advanced Combat Helmet) kaciga.

ACH (Napredna borbena kaciga) kaciga (sl. 2.8.4.2.2) razvijena je 2004. godine za američke vojnike razmještene u Iraku i Afganistanu. Napravljena je od novog tipa Kevlara sa poboljšanim karakteristikama, i boljom zaštitom od balističkih prijetnji.

Slika 2.8.4.2.2 Advanced Combat Helmet

Na testovima je pokazano da ova kaciga može spriječiti probijanje projektila 9mm sa bliske udaljenosti, što prethodne kacige nisu bile u mogućnosti. Ona zaustavlja i većinu fragmenata.

ACH je manja i 1,5kg lakša nego prethodni PASGT model. Unutar kacige nalazi se mekani jastučić, koji prijanja bolje za glavu borca. Dizajnirana je za neometano posmatranje terena i poboljšan sluh borca na terenu. Ima nešto drugačiji sistem unutrašnje suspenzije koji omogućava vojniku da se efikasnije bori. Negativna strana oce kacige je manja pokrivena površina glave, i to što kaciga zahtjeva češće prilagođavanje na glavi.

ACH kaciga je kompatibilna sa noćnim optičkim uređajima, komunikacijskim paketima i NBH (nuklearno-biološko-hemijskom) opremom.

POGLAVLJE 3

EKSPERIMENTALNE METODE ISTRAŽIVANJA

3.1 Uvod

Eksperimentalne metode istraživanja fragmentacije HE bojevih glava vrše se kroz Pit testove (detonacija bojeve glave u jami) i Arena testove (detonacija bojeve glave u prostoru). Pit test se koristi da bi se procjenila masena i geometrijska distribucije fragmenata (masa, oblik i dimenzije fragmeata), dok se Arena testovi koriste za predviđanje prostorne distribucije fragmenata (radijus ubojnog dejstva, gustina efikasnih fragmenata, vjerovatnoća onesposobljavanja, koeficijent efikasnosti i brzine fragmenata.

Test metode za ispitivanje fragmentacionog dejstva HE bojevih glava su skupa eksperimentalna istraživanja. U kombinaciji sa analitičkim i numeričkim metodama, eksperimentalne metode istraživanja su osnovna metoda u analizi fragmentacionog potencijala HE bojeve glave.

3.2 Pit Test

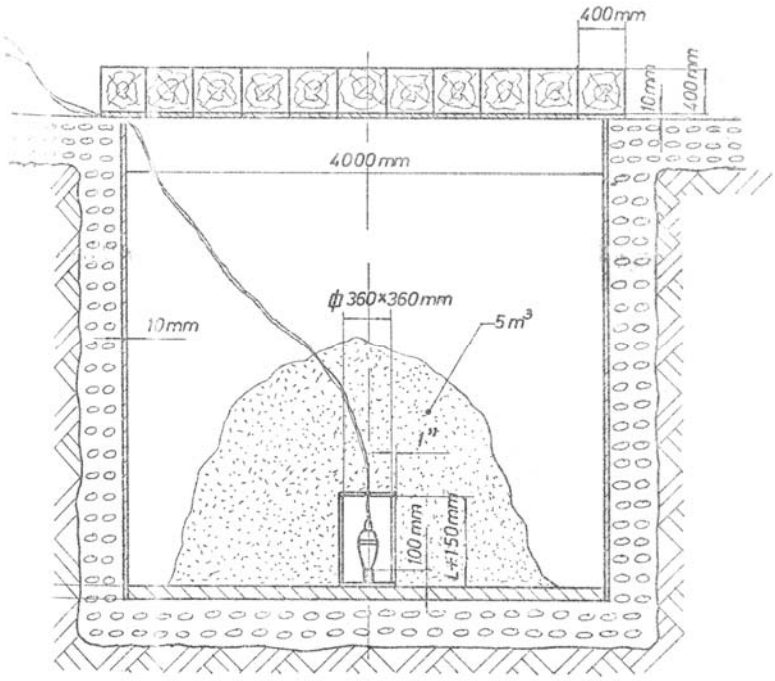
Pit test ili test fragmentacije bojeve glave u jami je osnovni eksperimentalni test koji se koristi za analizu geometrijske i masene distribucije fragmenata detonirajućih bojevih glava.

Fragmentacija bojeve glave vrši se u betonskoj jami, obloženoj čeličnim limom. Jama je obično ukopana u zemlju (slika 3.2.1). Bojeva glava ili projektil postavljaju se u drveni sanduk koji ima dimenzije veće od dimenzija projektila da bi se obezbjedila potpuna detonacija. Drveni sanduk se zatrpava pjeskom.

Na slici 3.2.1 prikazane su dimenzije sanduka za ispitivanje minobacačkog projektila kalibra 120mm, količina pjeska i položaj projektila. Pripaljivanje se vrši električnim putem, a upaljač se prethodno pripremi za ovakav način pripaljivanja. Poslije fragmentacije i vještačke ventilacije, vrši se prosijavanje pjeska sa mehaničkim sitom koje može biti različitih dimenzija (u slučaju jame za projektil kalibra 120mm, prečnik sita je 72cm, dimenzije otvora presjeka su 3,5 x 3,5 mm, a debljina čelične žice 2mm).

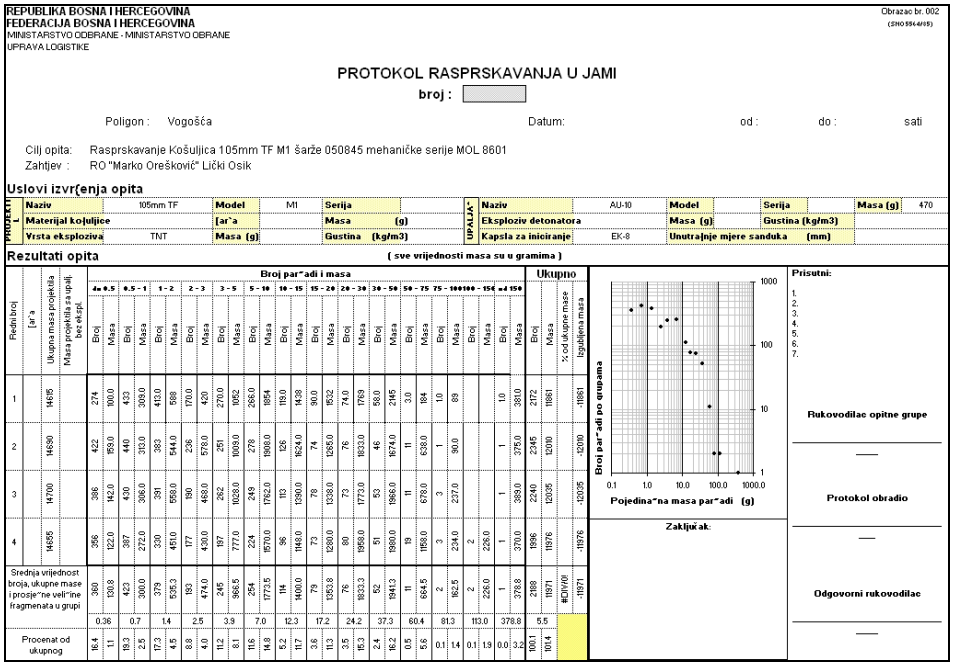
U sito se ubacuje pjesak lopatom sa jednog kraja jame, i sito se pomjera sve dok sav pjesak ne bude prosijan. Fragmenti se zadržavaju u situ zajedno sa drvenim ostacima sanduka.

Ostatak poslije sijanja u situ vadi se napolje i vrši se prebiranje i izdvajanje fragmenata. Poslije čišćenja i izdvajanja fragmenata vrši se premjeravanje i klasifikacija fragmenata prema masenim grupama, a rezultati se upisuju u protokole rasprskavanja [8].



Slika 3.2.1 Pit test (detonacija bojeve glave u jami)

Protokol fragmentacije (rasprskavanja) bojeve glave ili projektila ima opšti izgled kao na slici 3.2.2.



REPUBLIKA BOSNA I HERCEGOVINA
FEDERACIJA BOSNA I HERCEGOVINA
MINISTARSTVO ODBRANE - MINISTARSTVO OBRANE
UPRAVA LOGISTIKE

Obrazac br. 002
(SNO 994/495)

PROTOKOL RASPRSKAVANJA U JAMI
broj :

Poligon : Vogošća Datum: od : do : sati

Cilj opita: Rasprskavanje Košuljica 105mm TF M1 šarže 050845 mehaničke serije MOL 8601
Zahtjev : RO "Marko Orešković" Lički Osik

Uslovi izvrđenja opita

PROJEKTIL	Naziv	105mm TF	Model	M1	Serija	UPALAČ	Naziv	AU-10	Model	Serija	Masa (g) 470
	Materijal kojuljice		[ar`a		Masa (g)		Eksploziv detonatora		Masa (g)	Gustina (kg/m3)	
	Vrsta eksploziva	TNT	Masa (g)		Gustina (kg/m3)		Kapsla za iniciranje	EK-8	Unutrašnje mjere sanduka (mm)		

Rezultati opita (sve vrijednosti masa su u gramima)

Redni broj	[ar`a	Ukupna masa projektila	Masa projektila za upolj. bez ekspl.	Broj par~adi i masa: 4ø 0.5 Broj	Masa	0.5 - 1 Broj	Masa	1 - 2 Broj	Masa	2 - 3 Broj	Masa	3 - 5 Broj	Masa	5 - 10 Broj	Masa	10 - 15 Broj	Masa	15 - 20 Broj	Masa	20 - 30 Broj	Masa	30 - 50 Broj	Masa	50 - 75 Broj	Masa	75 - 100	100 - 150 Broj	Masa	ø 150 Broj	Masa	Ukupno Broj	Masa	% od ukupne mase	Izgubljena masa
1		14695		274	900.0	423	300.0	413.0	598	170.0	420	270.0	1052	266.0	1854	119.0	1438	90.0	1532	74.0	1759	58.0	2445	3.0	184	1.0	89			1.0	391.0	2172	11861		-11861
2		14690		422	959.0	440	313.0	383	544.0	236	578.0	251	1009.0	278	1906.0	126	1624.0	78	1265.0	76	1833.0	46	1674.0	11	638.0	1	90.0			1	375.0	2345	12069		-12069
3		14700		386	142.0	430	306.0	291	559.0	190	468.0	262	1028.0	249	1762.0	113	1290.0	78	1338.0	72	1773.0	53	1866.0	11	678.0	3	237.0			1	368.0	2240	12035		-12035
4		14695		366	122.0	387	272.0	330	451.0	177	430.0	197	777.0	224	1570.0	96	1149.0	73	1280.0	80	1958.0	51	1980.0	19	1158.0	3	234.0	2	226.0	1	370.0	1996	11976		-11976
Srednja vrijednost broja, ukupne mase i prosje~ne veli~ine fragmenata u grupi				360	130.8	423	300.0	379	526.3	193	474.0	245	966.5	254	1772.5	114	1400.0	79	1353.8	76	1833.3	52	1841.3	11	694.5	2	162.5	2	226.0	1	378.8	2188	11971	#DIV/0!	-11971
				0.36	0.7	1.4	2.5	3.9	7.0	12.3	17.2	24.2	37.3	60.4	81.3	113.0	378.8	5.5																
Procenat od ukupnog				16.4	1.1	19.3	2.5	17.3	4.5	8.8	4.0	11.2	8.1	11.6	14.8	5.2	11.7	3.6	11.3	3.5	15.3	2.4	16.2	0.5	5.6	0.1	1.4	0.1	1.9	0.0	3.2	100.1	101.4		

Zaključak:

Prisutni:
1.
2.
3.
4.
5.
6.
7.

Rukovodilac opitne grupe

Protokol obradio

Odgovorni rukovodilac

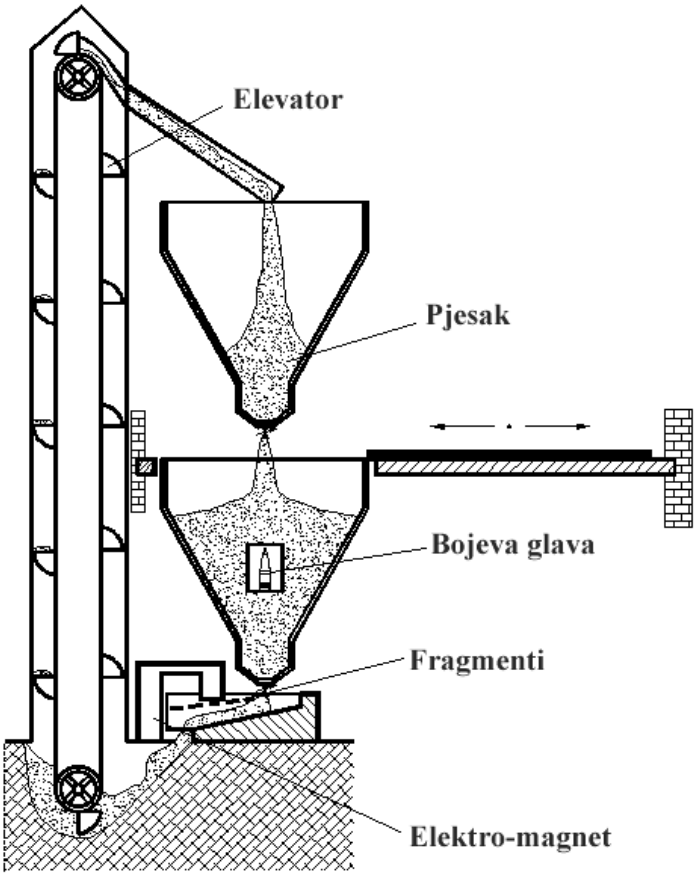
Slika 3.2.2 Protokol fragmentacije (Pit test)

Kod pravilno izvršenog ispitivanja, ukupna masa prikupljenih fragmenata nije manja od mase metalnog tijela ojeve glae za više od 5%. Veći gubitak mase fragmenata ukazuje na nepravilnost u izvođenju eksperimenta [6].

U savremenim Pit uređajima, nakon detonacije bojeve glave, metalni fragmenti mogu se odvojiti od pjeska prosijavanjem uz pomoć sita ili pomoću elektro-magneta.

Na sl. 3.2.3 predstavljena je shema modernog Pit postrojenja. Bojeva glava nalazi se u sanduku optimalne veličine, konstruisanom da omogući potpunu detonaciju bojeve glave. Detonacija se vrši električnim putem. Nakon detonacije bojeve glave, pjesak zajedno sa fragmentima prolazi

pored elektro-magneta koji privlači metalne fragmente. Preostali pjesak podiže se elevatorom do vrha Pit postrojenja gdje se može koristiti za fragmentaciju nove bojeve glave.



Slika 3.2.3 Shema modernog postrojenja za Pit test

U novijim istraživanjima [70] za ispitivanje masene i geometrijske distribucije fragmenata koristi se Pit uređaj za fragmentaciju bojeve glave ili projektila u vodi (slika 3.2.4).

Slika 3.2.4 Struktura Pit uređaja za fragmentaciju u vodi [70]

Podaci o broju, masi i obliku fragmenata dobijeni u Pit testovima služe kao polazna tačka u analizi masene distribucije fragmenata.

3.3 Test u Areni

Fragmentacija bojeve glave u Areni je eksperimentalni test koji služi kao osnova za procjenu prostorne distribucije fragmenata kod HE bojevih glava.

Postoje dva osnovna tipa Arena:

- Arena sa četvrtkružnim sektorima, i
- Arena sa polukružnim sektorima.

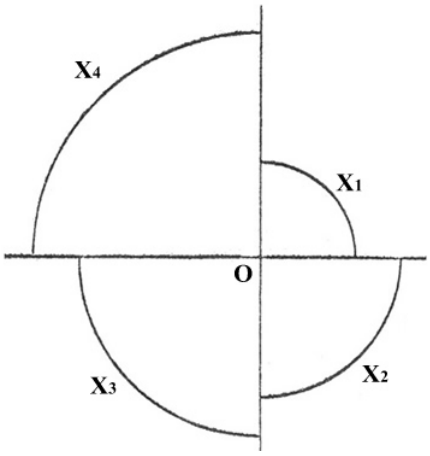
U našoj zemlji korištena su oba tipa Arena, zavisno od njihove namjene.

3.3.1 Test fragmentacije u Areni sa četvrtkružnim sektorima

Test fragmentacije u Areni sa četiri sektora (slika 3.3.1.1) najčešće se koristi za određivanje radijusa ubojnog dejstva HE bojevih glava. Osnovna svrha ovog testa je provjera reproduktivnosti procesa proizvodnje i za komparaciju performansi sličnih bojevih glava.

Slika 3.3.1.1 Četvrtkružna arena [70]

Na slici 3.3.1.2 prikazana je shema Arene sa četiri četvrtkružna sektora koja je korištena u našoj zemlji.



Slika 3.3.1.2 Shema Arene sa četiri četvrt-kružna sektora

Sektori Arene sastoje se od različitog broja drvenih panela (suha čamova daska) istih dimenzija, definisane debljine i visine. Debljina panela zavisi od kriterija onesposobljavajuće kinetičke energije fragmenta koji je usvojen.

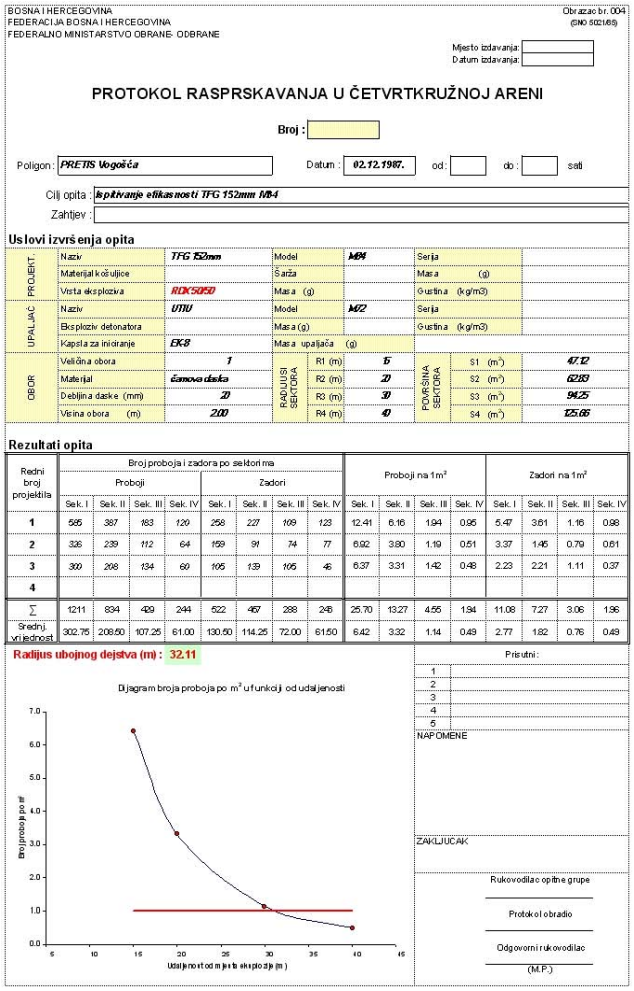
Sektori arene nalaze se na različitim udaljenostima od centra detonacije (slika 3.3.1.2). Zavisno od količine eksplozivnog punjenja u bojevoj glavi, mijenja se udaljenost od centra eksplozije, a sukcesivno tome i udaljenost ostalih sektora arene. Cilj je postići da broj proboja fragmenata po m^2 u trećem sektoru bude veći od 1 proboj/m^2, a u četvrtom sektoru manji od 1 proboj/m^2.

Četvrtkružna arena za bojeve glave kalibra do 152mm koja se koristila u našoj zemlji ima slijedeće geometrijske postavke:
R_1 = 10m – prvi radijus
R_2 = 15m – drugi radijus
R_3 = 20m – treći radijus
R_4 = 30m – četvrti radijus
H = 1,5m – visina panela
δ = 20mm – debljina panela

Kod bojevih glava kalibra 128mm i iznad koristila se Arena se slijedećim parametrima:
R_1 = 15m – prvi radijus
R_2 = 20m – drugi radijus
R_3 = 30m – treći radijus
R_4 = 40m – četvrti radijus
H = 1,5m – visina panela
δ = 20mm – debljina panela

Bojeva glava ili projektil postavi se vertikalno u centar arene na visini od 1m, i detonira se električnim putem. Obično se testiraju četiri bojeve glave sukcesivno, i nakon toga se broje svi proboji (i zadori) na drvenim panelima, te se kao mjerodavna vrijednost uzima srednji broj proboja (i zadora) za četiri projektila.

Broj proboja i zadora unosi se u protokol fragmentacije koji služi kao polazna tačka za određivanje radijusa ubojnog dejstva bojeve glave. Tipičan protokol fragmentacije u areni sa četiri sektora prikazan je na slici 3.3.1.3.



BOSNA I HERCEGOVINA
FEDERACIJA BOSNA I HERCEGOVINA
FEDERALNO MINISTARSTVO OBRANE- ODBRANE

Obrazac br. 004
(SNO 502/65)

Mjesto izdavanja:
Datum izdavanja:

PROTOKOL RASPRSKAVANJA U ČETVRTKRUŽNOJ ARENI

Broj :

Poligon: PRETIS Vogošća Datum: 02.12.1987. od: do: sati

Cilj opita: Ispitivanje efikasnosti TFG 152mm M84

Zahtjev:

Uslovi izvršenja opita

PROJEKT.	Naziv	TFG 152mm	Model	M84	Serija	
	Materijal kožuljice		Šarža		Masa (g)	
	Vrsta eksplozива	RDX50/50	Masa (g)		Gustina (kg/m3)	
UPALJAČ	Naziv	UTIU	Model	M22	Serija	
	Eksploziv detonatora		Masa (g)		Gustina (kg/m3)	
	Kapsla za iniciranje	EK-8	Masa upaljača (g)			

OBOR	Veličina obora	1	RADIJUSI SEKTORA	R1 (m)	15	POVRŠINA SEKTORA	S1 (m²)	47.12
	Materijal	Šamova daska		R2 (m)	20		S2 (m²)	62.83
	Debljina daske (mm)	20		R3 (m)	30		S3 (m²)	94.25
	Visina obora (m)	2.00		R4 (m)	40		S4 (m²)	125.66

Rezultati opita

Redni broj projektila	Broj proboja i zadora po sektorima								Proboji na 1m²				Zadori na 1m²			
	Proboji				Zadori											
	Sek. I	Sek. II	Sek. III	Sek. IV	Sek. I	Sek. II	Sek. III	Sek. IV	Sek. I	Sek. II	Sek. III	Sek. IV	Sek. I	Sek. II	Sek. III	Sek. IV
1	585	387	183	120	258	227	109	123	12.41	8.16	1.94	0.95	5.47	3.61	1.16	0.98
2	336	239	112	64	159	91	74	77	6.92	3.80	1.19	0.51	3.37	1.45	0.79	0.61
3	309	208	134	60	105	139	105	46	6.37	3.31	1.42	0.48	2.23	2.21	1.11	0.37
4																
∑	1211	894	429	244	522	457	288	246	25.70	13.27	4.55	1.94	11.08	7.27	3.06	1.96
Srednj. vrijednost	302.75	208.50	107.25	61.00	130.50	114.25	72.00	61.50	6.42	3.32	1.14	0.49	2.77	1.82	0.76	0.49

Radijus ubojnog dejstva (m): 32.11

Dijagram broja proboja po m² u funkciji od udaljenosti

Prisutni:
1
2
3
4
5

NAPOMENE

ZAKLJUČAK

Rukovodilac opitne grupe

Protokol obradio

Odgovorni rukovodilac

(M.P.)

Slika 3.3.1.3 Protokol fragmentacije u četvrtkružnoj Areni

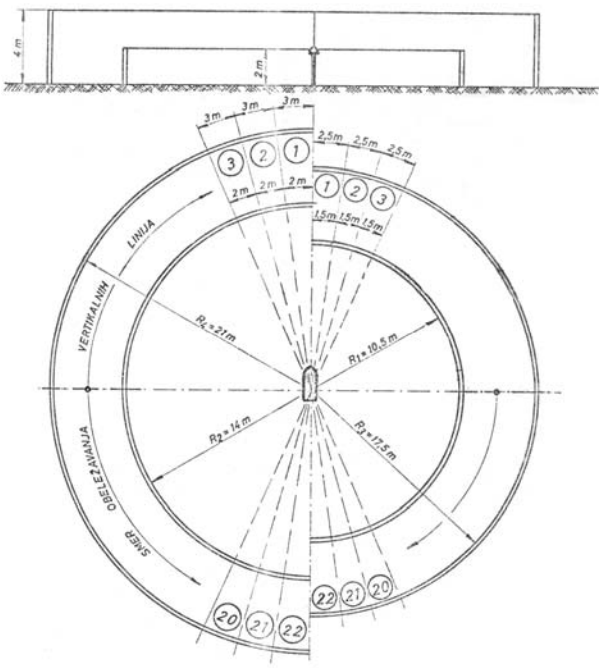
Tokom svoje upotrebe, test fragmentacije u četvrtkružnoj Areni pokazao je niz nedostataka od kojih su najbitniji:

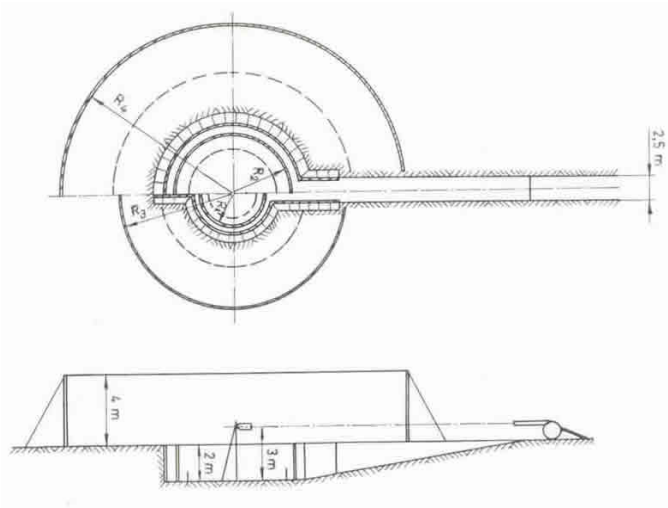
- navedena test metoda ne definiše prostorni zakon raspodjele gustine efikasnih fragmenata
- zanemaren je uticaj izložene površine borca i vjerovatnoće onesposobljavanja na različitim rastojanjima od centra detonacije
- na osnovu dobijenih podataka nemoguće je izvršiti analizu efikasnosti projektila sa blizinskim upaljačem
- rezultati fragmentacije nepokretnog projektila u vertikalnom položaju ne mogu se transponirati na bilo koji padni ugao, za projektil sa padnom brzinom većom od nule ili na tempirna gađanja.

3.3.2 Test fragmentacije u Areni sa polukružnim sektorima

U zapadnim zemljama za ispitivanje prostorne distribucije fragmenata upotrebljava se Arena sa polukružnim sektorima. U našoj zemlji ona se, uz određene modifikacije u odnosu na zapadne modele, počela koristiti krajem osamdesetih godina XX vijeka.

Shema polukružne Arene, korištene u našoj zemlji, prikazana je na slici 3.3.2. Ispitivanje se može vršiti statički (slika 3.3.2.a), kada se nepokretni projektil detonira u centru Arene. Drugi način je dinamičko testiranje (slika 3.3.2.b), koje se izvodi tako što se sa projektilima, laborisanim sa udarnim upaljačima, gađa horizontalnom putanjom na malu drvenu metu koja se nalazi u centru Arene [8].





a.) Statičko ispitivanje fragmentacije *b.) Dinamičko ispitivanje fragmentacije*

Slika 3.3.2 Shema polukružne Arene [14]

Bojeva glava ili projektil, koji se detonira električnim putem, postavlja se horizontalno na visini od 2m od površine tla, u centar arene (slika 3.3.2).

Polukružna arena, prikazana na slici 3.3.2.a, ima slijedeće geometrijske karakteristike [8]:

R_1 = 10,5m H_1 = 2m
R_2 = 14m H_2 = 2m
R_3 = 17,5m H_3 = 4m
R_4 = 21m H_4 = 4m

Širina drvenog panela (segmenta) prvog sektora (slika 3.3.2.a) je 1,5m, drugog 2m, trećeg 2,5m i četvrtog 3m, odnosno dužina luka, sektora "*i*" na radijusu *R* (dovoljno tačna aproksimacija):

$$l = R \cdot \theta_r = R \cdot \theta_s \cdot \tfrac{\pi}{180} \qquad (3.3.2.1)$$

gdje su:
R - radijus sektora Arene (m),
φ_r - polarni ugao u radijanima,
φ_s - polarni ugao u stepenima,

Cilj je da ugao luka (polarna zona arene) bude isti za svaki panel Arene.

Debljina drvenih panela (čamova daska) polukružne Arene je 25,4mm. Svi paneli Arene su postavljeni na istom nivou (sl. 3.3.2.a). Svaki sektor arene sastoji se od od *N* panela, istih dimenzija koji su obilježeni od 1 do *N*, polazeći od oživala ka dnu bojeve glave. Svaki panel izložen je dejstvu fragmenata koji pripadaju snopu čiji je ugao otvora 180°/N. Površine panela koji su okrenuti (izloženi) prema bojevoj glavi dobiju se množenjem širine i visine panela.

Nakon detonacije bojeve glave u polukružnoj areni broje se proboji (i zadori) fragmenata na panelima svakog polukružnog sektora. Dobijeni podaci predstavljaju osnovu za analizu prostorne distribucije fragmenata [8].

3.3.3 NATO Arena

Metod testiranja municije u NATO Areni nastao je na osnovu sporazuma između Njemačke, Velike Britanije i SAD-a. On se koristi za određivanje masene (broj, masa i oblik fragmenata, zavisno od segmenta Arene) i prostorne distribucije fragmenata (ukupni broj fragmenata, gustina efikasnih fragmenata, koeficijent efikasnosti, itd).

Postoje dvije vrste NATO Arena:

- Pravougla NATO Arena (eng. Rectangular Fragmentation Arena - RFA), i
- Polukružna NATO Arena (eng. Semicircular Fragmentation Arena - SCFA) [13].

Prije samog testa fragmentacije u NATO Areni potrebno je:

a. Zabilježiti nomenklaturu i identifikacijske podatke o municiji koja se testira, sve glavne komponente (upaljač, eksploziv, itd) i položaj upaljača
b. Fotografirati predmet testiranja (bojevu glavu)
c. Ispitati testne bojeve glave zbog mogućih oštećenja, zastarjelosti i defekata. Ako je potrebno treba rendgenski snimiti bojevu glavu da se osigura da eksploziv nema šupljina ili lunkera i da ima uniformnu strukturu zrna i gustinu (u barem dva ortogonalna presjeka)
d. Odrediti i zabilježiti masu eksploziva, tijela košuljice i upaljača, vaganjem ili analitički.
e. Odrediti i zabilježiti položaj upaljača, položaj od 0° za prednji upaljač ili 180° za upaljač koji se nalazi na dnu bojeve glave
f. Po potrebi modificirati upaljač, kako bi se smjestio električni detonator za detonaciju sa udaljenog mjesta. Mora se koristiti detonatorski pojačnik (booster) bojeve glave pri detonaciji glavnog eksplozivnog punjenja
g. Sklopiti bojevu glavu tako da bude što više nalik na bojevu glavu koja se upotrebljava u realnim uslovima upotreba (realna taktička situacija). Npr., sve bojeve glave sa odgovarajućim upaljačima, modificiranim za statičku upotrebu, minobacački projektili sa svojim krilcima, i sl.
h. Izmjeriti i zabilježiti slijedeće fizikalne karakteristike bojeve glave (sa modificiranim upaljačem, krilcima, i sl): prečnik, masa, i centar mase.

i. Postaviti bojevu glavu u centar Arene sa svojom uzdužnom osom u horizontalnoj ravni. Koristiti optička naprave i libele kako bi osigurali pravilan položaj. Pričvrstiti bojevu glavu sa nemetalnim materijalom.
j. Napuniti test Arenu sa medijem koji omogućava sakupljanje (povrat) fragmenata (pijesak, kompozitni paneli - zidovi (tabela 3.3.3).

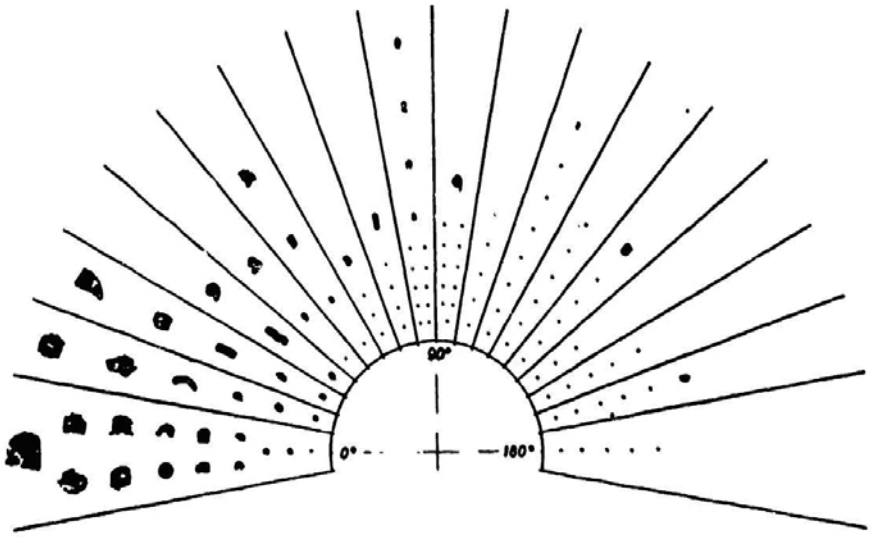
Tabela 3.3.3 Karakteristike medija za sakupljanje fragmenata

Tip medija	**Gustina (kg/m^3)**
Pješčani kvarz, ispran, veličina zrna < 2mm	1700
Kartonski paneli, debljina 3,5 - 3,85 mm	700

k. Ispitati sistem za mjerenje brzine (ako je potrebno) i korektno instalirati popratnu opremu (kamere, senzore, i sl).
l. Pokrenuti sekvencijalni tajmer i sistem za snimanje kako bi se pokrenuo sistem za akviziciju podataka.

Po završetku detonacije bojeve glave u NATO Areni potrebno je:

a. Zabilježiti broj ukupnih testova fragmentacije
b. Locirati i i sakupiti fragmente iz medija (pjesak) u Areni
c. Evidentirati slijedeće parametre:
   - Ukupni broj fragmenata po masenoj grupi
   - Ukupni broj fragmenata po polarnoj zoni Arene
   - Ukupnu masu fragmenata po masenoj grupi
   - Ukupnu masu fragmenata po polarnoj zoni Arene



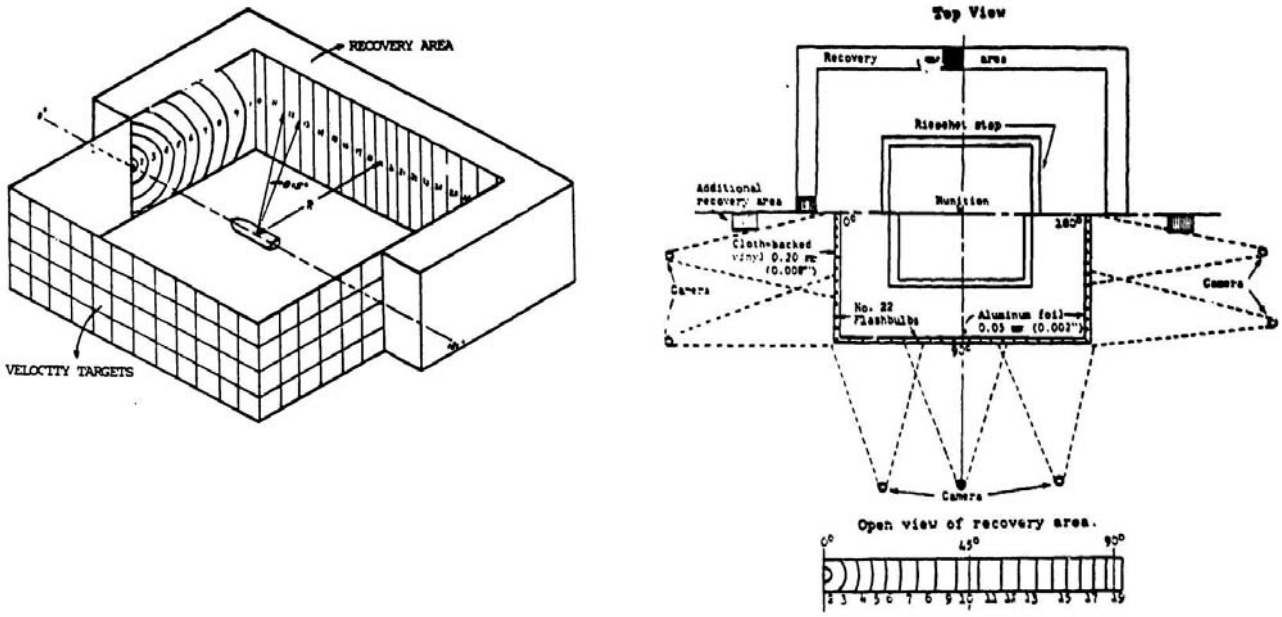
Sl. 3.3.3 Tipičan primjer reprezentativnih fragmenata u ugaonim zonama od 0° do 180°.

Na slici 3.3.3 prikazani su primjeri reprezentativnih oblika (i masa) fragmenata u različitim polarnim zonama test Arene (od 0° do 180°).

d. Za polukružnu arenu, sakupiti fragmente tek nakon završetka svih testova (ako ih je više). U ovom slučaju, nakon svake detonacije provjeriti da li su vreće sa pijeskom u dobrom stanju, i ako nisu, zamjeniti ih i ponovo napuniti pijeskom.
e. Očistiti i odvojiti fragmente prema polarnim zonama, vodeći računa o vrsti metalne komponente bojeve glave (ili projektila) odakle potiče fragment (ukoliko postoji zahtjev).
f. Izračunati brzine fragmenata (ukoliko postoji zahtjev), individualno vrijeme leta fragmenata, odnosno odrediti maksimalnu, minimalnu i srednju brzinu fragmenata za individualnu polarnu zonu.

3.3.3.1 Pravougla NATO test Arena

Shema pravougle NATO arene prikazana je na slici 3.3.3.1.1. Projektil koji je postavljen horizontalno u centru arene na visini od 1,2m, okružen je sa jedne strane panelima za sakupljanje fragmenata (eng. Recovery area), a sa druge panelima za mjerenje brzine fragmenata (eng. Velocity targets). Oba ova sektora obuhvataju ugao od po 180° u odnosu na uzdužnu osu projektila [13].



a.) 3D pogled na Arenu *b.) pogled na Arenu odozgo*

Slika 3.3.3.1.1 Shema tipične pravougle arene [13]

Paneli pravougle arene (slika 3.3.3.1.1) podjeljeni su u polarne zone koje omogućavaju dobijanje podataka o masi, brzini i prostornom rasporedu fragmenata za bojevu glavu koja se testira. Polarni ugao zone u pravougloj Areni sa slike 3.3.3.1.1.a iznosi 5° [13].

Udaljenost od centra detonacije do panela pravougle Arene određuje se u zavisnosti od količine eksplozivnog punjenja u bojevoj glavi. Ove udaljenosti definišu se korištenjem izraza:

$$X_D = 4{,}0 \cdot C_{eks}^{\frac{1}{3}} \qquad (3.3.3.1.1)$$

gdje su:
X_D - udaljenost od centra detonacije do panela, a
C_{eks} - masa eksplozivnog punjenja [13].

Ako se očekuju brzine fragmenata veće od 1500 ms, udaljenost između bojevih glava i panela za mjerenje brzine ne smije biti manja od 2,4m, jer to utiče na tačnost mjerenja brzine fragmenata [13].

Površina za prikupljanje fragmenata (eng. Recovery area) sastoji se od drvene strukture koja sadrži kompozitne kartonske ploče dimenzija 1,2m x 2,4m x 12,7mm. Svaka sekcija panela sastoji se od onoliko slojeva kartonskih ploča koliko je potrebno da se u njima zadrže fragmenti nakon detonacije bojeve glave (npr: ukupna debljina kartonskih ploča za ispitivanje projektila 105mm iznosi 0,9 m, a debljina kartonskih ploča pri ispitivanju projektila 155mm je 1,8 m. Za ispitivanje projektila 105mm potrebne su 72 kartonske ploče debljine 12,7 mm, a 144 takve ploče (debljine 12,7 mm) ili barem 120 takvih ploča (debljine 15mm) za ispitivanja projektila 155mm) [13].

Visina i debljina panela za prikupljanje fragmenata zavise od veličine i tipa projektila koji se testira.

Paneli za prikupljanje fragmenata dijele se na zone (sl. 3.3.3.1.1) da bi se mogla odrediti masena distribucija fragmenata za svaki polarni interval od 5° do 180°. Oznake panela postavljene su na 2,5°, 7,5°, 12,5°, itd., kako bi dobili srednje vrijednosti podataka za svaki interval [13].

Mjerenje brzine fragmenata obavlja se koristeći standardni test panel (slika 3.3.3.1.1.b). Svaki standardni test panel za mjerenje brzine veličine je dimenzija 1,2 x 2,4 m, i sastavljen je od dva vertikalna zida, međusobno udaljena 15cm. Unutrašnji zid (bliži bojevoj glavi) napravljen je od aluminijskih folija, debljine približno 0,05mm kako bi reflektovao svjetlo od sijalica koje se nalaze između zidova.Vanjski zid (bliži kamerama) napravljen je od vinila, zaštićenog crnom tkaninom, debljine približno 0,20mm. Strana okrenuta kamerama označena je bijelim kvadratima širine 60cm [13].

Devet sijalica koriste se unutar svakog panela za osvjetljenje prilikom procesa mjerenja brzine fragmenata. Svaka sijalica povezana je serijski sa ostalima. Zato postoji devet odvojenih kola sijalica, tako da ako jedno kolo ne funkcioniše, ostala će dati odgovarajuću iluminaciju.

Oznake zona na pozadini panela za mjerenje brzine obično su vidljive pod prirodnim svjetlom. Da bi bili sigurni da su one vidljive i kada je vidljivost slaba, sijalice se postavljaju u reflektore koji se nalaze na tlu kako bi se obezbjedio uniforman iluminacioni intenzitet preko cijelog panela. Sijalice se uključuju, kako bi se dostigao vrhunac njihovih performansi, otprilike 20ms prije nego što počinje snimanja udara fragmenata u panel.

Jedinica za kontrolu osvjetljenja koja se kontroliše elektronskim sekvencijalnim tajmerom, daje energiju za paljenje sijalica. Sijalice su sinhronizovane da budu na vrhuncu svojih performansi kada fragmenti prolaze kroz zadnji dio panela za mjerenje brzine. Snop svjetla koji prolazi kroz otvore napravljene perforacijom fragmenata snima se na film [13].

U pravougloj Areni, barikade protiv rikošeta koriste se da bi se spriječilo da fragmenti koji udare u zemlju i rikošetiraju ne udare u panele za mjerenje brzine ili panele za prikupljanje fragmenata. Ove barikade konstruišu se na slijedeće načine [13]:

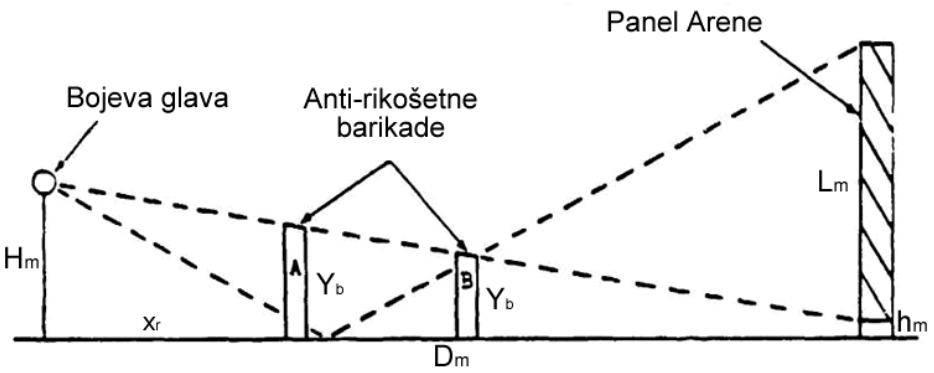
1. Postavlja se barikada od zemlje, širine 0,6m koja je pod nagibom tako da se spaja sa zamišljenom ravni između ose projektila i dna panela (slika 3.3.3.1.2)
2. Čelične ploče koje se nalaze na izbočini od zemlje ili u drvenom okviru i nagnute pod uglom prema projektilu tako da pogodak fragmenta u ploče rezultira rikošetom prema zemlji, a ne prema panelima. Visina i položaj anti-rikošetnih barikada može se odrediti iz slijedećih jednačina:

   Ako je x_r udaljenost, duž tla, od centra test Arene do anti-rikošetne barikade, a Y_b visina anti-rikošetne barikade, onda je:

$$x_r = \frac{2 \cdot H_m \cdot D_m}{(2 \cdot H_m + L_m)} \quad \text{i} \quad Y_b = \frac{H_m \cdot (2 \cdot h_m + L_m)}{(2 \cdot H_m + L_m)} \qquad (3.3.3.1.2)$$

   U izrazu (3.3.3.1.2) su:
   H_m - udaljenost ose bojeve glave od tla,
   D_m - udaljenost ose bojeve glave do mete (panela),
   h_m - udaljenost između tla i dna mete, i
   L_m - visina mete (obično 2,4m) [13].

Udaljenost x_r može se smanjiti, po potrebi, i tada se treba proporcionalno povećati visina barikade Y_b. Tako, npr., ako se x_r smanji za x_n, Y_b se mora povećati za $x_n \cdot (H_m - h_m)/D_m$.

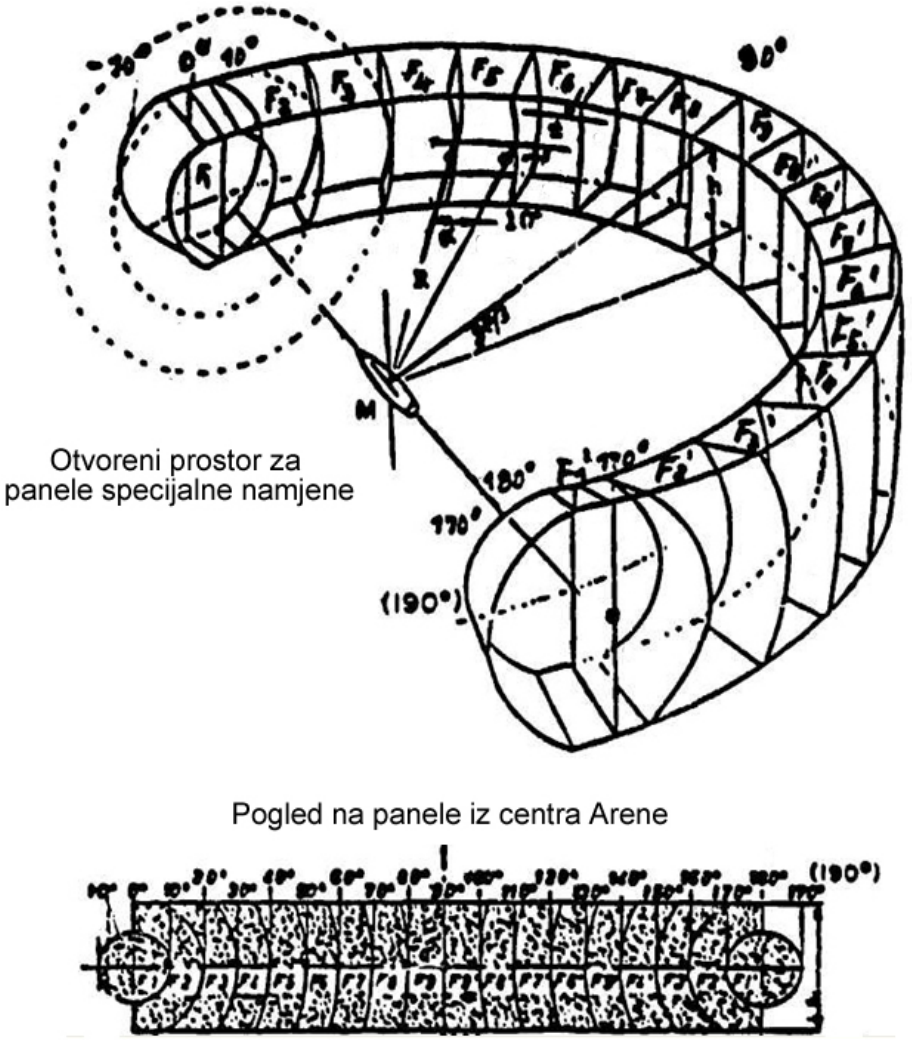


Slika 3.3.3.1.2 Rikošetne barikade; i opcija A i opcija B su zadovoljavajuće [13]

Slika 3.3.3.1.2 pokazuje dimenzije anti-rikošetnih barikada i mete, udaljenost ose bojeve glave od tla, udaljenost ose bojeve glave do mete (panela) i udaljenost između tla i dna mete [13].

3.3.3.2 Polukružna NATO Arena

Shema klasične polukružne arene prikazana je na slici 3.3.3.2.1. Paneli arene podijeljeni su na polarne zone Arene (F1, F2, F3, ...) širine α, dok je visina panela *h*, a debljina panela *t* [13].



Slika 3.3.3.2.1 Shema klasične polukružne arene [13]

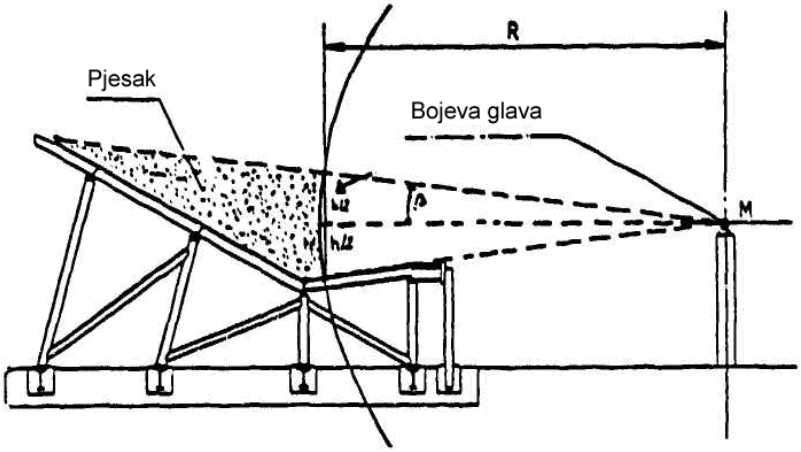
Projektil se postavlja u centar test arene, sa svojom uzdužnom osom u horizontalnoj ravni. Prednji dio projektila okrenut je prema polarnoj zoni od 0°, a dno projektila prema polarnoj zoni od 180°.

Arena se sastoji od polukružnog sektora koji je podjeljen na panele (segmente). Unutrašnja strana panela okrenuta je prema bojevoj glavi. Vreće ispunjene pijeskom koriste se kao medij za zaustavljanje i prikupljanje fragmenata.

Paneli za sakupljanje fragmenata sastoje se od 18 zona, gdje svaka zona zauzima polarni ugao od $\alpha = 10°$ (osim polarnih zona F_1 i F_1' kod koji su uglovi od 20°). Zone F_1' - F_9' su ogledalne slike zona F_1 - F9 (slika 3.3.3.2.1) [13].

Debljina polukružne arene *t* obično iznosi od 0,8 do 1,5m, zavisno od njenog radijusa.

Visina zida panela izračunava se koristeći jednačinu $h = 2 \cdot R \cdot \sin(\beta)$, gdje je β meridijalni ugao polukružne arene čije se izvorište nalazi u centru arene (slika 3.3.3.2.2), a *R* udaljenost od centra detonacije do panela [13].



Slika 3.3.3.2.2 Sekcijski pogled na polukružnu arenu

Radijus arene *R* je funkcija eksplozivnog punjenja u bojevoj glavi. U tabeli 3.3.2 date su preporuke za vrijednosti radijusa polukružne arene u funkciji mase eksploziva [13].

Tabela 3.3.2 Radijusi polukružne Arene [13]

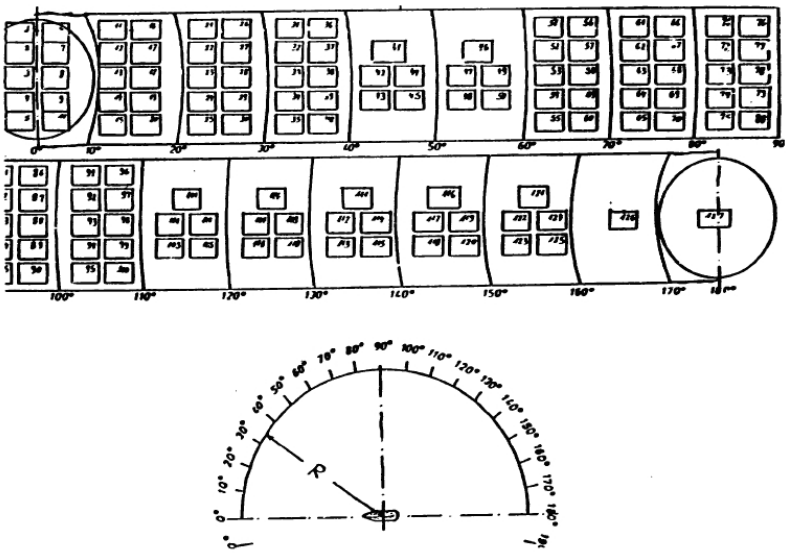
Masa eksploziva, kg	Radijus arene, m
do 0,6	2
0,6 do 10	5
10 do 130	10

Ako se mjeri i brzina fragmenata, prednji otvor polukružne arene treba zatvoriti sa kartonskim pločama debljine 2mm kako bi se postavili paneli za mjerenje brzine (sa elektronskim senzorima).

Nakon detonacije bojeve glave potrebno je isprazniti sadržaj svake zone zasebno, odvojiti fragmente od medija (pijeska), koristeći specijalnu aparaturu - dvoslojno sito, različite veličine mreže i magnetni doboš. Ovo omogućava da se sakupi i tzv. "fragmentacijska prašina".

Sakupljeni fragmenti iz svake polarne zone se očiste, razdvoje prema komponentama odakle potiču (tijelo projektila, upaljač, krilca, ...), izbroje, odvagaju i razvrste prema masenim grupama [13].

Mjerenje brzine fragmenata vrši se korištenjem senzora postavljenim na različitim lokacijama na panelima koji mjere vrijeme leta fragmenta. Broj senzora u Areni i njihov raspored može se modificirati od testa do testa. Na slici 3.3.3.2.3 prikazan je tipičan raspored senzora za mjerenje brzine fragmenata u polukružnoj Areni.



Slika 3.3.3.2.3 Tipične lokacije senzora u NATO polukružnoj Areni [13]

Mjerenje vremena leta fragmenta započinje od trenutka kada se projektil detonira, a prestaje kada fragmenti probiju ploču sa provodnicima. Početak mjerenja vremena leta fragmenta može se odrediti koristeći foto-detektore, žičane prekidače, itd [13].

POGLAVLJE 4

CILJEVI ISTRAŽIVANJA

4.1 Model za predviđanje smrtonosne zone HE bojevih glava

Glavni zadatak ovog magistarskog rada je definisanje modela za predviđanje zone smrtonosnog dejstva HE bojevih glava.

Model za predviđanje smrtonosne zone predstavlja modificiran i pojednostavljen američki model za određivanje koeficijenta efikasnosti A_L (*U.S. Vulnerability Model for Military Personnel*). Modificiranje i pojednostavljenje je uslovljeno raspoloživim bazama podataka, nivou vojne doktrine u našoj zemlji u oblasti definisanja smrtonosnih efekata HE municije, raspoloživih tehnologija i standarda za testiranje municije, itd.

Koeficijent efikasnosti A_L je veličina čiji je fizički smisao - očekivani broj onesposobljenih vojnika na terenu nakon dejstva jedne bojeve glave pri definisanoj gustini vojnika.

Prema američkom modelu, koeficijent efikasnosti A_L određuje se izrazom:

$$A_L = \frac{N}{\sigma} = \int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty} P(x,y)\cdot dx\cdot dy \qquad (4.1.1)$$

gdje su:
N - očekivani broj onesposobljenih boraca na bojištu,
σ - površinska gustina vojnika u određenoj tački (x,y) terena,
P(x,y) - vjerovatnoća onesposobljavanja vojnika koji se nalazi u datoj tački (x,y) terena.

Izraz (4.1.1) kojim se određuje koeficijent efikasnosti A_L prihvata se i u modelu za predviđanje smrtonosne zone.

Američki istraživači koriste različite vrijednosti površinske gustine vojnika za određene taktičke situacije (kolona vojnika, cik-cak formacija, defanzivna formacija, itd), gdje je $\sigma(x,y)$ konstantna, ali nije uniformna).

U vojnoj terminologiji naše zemlje površinska gustina vojnika $\sigma(x,y)$ uzimana je kao uniformna i konstantna (1 vojnik po m^2 površine terena).

Usvojena je konstantna i uniformna površinska gustina vojnika - 1 vojnik/m^2 za model predviđanja smrtonosne zona bojeve glave.

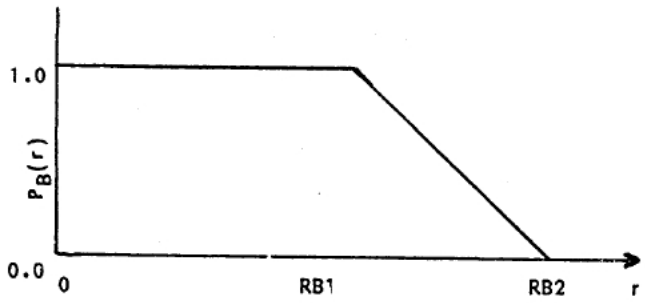
Vjerovatnoća onesposobljavanja vojnika P u tački (x,y), koristeći američki model, dobija se preko izraza:

$$P(x,y) = 1 - \left[1 - P_B(x,y)\right]\cdot\left[1 - P_F(x,y)\right] \qquad (4.1.2)$$

gdje su:
$P_B(x, y)$ - vjerovatnoća onesposobljavanja uslijed rušećeg efekta produkata detonacije,
$P_F(x, y)$ - vjerovatnoća onesposobljavanja uslijed djelovanja fragmenata.

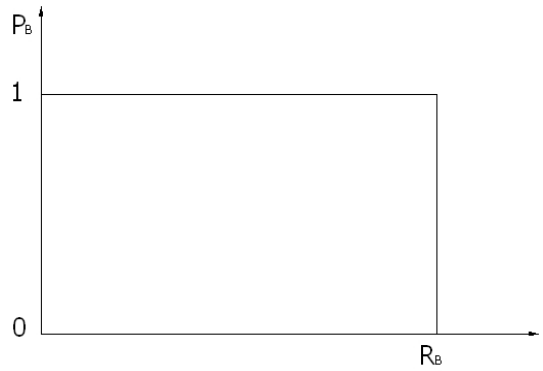
Izraz (4.1.2) za procjenu vjerovatnoće onesposobljavanja vojnika se, također, prihvata, ali uz određene modifikacije.

Prema američkom modelu, vjerovatnoća onesposobljavanja vojnika uslijed rušećeg efekta P_B određuje se korištenjem dvostepene funkcije (sl. 4.1.1) koja zavisi od vrste i mase eksploziva. Kod nje vrijednost P_B može biti i manja od 1, i to u intervalu od R_{B1} do R_{B2}.



Slika 4.1.1 Dvostepena funkcija vjerovatnoće onesposobljavanja uslijed blast efekta [46]

Za određivanje vjerovatnoće onesposobljavanja vojnika uslijed rušećeg efekta (slika 4.1.1) potrebno je poznavati radijuse R_{B1} i R_{B2}, radijuse oko tačke detonacije za koju je vjerovatnoća onesposobljavanja vojnika uslijed rušećeg efekta jednaka 1 i 0, respektivno.



Slika 2. Funkcija vjerovatnoće onesposobljavanja uslijed blast efekta

U modelu za predviđanje smrtonosne zone razmatra se samo jednostepena funkcija (slika 4.1.2) kod koje je P_B = 1. Za njeno definisanje potrebno je odrediti vrijednost R_B - radijus oko tačke detonacije za koju je vjerovatnoća onesposobljavanja vojnika uslijed rušećeg efekta jednaka 0. Vrijednost radijusa R_B određuje se na osnovu onesposobljavajućeg nivoa nadpritiska udarnog detonacionog vala, a to je u slučaju kad je nadpritisak produkata detonacije HE bojeve glave veći ili jednak od 10 bara.

Prilikom određivanja vjerovatnoće onesposobljavanja uslijed djelovanja fragmenata, prema američkom modelu, koristi se izraz:

$$P_F(x, y) = 1 - e^{-d(x,y)\cdot A_t} \tag{4.1.3}$$

gdje su:
A_t - izložena površina mete na određenoj udaljenosti od centra detonacije,
d(x, y) - srednja gustina efikasnih fragmenata.

U modelu za predviđanje smrtonosne zone usvaja se (prema NATO standardu) da je vrijednost izložene površine vojnika u jurišnom položaju 0,37 m^2, u stojećem položaju 0,5 m^2, a u ležećem položaju 0,1 m^2.

Izraz (4.1.3) koristi se i u modelu za predviđanje smrtonosne zone, ali se gustina efikasnih fragmenata definiše na drugačiji način.

Prema američkom modelu, srednja gustina smrtonosnih fragmenata iz izraza (4.1.3) definira se kao:

$$d(x,y)=\frac{\sum_{j=LZ}^{UZ}\sum_{i=1}^{k}\frac{N(i,j)}{S(j)}P_{I/H}(i,j)}{r^2} \tag{4.1.4}$$

gdje su:
i - masena grupa fragmenta,
j - polarna zona fragmentacije definirana tokom statičkih ispitivanja,
UZ, LZ - zadnja i prva polarna zona arene,
k - broj masenih grupa efikasnih fragmenata unutar *j*-te polarne zone,
N(i, j) - broj fragmenata u *i*-toj masenoj grupi unutar *j*-te polarne zone,
S(j) - prostorni ugao za *j*-tu polarnu zonu na udaljenosti *r*,
r - udaljenost od centra detonacije,
$P_{I/H}$ - uslovna vjerovatnoća onesposobljavanja, pretpostavljajući pogodak mete jednim fragmentom.

Uslovna vjerovatnoća onesposobljavanja $P_{I/H}$ iz izraza (4.1.4), prema američkom modelu, definiše se matematički kao:

$$P_H = 1 - e^{-a\cdot\left(m\cdot V_r^{3/2}-b\right)^n} \tag{4.1.5}$$

gdje su:
a, b, n - konstante ranjivosti, određene eksperimentalnim istraživanjima, koje definišu izabranu taktičku situaciju i maksimalno vrijeme nakon ranjavanja poslije kojeg nastupa onesposobljavanje,
m - masa fragmenta,
V_r - brzina fragmenta prilikom udara u metu.

Podaci o masenoj grupi fragmenata po polarnim zonama su povjerljivi podaci koje ima samo američka vojska. Da bi se dobili takvi podaci vrše se skupa ispitivanja u NATO areni sa panelima za hvatanje fragmenata. Kod takvog tipa arene fragmenti se "hvataju" nakon proboja meta u pojedinim sektorima arene, nakon čega im se određuje masa, oblik i dimenzije.

Konstante ranjivosti iz izraza (4.1.5), također, predstavljaju povjerljive podatke dostupne samo američkim istraživačima.

Da bi se dobile vrijednosti brzine fragmenata (izraz 4.1.5), potrebno je mjeriti brzinu udara fragmenta u panele. Za to su potrebna skupa eksperimentalna istraživanja, i u toku izrade ovog magistarskog rada podaci o brzinama udara fragmenata nisu bili dostupni.

U modelu za predviđanje smrtonosne zone, definisanje srednje gustine efikasnih fragmenata na osnovu izraza (4.1.4) nije bilo moguće zbog ograničenja u dostupnosti informacija.

Međutim, na osnovu raspoloživih podataka (dostupnih eksperimentalnih istraživanja u polukružnoj areni) i matematičkih procedura moguće je razviti metod kojim se predviđa gustina efikasnih fragmenata u prostoru.

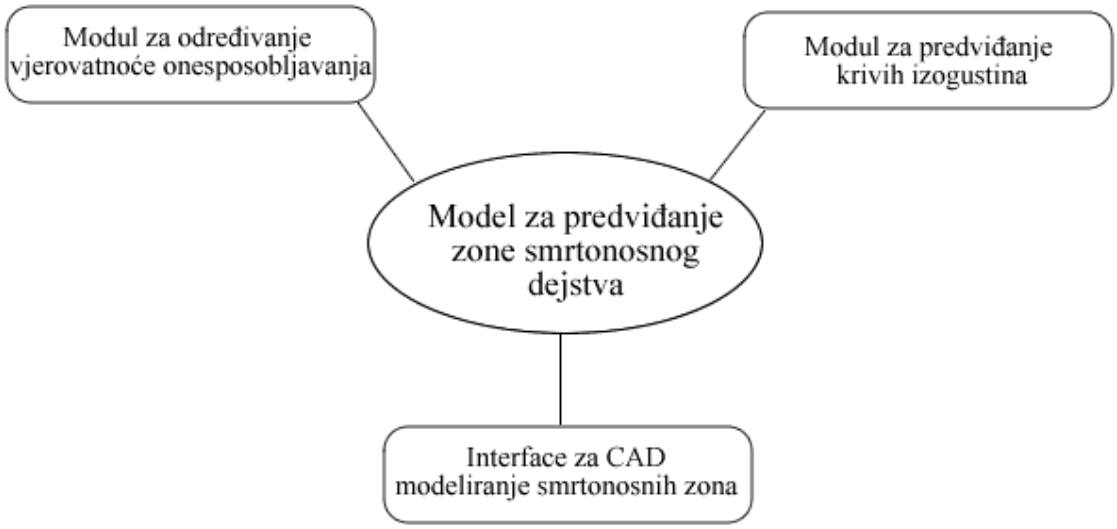
Generalno, taj metod bi se sastojao od definisanja gustine efikasnih fragmenata za svaku polarnu zonu. Gustina efikasnih fragmenata za pojedine intervale polarne zone eksperimentalno se

određuje za različite udaljenosti mjerenjem broja prodora drvenih panela na različitim udaljenostima za isti interval pojedinih uglova.

Zatim je moguće interpolacijom odrediti za svaki interval polarnih uglova rastojanje na kome je gustina efikasnih fragmenata jednaka 1 fragment/m^2.

Za definisanje modela koji omogućava predviđanje zone smrtonosnog dejstva HE bojevih glava, uvode se slijedeće hipoteze:

1. Vojnik na terenu je onesposobljen za borbu ako je pogođen najmanje jednim efikasnim fragmentom.
2. Fragment se smatra efikasnim u određenoj tački svoje putanje ako je sposobno da u toj tački probije etalon metu koja je normalna na njegovu putanju, što znači da kinetička energija udara efikasnog fragmenta iznosi (najmanje) 100J.
3. Raspodjela fragmenata u prostoru oko bojeve glave je osno-simetrična.
4. Fragmenti potiču iz jedne tačke - centra detonacije, tj. dimenzije bojeve glave su zanemarljivo male u odnosu na prostor razlijetanja fragmenata.
5. Fragmenti imaju pravolinijsku putanju.
6. Vjerovatnoća onesposobljavanja vojnika na terenu je kombinacija djelovanja blast efekta detonacionih produkata i djelovanja fragmenata bojeve glave.
7. Onesposobljavajući nivo nadpritiska detonacionog talasa na ljudski organizam iznosi 10 bara i više.
8. Površinska gustina vojnika na terenu (koji je ravan) je konstantna i uniformna, i iznosi 1 vojnik/m^2 površine terena.
9. Prema NATO standardu vrijednost izložene površine vojnika u jurišnom položaju je 0,37 m^2, u stojećem položaju 0,5 m^2, a u ležećem položaju 0,1 m^2.
10. Smrtonosna zona HE bojeve glave predstavlja površinu terena unutar koje je gustina efikasnih fragmenata $\geq$ 1 frag/m^2.
11. Zanemaruje se uticaj brzine i rotacije bojeve glave prilikom udara u cilj.



Slika 4.1.3 Model za predviđanje smrtonosne zone

Model za predviđanje zone smrtonosnog djelovanja HE bojevih glava sastoji se od tri glavna modula (slika 4.1.3):

- **Modul za određivanje vjerovatnoće pogađanja,**
- **Modul za predviđanje krivih izogustina, i**
- **Interface za CAD modeliranje smrtonosnih zona.**

Modul za određivanje vjerovatnoće pogađanja, Modul za predviđanje krivih izogustina i Interface za CAD modeliranje smrtonosnih zona predstavljaju osnovu modela za predviđanje zone smrtonosnog dejstva HE bojevih glava.

Kao dodatni dio modula za predviđanje krivih izogustina razvijeni su alati za procjenu radijusa efikasnog djelovanja bojeve glave, te alat za predviđanje ukupnog broja fragmenata u prostoru.

4.1.1 Modul za određivanje vjerovatnoće onesposobljavanja

Model za predviđanje zone smrtonosnog dejstva HE bojevih glava sadrži modul za određivanje vjerovatnoće onesposobljavanja čiju osnovu čini američki model *U.S. Vulnerability Model for Military Personnel*.

Prema američkom modelu, koeficijent efikasnosti A_L definiše se kao očekivani broj onesposobljenih vojnika nakon dejstva jedne bojeve glave pri definisanoj gustini vojnika po površini terena, a određuje se korištenjem izraza (4.1.1).

Da bi se odredio koeficijent efikasnosti A_L, potrebno je usvojiti vrijednost površinske gustine vojnika na terenu i odrediti vjerovatnoću onesposobljavanja vojnika na terenu.

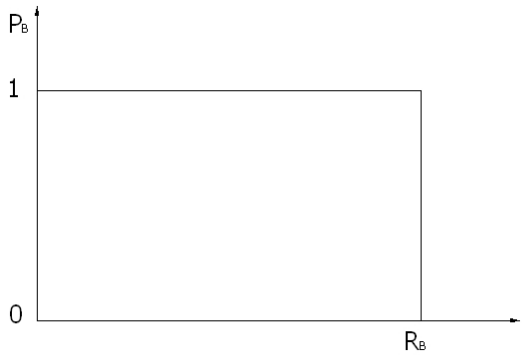
Prema usvojenoj hipotezi, površinska gustina vojnika na terenu je konstantna i uniformna, i iznosi 1 vojnik/m^2 površine terena.

Vjerovatnoću onesposobljavanja vojnika *P(x,y)* u nekoj tački moguće je procjeniti iz izraza:

$$P(x,y) = 1 - \left[1 - P_B(x,y)\right] \cdot \left[1 - P_F(x,y)\right] \qquad (4.1.1.1)$$

gdje su:
$P_B(x, y)$ - vjerovatnoća onesposobljavanja vojnika uslijed rušećeg efekta produkata detonacije, a
$P_F(x, y)$ - vjerovatnoća onesposobljavanja vojnika uslijed djelovanja fragmenata.

Procjena vjerovatnoće onesposobljavanja uslijed rušećeg efekta produkata detonacije vrši se korištenjem jednostepene funkcije (sl. 4.1.1.1).



Slika 4.1.1.1 Jednostepena funkcija vjerovatnoće onesposobljavanja uslijed blast efekta

Pretpostavlja se da je vjerovatnoća onesposobljavanja vojnika na terenu uslijed blast efekta do tačke na udaljenosti R_B od centra detonacije jednaka $P_B = 1$, a od tačke R_B vrijedi $P_B = 0$ (slika 4.1.1.1).

Jednostepena funkcija vjerovatnoće onesposobljavanja vojnika uslijed rušećeg efekta (slika 4.1.1.1) usvojena je u modelu zbog toga što je na manjim udaljenostima od bojeve glave dominantan efekat djelovanja fragmenata, pa se može zanemariti uticaj linearne funkcije vjerovatnoće onesposobljavanja čiji je domen od R_{B1} do R_{B2} (slika 4.1.1).

Međutim, udarno djelovanje detonacionih produkata na vojnike na terenu dominantno je u slučaju kada su vojnici veoma blizu tačke eksplozije, a nalaze se u zaklonu ili iza određenih zaštitnih objekata. Tada nije dominantan efekat djelovanja fragmenata, već djelovanje udarnog talasa eksplozivnih produkata.

Prema dosada rečenom, može se napisati:

$P_B = 1$ kada je $r \le R_B$

$P_B = 0$ kada je $r \ge R_B$

U prethodnom izrazu R_B je radijus oko tačke detonacije za koju je vjerovatnoća onesposobljavanja vojnika uslijed rušećeg efekta jednaka 1. Radijus R_B zavisi od mase eksploziva, tipa eksploziva i rastojanja od centra eksplozije.

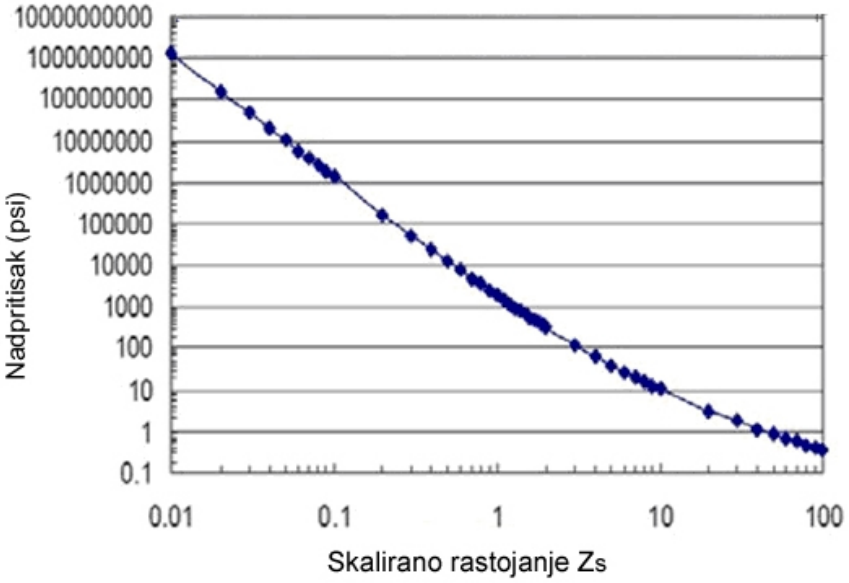
Vrijednost radijusa R_B može se jednostavno odrediti u funkciji od skaliranog rastojanja Z_s [77]. Formula za određivanje R_B preko skaliranog rastojanja Z_s ima oblik:

$$R_B = Z_s \cdot \sqrt[3]{C_{eksp}} \tag{4.1.1.2}$$

Ovdje je C_{eksp} - ekvivalentna masa eksploziva TNT. U slučaju korištenja drugog tipa eksploziva vrši se procjena ekvivalentne mase datog eksploziva pomoću izraza:

$$C_{ekv_TNT} = C_{eksp} \cdot P_{rel} \tag{4.1.1.3}$$

gdje je P_{rel} - relativna snaga eksploziva u odnosu na standardni vojni eksploziv TNT (broj veći ili manji od jedan). Vrijednost veličine P_{rel} za kompoziciju B, u odnosu na eksploziv TNT je 1,75.



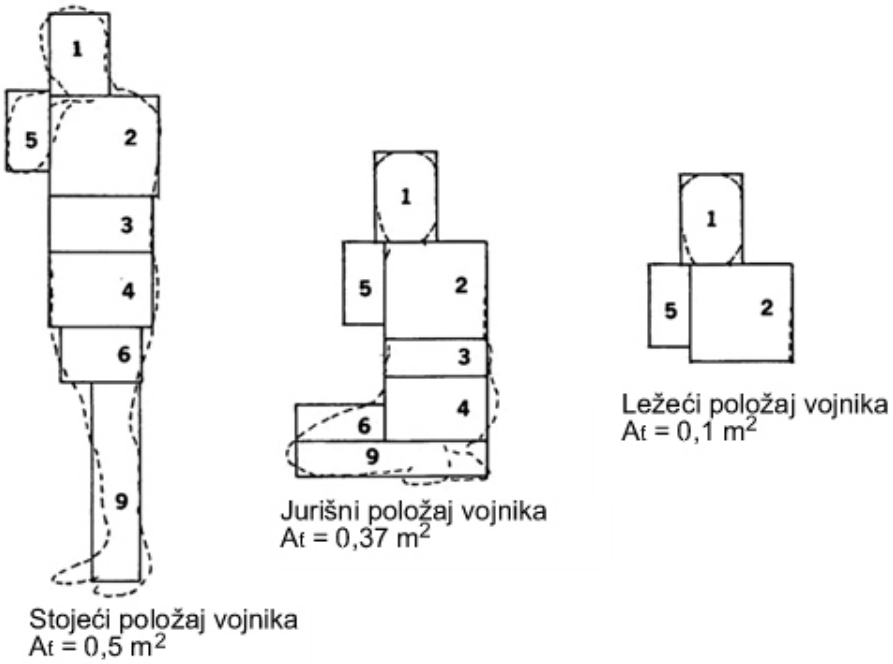
Sl. 4.1.1.2 Nadpritisak u funkciji rastojanja, izražen preko skalirane distance Z_s [73]
(Konverzija jedinica: 10 psi ekvivalentno je 0,689474 bar)

Vjerovatnoća onesposobljavanja vojnika na terenu uslijed djelovanja fragmenata može se procjeniti korištenjem izraza:

$$P_F(x,y) = 1 - e^{-d(x,y) \cdot A_t} \tag{4.1.1.4}$$

gdje su:
A_t - izložena površina vojnika na određenoj udaljenosti od centra detonacije, i
d(x,y) - srednja gustina efikasnih fragmenata.

Prema NATO vojnom standardu - STANAG 4512, vrijednost izložene površine vojnika A_t u jurišnom položaju je 0,37m^2, u stojećem položaju - 0,5 m^2, te u ležećem položaju - 0,1 m^2, kao što je prikazano na slici 4.1.1.3.



Slika 4.1.1.3 Vrijednosti usvojenih izloženih površina vojnika na terenu [10]

Srednja gustina fragmenata određuje se korištenjem modula za predviđanje krivih izogustina, a koji je opisan u slijedećem odjeljku.

4.1.2 Modul za predviđanje krivih izogustina

Modul za predviđanje krivih izogustina podrazumijeva predviđanje rasporeda gustine efikasnih fragmenata u prostoru oko bojeve glave, u funkciji od polarnog ugla.

Modul omogućava procjenu rasporeda gustine efikasnih fragmenata u funkciji od polarne zone za konstantne vrijednosti udaljenosti od centra detonacije, predviđanje 3D modela gustine efikasnih fragmenata u prostoru, predviđanje gustine efikasnih fragmenata za različite vrijednosti udaljenosti od centra detonacije u funkciji od polarne zone i definisanje krivih izogustina.

Protokol ispitivanja fragmentacije bojeve glave u polukružnoj Areni sadrži podatke o broju proboja (i zadora) fragmenata kroz svaki sektor arene.

Dobijeni podaci o broju proboja fragmenata kroz drvene panele sektora mogu se iskoristiti za određivanje gustine efikasnih fragmenata za svaki sektor polukružne arene posebno.

Gustina efikasnih fragmenata u opštem slučaju je funkcija ugla polarne zone θ i udaljenosti od centra eksplozije R:

$$d_{sp} = f(\theta, R) \tag{4.1.2.1}$$

Predviđanje gustine efikasnih fragmenata u funkciji od polarne zone za konstantne vrijednosti udaljenosti do centra detonacije bazira se na pretpostavci da je R = const. Tako se, na osnovu dobijenih eksperimentalnih podataka, za svaki radijus arene može procjeniti gustina efikasnih fragmenata u funkciji od polarne zone. Tada vrijedi da je $d_{sp} = f(\theta)$.

Na osnovu eksperimentalnih podataka o broju proboja fragmenata kroz panele svih sektora arene može se definisati gustina efikasnih fragmenata d_{spi} za svaki panel korištenjem izraza:

$$d_{spi} = \frac{n_{spi}}{S_{spi}} \tag{4.1.2.2}$$

U izrazu (4.1.2.2) su:

n_{spi} - broj efikasnih fragmenata za dati panel (fragmenti koji su probili panel u areni),
S_{spi} - izložena površina panela u areni.

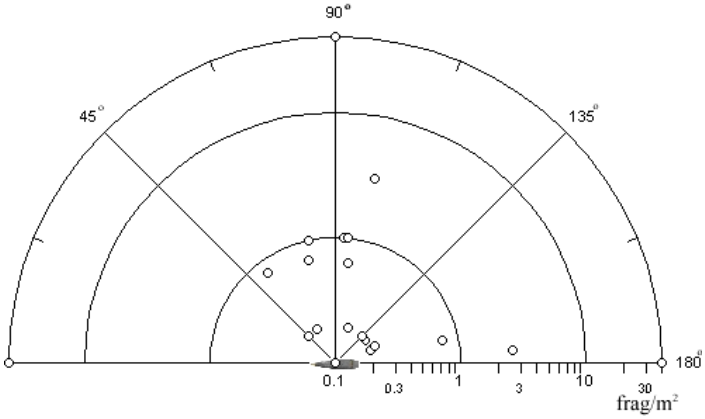
Površina panela S_{spi} određuje se formulom:

$$S_{spi} = a_{spi} \cdot h_{spi} \tag{4.1.2.3}$$

gdje su:
a_{spi} - širina drvenog panela arene,
h_{spi} - visina panela arene.

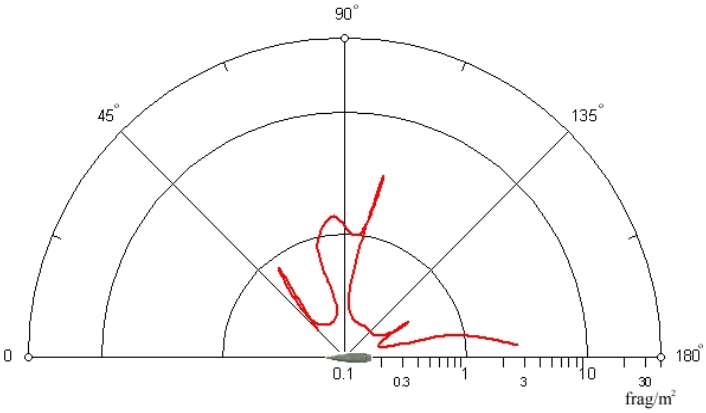
Širina panela je konstantna za određeni sektor, i za polukružnu arenu interval polarne zone iznosi 8,18°, što se dobije ako ukupni ugaoni interval jednog sektora arene - 180° podijelimo sa ukupnim brojem panela u datom sektoru - 22. To praktično znači da se širina panela mijenja u zavisnosti od udaljenosti od centra eksplozije (različita za sva četiri sektora), kako bi interval polarnog ugla ostao isti.

Nakon određivanja gustine efikasnih fragmenata, korištenjem izraza (4.1.2.1), za svaki panel u areni, moguće je dobijene rezultate prikazati u polarnim dijagramima, u kojima je osa gustine efikasnih fragmenata prikazana u logaritamskoj skali radi jasnijeg prikaza (slika 4.1.2.1). Na slici 4.1.2.1 vrijednost udaljenosti od centra detonacije je konstantna (R = const), dok je gustina efikasnih fragmenata u zavisnosti od polarnog ugla θ promjenljiva veličina.



Slika 4.1.2.1 Polarni dijagram rasporeda gustine efikasnih fragmenata (R = const)

Tačke sa izračunatim vrijednostima gustine efikasnih fragmenata u zavisnosti od polarne zone (slika 4.1.2.1) moguće je interpolirati spline funkcijom kako bi se dobila glatka kriva koja pokazuje trend rasporeda gustine efikasnih fragmenata za određenu udaljenost od centra eksplozije (slika 4.1.2.2).



Slika 4.1.2.2 Interpolacija dobijenih tačaka spline funkcijom (R = const)

Za definisanje 3D modela gustine efikasnih fragmenata, koji se bazira na eksperimentalnim podacima dobijenim u polukružnoj areni, koristi se pravougli koordinatni sistem.

Dobijene podatke o broju proboja fragmenata kroz panele arene moguće je iskorisiti za definisanje gustine efikasnih fragmenata za svaku polarnu zonu (izraz 4.1.2.2).

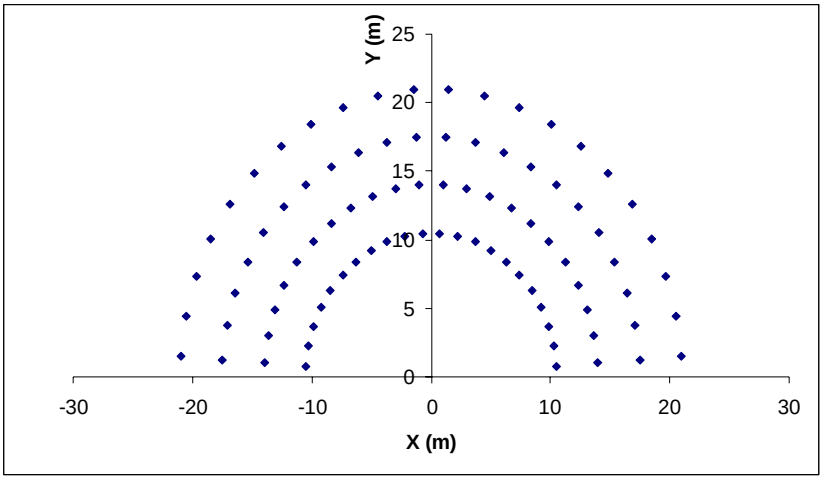
Nakon određivanja gustine efikasnih fragmenata za sve panele arene, potrebno je u pravouglom koordinatnom sistemu predstaviti tačke koje odgovaraju centru datih panela - X_i, Y_i.

Pri tome se koriste izrazi za transformaciju iz polarnog u pravougli koordinatni sistem:

$$X_i = R_i \cdot \cos\theta_{ci}$$

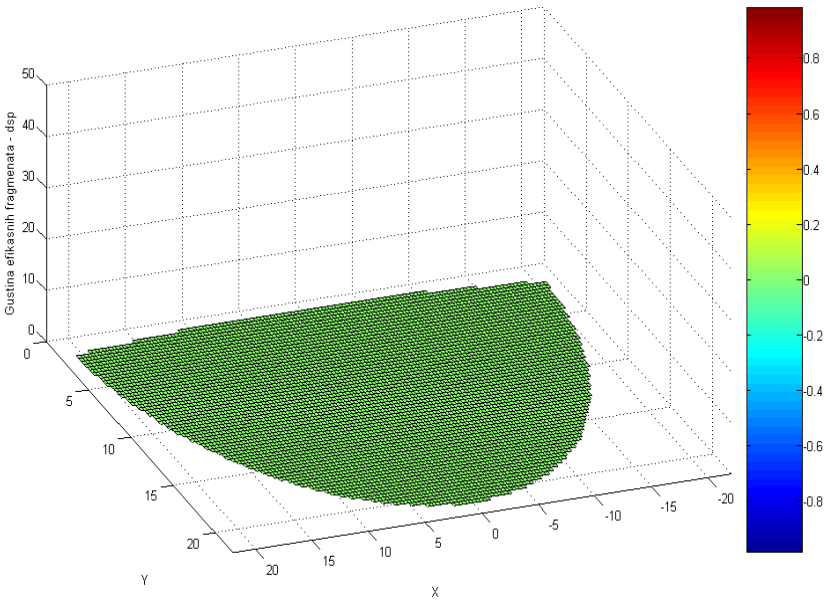
$$Y_i = R_i \cdot \sin\theta_{ci} \qquad (4.1.2.4)$$

gdje su:
R_i - poluprečnici sektora arene,
θ_{ci} - centralni uglovi polarnih zona u pojedinim sektorima arene.



Slika 4.1.2.3 Prikaz koordinata centara svih panela arene

Na slici 4.1.2.3 dat je prikaz koordinata centara svih panela polukružne arene.



Slika 4.1.2.4 Domen 3D modela gustine efikasnih fragmenata

Prethodno dobijene koordinate centara panela X_i, Y_i predstavljaju domen 3D modela gustine efikasnih fragmenata (slika 4.1.2.4).

Da bi se mogao definisati prostorni raspored gustine efikasnih fragmenata potrebno je pridružiti vrijednosti gustine efikasnih fragmenata d_{spi} odgovarajućoj koordinati X_i, Y_i. To znači da vrijednost gustine efikasnih fragmenata koja je dobijena za napr. prvi panel prvog sektora arene pridružimo koordinati tačke koja predstavlja centar datog panela.

Na taj način dobija se skup tačaka u prostoru koji opisuje prostornu distribuciju gustine efikasnih fragmenata - 3D model gustine efikasnih fragmenata.

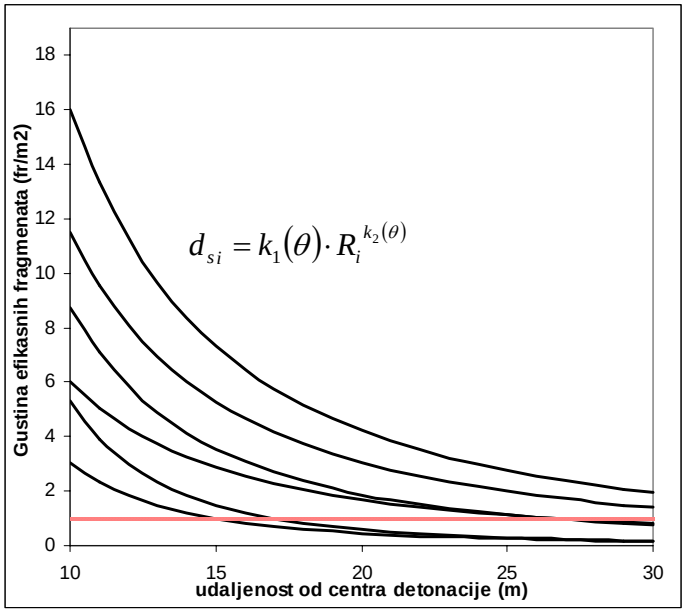
Eksperimentalni podaci o broju proboja fragmenata kroz drvene panele sektora mogu se upotrijebiti za određivanje gustine efikasnih fragmenata u zavisnosti od polarne zone i udaljenosti od centra detonacije. U tom slučaju promjenljive veličine su i polarni ugao θ i udaljenost od centra detonacije R, pa u tom slučaju vrijedi izraz (4.1.2.1).

Korištenjem izraza (4.1.2.2) može se odrediti gustina efikasnih fragmenata za svaki panel, svih sektora arene. Komparacijom dobijenih rezultata za istu polarnu zonu uočava se da vrijednost gustine efikasnih fragmenata opada sa povećanjem udaljenosti od centra eksplozije.

Tako je za svaku polarnu zonu moguće definisati aproksimacionu funkciju gustine efikasnih fragmenata za različite udaljenosti od centra detonacije. Za taj postupak koristi se regresiona analiza funkcije opšteg oblika:

$$d_{si} = k_1(\theta) \cdot R_i^{k_2(\theta)} \qquad (4.1.2.5)$$

gdje su $k_1(\theta)$ i $k_2(\theta)$ konstante koje se određuju na osnovu regresione analize.



Slika 4.1.2.5 Aproksimacione funkcije gustine efikasnih fragmenata za različite udaljenosti od centra detonacije i različite polarne zone

Na slici 4.1.2.5 prikazane su aproksimacione funkcije gustine efikasnih fragmenata za različite udaljenosti od centra detonacije i različite polarne zone. Isprekidana linija crvene boje na slici 4.1.2.5 označava tačke gdje je gustina efikasnih fragmenata jednaka 1 fragment/m^2 površine terena.

Nakon definisanja aproksimacionih funkcija gustine efikasnih fragmenata za svaku polarnu zonu, određuju se tačke na terenu sa jednakom vrijednosti gustine efikasnih fragmenata.

Metodom interpolacije aproksimacionih funkcija, oblika kao u izrazu (4.1.2.5), dobija se skup tačaka sa unaprijed definisanom gustinom efikasnih fragmenata, napr. od 0,5 frag/m^2, 1 frag/m^2, 2 frag/m^2, itd, zavisno od potrebe istraživača.

Dobijene krive koje spajaju tačke sa istom gustinom efikasnosih fragmenata nazivaju se krive *Izogustina*.

Smrtonosna zona HE bojevih glava definiše se kao zona na bojištu koja ograničava površinu terena unutar koje je gustina efikasnih fragmenata ≥ 1 frag/m^2.

Vojnik koji se nalazi unutar smrtonosne zone bit će onesposobljen za borbu ako ga pogodi fragment čija je kinetička energija veća ili jednaka od 100J.

Uvjeti pod kojima se određuje ovako definisana smrtonosna zona su nulti napadni ugao bojeve glave i detonacija bojeve glave na tlu.

Kriva izogustina (gdje je vrijednost gustine efikasnih fragmenata jednaka 1 fragment/m^2), tj. kriva koja ograničava smrtonosnu zonu bojeve glave, može se definisati interpolacijom kroz tačke sa istom gustinom efikasnih fragmenata (1 frag/m^2) koje su prethodno određene. To se može postići korištenjem spline funkcije kako bi se dobila glatka kriva.

Na taj način se mogu, korištenjem softverskih paketa (MatLab© i dr.), predstaviti 2D modeli smrtonosnih zona preko polarnih dijagrama. U takvim dijagramima vrijednost gustine efikasnih fragmenata je konstantna (1 frag/m^2), dok je promjenljiva vrijednost udaljenosti od centra detonacije bojeve glave.

Poznavanjem vrijednosti srednje gustine efikasnih fragmenata, moguće je odrediti vjerovatnoću onesposobljavanja vojnika na terenu $P(x,y)$, a time i koeficijent efikasnosti A_L.

Koeficijent efikasnosti A_L izračunava se uz pomoć računara, koristeći metode numeričke matematike (numerička integracija dvostrukog integrala). Vjerovatnoća onesposobljavanja $P(x,y)$ je bezdimenziona veličina, pa koeficijent efikasnosti A_L ima dimenziju površine.

Ovako određen koeficijent efikasnosti A_L određen je za uslove nultog napadnog ugla bojeve glave i detonacije bojeve glave na tlu.

U okviru modula za predviđanje krivih izogustina razvijeni su dodatni podmoduli koji omogućavaju predviđanje ukupnog broja fragmenata u prostoru i radijusa efikasnog dejstva bojeve glave.

Podmodul za predviđanje ukupnog broja fragmenata u prostoru, nastalih fragmentacijom HE bojeve glave, bazira se na matematičkom aparatu koji koristi rezultate eksperimentalnih istraživanja dobijene u polukružnoj areni, kako bi se procjenio ukupan broj fragmenata u prostoru. Podmodul za predviđanje ukupnog broja fragmenata u prostoru sastoji se iz dva dijela.

U prvom dijelu podmodula procjenjuje se broj efikasnih fragmenata u prostoru na određenom rastojanju od centra eksplozije bojeve glave. Pri tome se razmatraju samo fragmenti koji su probili metu - efikasni fragmenti.

Drugi dio podmodula koristi se za predviđanje ukupnog broja svih fragmenata. U ovom slučaju koriste se podaci i o broju proboja i o broju zadora (fragment pogađa metu, ali je ne probija).

Ukupni broj efikasnih fragmenata u prostoru može se procjeniti na osnovu jednačina:

$$N_{uk-ef} = \sum_{j=1}^{n} N_{j-ef} \qquad (4.1.2.6)$$

$$N_{j-ef} = n_{j-ef} \cdot \frac{S_{\Omega j}}{S_m} \qquad (4.1.2.7)$$

gdje su:
$N_{uk\text{-}ef}$ - ukupni broj efikasnih fragmenata u prostoru oko bojeve glave,
$N_{j\text{-}ef}$ - ukupni broj efikasnih fragmenata u *j*-toj polarnoj zoni arene,
$n_{j\text{-}ef}$ - broj registrovanih efikasnih fragmenata (prodori) u *j*-toj polarnoj zoni arene,
$S_{\Omega j}$ - površina dijela sfere koju odsjeca prostorni ugao u *j*-toj polarnoj zoni arene,
S_m - površina panela arene. Konstantna za određeni sektor arene.

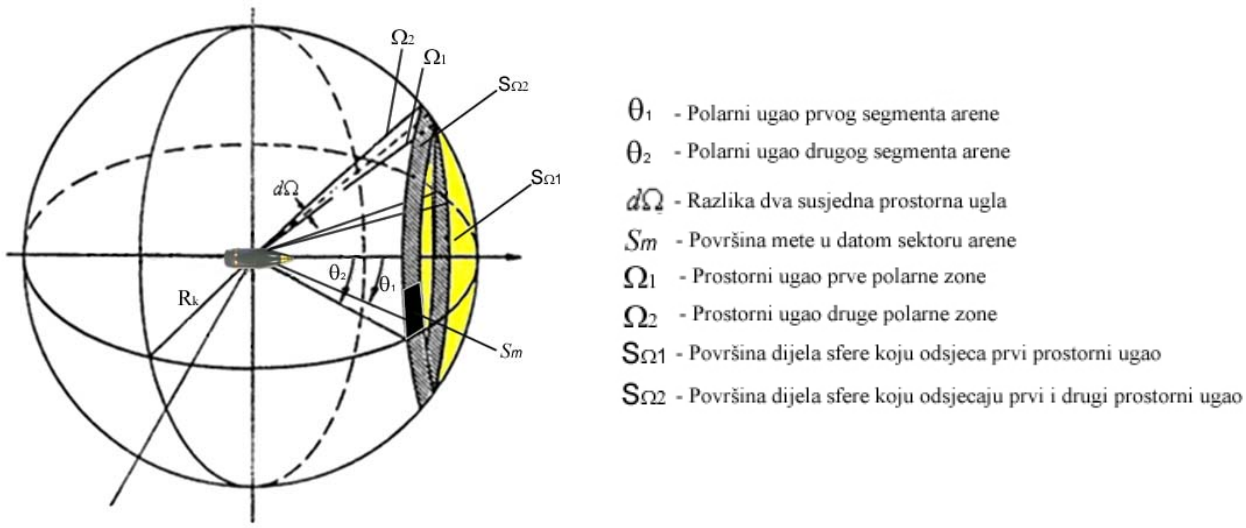
Procjena ukupnog broja svih fragmenata u prostoru određuje se na osnovu jednačina:

$$N_{uk} = \sum_{j=1}^{n} N_j \tag{4.1.2.8}$$

$$N_j = n_j \cdot \frac{S_{\Omega j}}{S_m} \tag{4.1.2.9}$$

gdje su:
N_{uk} - ukupni broj svih fragmenata u prostoru oko bojeve glave,
N_j - ukupni broj svih fragmenata u *j*-toj polarnoj zoni arene,
n_j - broj registrovanih fragmenata (prodori i zadori) u *j*-toj polarnoj zoni arene,
$S_{\Omega j}$ - površina dijela sfere koju odsjeca prostorni ugao u *j*-toj polarnoj zoni arene,
S_m - površina panela arene.

U poglavlju 2.7.2 izložen je metod za predviđanje ukupnog broja fragmenata u prostoru.



Slika 4.1.2.7 Geometrija korištena u analizi ukupnog broja fragmenata

Površina dijela sfere koju odsjeca prvi prostorni ugao određuje se pomoću izraza:

$$S_{\Omega 1} = 2\pi R_k^{\,2}(1-\cos\theta_1) \tag{4.1.2.10}$$

gdje su:
R_k - radijus sektora arene,
θ_1 - polarni ugao prvog segmenta arene (slika 4.1.2.7).

Opšti izraz za definisanje površine dijela sfere koju odsjecaju dva susjedna prostorna ugla, za *j*-tu polarnu zonu sa sada može napisati u obliku:

$$S_{\Omega j} = 2\pi R_k^{\,2}(\cos\theta_j - \cos\theta_{j+1}) \tag{4.1.2.11}$$

Opšti izraz za procjenu broja efikasnih fragmenata u prostoru oko bojeve glave predstavljen je u obliku:

$$N_{uk-ef} = \sum_{j=1}^{n} N_{j-ef} = \sum_{j=1}^{n} n_{j-ef} \cdot \frac{2\pi R_k^{\,2}(\cos\theta_i - \cos\theta_{i+1})}{S_m} \qquad (4.1.2.12)$$

Slično izrazu (4.1.2.12), formula za procjenu ukupnog broja svih fragmenata u prostoru ima oblik:

$$N_{uk} = \sum_{j=1}^{n} N_j = \sum_{j=1}^{n} n_j \cdot \frac{2\pi R_k^{\,2}(\cos\theta_i - \cos\theta_{i+1})}{S_m} \qquad (4.1.2.13)$$

Na osnovu podataka o broju proboja fragmenata, određenih u eksperimentalnim istraživanjima u polukružnoj areni, može se, osim procjene ukupnog broja fragmenata, procjeniti zavisnost efikasnih fragmenata u funkciji od polarne zone. Ova procjena je važna jer nam može ukazati u kojem intervalu prostornih uglova se nalazi najveći broj efikasnih fragmenata.

Podmodul za predviđanje radijusa efikasnog dejstva koristi se u fazi provjere reproduktivnosti procesa proizvodnje i za jednostavnu usporedbu performansi sličnih bojevih glava. Ovaj podmodul bazira se na statističkoj analizi srednjih vrijednosti proboja po sektorima i na određenoj udaljenosti od centra eksplozije.

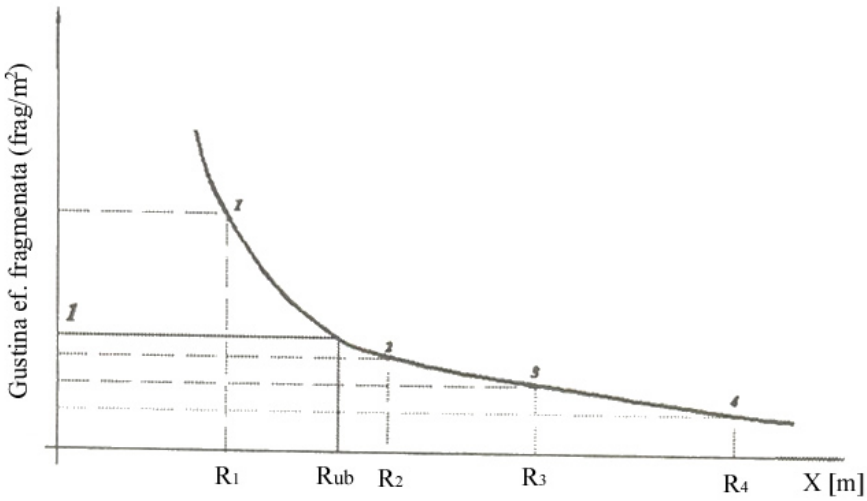
Za procjenu radijusa efikasnog dejstva koriste se numeričke metode i eksperimentalni podaci dobijeni testom fragmentacije bojevih glava u četvrtkružnoj Areni.

Nakon rasprskavanja bojeve glave, za svaki sektor četvrtkružne Arene procjenjuje se gustina efikasnih fragmenata d_s (fragmenti koji su probili drvenu metu) korištenjem izraza:

$$d_s = \frac{n_s}{S_s} \qquad (4.1.2.14)$$

Ovdje su:
n_s - broj efikasnih fragmenata (broj proboja) kroz dati sektor četvrtkružne arene,
S_s - izložena površina sektora (S_s = ½ $R_k \cdot \pi \cdot h$, gdje je R_k radijus datog sektora, a h_s njegova visina - visina segmenta/panela).

Karakter promjene gustine efikasnih fragmenata sa rastojanjem od centra detonacije bojeve glave prikazan je na slici 4.1.2.8. Ona je uvijek opadajuća funkcija.



Slika 4.1.2.8 Određivanje dometa efikasnog fragmenta [6]

Funkcija promjene gustine efikasnih fragmenata sa rastojanjem procjenjuje se postupkom regresione analize eksponencijalne krive opšteg oblika:

$$d_s = k_1 \cdot R_k^{\,k_2} \qquad (4.1.2.15)$$

gdje su:
k_1, k_2 - koeficijenti aproksimacione funkcije (4.1.2.15), dobijeni regresionom analizom, a
R_k - radijus *k*-tog sektora arene.

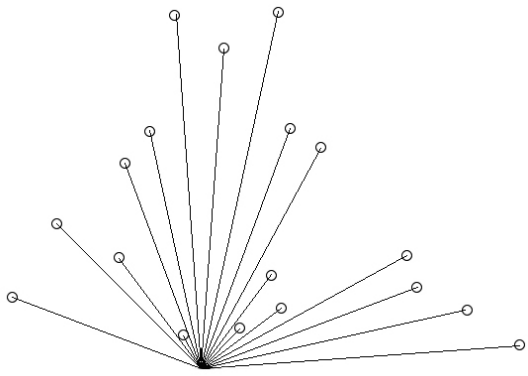
Nakon što se procjeni gustina efikasnih fragmenata za sva četiri sektora Arene, radijus efikasnog dejstva - R_{ub} definiše se kao udaljenost od centra detonacije na kojoj je gustina efikasnih fragmenata jednaka jednom fragmentu po m^2 površine (slika 4.1.2.8).

Vrijednost radijusa efikasnog dejstva određuje se metodama numeričke matematike ili softverski, interpolacijom aproksimacione funkcije oblika kao u izrazu (4.1.2.15).

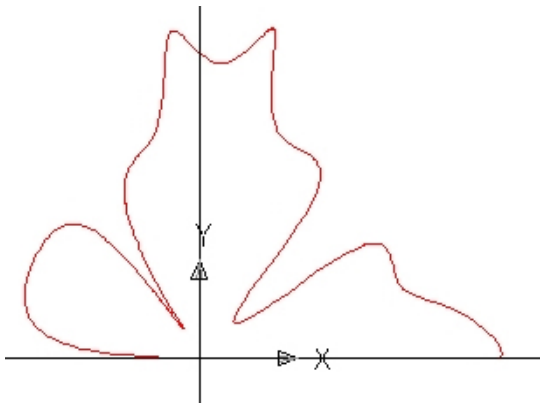
4.1.3 Interface za CAD modeliranje smrtonosnih zona

Modul za predviđanje krivih izogustina omogućava definisanje 2D modela smrtonosne zone, a time i tačaka na bojištu u kojima je gustina efikasnih fragmenata jednaka 1 frag/m^2.

Ulazne podatke za CAD modeliranje smrtonosne zone predstavljaju izračunate udaljenosti od centra detonacije do tačaka u kojima je gustina efikasnih fragmenata jednaka 1 frag/m^2, te koordinate centara panela polukružne arene (slika 4.1.3.1.a).



a.) Definisanje modela tačaka u kojima je gustina efikasnih fragmenata jednaka 1 frag/m^2



b.) Interpolaciona spline kriva koja prolazi kroz tačke u kojima je gustina efikasnih fragmenata ista - 1 frag/m^2.

Slika 4.1.3.1 Postupak crtanja 2D modela zone smrtonosnog dejstva u CAD softveru

Nakon modeliranja tačaka u kojima je gustina efikasnih fragmenata jednaka 1 frag/m^2, metodom interpolacije spline funkcijom u CAD softveru dobija se kriva izogustina koja ograničava smrtonosnu zonu jedne bojeve glave (slika 4.1.3.1.b).

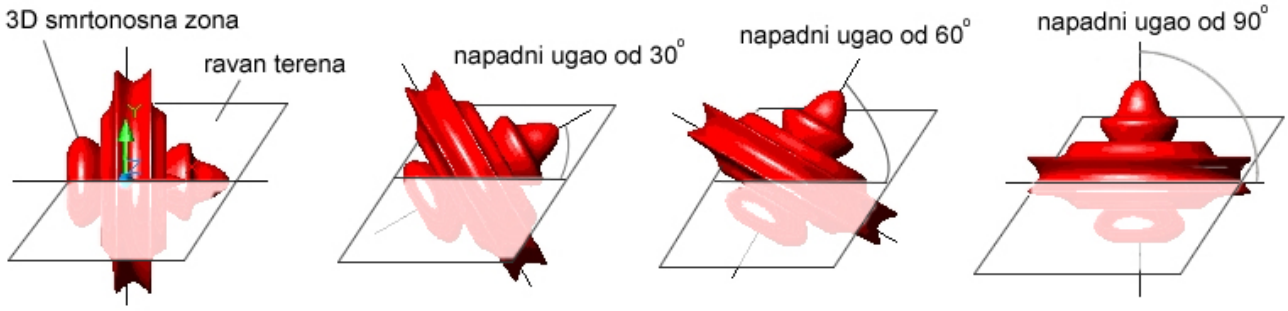
Na slici 4.1.3.1.b prikazana je interpolaciona kriva koja prolazi kroz tačke u kojima je gustina efikasnih fragmenata ista i iznosi 1 fragment/m^2.

Dobijeni 2D model (slika 4.1.3.1.b) gustine efikasnih fragmenata (1 frag/m^2) oko bojeve glave predstavlja polovinu zone smrtonosnog dejstva HE bojeve glave. Naime, eksperimentalni podaci dobijeni iz polukružne Arene odnose se samo za jednu polovinu (sferičnog) prostora oko bojeve glave.

Zbog toga što je, prema usvojenoj hipotezi, raspodjela fragmenata u prostoru oko bojeve glave osno-simetrična, zona smrtonosnog dejstva može se prikazati i za cijeli prostor oko bojeve glave. To se postiže zrcaljenjem dobijenog 2D modela u odnosu na osu simetrije bojeve glave.

Smrtonosna zona ograničena krivom sa slike 4.1.3.1.b može se softverski rotirati oko ose simetrije bojeve glave (x - osa na slici 4.1.3.1.b), kako bi se dobio 3D model smrtonosne zone u prostoru.

Kada se žele simulirati borbeni uslovi i različite taktičke situacije na terenu, dobijeni 3D model se transponuje na analizu smrtonosne zone za različite napadne uglove bojeve glave. Tada se vrši rotacija cjelokupnog 3D modela oko ordinate (osa okomita na osu simetrije bojeve glave, y - osa na slici 4.1.3.1.b) za npr. 30°, 60° ili 90°, kao što je prikazano na slici 4.1.3.2. Pri tome se koriste CAD metode.

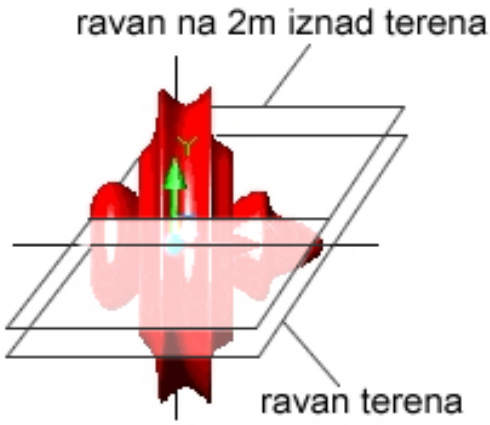


Slika 4.1.3.2 Presjek ravni tla sa 3D modelom smrtonosne zone za različite napadne uglove bojeve glave

Na slici 4.1.3.2 prikazani su 3D modeli smrtonosne zone za različite napadne uglove bojeve glave. Presjekom dobijenih 3D modela sa ravnima paralelnim tlu, dobija se projekcija 3D modela smrtonosne zone na zadate ravni, tj. 2D model smrtonosne zone za različite nivoe terena.

Postupak određivanja vrijednosti površine smrtonosne zone A_s CAD metodom bazira se na presjecanju 3D modela smrtonosne zone za različite napadne uglove bojeve glave sa ravni terena, i određivanju tražene vrijednosti površine A_s softverskim putem (CAD alatka: Area).

Kada se želi procjeniti površina smrtonosne zone A_s za nultu ravan, ili za ravan terena, tada se 3D model smrtonosne zone presjeca sa ravni koja se nalazi u ravni tla (slika 4.1.3.2).



Slika 4.1.3.3 Određivanje površine smrtonosne zone na visini od 2m od tla

Ako se želi odrediti površina smrtonosne zone A_s na visini od 2m od tla (maksimalna procjenjena visina vojnika na ravnom terenu), tada se dati 3D model smrtonosne zone presjeca sa ravni koja se nalazi 2m udaljena od ravni tla (slika 4.1.3.3).

Nakon određivanja presjeka 3D modela smrtonosne zone sa dvije ravni, CAD metodama se softverski izračunavaju dobijene površine smrtonosnih zona A_s. Na taj način mogu se procjeniti vrijednosti površine smrtonosne zone A_s oko bojeve glave na kojima je gustina efikasnih fragmenata ≥ 1 frag/m^2, za dva različita nivoa na terenu, i za različite padne uglove bojeve glave.

Kada su poznate sve tražene vrijednosti, moguće je grafički prikazati i analizirati dobijene rezultate u obliku dijagrama površine smrtonosne zone u zavisnosti do napadnog ugla, za dva različita visinska nivoa na bojištu, analizirati dobijene aproksimacione funkcije, istraživati ugaonu širinu snopova fragmenata, itd.

Interface za CAD modeliranje smrtonosne zone omogućava 2D i 3D vizualizaciju zone smrtonosnog dejstva, izračunavanje površine zone smrtonosnog dejstva za različite nivoe bojišta, te predviđanje zone smrtonosnog dejstva za različite padne uglove bojeve glave.

POGLAVLJE 5

ANALIZA ISTRAŽIVANJA

5.1 Plan eksperimentalnih istraživanja

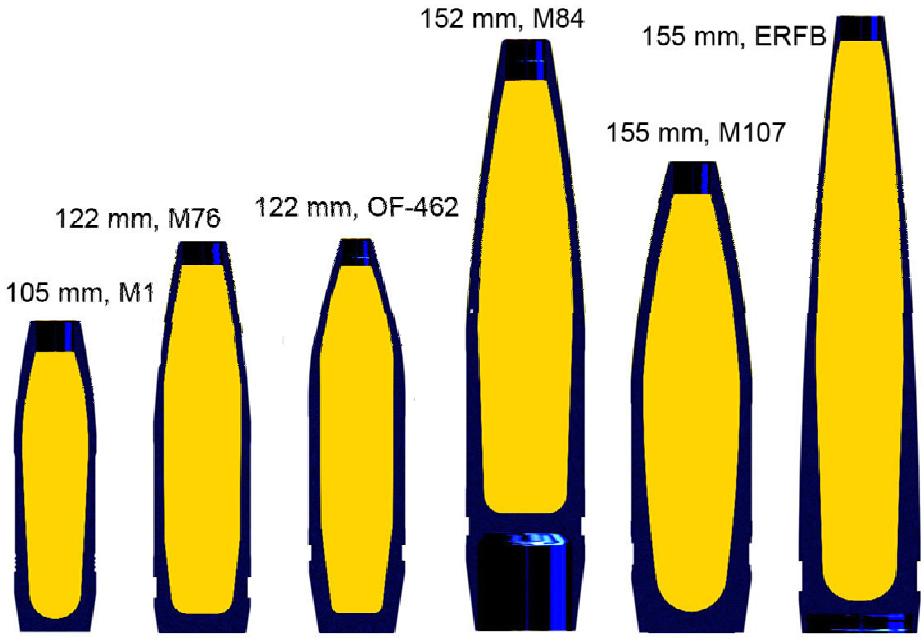
Eksperimentalna istraživanja fragmentacijom vršit će se sa tri osnovne grupe projektila:

- Artiljerijski projektili,
- Minobacački projektili, i
- Bojeve glave raketnih projektila.

5.1.1 Artiljerijski projektili

U grupi artiljerijskih projektila će se razmatrati efekti fragmentacije slijedećih tipova projektila (slika 5.1.1):

- Projektil 105mm M1,
- Projektil 122mm M76,
- Projektil 122mm OF-462,
- Projektil 152mm M84,
- Projektil 155mm M107, i
- Projektil 155mm ERFB.

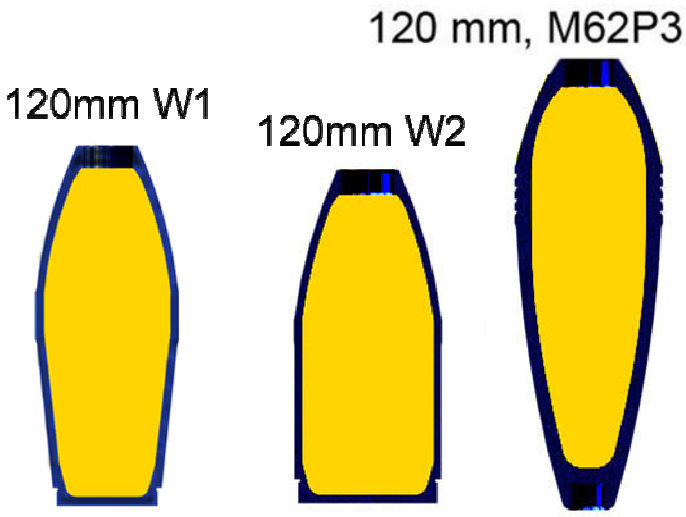


Slika5.1.1 Ispitivani artiljerijski projektili

5.1.2 Minobacački projektili

U grupi minobacačkih projektila razmatrat će se efekti fragmentacije slijedećih tipova projektila (slika 5.1.2):

- Projektil 120mm W1,
- Projektil 120mm W2, i
- Projektil 120mm M62P3,

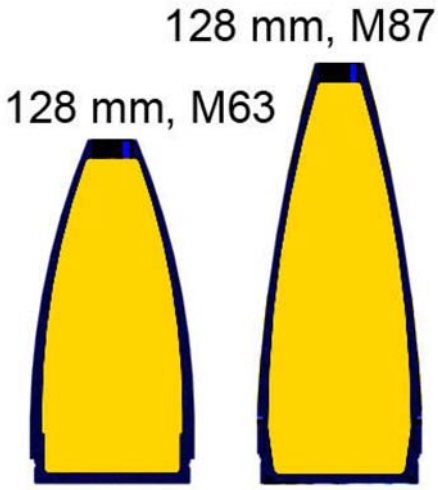


Slika 5.1.2 Ispitivani minobacački projektili

5.1.3 Bojeve glave raketnih projektila

U grupi raketnih projektila razmatrat će se efekti fragmentacije bojevih glava slijedećih projektila (slika 5.1.3):

- Projektil 128mm M63, i
- Projektil 128mm M87



Slika 5.1.3 Ispitivane bojeve glave raketnih projektila

Detaljni podaci o broju testiranih projektila, vrsti upaljača, masi komponenata bojevih glava, mehaničkim osobinama materijala košuljice (σ_m - zatezna čvrstoća i σ_v - granica razvlačenja, dobijeni u statičkim uslovima ispitivanja), odnosu mase eksplozivnog punjenja prema masi tijela bojeve glave - C_{eks}/M, i odnosu debljine tijela bojeve glave prema prečniku eksplozivnog punjenja - t/d dati su tabeli 5.1.

Tabela 5.1 Podaci o ispitivanim projektilima

Projektili		Upaljač	Podaci o masama				Broj ispitivanih projektila			Podaci o materijalu košuljice			Geometrija
			Masa košuljice (kg)	Masa eksploziva (kg)	Eksploziv	Četvrtkružna arena	Polukružna arena	Pit test	Materijal	σ_v	σ_m	C_{eks}/M	t/d
Artiljerijski projektili	105mm M1	AU 10	11,812	2,195	TNT	8^{I}	-	4	Č.9180VP	522-540	787-812	0,186	0,190
	122mm OF-462	RGM-2 350	17,757	3,552	TNT	4^{I}	6^{III}	4	Č.1737VP	441	731	0,200	0,185
	122mm M76	UTIU M72	16,58	4,432	Komp. B	4^{I}	6^{III}	4	Č.9180VP	523	760	0,263	0,149
	152mm M84	PD M557	34,988	7,175	TNT	12^{II}	-	-	Č.4135VP	874-966	973-1031	0,205	0,152
	152mm M84	PD M557	34,988	7,815	Komp. B	15^{II}	-	-	Č.4135VP	874-966	973-1031	0,223	0,152
	155mm M107	PD M51A5	34,862	6,576	TNT	4^{II}	-	-	AISI 1045	505	585	0,189	0,191
	155mm ERFB	M572	36,422	7,849	TNT	3^{II}	-	-	Č.4135VP	874-966	973-1031	0,215	0,172
Minobacački	120mm M62P3	UT M68P1	8,649	2,192	TNT	4^{I}	-	1	Č.1534VP	324	589	0,253	0,151
	120mm W1	UTU M65	5,284	2,591 2,822	TNT Komp. B	8^{I} (TNT) 12^{I} (Komp. B)	1 (TNT)	6 (TNT, Komp. B)	Č.4135VP Č.9180VP Č.1737VP	874-966 523-627 441-549	973-1031 760-861 731-837	0,490 0,534	0,0824
	120mm W2	UTU M65	5,064	2,699 2,940	TNT Komp. B	-	-	6 (TNT, Komp. B)	Č.4135VP Č.9180VP Č.1737VP	874-966 523-627 441-549	973-1031 760-861 731-837	0,533 0,581	0,0720
Raketni	128mm M63	UTI M63	5,984	2,421	TNT	4^{I}	2	1	Č.1737VP	441-549	731-837	0,405	0,093
	128mm M87	UTI M84	6,100	2,891	TNT	4^{I}	4	1	Č.1737VP	441-549	731-837	0,474	0,083
	128mm M87	UTI M84	6,100	3,149	Komp. B	4^{I}	4	4	Č.1737VP	441-549	731-837	0,516	0,083

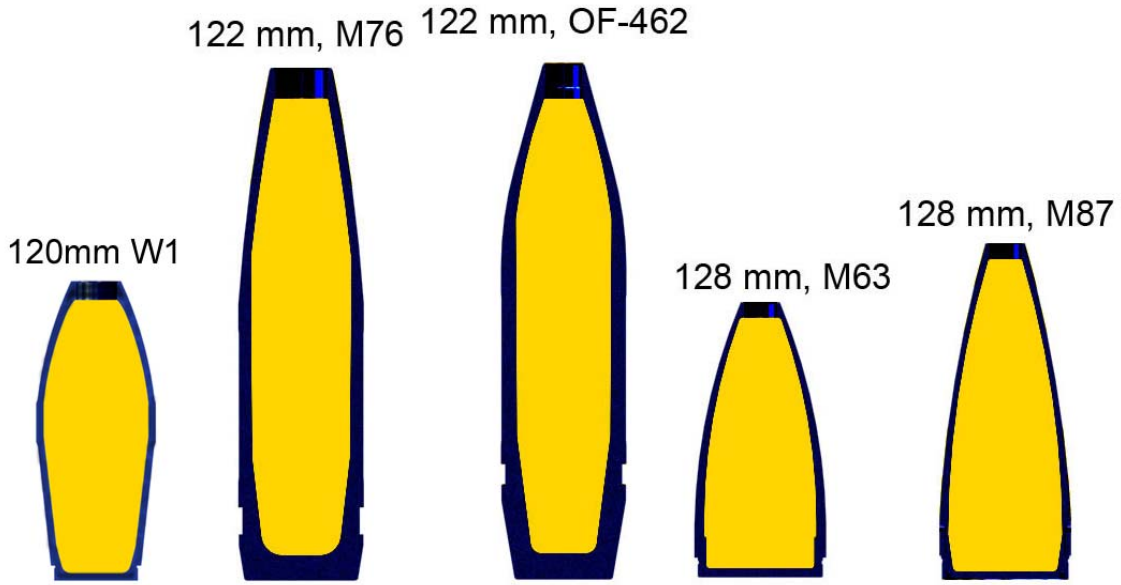
I - četvrtkružna arena sa radijusima: 10, 15, 20 i 30m
II - četvrtkružna arena sa radijusima: 15, 20, 30 i 40
III - dostupni podaci samo o broju proboja fragmenata

5.2 Eksperimentalna ispitivanja fragmentacije u polukružnoj areni

Eksperimentalna istraživanja u polukružnoj areni vršena su sa slijedećim projektilima, odnosno bojevim glavama (slika 5.2.1), datim u tabeli 5.2.1.

Tabela 5.2.1 Vrste i broj ispitivanih bojevih glava u polukružnoj areni

Minobacački projektili	**Artiljerijski projektili**	**Bojeve glave raketnog projektila**
120mm W1 (TNT) 1 opit	122mm OF-462 (TNT) - 6 opita 122mm M76 (Komp. B) - 6 opita	128mm M63 (TNT) - 2 opita 128mm M87 (TNT) - 4 opita 128mm M87 (Komp. B) - 4 opita



Slika 5.2.1 Bojeve glave testirane u polukružnoj areni

Tokom eksperimentalnih ispitivanja vršenih u polukružnoj areni, registrovan je broj proboja i zadora fragmenata kroz panele polukružnih sektora.

Rezultati testa fragmentacije u polukružnoj areni omogućit će određivanje koeficijenta efikasnosti, krive izogustina, 2D i 3D smrtonosne zone, te ukupnog broja fragmenata u prostoru.

U tabeli 5.2.2 navedeni su rezultati eksperimentalnih istraživanja fragmentacije (broj proboja, te broj proboja i zadora po panelima) datih bojevih glava u polukružnoj areni.

Tabela 5.2.2 Eksperimentalni podaci dobijeni fragmentacijom u polukružnoj areni

Bojeva glava	Panel	I sektor		II sektor		III sektor		IV sektor	
		Sr. broj proboja	Sr. broj proboja i zadora	Sr. broj proboja	Sr. broj proboja i zadora	Sr. broj proboja	Sr. broj proboja i zadora	Sr. broj proboja	Sr. broj proboja i zadora
120mm W1 (TNT)	1	0	0	0	0	0	0	0	0
	2	0	0	0	0	0	0	0	0
	3	4	4	0	3	0	0	1	0
	4	0	3	0	0	0	0	0	0
	5	2	6	0	0	0	0	0	0
	6	4	4	0	1	1	0	2	0
	7	2	4	3	0	4	3	0	1
	8	0	0	2	1	1	1	0	0

	9	6	0	2	2	1	2	0	1
	10	10	10	4	0	5	3	2	2
	11	8	8	9	0	7	3	4	2
	12	11	11	12	0	5	5	5	4
	13	10	17	16	3	16	5	3	4
	14	4	8	21	5	1	1	6	1
	15	5	5	5	4	0	4	2	2
	16	2	5	3	0	1	1	1	0
	17	1	8	1	0	0	1	0	0
	18	1	10	2	1	1	0	1	0
	19	7	11	2	0	2	6	0	4
	20	7	5	1	0	1	1	0	1
	21	6	8	6	5	3	4	2	2
	22	21	21	8	2	13	3	0	2
122mm OF-462 (TNT)	1	1.50	-	0.67	-	0.67	-	0.17	-
	2	1.33		0.50		0.33		0.17	
	3	0.17		0.67		0.00		0.17	
	4	0.17		0.00		0.17		0.00	
	5	0.17		0.17		0.33		0.00	
	6	1.50		1.00		0.50		0.83	
	7	3.17		2.67		0.67		1.67	
	8	2.17		2.50		0.83		0.83	
	9	1.67		2.83		0.83		0.67	
	10	9.67		7.33		5.00		3.00	
	11	11.67		7.00		3.67		4.33	
	12	30.00		31.33		14.83		11.83	
	13	23.67		19.00		10.33		7.50	
	14	4.17		1.17		1.33		1.33	
	15	3.33		3.17		1.67		1.17	
	16	2.17		0.67		1.00		0.33	
	17	2.33		1.00		1.33		0.67	
	18	2.50		2.67		0.33		1.00	
	19	4.00		2.17		0.50		0.33	
	20	0.50		0.67		0.00		0.00	
	21	1.83		1.83		0.67		1.83	
	22	7.00		5.50		4.83		6.67	
122mm M76 (Komp. B)	1	2.00	-	1.33	-	0.00	-	0.17	-
	2	0.50		0.67		0.00		0.17	
	3	0.50		0.33		0.33		0.17	
	4	1.00		0.33		0.17		0.67	
	5	1.00		1.00		0.00		0.50	
	6	1.17		1.50		0.67		0.67	
	7	2.67		2.17		1.17		0.50	
	8	6.83		4.67		3.00		2.83	
	9	2.83		3.83		0.83		1.50	
	10	16.83		17.50		6.67		6.50	
	11	28.17		28.17		8.17		8.00	
	12	60.67		76.83		28.17		26.83	
	13	32.50		23.67		12.67		9.33	
	14	10.33		6.33		4.00		4.17	
	15	7.00		6.50		2.00		2.50	
	16	5.50		2.50		1.67		1.83	
	17	4.17		3.50		1.67		1.33	
	18	4.67		2.67		0.50		0.67	
	19	0.83		0.17		0.17		0.00	
	20	3.17		3.83		2.33		2.50	
	21	9.33		7.67		5.33		1.83	
	22	22.33		20.33		12.67		10.17	
128mm M63 (TNT)	1	0.50	11.00	0.50	22.50	0.50	7.50	2.00	13.50
	2	0.00	5.00	0.00	9.00	0.00	4.50	0.50	4.50
	3	0.00	6.50	0.00	5.00	0.00	1.50	0.00	1.50
	4	0.50	12.50	0.50	9.50	0.00	1.50	0.00	2.00

	5	2.00	7.00	0.50	8.50	0.00	2.00	1.00	2.50
	6	0.50	3.50	0.00	6.50	0.00	1.00	1.00	1.50
	7	1.50	12.50	2.00	8.00	0.50	3.00	1.00	2.50
	8	4.00	25.50	3.50	11.50	1.50	6.00	0.50	1.50
	9	5.50	34.50	7.00	16.00	3.50	5.50	3.00	5.00
	10	13.50	29.00	12.00	29.00	3.00	9.00	5.00	13.00
	11	16.00	41.00	22.00	63.00	8.00	15.50	12.50	21.50
	12	15.50	39.50	7.00	31.00	4.00	15.00	3.00	9.50
	13	6.50	44.50	6.50	21.50	2.50	10.00	4.50	11.00
	14	5.50	31.00	1.50	12.00	1.00	5.00	1.50	5.00
	15	2.00	20.50	0.50	9.00	1.00	3.50	1.50	4.50
	16	2.00	22.00	1.00	6.50	0.00	3.50	1.00	3.50
	17	0.50	13.00	0.00	7.50	0.50	4.00	0.00	2.50
	18	1.00	13.00	0.50	14.00	0.00	1.50	0.50	4.50
	19	2.00	24.00	3.00	33.50	0.50	3.50	1.50	10.00
	20	3.50	62.00	8.50	63.50	3.00	12.00	0.50	18.00
	21	15.50	197.00	13.50	172.00	6.50	39.50	4.00	26.00
	22	25.50	408.50	19.00	240.50	7.50	75.00	6.00	49.00
128mm M87 (TNT)	1	3.00	10.00	0.75	10.50	1.00	4.25	1.75	5.25
	2	0.00	9.25	0.00	17.75	0.25	1.75	1.75	3.00
	3	0.25	6.50	0.25	12.50	0.00	1.00	0.75	1.50
	4	0.25	7.25	0.25	13.25	0.25	1.75	1.25	2.25
	5	1.00	7.50	0.25	5.75	0.50	1.50	0.50	2.50
	6	1.00	6.25	3.00	12.50	0.25	0.75	0.25	1.00
	7	2.50	9.50	1.50	11.00	0.25	1.75	2.00	2.50
	8	3.00	22.50	2.00	18.25	0.75	2.50	0.50	3.75
	9	8.25	38.00	4.75	26.75	2.25	4.75	2.00	5.50
	10	11.25	43.75	12.00	57.00	5.75	9.50	5.00	13.00
	11	28.25	74.50	22.25	97.50	12.00	18.00	10.25	19.50
	12	23.25	78.00	30.50	119.25	9.00	18.25	11.00	22.25
	13	18.75	42.75	9.00	52.75	6.50	15.75	4.75	11.00
	14	7.25	38.00	13.25	47.00	2.50	7.75	3.25	10.25
	15	4.00	28.00	3.75	24.25	3.00	6.50	3.50	7.25
	16	1.50	19.50	2.50	25.75	0.75	2.25	1.50	3.25
	17	0.75	7.50	0.25	33.00	0.50	1.25	2.00	2.25
	18	1.75	10.25	1.00	22.75	0.25	1.50	0.25	1.75
	19	0.75	30.00	0.75	45.50	0.75	5.75	2.50	4.25
	20	5.00	96.00	5.75	82.00	1.25	18.50	2.25	11.00
	21	11.75	202.50	12.75	149.25	5.75	45.00	4.50	30.00
	22	56.00	508.00	59.50	391.00	39.50	180.00	21.75	123.50
128mm M87 (Komp. B)	1	3.00	44.75	1.25	1.25	0.25	10.50	0.75	7.25
	2	0.00	10.00	0.50	0.50	0.00	3.25	0.00	6.75
	3	0.25	10.00	0.75	0.75	0.00	2.00	0.00	3.25
	4	0.50	8.25	0.50	0.50	0.25	2.50	0.00	4.00
	5	1.25	7.25	0.75	0.75	0.00	1.50	0.00	2.50
	6	1.00	9.75	3.00	3.00	0.00	2.75	0.25	1.50
	7	3.25	25.50	3.25	3.25	0.50	5.25	2.00	4.25
	8	3.00	17.25	3.25	3.25	1.50	4.50	0.75	4.00
	9	8.00	38.25	5.25	5.25	2.00	7.25	0.75	5.75
	10	17.25	56.25	18.50	18.50	6.00	12.50	4.50	12.00
	11	34.00	99.75	36.50	36.50	12.50	31.00	12.50	26.25
	12	38.75	97.25	34.75	34.75	16.25	35.75	12.50	29.75
	13	26.00	58.25	22.00	22.00	9.75	19.00	5.25	15.25
	14	7.50	41.25	4.50	4.50	2.00	11.50	1.50	9.25
	15	7.00	30.00	6.00	6.00	1.75	8.50	1.50	5.50
	16	3.50	31.00	3.00	3.00	0.75	9.00	1.25	4.00
	17	2.00	18.50	1.00	1.00	0.25	6.00	0.25	3.75
	18	0.75	28.00	0.75	0.75	0.50	4.00	0.00	4.50
	19	1.25	56.25	3.00	3.00	0.00	6.00	0.25	9.50
	20	4.75	139.25	5.25	5.25	0.50	24.00	0.75	25.75
	21	22.25	333.00	17.25	17.25	7.00	71.25	4.50	58.50
	22	145.50	1136.50	96.75	96.75	42.25	238.25	38.50	213.25

Dobijeni eksperimentalni podaci, prikazani u tabeli 5.2.2, predstavljaju input u proračunu koeficijenta efikasnosti, krivih izogustina, 2D i 3D smrtonosne zone, te ukupnog broja fragmenata u prostoru.

5.2.1 Predviđanje koeficijenta efikasnosti

Za predviđanje koeficijenta efikasnosti A_L koristi se modul za određivanje vjerovatnoće onesposobljavanja. Kao ulazni podaci za proračun koeficijenta efikasnosti koriste se podaci dobijeni eksperimentalnim ispitivanjima u polukružnoj areni (tabela 5.2.2).

U tabeli 5.2.1.1 prikazani su rezultati dobijene vrijednosti radijusa R_B na kojem je vjerovatnoća onesposobljavanja vojnika na bojištu jednaka 1, za različite tipove i mase eksplozivnog punjenja u bojevoj glavi.

Tabela 5.2.1.1 Parametri korišteni u analizi radijusa R_B

Bojeva glava	Tip eksploziva	Masa eksploziva (kg)	Relativna snaga eksploziva	Ekvivalentna masa eksploziva (kg)	R_B (m)
120mm W1	TNT	2,702	1	2,702	3,6173
122mm M76	Komp. B	4,432	1,75	7,756	5,1466
122mm OF-462	TNT	3,562	1	3,562	3,9707
128mm M63	TNT	2,30	1	2,30	3,4320
128mm M87	TNT	2,912	1	2,912	3,7128
128mm M87	Komp. B	3,145	1,75	5,504	4,5905

Za predviđanje vjerovatnoće onesposobljavanja dejstvom fragmenata, sa ciljem definisanja ukupne vjerovatnoće onesposobljavanja, a na osnovu ulaznih podataka dobijenih ispitivanjima u polukružnoj areni (tabela 5.2.1), određena je srednja gustina fragmenata po polarnim zonama oko bojeve glave. Vrijednosti geometrijskih paramatera polukružne arene (broj panela, radijusi sektora, širine, visine i površine panela) navedeni su u tabeli 5.2.1.2.

Tabela 5.2.1.2 Vrijednosti geometrijskih parametera polukružne arene
(Mjerodavne vrijednosti izložene površine segmenata na trećem i četvrtom sektoru - visina 2m)*

Arena	Broj panela	Radijusi sektora (m)	Širina panela arene - a_{spi} (m)	visina panela arene - h_{spi} (m)	Površina panela arene - S_{spi} (m)
Polukružna	22	10	1,5	2	3
		14	2	2	4
		17,5	2,5	4	5*
		21	3	4	6*

Poznavanjem vrijednosti broja proboja efikasnih fragmenata i površine panela arene u kojoj je izvršeno eksperimentalno ispitivanje, određena je srednja gustina efikasnih fragmenata za svaku polarnu zonu, u svakom sektoru arene.

U tabeli 5.2.1.3 predstavljene su vrijednosti srednje gustine efikasnih fragmenata za svaki segment (polarnu zonu) arene, za ispitivane bojeve glave.

Tabela 5.2.1.3 Vrijednosti srednje gustine efikasnih fragmenata za svaku polarnu zonu arene

Bojeva glava	Panel	Srednja gustina efikasnih fragmenata I sektor	Srednja gustina efikasnih fragmenata II sektor	Srednja gustina efikasnih fragmenata III sektor	Srednja gustina efikasnih fragmenata IV sektor
120mm W1 (TNT)	1	0.00	0.00	0.00	0.00
	2	0.00	0.00	0.00	0.00
	3	1.33	0.00	0.00	0.17
	4	0.00	0.00	0.00	0.00
	5	0.67	0.00	0.00	0.00

	6	1.33	0.00	0.20	0.33
	7	0.67	0.75	0.80	0.00
	8	0.00	0.50	0.20	0.00
	9	2.00	0.50	0.20	0.00
	10	3.33	1.00	1.00	0.33
	11	2.67	2.25	1.40	0.67
	12	3.67	3.00	1.00	0.83
	13	3.33	4.00	3.20	0.50
	14	1.33	5.25	0.20	1.00
	15	1.67	1.25	0.00	0.33
	16	0.67	0.75	0.20	0.17
	17	0.33	0.25	0.00	0.00
	18	0.33	0.50	0.20	0.17
	19	2.33	0.50	0.40	0.00
	20	2.33	0.25	0.20	0.00
	21	2.00	1.50	0.60	0.33
	22	7.00	2.00	2.60	0.00
122mm OF-462 (TNT)	1	0.50	0.17	0.13	0.03
	2	0.44	0.13	0.07	0.03
	3	0.06	0.17	0.00	0.03
	4	0.06	0.00	0.03	0.00
	5	0.06	0.04	0.07	0.00
	6	0.50	0.25	0.10	0.14
	7	1.06	0.67	0.13	0.28
	8	0.72	0.63	0.17	0.14
	9	0.56	0.71	0.17	0.11
	10	3.22	1.83	1.00	0.50
	11	3.89	1.75	0.73	0.72
	12	10.00	7.84	2.97	1.97
	13	7.89	4.75	2.07	1.25
	14	1.39	0.29	0.27	0.22
	15	1.11	0.79	0.33	0.19
	16	0.72	0.17	0.20	0.06
	17	0.78	0.25	0.27	0.11
	18	0.83	0.67	0.07	0.17
	19	1.33	0.54	0.10	0.06
	20	0.17	0.17	0.00	0.00
	21	0.61	0.46	0.13	0.31
	22	1.33	1.38	0.97	1.11
122mm M76 (Komp. B)	1	0.67	0.33	0.00	0.03
	2	0.17	0.17	0.00	0.03
	3	0.17	0.08	0.07	0.03
	4	0.33	0.08	0.03	0.11
	5	0.33	0.25	0.00	0.08
	6	0.39	0.38	0.13	0.11
	7	0.89	0.54	0.23	0.08
	8	2.28	1.17	0.60	0.47
	9	0.94	0.96	0.17	0.25
	10	5.61	4.38	1.33	1.08
	11	9.39	7.04	1.63	1.33
	12	20.23	19.22	5.64	4.47
	13	10.84	5.92	2.53	1.56
	14	3.45	1.58	0.80	0.69
	15	2.33	1.63	0.40	0.42
	16	1.83	0.63	0.33	0.31
	17	1.39	0.88	0.33	0.22
	18	1.56	0.67	0.10	0.11
	19	0.28	0.04	0.03	0.00
	20	1.06	0.96	0.47	0.42
	21	3.11	1.92	1.07	0.31
	22	10.67	5.09	2.53	1.70
128mm M63	1	0.17	0.13	0.10	0.33

(TNT)	2	0.00	0.00	0.00	0.08
	3	0.00	0.00	0.00	0.00
	4	0.17	0.13	0.00	0.00
	5	0.67	0.13	0.00	0.17
	6	0.17	0.00	0.00	0.17
	7	0.50	0.50	0.10	0.17
	8	1.33	0.88	0.30	0.08
	9	1.83	1.75	0.70	0.50
	10	4.50	3.00	0.60	0.83
	11	5.34	5.50	1.60	2.08
	12	5.17	1.75	0.80	0.50
	13	2.17	1.63	0.50	0.75
	14	1.83	0.38	0.20	0.25
	15	0.67	0.13	0.20	0.25
	16	0.67	0.25	0.00	0.17
	17	0.17	0.00	0.10	0.00
	18	0.33	0.13	0.00	0.08
	19	0.67	0.75	0.10	0.25
	20	1.17	2.13	0.60	0.08
	21	5.17	3.38	1.30	0.67
	22	8.50	4.75	1.50	1.00
128mm M87 (TNT)	1	1.00	0.19	0.20	0.29
	2	0.00	0.00	0.05	0.29
	3	0.08	0.06	0.00	0.13
	4	0.08	0.06	0.05	0.21
	5	0.33	0.06	0.10	0.08
	6	0.33	0.75	0.05	0.04
	7	0.83	0.38	0.05	0.33
	8	1.00	0.50	0.15	0.08
	9	2.75	1.19	0.45	0.33
	10	3.75	3.00	1.15	0.83
	11	9.42	5.56	2.40	1.71
	12	7.75	7.63	1.80	1.83
	13	6.25	2.25	1.30	0.79
	14	2.42	3.31	0.50	0.54
	15	1.33	0.94	0.60	0.58
	16	0.50	0.63	0.15	0.25
	17	0.25	0.06	0.10	0.33
	18	0.58	0.25	0.05	0.04
	19	0.25	0.19	0.15	0.42
	20	1.67	1.44	0.25	0.38
	21	3.92	3.19	1.15	0.75
	22	18.67	14.88	7.90	3.63
128mm M87 (Komp. B)	1	1.00	0.31	0.05	0.13
	2	0.00	0.13	0.00	0.00
	3	0.08	0.19	0.00	0.00
	4	0.17	0.13	0.05	0.00
	5	0.42	0.19	0.00	0.00
	6	0.33	0.75	0.00	0.04
	7	1.08	0.81	0.10	0.33
	8	1.00	0.81	0.30	0.13
	9	2.67	1.31	0.40	0.13
	10	5.75	4.63	1.20	0.75
	11	11.34	9.13	2.50	2.08
	12	12.92	8.69	3.25	2.08
	13	8.67	5.50	1.95	0.88
	14	2.50	1.13	0.40	0.25
	15	2.33	1.50	0.35	0.25
	16	1.17	0.75	0.15	0.21
	17	0.67	0.25	0.05	0.04
	18	0.25	0.19	0.10	0.00
	19	0.42	0.75	0.00	0.04

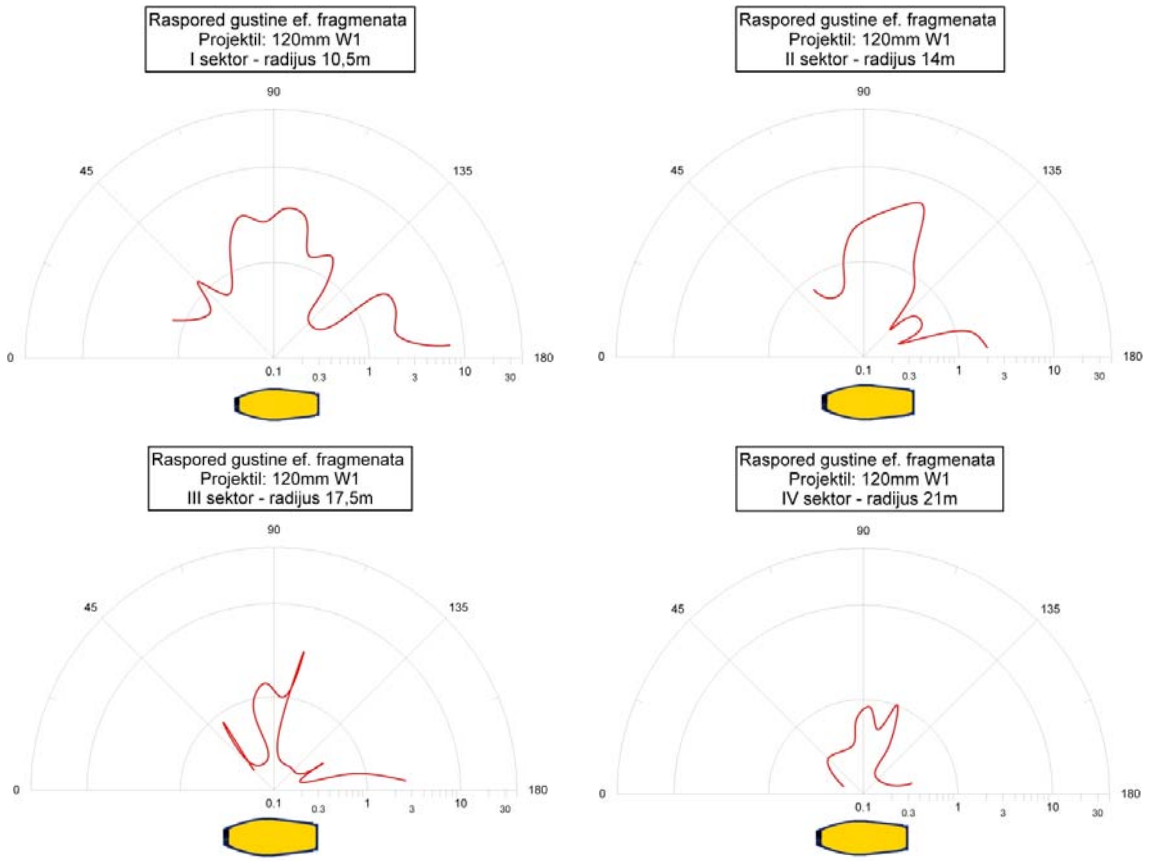
	20	1.58	1.31	0.10	0.13
	21	7.42	4.31	1.40	0.75
	22	48.52	24.20	8.45	6.42

Izračunate vrijednosti gustine efikasnih fragmenata za svaku polarnu zonu grafički su prikazane u polarnom dijagramu, koji je funkcija polarnog ugla i srednje gustine efikasnih fragmenata.

U polarnom dijagramu radijus vektora predstavlja gustina efikasnih fragmenata u zavisnosti od polarnog ugla. Niz od 22 tačke, koje predstavljaju vrh radijus vektora (gustine efikasnih fragmenata) interpolirane su spline funkcijom, korištenjem softverskog paketa Grapher©. Grapher© je napredni tehnički softverski paket koji se koristi pri grafičkoj analizi podataka [75].

Ose polarnog koordinatnog sistema predstavljene su u logaritamskoj skali. Postupak je ponovljen za sva četiri polukružna sektora arene.

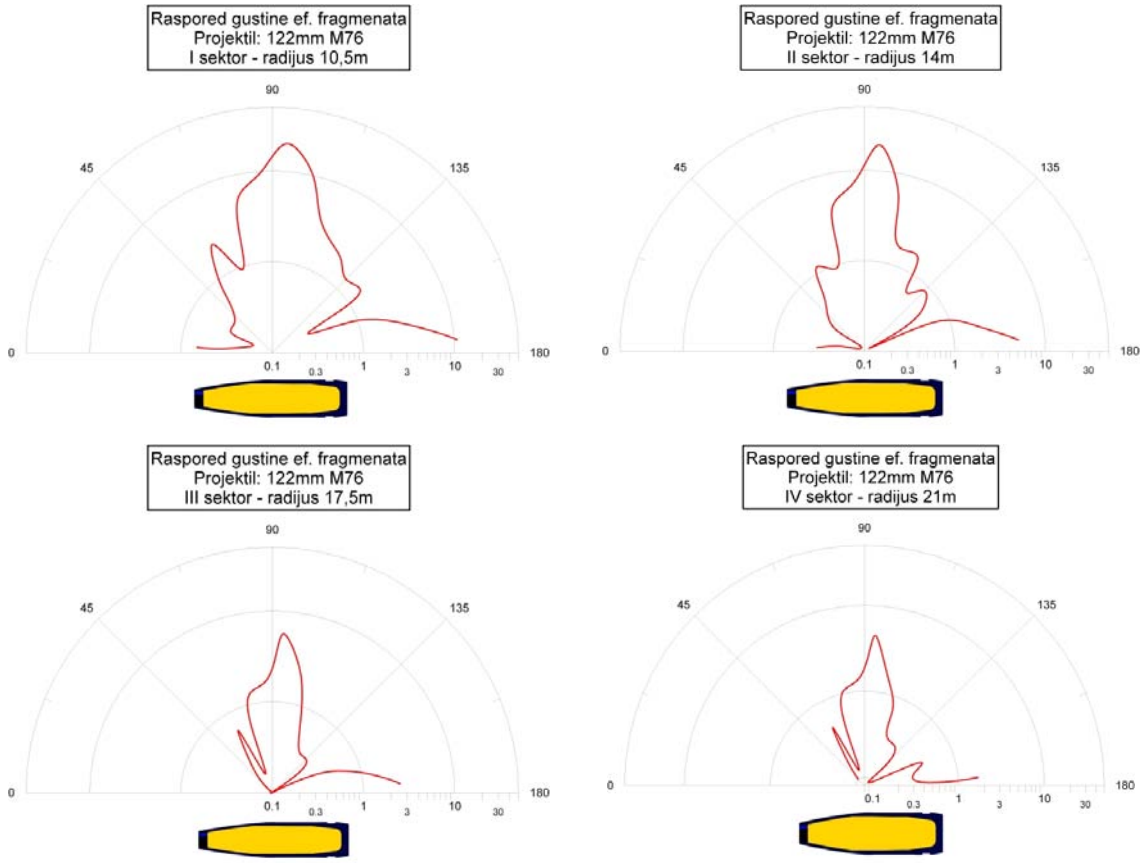
Na slici 5.2.1.1 predstavljeni su polarni dijagrami gustine efikasnih fragmenata za bojevu glavu 120mm W1, napravljeni u softveru Grapher©.



Slika 5.2.2.1 Polarni dijagrami gustine efikasnih fragmenata za bojevu glavu 120mm W1 (TNT)

Sa slike 5.2.1.1 može se zaključiti da se gustina efikasnih fragmenata generalno smanjuje sa povećanjem udaljenosti od centra detonacije. Krive gustine efikasnih fragmenata imaju stohastičan oblik, sa naglašenim bočnim snopom efikasnih fragmenata. Na udaljenosti od 10,5m od tačke detonacije gustina efikasnih fragmenata za bojevu glavu 120mm W1 ima veoma širok snop bočnih fragmenata sa maksimalnom gustinom efikasnih fragmenata od oko 5 frag/m^2 za polarni ugao od približno 100°.

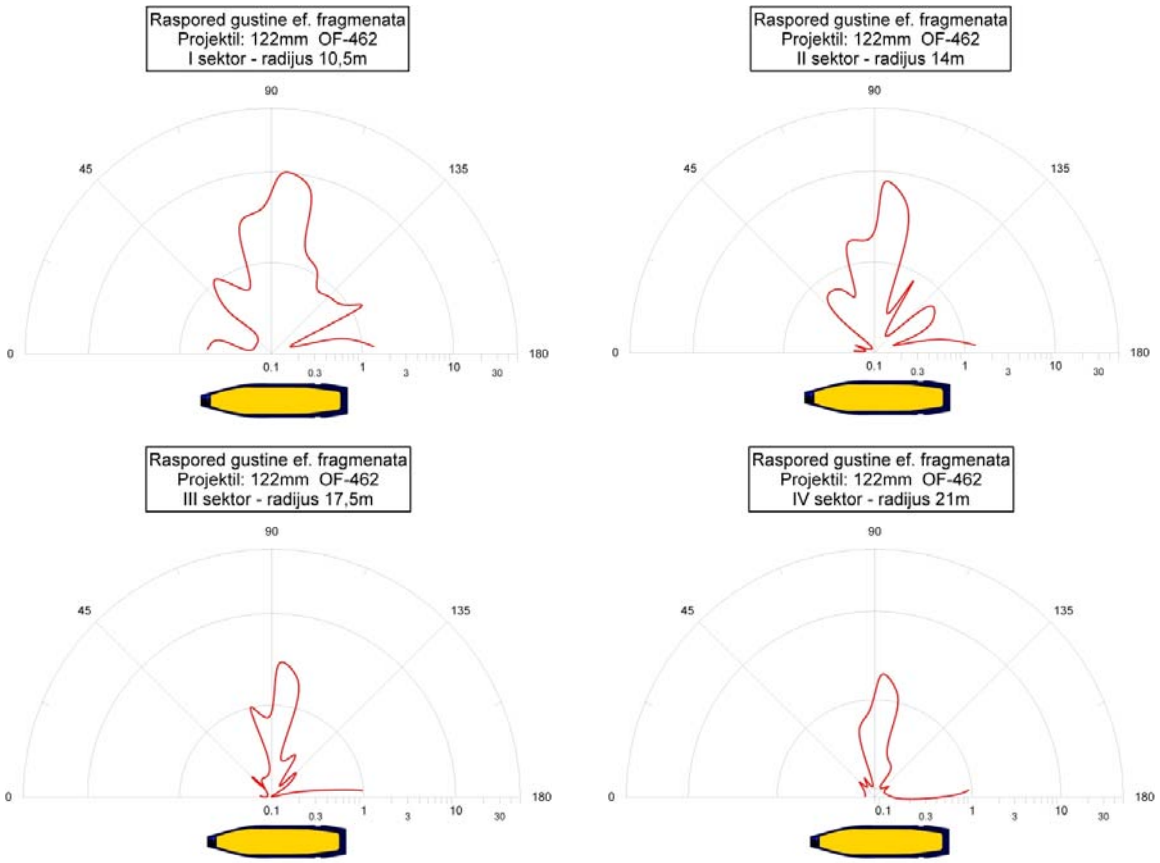
Kako se udaljenosti povećavaju (14m, 17.5m, i 21m) karakteristični snopovi fragmenata (prednji, bočni i zadnji) postaju sve uži, tako da maksimalna gustina efikasnih fragmenata za udaljenost od 21m od centra detonacije iznosi 1 frag/m^2, i to za polarni ugao od oko 110°.



Slika 5.2.1.2 Polarni grafikoni gustine efikasnih fragmenata za 122mm M76 (Komp. B)

Na slici 5.2.1.2 prikazani su polarni dijagrami gustine efikasnih fragmenata za bojevu glavu 122mm M76, napunjenu kompozicijom B. Ovi dijagrami ukazuju na to da bojeva glava 122mm M76 ima znatno veću gustinu efikasnih fragmenata u odnosu na bojevu glavu 120mm W1. Tako maksimalna gustina efikasnih fragmenata za bojevu glavu 122mm M76 na udaljenosti 10,5m od tačke eksplozije iznosi oko 20 frag/m^2, i to za polarni ugao od približno 100°. Prednji snop fragmenata veoma je mali za ovaj tip bojeve glave, skoro da i ne postoji.

Idući od centra detonacije, gustina efikasnih fragmenata se smanjuje, pa za radijus od 21m ona iznosi maksimalnih 5 frag/m^2, za ugao od oko 90°. Bojeva glava 122mm M76 ima najveću maksimalnu gustinu efikasnih fragmenata (oko 20 frag/m^2 za radijus 10,5m) od svih ispitanih bojevih glava (u polukružnoj areni). To je posljedica korištenja brizantnijeg eksploziva (komp. B), optimizovanog dizajna bojeve glave, veće količine eksploziva u košuljici, povoljnih odnosa C_{eksp}/M i t/d, itd.



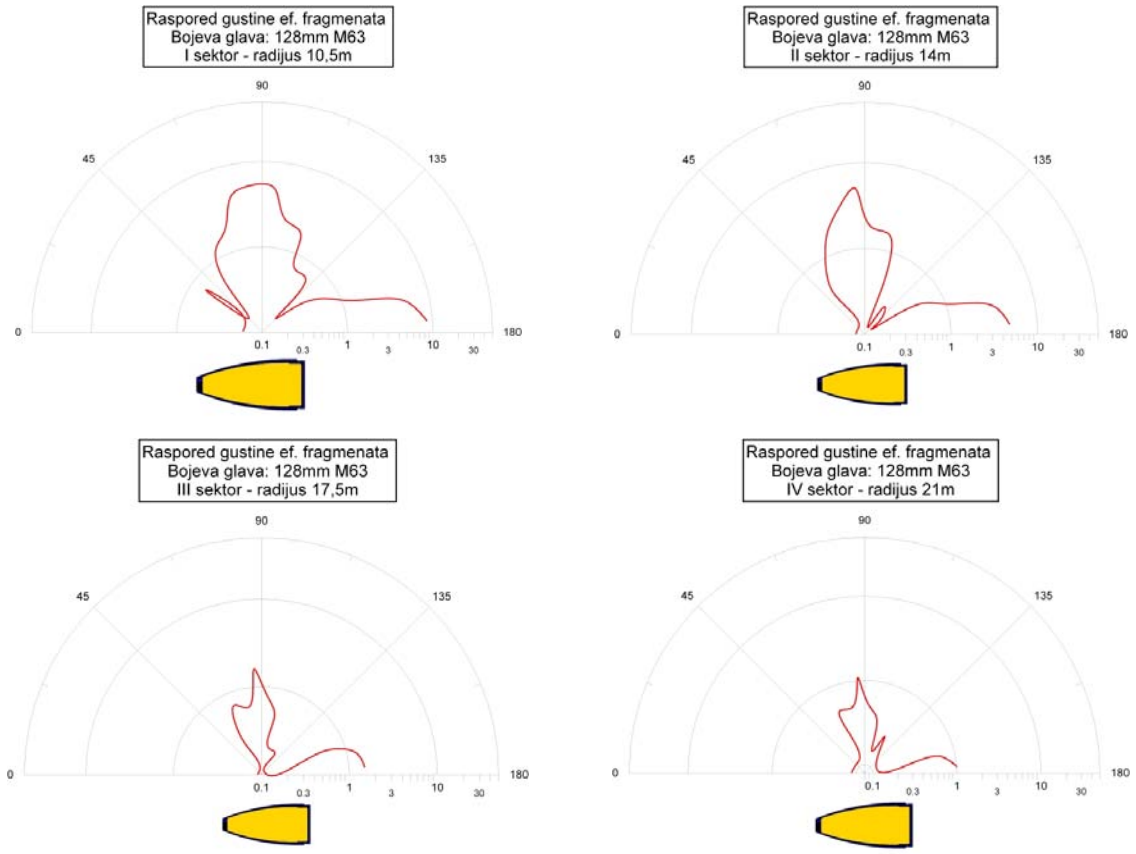
Slika 5.2.1.3 Polarni grafikoni gustine efikasnih fragmenata za 122mm OF-462 (TNT)

Na slici 5.2.1.3 prikazana su četiri polarna dijagrama gustine efikasnih fragmenata za bojevu glavu 122mm OF-462, sa eksplozivom TNT. Slika 5.2.1.3 pokazuje da dominantan snop fragmenata kod bojeve glave 122mm OF-462 predstavlja bočni snop fragmenata. On je uži nego kod bojeve glave istog kalibra 122mm M76, a i maksimalna gustina efikasnih fragmenata je manja. Tako je za radijus od 10,5m kod bojeve glave 122mm OF-462 maksimalna gustina efikasnih fragmenata oko 10 frag/m^2 (100% manja nego kod 122mm M76), za ugao od oko 95°, a za radijus od 21m ona iznosi oko 3 frag/m^2 za praktično isti polarni ugao (95°).

Manja gustina efikasnih fragmenata, uži bočni snop fragmenata, te skoro nepostojanje prednjeg i zadnjeg snopa fragmenata kod bojeve glave 122mm OF-462 u odnosu na 122mm M76, posljedica su eksplozivnog punjenja sa slabijim detonacionim parametrima (TNT), manje količine eksploziva u tijelu bojeve glave, te nešto većeg odnosa *t/d*, manje vitkosti oživala, itd.

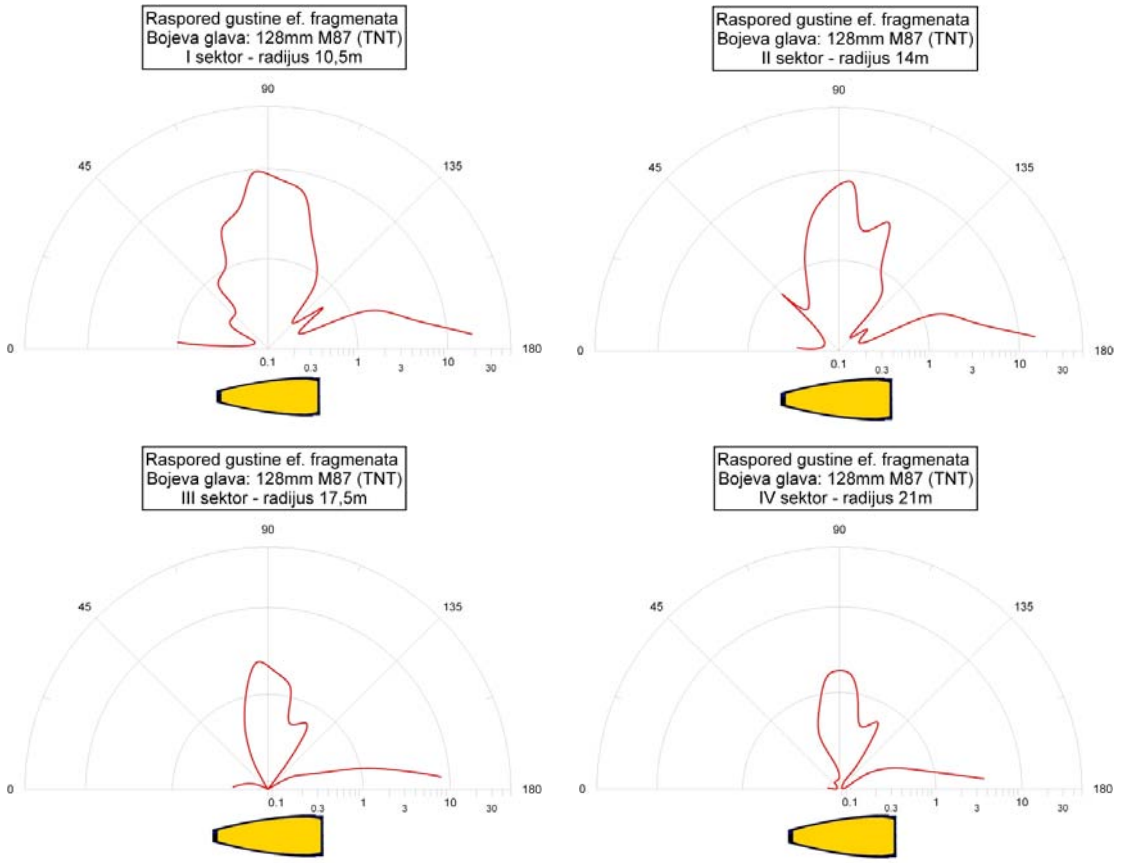
Na slici 5.2.1.4 prikazani su polarni dijagrami gustine efikasnih fragmenata za bojevu glavu raketnog projektila 128mm M63, napunjenu TNT-om. Za ovu bojevu glavu karakterističan je, osim naglašenog bočnog snopa fragmenata, izraženi zadnji snop fragmenata sa maksimalnom gustinom efikasnih fragmenata sličnoj onom kao kod bočnog snopa fragmenata.

Bojeva glava 128mm M63 ima tanku stijenku tijela bojeve glave (odnos t/d = 0,078), pa je prisutno dosta fragmenata manje mase koji nisu efikasni. Tako na udaljenosti od 10,5m maksimalna gustina fragmenata iznosi oko 6 frag/m^2, što je značajno manja gustina ef. fragmenata nego kod, napr., artiljerijskog projektila 122mm M76.



Slika 5.2.1.4 Polarni grafikoni gustine efikasnih fragmenata za 128mmm M63 (TNT)

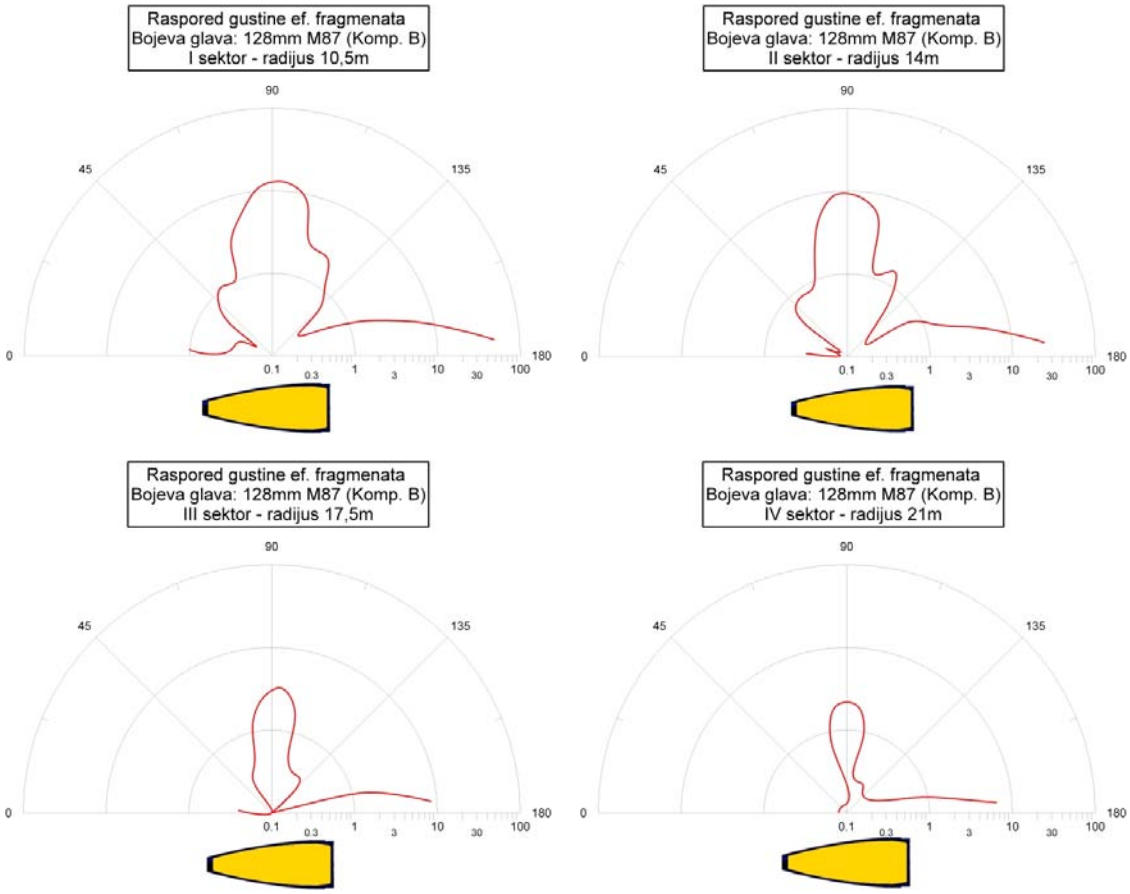
Na slici 5.2.1.5 predstavljeni su dijagrami gustine efikasnih fragmenata za bojevu glavu raketnog projektila 128mm M87, koja sadrži eksploziv TNT.



Slika 5.2.1.5 Polarni grafikoni gustine efikasnih fragmenata za BG 128mm M87 (TNT)

Bojeva glava 128mm M87 sa TNT-om ima širi bočni snop efikasnih fragmenata nego bojeva glava 128mm M63. Takođe, maksimalna gustina efikasnih fragmenata je veća, i iznosi 10 frag/m^2 za radijus 10,5m, te 3 frag/m^2 (za ugao od oko 90°) na udaljenosti 21m od centra detonacije.

Bolje perfomanse ove bojeve glave u odnosu na 128mm M63 postignute su nešto manjim odnosom *t/d* (optimizovan dizajn tijela bojeve glave), te većim odnosom C_{eks}/M (veća količina eksploziva). Bojeva glava 128mm M87 ima i naglašen zadnji snop fragmenata sa maksimalnom gustinom efikasnih fragmenata od oko 20 frag/m^2.



Slika 5.2.1.6 Polarni grafikoni gustine efikasnih fragmenata za BG 128mm M87 (Komp. B)

Na slici 5.2.1.6 predstavljeni su polarni dijagrami gustine efikasnih fragmenata za bojevu glavu 128mm M87 (Kompozicija B). Slika 5.2.1.6 pokazuje da se korištenjem eksploziva sa većom gustinom i detonacionom brzinom (komp. B) u ondosu na TNT može povećati gustina efikasnih fragmenata. Naročito je interesantan zadnji snop fragmenata sa maksimalnom gustinom efikasnih fragmenata od oko 45 frag/m^2 za polarni ugao od 170° u odnosu na vrh bojeve glave.

Također, za udaljenost 21m od centra eksplozije, maksimalna gustina efikasnih fragmenata za isti polarni ugao iznosi oko 8 frag/m^2. Povećana je i gustina fragmenata u bočnom snopu, pa maksimalna gustina efikasnih fragmenata za dati snop (polarni ugao od 90°) i radijus od 10,5m iznosi oko 15 frag/m^2, a za radijus 21m od centra detonacije ona iznosi oko 3 frag/m^2.

Na osnovu poznatih vrijednosti radijusa (udaljenosti od centra detonacije bojeve glave) na kojem je vjerovatnoća onesposobljavanja vojnika na bojištu jednaka 1 (R_B), srednje gustine efikasnih fragmenata (d_{spi}), i izložene površine vojnika na terenu (A_t), određene su vrijednosti ukupne vjerovatnoće onesposobljavanja vojnika na terenu.

Razvijena je programska skripta u MatLab©-u kojom se predviđa ukupna vjerovatnoća onesposobljavanja vojnika na terenu i kreira 3D grafikon vjerovatnoće onesposobljavanja.

Ulazne podatke za ovaj program predstavljaju koordinate tačaka koje odgovaraju položaju centara segmenata/panela svakog sektora u Areni - X_i i Y_i, te odgovarajuće vrijednosti dobijene ukupne vjerovatnoće onesposobljavanja - $P(x,y)$.

Na slikama 5.2.1.7 - 5.2.1.12 prikazani su dobijeni trodimenzionalni grafikoni vjerovatnoće onesposobljavanja za ispitivane bojeve glave.

Svaka slika sadrži po tri grafikona vjerovatnoće onesposobljavanja, i to za različite borbene položaje vojnika (stojeći, jurišni i ležeći), pri čemu je različita izložena površina vojnika A_t na terenu ($0.5m^2$, $0.37m^2$ i $0.1m^2$).

Izvršena analiza odnosi se na detonaciju na tlu i nulti napadni ugao bojeve glave, jer se izračunata srednja gustina efikasnih fragmenata bazira na eksperimentalnim ispitivanjima statičke fragmentacije bojevih glava u polukružnoj areni.

Na datim dijagramima, projektil se nalazi u tački (0,0) i okrenut je vrhom prema negativnoj strani X-ose. Trodimenzionalni grafikoni vjerovatnoće onesposobljavanja dati su u istoj razmjeri, gdje X i Y osa ograničavaju ravan terena, a Z osa predstavlja ukupnu (totalnu) vjerovatnoću onesposobljavanja vojnika na bojištu i ima raspon vrijednosti od 0 do 1.

Dimenzije X i Y koordinatnih osa date su u metrima.

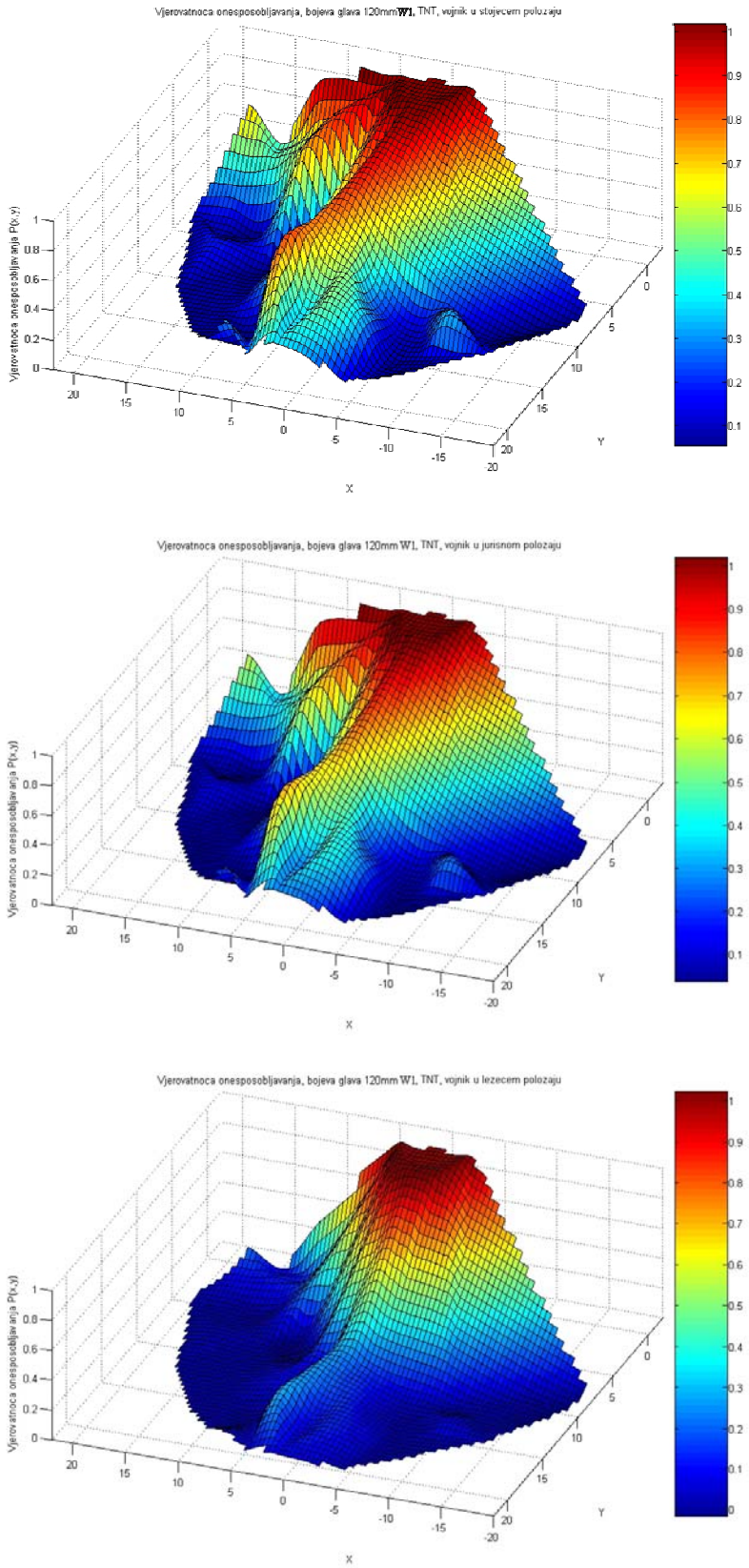
Sa slike 5.2.1.7 može se zaključiti da vjerovatnoća onesposobljavanja opada sa smanjenjem izložene površine vojnika A_t na terenu, za iste uslove pada bojeve glave i visine detonacije.

Vjerovatnoća onesposobljavanja jednaka je jedinici do udaljenosti R_B na kojoj je vjerovatnoća onesposobljavanja uslijed rušećeg efekta jednaka jedan. Iza tog rastojanja, funkcija vjerovatnoće onesposobljavanja ima opadajući karakter, a zavisi prvenstveno od gustine efikasnih fragmenata i izložene površine vojnika na terenu.

Za bojevu glavu 120mm W1 (slika 5.2.1.7) postoji veća vjerovatnoća onesposobljavanja od djelovanja fragmenata iz bočnog snopa, što proizilazi iz veće gustine efikasnih fragmenata u tom polarnom segmentu prostora oko bojeve glave.

Dijagrami sa slike 5.2.1.7 pokazuju da za manje vrijednosti izložene površine vojnika funkcija vjerovatnoće onesposobljavanja ima uniformniji oblik, bez posebno naglašenih segmenata (napr. u bočnom pravcu). To znači da je vjerovatnoća onesposobljavanja vojnika koji se nalazi u ležećem položaju na bojištu jednaka u svim pravcima oko bojeve glave, na definisanim razdaljinama.

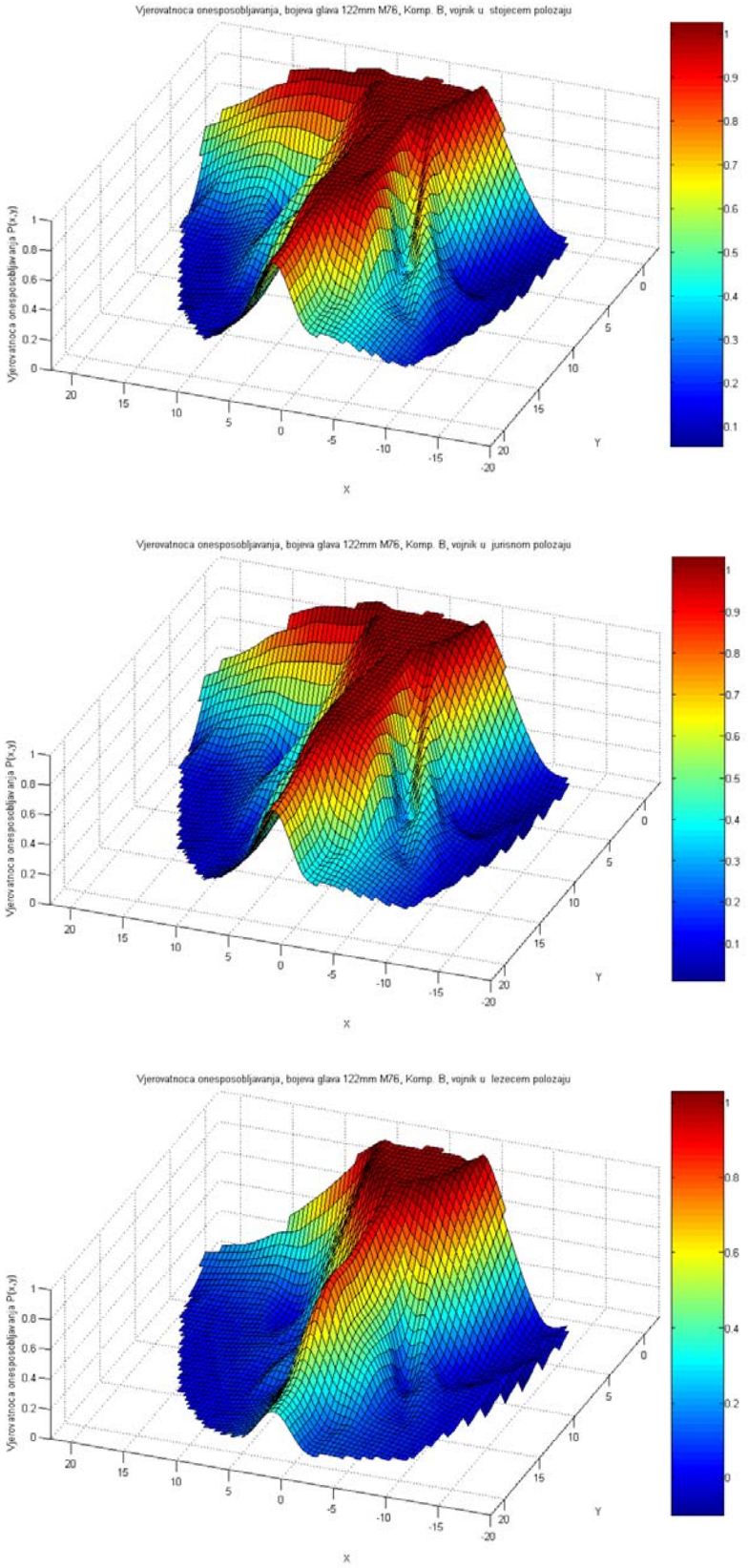
To se ne odnosi na površine vojnika u jurišnom ili stojećem stavu. Tada se može desiti da vojnik koji stoji ispred detonirajuće bojeve glave na par metara od bojeve glave ne bude pogođen niti jednim efikasnim fragmentom, a drugi vojnik koji stoji na većoj udaljenosti - bočno od bojeve glave, prema rasporedu vjerovatnoća, može biti onesposobljen, tj. pogođen bar jednim efikasnim fragmentom.



Slika 5.2.1.7 Vjerovatnoća onesposobljavanja vojnika dejstvom bojeve glave 120mm W1, TNT, za tri izložene površine vojnika (stojeća, jurišna i ležeća)

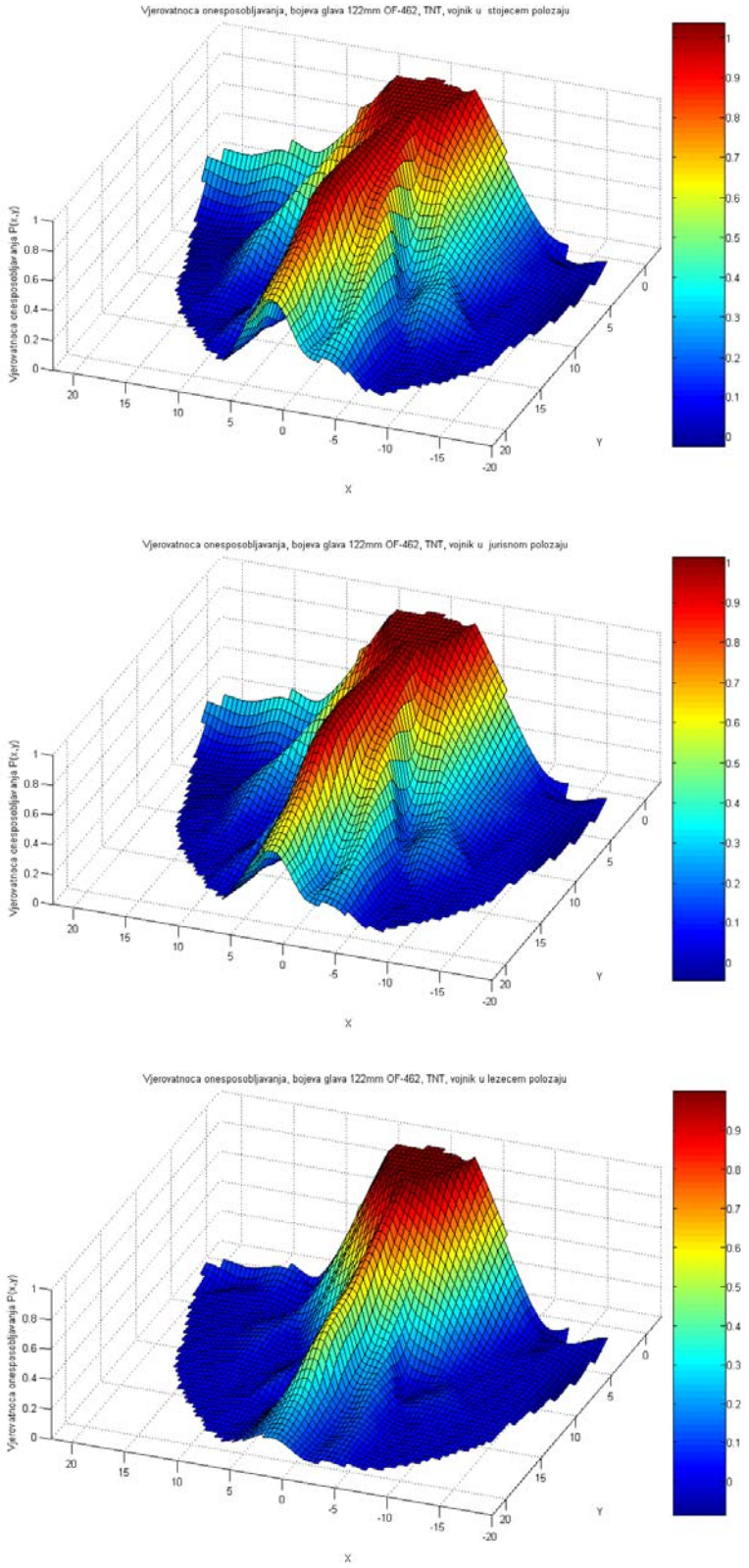
Na slici 5.2.1.8 prikazani su grafikoni vjerovatnoće onesposobljavanja za artiljerijski projektil 122mm M76, sa komp. B. Vjerovatnoća onesposobljavanja vojnika dejstvom ove bojeve glave veća je od vjerovatnoće onesposobljavanja dejstvom minobacačkog projektila 120mm W1 (sl. 5.2.1.7) ili artiljerijskog projektila 122mm OF-462 (sl. 5.2.1.9). To se najbolje može vidjeti na

trećem dijagramu sa slike 5.2.1.8 u kojem, i za ležeći položaj vojnika, funkcija vjerovatnoće onesposobljavanja vojnika na prostoru bočno od bojeve glave 122mm M76 zadržava svoj karakterističan oblik, i ne opada uniformno od centra detonacije, već ima znatno izražen bočni snop.

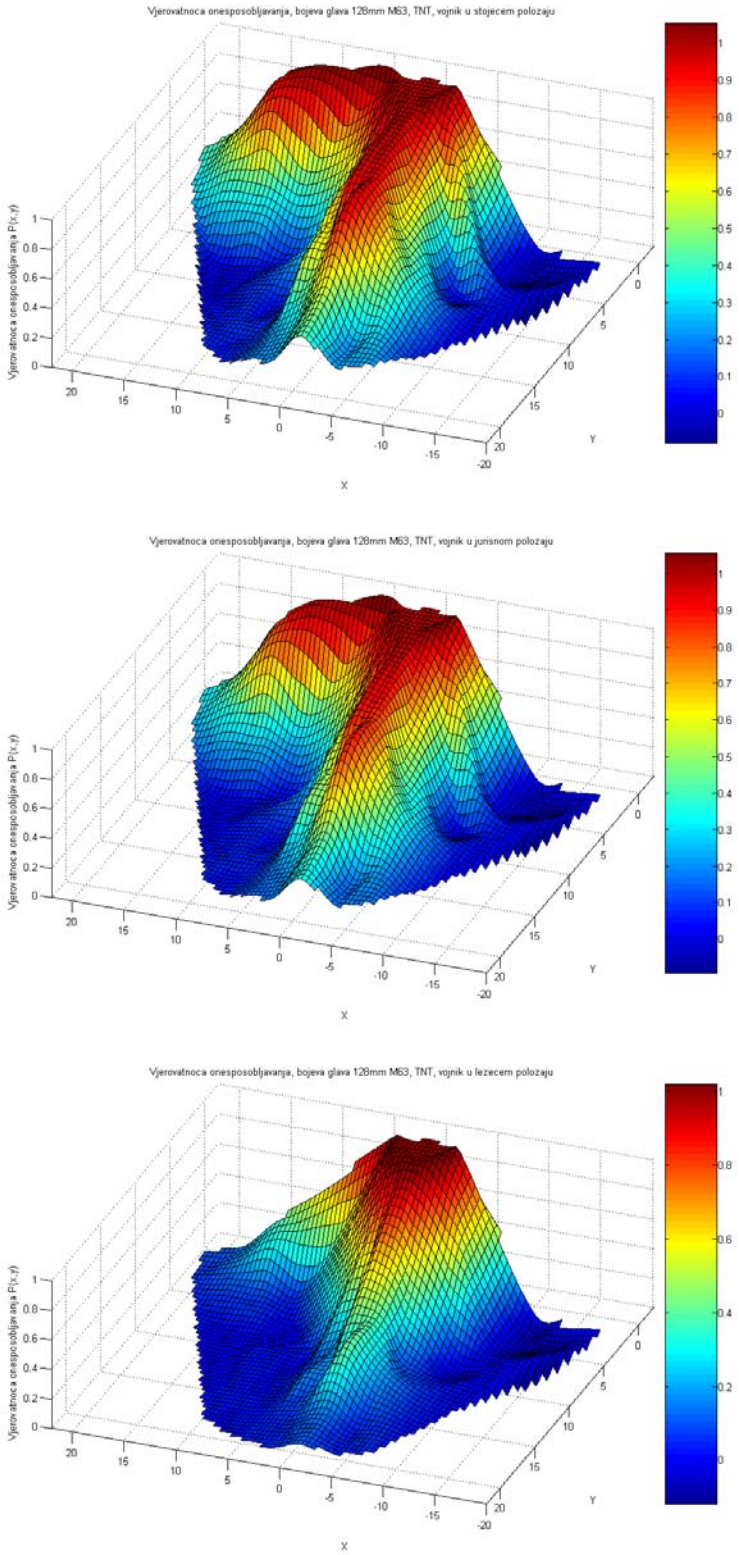


Slika 5.2.1.8 Vjerovatnoća onesposobljavanja vojnika dejstvom projektila 122mm M76, Komp. B, za tri izložene površine vojnika (stojeća, jurišna i ležeća)

Na slici 5.2.1.9 dati su 3D grafikoni vjerovatnoće onesposobljavanja za projektil ruskog dizajna 122mm OF-462, napunjenu sa eksplozivom TNT. Može se zaključiti da je vjerovatnoća onesposobljavanja dejstvom ove bojeve glave posebno velika za vojnike koji se nalaze bočno od bojeve glave. Ispred i iza bojeve glave 122mm OF-462 nalaze se zone u kojima je vjerovatnoća onesposobljavanja vojnika minimalna.



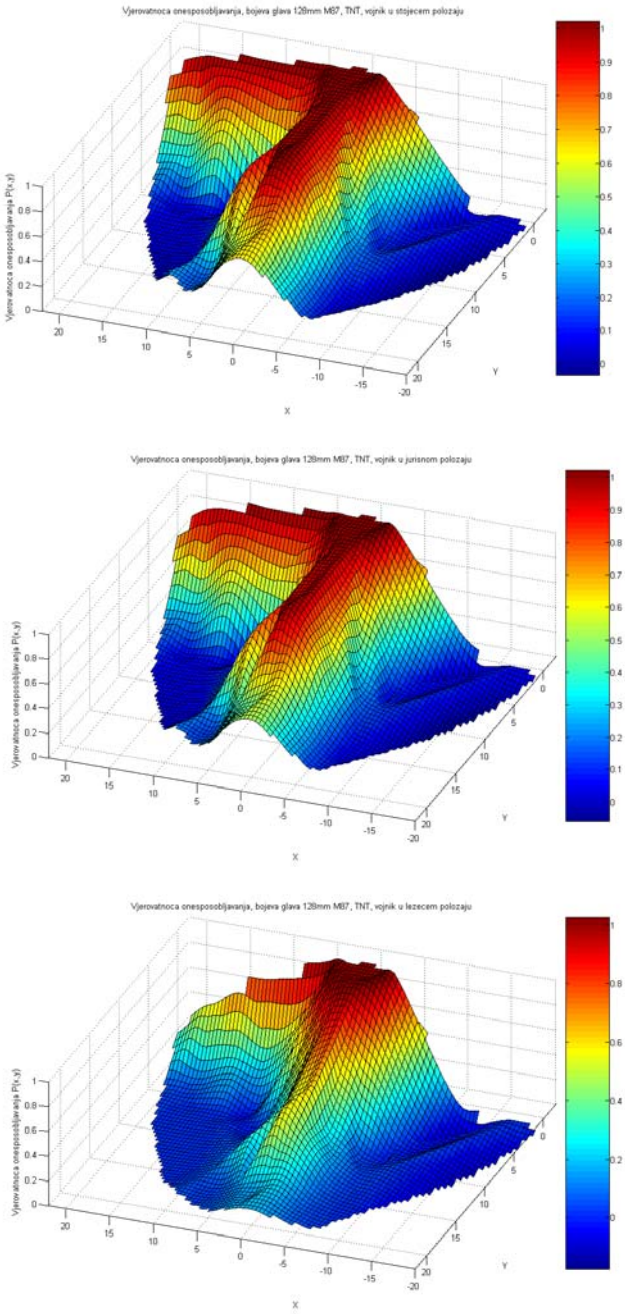
Slika 5.2.1.9 Vjerovatnoća onesposobljavanja vojnika dejstvom projektila 122mm OF-462, TNT, za tri izložene površine vojnika (stojeća, jurišna i ležeća)



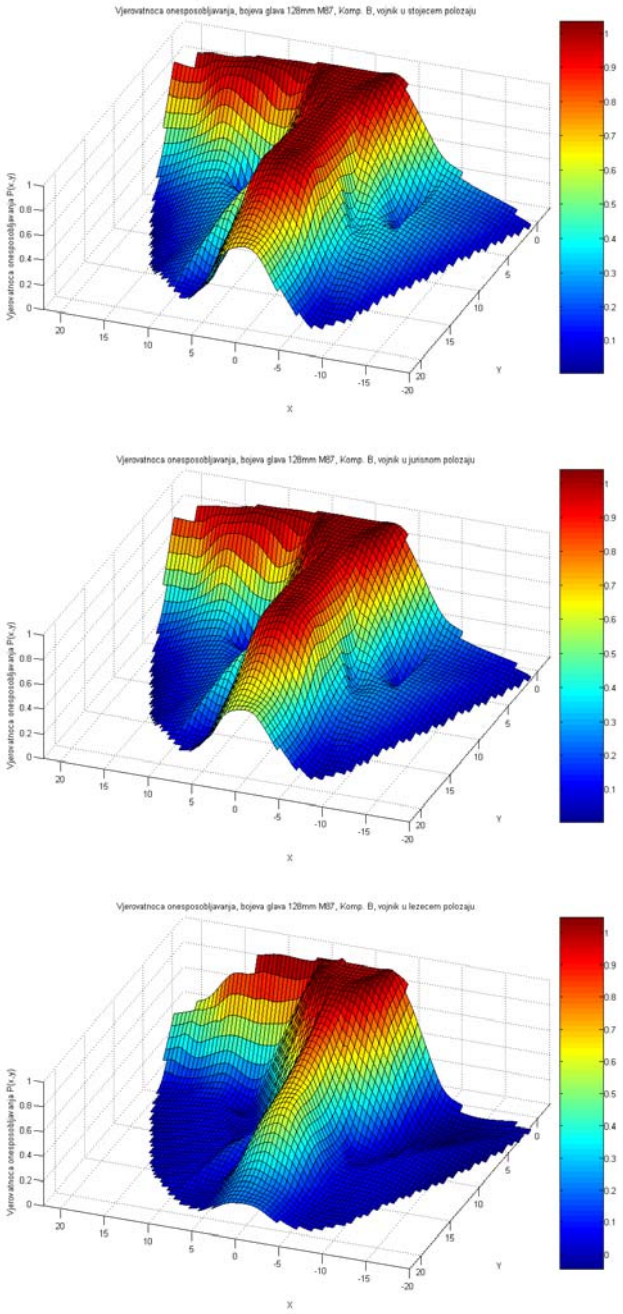
Slika 5.2.1.10 Vjerovatnoća onesposobljavanja vojnika dejstvom bojeve glave 128mm M63, TNT, za tri izložene površine vojnika (stojeća, jurišna i ležeća)

Slika 5.2.1.10 pokazuje raspored vjerovatnoća onesposobljavanja dejstvom bojeve glave raketnog projektila 128mm M63, napunjena sa TNT-om. Kod ove bojeve glave vjerovatnoća onesposobljavanja je naročito velika za vojnike koji se nalaze bočno i iza detonirajuće bojeve glave.

Posebno je karakterističan zadnji snop koji ima vrijednosti vjerovatnoće onesposobljavanja gotovo jednake kao i kod bočne strane bojeve glave. Vjerovatnoće onesposobljavanja za dio terena ispred ove bojeve glave znatno je umanjena.



Slika 5.2.1.11 Vjerovatnoća onesposobljavanja vojnika dejstvom bojeve glave 128mm M87, TNT, za tri izložene površine vojnika (stojeća, jurišna i ležeća)



Slika 5.2.1.12 Vjerovatnoća onesposobljavanja vojnika dejstvom bojeve glave 128mm M87, Komp. B, za tri izložene površine vojnika (stojeća, jurišna i ležeća)

Na slikama 5.2.1.11 i 5.2.1.12 dat je prikaz funkcija vjerovatnoće onesposobljavanja vojnika dejstvom bojeve glave raketnog projektila 128mm M87, gdje je jedna varijanta napunjena TNT-om, a druga kompozicijom B.

Primjećuje se dosta sličan raspored vjerovatnoće onesposobljavanja u oba slučaja, s tim da bojeva glava sa kompozicijom B dejstvuje sa nešto većom vjerovatnoćom onesposobljavanja, posebno u regionima bočno od bojeve glave. I kod ove bojeve glave, kao i kod BG 128mm M63,

vjerovatnoća onesposobljavanja vojnika koji se nalazi bočno i iza bojeve glave je dosta veća nego vjerovatnoća onesposobljavanja vojnika koji se nalazi ispred detonirajuće bojeve glave

Nakon određivanja ukupne vjerovatnoće onesposobljavanja *P(x,y)*, izračunate su vrijednosti koeficijenta efikasnosti A_L, za uslove nultog napadnog ugla bojeve glave i detonacije na tlu.

Napravljen je program u MatLab©-u koji metodom numeričke integracije (funkcija Trapz©) izračunava vrijednosti koeficijenta efikasnosti A_L, za date ulazne podatke: X_i, Y_i - koordinate terena i *P(x,y)* - vjerovatnoće onesposobljavanja vojnika za definsane tačke terena (bojišta).

Razvijeni program, osim modula za izračunavanje vrijednosti A_L, sadrži i podprogram za kreiranje trodimenzionalnog grafikona vjerovatnoće onesposobljavanja u pravouglom koordinatnom sistemu.

U tabeli 5.2.1.4 prikazane su izračunate vrijednosti koeficijenta efikasnosti bojevih glava A_L za različite izložene površine boraca - A_t.

Tabela 5.2.1.4 Komparacija koeficijenta efikasnosti bojevih glava A_L za različite izložene površine vojnika na terenu (bojištu)

Bojeva glava (Nulti napadni ugao, detonacija na tlu)	**A_L** (A_t = 0,5 m^2) Stojeći položaj borca	**A_L** (A_t = 0,37 m^2) Jurišni položaj borca	**A_L** (A_t = 0,1 m^2) Ležeći položaj borca
120mm W1, TNT	490,90	433,52	270,44
122mm M76, Komp. B	588,99	527,95	326,55
122mm OF-462, TNT	444,17	391,76	237,47
128mm M63, TNT	440,15	388,74	229,98
128mm M87, TNT	528,84	469,02	272,69
128mm M87, Komp. B	612,25	545,25	324,65

Rezultati u tabeli 5.2.1.4 dobijeni su za uslov da je površinska gustina vojnika na terenu (koji je ravan) konstantna i uniformna i iznosi 1 vojnik/m^2 površine terena, napadni ugao bojeve glave je 0°, te za usvojene vrijednosti izložene površine vojnika.

Tabela 5.2.1.4 pokazuje trend smanjivanja koeficijenta efikasnosti A_L sa smanjenjem izložene površine boraca. Najveći koeficijent efikasnosti ima bojeva glava 128mm M87, napunjena kompozicijom B (612,25 m^2). Slijedi je bojeva glava 122mm M76 (588,99 m^2), dok bojeva glava minobacačkog projektila 120mm W1 ima najmanji koeficijent efikasnosti (490 m^2).

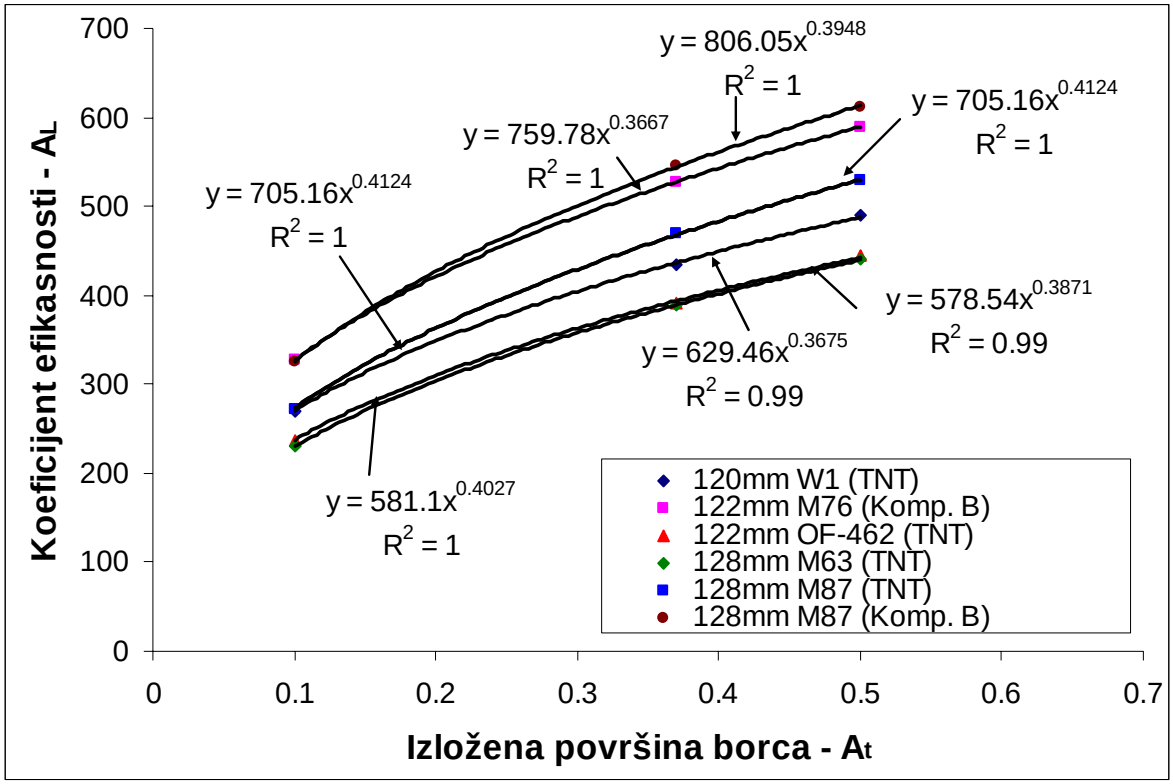
Ovi rezultati pokazuju da teoretski broj onesposobljenih vojnika na terenu, za koga se pretpostavlja da je ravan i ima uniformnu površinsku gustinu vojnika od 1 vojnik/m^2 terena, iznosi za bojevu glavu 128mm M87 - 612 boraca, za 122mm M76 - 588 boraca, a za 120mm W1 - 490 boraca.

Ukoliko bi se u proračunu koristio napr. jedan od američkih kriterija rasporeda boraca na terenu (ravna formacija sa površinskom gustinom od 0,016 vojnika/m^2) tada teoretski broj onesposobljenih vojnika na terenu (sa definisanom gustinom vojnika) iznosi za bojevu glavu 128mm M87 - barem 10 boraca, za 122mm M76 - 9 boraca, a za 120mm W1 - najmanje 8 boraca.

Iz ovih rezultata može se uočiti razlika između američkog koncepta definisanja distribucije vojnika na terenu i usvojenog modela u magistarskom radu.

Na slici 5.2.1.13 prikazan je dijagram koji pokazuje zavisnost koeficijenta efikasnosti A_L od izložene površine vojnika na terenu A_t, za nulti napadni ugao bojeve glave i detonaciju na tlu, za date bojeve glave.

Na dijagramu sa sl. 5.2.1.13 su predstavljene i aproksimacione krive (eksponencijalnog oblika) dobijene regresionom analizom dobijenih vrijednosti A_L.



Slika 5.2.1.13 Zavisnosti koeficijenta efikasnosti A_L od izložene površine borca - A_t

Grafikon na slici 5.2.1.13 pokazuje kako se povećava koeficijent efikasnosti A_L sa povećanjem izložene površine borca A_t. Regresione krive koje najbolje aproksimiraju dobijene podatke, i koje su predložene u okviru rada, mogu se predstaviti u opštem obliku preko izraza:

$$A_L = a_1 \cdot A_t^{b_1}$$

gdje su a_1 i b_1 - konstante određene regresionom analizom.

Tabela 5.2.1.5 Ispitivane bojeve glave, vrste eksploziva i koeficijenti korelacije aproks. funkcija

Bojeva glava	Eksploziv	Regresiona kriva	Koeficijent korelacije
120mm W1	TNT	$A_L=629{,}46\cdot(A_t)^{0{,}3675}$	0,99
122mm M76	Komp. B	$A_L=759{,}78\cdot(A_t)^{0{,}3667}$	1
122mm OF-462	TNT	$A_L=581{,}1\cdot(A_t)^{0{,}4027}$	1
128mm M63	TNT	$A_L=578{,}54\cdot(A_t)^{0{,}3871}$	0,99
128mm M87	TNT	$A_L=705{,}16\cdot(A_t)^{0{,}4124}$	1
128mm M87	Komp. B	$A_L=806{,}05\cdot(A_t)^{0{,}3948}$	1

Tabela 5.2.1.5 pokazuje dobro slaganje predloženih aproksimacionih krivih (koeficijent korelacije blizak jedinici) sa dobijenim podacima sa A_L.

Interval vrijednosti za koeficijent a_1 iznosi od 578,54 do 806,05, a za koeficijent b_1 on iznosi od 0,3667 do 0,4124.

Srednja vrijednost koeficijenta a_1 iznosi 676,68, a koeficijenta b_1 - 0,388.

5.2.2 Predviđanje 3D modela gustine efikasnih fragmenata

Pomoću modula za predviđanje krivih izogustina moguće je predviđanje 3D modela gustine efikasnih fragmenata koji omogućava prostornu vizuelizaciju funkcije gustine efikasnih fragmenata HE bojeve glave.

Za procjenu 3D modela gustine efikasnih fragmenata korišten je softverski paket MatLab©, gdje je napravljen poseban programski modul.

Izvršena je transformacija polarnog koordinatnog dijagrama gustine efikasnih fragmenata u funkciji polarnog ugla, u pravougli koordinatni sistem

Polukružna arena u kojoj su vršena ispitivanja ima 22 panela. Ugaoni interval polarne zone svakog panela arene iznosi 8,18°. Sa promjenom udaljenosti od centra eksplozije, ovaj ugaoni interval za sve sektore arene je konstantan, a mijenja se samo širina panela.

Za predviđanje 3D modela gustine efikasnih fragmenata u prostoru napravljen je program u MatLab©-u. Dati program kao ulazne podatke uzima vrijednosti X_i i Y_i - koordinate tačaka koje odgovaraju položaju centara panela svakog sektora u Areni, i d_{spi} - odgovarajuće dobijene vrijednosti srednje gustine efikasnih fragmenata.

Na osnovu ulaznih podataka, program omogućava, za definisani domen, iscrtavanje 3D modela koja predstavlja gustinu efikasnih fragmenata u prostoru oko bojeve glave. Program koristi funkcije Meshgrid©, Griddata© i Surf©.

Meshgrid© funkcija transformira domen, određen vektorima X_i i Y_i u niz x_i i y_i, koji se koristi pri kreiranju trodimenzionalnih grafikona.

Griddata© funkcija koristi se za definisanje površine na osnovu ulaznih podataka, postupkom interpolacije kubnim splajnom.

Surf© funkcija koristi se za kreiranje obojenih, glatkih (eng. Smooth Shaded) parametarskih površina, određenih definisanim vrijednostima x_i, y_i, i d_{spi} [74].

Sa desne strane svih grafikona nalazi se Colorbar©, funkcija u MatLab©-u koja u boji pokazuje skalu vrijednosti gustine efikasnih fragmenata.

Dimenzije X i Y koordinatnih osa date su u metrima.

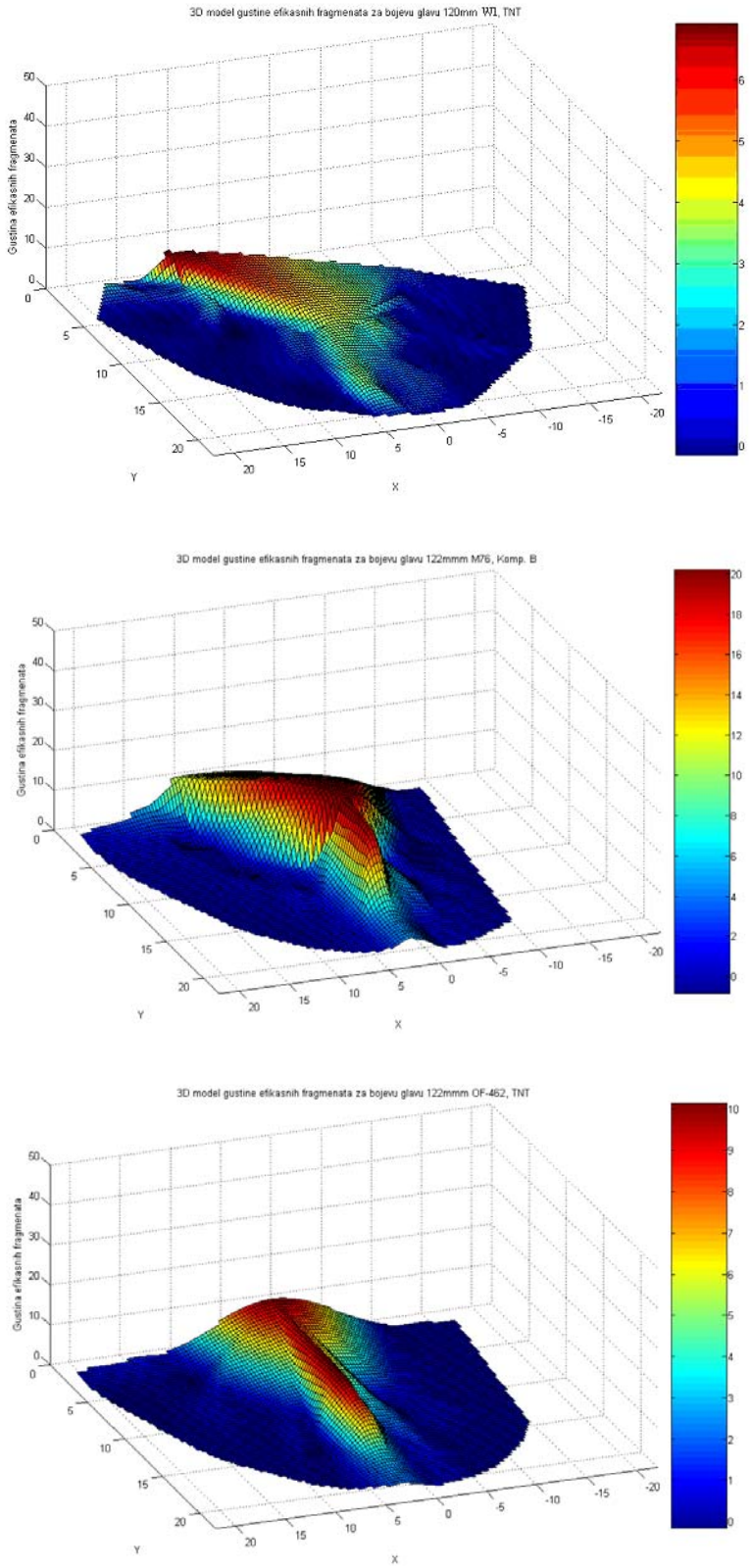
Na slici 5.2.2.1 prikazani su trodimenzionalni grafikoni funkcije gustine efikasnih fragmenata za minobacački projektil 120mm W1 (TNT), te artiljerijske projektile kalibra 122mm, M76 (Komp. B) i OF-462 (TNT).

Z-osa na dijagramima predstavlja vrijednost gustine efikasnih fragmenata. Dijagrami su predstavljeni u istoj razmjeri. Sa desne strane dijagrama prikazana ja skala u boji koja pokazuje vrijednosti gustine efikasnih fragmenata za određene tačke bojišta.

Gustina efikasnih fragmenata opada sa povećanjem udaljenosti od centra eksplozije. Projektil je na dijagramima predstavljen u koordinati (0,0,0), a vrh projektila okrenut je prema negativnoj strani X-ose.

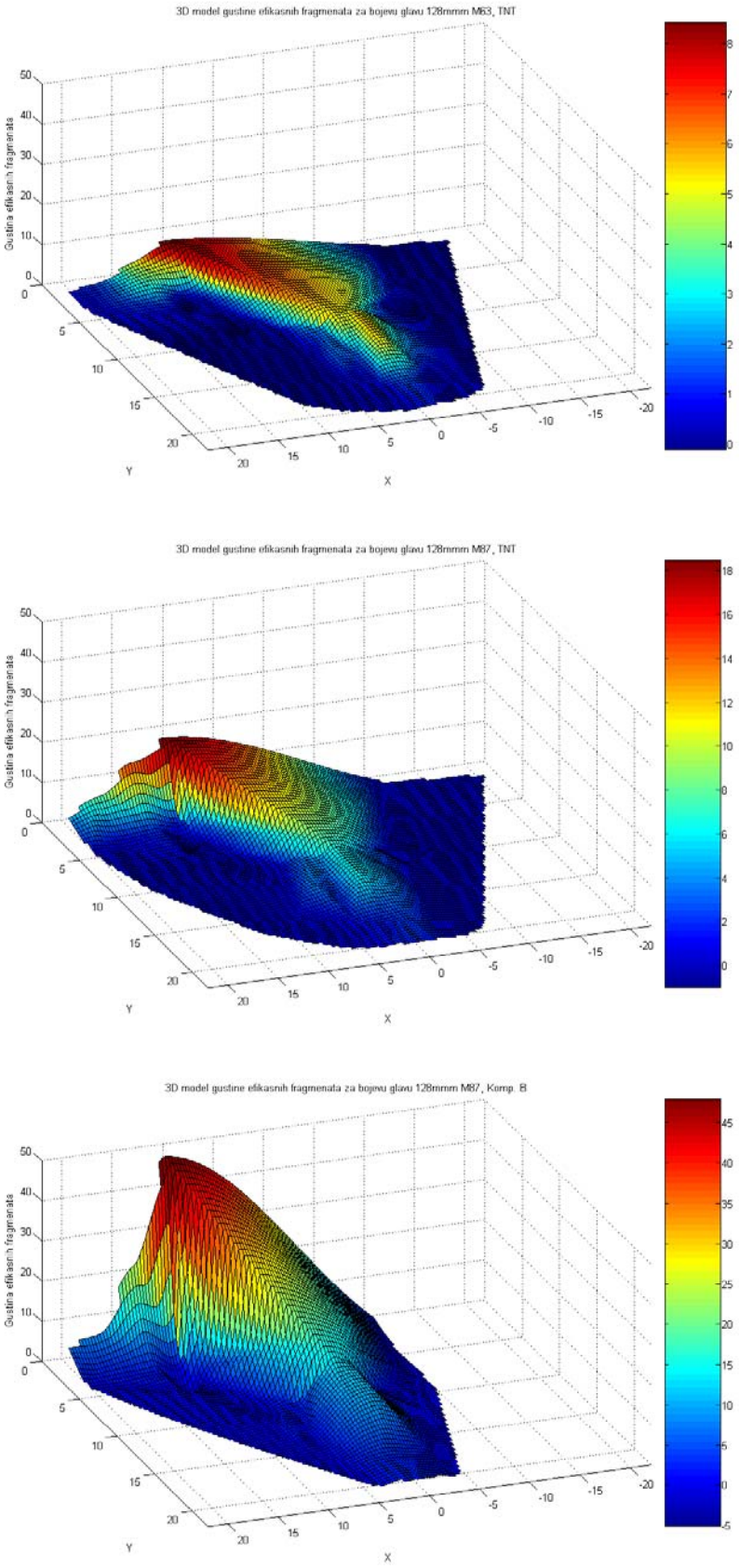
Slika 5.2.2.1 pokazuje da najveću gustinu efikasnih fragmenata ima bojeva glava 122mm M76, sa izraženim bočnim snopom fragmenata, dok bojeva glava 122mm OF-462 ima dosta uzak bočni snop efikasnih fragmenata.

Skala koja se nalazi sa desne strane dijagrama pokazuje da je najveća gustina efikasnih fragmenata kod bojeve glave 122mm M76 sa komp. B, i iznosi oko 20 frag/m^2, dok je ona najmanja za minobacačku bojevu glavu 120mm W1 sa TNT, i iznosi oko 7 frag/m^2.



Slika 5.2.2.1 3D modeli gustine efikasnih fragmenata za bojeve glave 120mm W1 (TNT), 122 M76 (Komp. B), 122mm OF-462 (TNT)

Na slici 5.2.2.2 prikazani su dijagrami 3D modela gustine efikasnih fragmenata za bojeve glave raketnih projektila 128mm, M63 i M87. Bojeva glava 128mm M63 koja je ispitivana sadrži eksploziv TNT, a bojeve glave 128mm M87 su punjene eksplozivom TNT i kompozicijom B.



Slika 5.2.2.2 3D modeli gustine efikasnih fragmenata za bojeve glave raketnih projektila:
128mm M63 (TNT), 128mm M87 (TNT) i 128mm M87 (Komp. B)

Model gustine efikasnih fragmenata kod bojeve glave 128mm M87 (varijanta sa Komp. B) pokazuje značajno veću gustinu efikasnih fragmenata od ostalih modela. Dijagrami sa slike 5.2.2.2 potvrđuju zaključak da je bojeva glava 128mm M87 efikasnija od 128mm M63, uslijed optimizovanijeg dizajna tijela bojeve glave (manji odnos *t/d* i veća vitkost oživala), te veće količine brizantnijeg eksploziva (komp. B).

Skala koja se nalazi sa desne strane dijagrama pokazuje da je najveća gustina efikasnih fragmenata kod bojeve glave 128mm M87 sa komp. B, i iznosi oko 45 frag/m^2, dok je ona minimalna za bojevu glavu 128mm M63 sa TNT, i iznosi oko 8 frag/m^2.

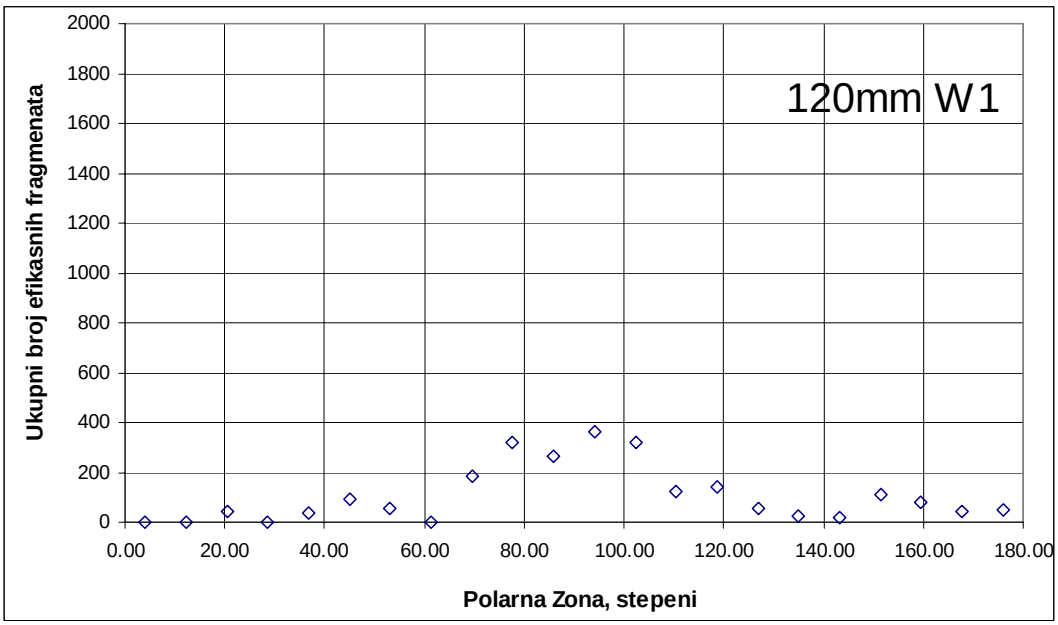
5.2.3 Procjena ukupnog broja efikasnih fragmenata u prostoru

U sklopu modula za predviđanje krivih izogustina razvijen je podmodul za predviđanje ukupnog broja fragmenata po prostoru koji predstavlja dodatni alat za procjenu efikasnosti bojevih glava.

U tabeli 5.2.3.1 dati su podaci o broju proboja i zadora za svaki tip projektila i opit. Kod eksperimentalnih istraživanja projektila 122mm M76 i 122mm OF-462 nisu registrovani zadori fragmenata, tako da nije bilo moguće procjeniti ukupan broj fragmenata po pojedinim panelima sektora.

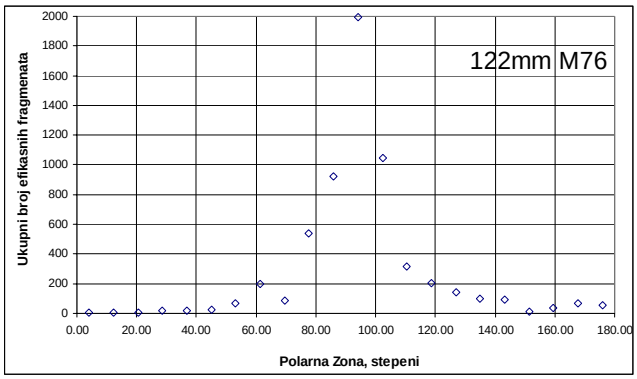
Za predviđanje ukupnog broja fragmenata u prostoru korišteni su podaci o broju prodora i zadora sa prvog sektora polukružne arene (10,5m).

Na osnovu podataka o broju proboja fragmenata mogu se grafički prikazati dijagrami broja efikasnih fragmenata u zavisnosti od polarne zone oko bojeve glave (slike 5.2.3.1-5.2.3.6) na udaljenosti 10,5 m od centra eksplozije. Ovi dijagrami veoma su važni u analizi efikasnosti bojeve glave jer pokazuju u kojem snopu fragmenata se nalazi najveći broj efikasnih fragmenata. Svi dijagrami predstavljeni su istoj skali radi lakše komparacije.

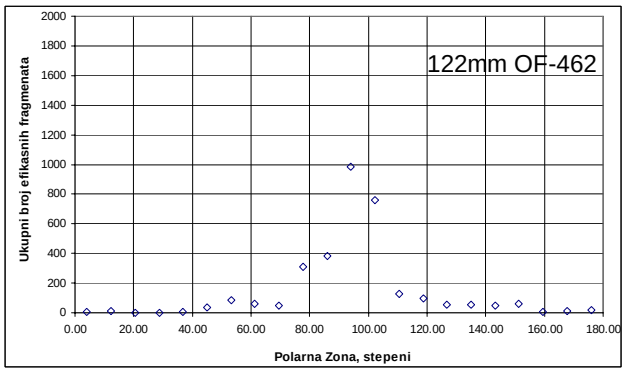


Slika 5.2.3.1 Dijagrami ukupnog broja efikasnih fragmenata u zavisnost od polarne zone oko bojeve glave 120mm W1 (TNT) na udaljenosti 10,5 m od centra eksplozije

Najveći broj efikasnih fragmenata za bojevu glavu 120mm W1 nalazi se u polarnom intervalu od 80° - 110° (slika 5.2.3.1). Najveći broj efikasnih fragmenata (oko 370 fragmenata) nalazi se pri polarnom uglu od oko 90° mjereno od vrha bojeve glave.



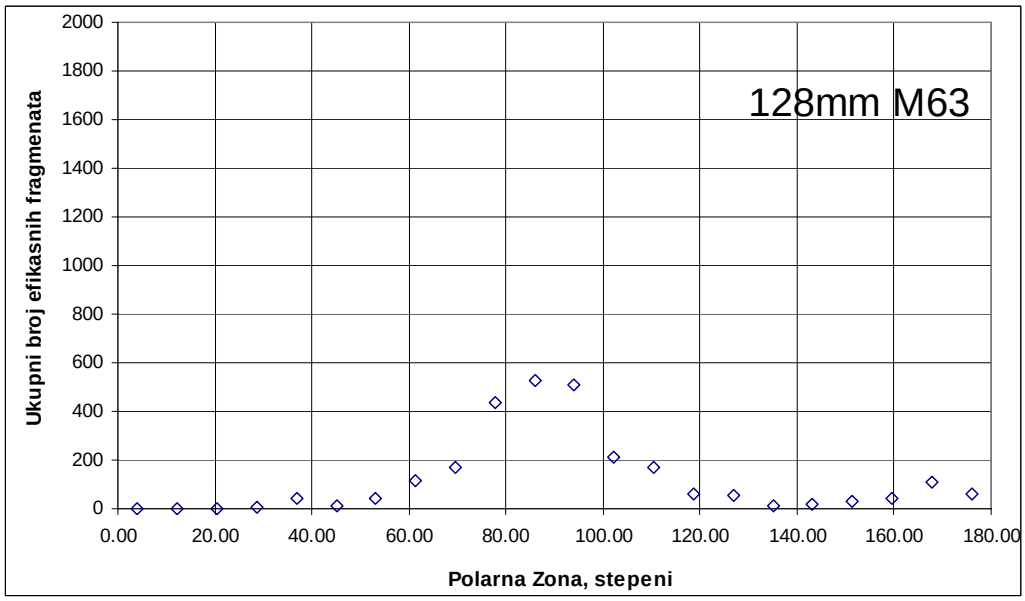
Slika 5.2.3.2 Dijagrami ukupnog broja efikasnih fragmenata u zavisnost od polarne zone oko bojeve glave 122mm M76 (Komp. B) na udaljenosti 10,5 m od centra eksplozije



Slika 5.2.3.3 Dijagrami ukupnog broja efikasnih fragmenata u zavisnost od polarne zone oko bojeve glave 122mm OF-462 (TNT) na udaljenosti 10,5 m od centra eksplozije

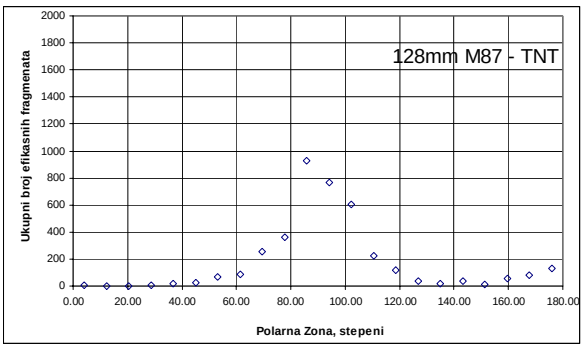
Bojeva glava 122mm M76 ima značajno uži bočni snop fragmenata (85° - 100°) u poređenju sa BG 120mm M77 W1, ali je broj efikasnih fragmenata za polarni ugao od 90° mnogo veći - oko 2000 efikasnih fragmenata (sl. 5.2.3.2).

Kod bojeve glave 122mm OF-462, koja sadrži TNT (sl. 5.2.3.3), bočni snop efikasnih fragmenata sličan je snopu kod 122mm M76. Razlika se ogleda u tome što je za polarni ugao od oko 90° broj efikasnih fragmenata za bojevu glavu 122mm OF-462 oko 1000 fragmenata, što je za 100% manja količina efikasnih fragmenata nego kod 122mm M76. Ovo je posljedica nešto većeg odnosa *t/d* i manje vrijednosti odnosa C_{eks}/M za bojevu glavu 122mm OF-462 u odnosu na 122mm M76.

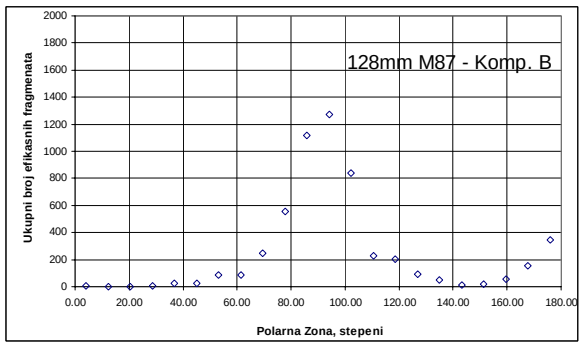


Slika 5.2.3.4Dijagrami ukupnog broja efikasnih fragmenata u zavisnost od polarne zone oko bojeve glave 128mm M63 (TNT) na udaljenosti 10,5 m od centra eksplozije

Bojeva glava 128mm M63, napunjena TNT-om (sl. 5.2.3.4), ima nešto širi bočni snop fragmenata sa ugaonim rasponom od 75° - 110°. Maksimalni broj efikasnih fragmenata za ovu bojevu glavu nalazi se u polarnoj zoni od oko 90 stepeni, i to oko 520 fragmenata.



Slika 5.2.3.5 Dijagrami ukupnog broja efikasnih fragmenata u zavisnost od polarne zone oko bojeve glave 128mm M87 (TNT) na udaljenosti 10,5 m od centra eksplozije



Slika 5.2.3.6 Dijagrami ukupnog broja efikasnih fragmenata u zavisnost od polarne zone oko bojeve glave 128mm M87 (Komp. B) na 10,5 m od centra eksplozije

Širina bočnog snopa fragmenata kod bojeve glave 128mm M87 sa TNT-om (sl. 5.2.3.5) slična je kao i kod BG 128mm M63, s tim da za polarni ugao od 90° maksimalni broj efikasnih fragmenata kod Bg 128mm M87 (TNT) iznosi oko 920.

Kad je u pitanju bojeva glava 128mm M87 sa kompozicijom B (sl. 5.2.3.6), bočni snop fragmenata nešto je uži nego kod 128mm M87 sa TNT-om, s tim da ima više efikasnih fragmenata, maksimalno oko 1200 za ugao od 90°.

Korištenjem metodologije za predviđanje broja efikasnih fragmenata dobijeni su rezultati koji su prikazani u tabeli 5.2.3.

Tabela 7. Vrijednosti procjenjenog broja efikasnih fragmenata

Bojeva glava	**Ukupni broj efikasnih fragmenata**
120mm W1, TNT	2330
122mm M76, Komp. B	5960
122mm OF-462, TNT	3178
128mm M63, TNT	2615
128mm M87, TNT	3835
128mm M87, Komp. B	5428

Rezultati u tabeli 5.2.3 dobijeni su na osnovu hipoteze da je raspodjela fragmenata u prostoru oko bojeve glave osno-simetrična.

Parametri koji utiču na ukupni broj fragmenata dobijenih fragmentacijom bojeve glave su masa komponenata bojeve glave (košuljica i eksploziv), geometrijski odnos *t/d*, maseni odnos C_{eks}/M, vrsta eksploziva, dizajn tijela bojeve glave, itd.

Na osnovu dobijenih rezultata može se procjeniti da se najveći broj efikasnih fragmenata od ispitivanih bojevih glava predviđa za artiljerijski projektil 122mm M76. Ovaj projektil ima, poslije projektila 122mm OF-462) najveću masu tijela bojeve glave (16,58kg), najveću masu eksploziva - kompozicija B (4,4 kg), odnos *t/d* = 0,149, i odnos *Ceks/M* = 0,263.

Slijedeći po redoslijedu je bojeva glava raketnog projektila 128mm M87, sa komp. B. Masa tijela ove bojeve glave (6,012kg) je za oko 175% manja od mase tijela projektila 122mm M76, a masa eksploziva (3,145kg) manja je za oko 41% od mase eksplozivnog punjenja kod 122mm M76.

Odnos *t/d* (0,083) kod 128mm M87 je manji za 80%, a odnos C_{eks}/M (0,523) je veći za oko 96% u odnosu na 122mm M76, što za posljedicu ima veću početnu brzinu fragmenata.

Komparirajući dobijene vrijednosti ukupnog broj efikasnih fragmenata za ove dvije bojeve glave (razlika od 10% u korist 122mm M76) može se zaključiti da je, s obzirom na spomenute masene i geometrijske parametre, bojeva glava 128mm M87 daleko efikasnija od projektila 122mm M76.

5.2.4 Određivanje krivih izogustina i 2D smrtonosne zone

Za svaki sektor polukružne arene eksperimentalno su utvrđene promjene gustine efikasnih fragmenata u zavisnosti od polarnog ugla.

Obzirom da postoje četiri sektora na različitim udaljenostima od centra eksplozije, moguće je uspostaviti funkciju promjene gustine efikasnih fragmenata u zavisnosti od rastojanja od centra eksplozije R i polarnog ugla θ (88 tačaka).

Metodom interpolacije je za svaku polarnu zonu određena funkcija promjene gustine efikasnih fragmenata u zavisnosti od rastojanja od centra eksplozije R_i i time je dobijen skup od 22 funkcije.

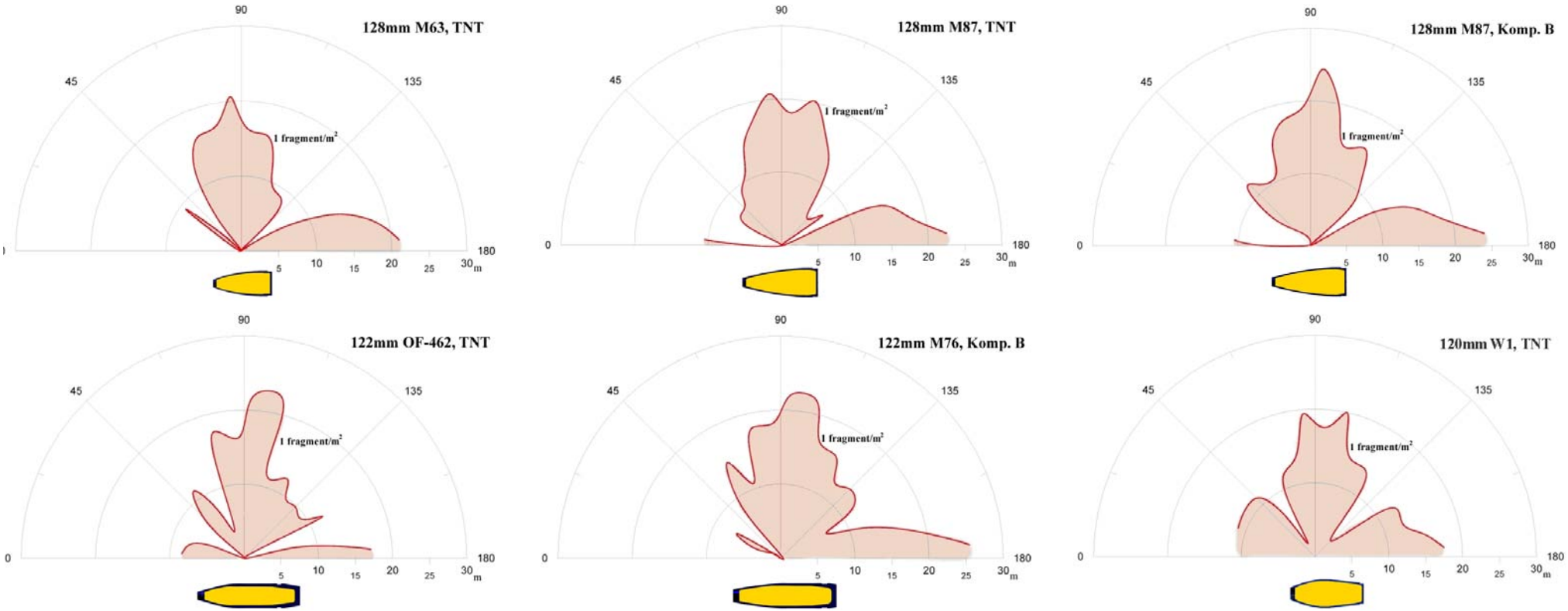
Metodom interpolacije datih aproksimacionih funkcija u MatLab©-u dobijen je skup tačaka sa unaprijed definisanom gustinom efikasnih fragmenata. Krive Izogustina su krive koje spajaju tačke sa istom gustinom efikasnih fragmenata.

U našem modelu usvojeno je da se smrtonosna zona HE bojevih glava definiše kao zona na bojištu koja ograničava površinu terena unutar koje je gustina efikasnih fragmenata ≥ 1 frag/m^2. To znači da krive izogustina predstavljaju "obvojnicu" smrtonosne zone ili krivu koja ograničava 2D model smrtonosne zone.

Definiranje 2D smrtonosne zone, na osnovu poznavanja skupa krivih izogustina izvršeno je upotrebom softverskog paketa Grapher©. Tačke sa istom gustinom efikasnih fragmenata su softverski interpolirane spline funkcijom, a rezultati su prikazani u polarnim dijagramima (slika 5.2.4.1). U ovim polarnim dijagramima, radijus vektora gustine efikasnih fragmenata (koja je konstantna i iznosi 1 frag/m^2) predstavljena je u zavisnosti od polarnog ugla. Ose koordinatnog sistema predstavljene su u logaritamskoj skali, i svi dijagrami su u istoj razmjeri. Prikazane smrtonosne zone date su za uslove nultog napadnog ugla bojeve glave, a detonacija bojeve glave je izvršena na tlu.

Iz polarnih dijagrama smrtonosne zone, predstavljenih na slici 5.2.4.1, mogu se izvući slijedeći zaključci:

- svaka smrtonosna zona sastoji se iz tri snopa, prednji, bočni i zadnji snop smrtonosne zone.
- kod svake bojeve glave najizraženija je bočna strana smrtonosne zone.
- Smrtonosna zona zavisi od mnogo uticajnih parametara, koje je veoma teško modelirati.
- minobacački projektil (120mm W1) pokazuju uniforman raspored snopova u smrtonosnoj zoni, gdje su prednji i zadnji snop smrtonosne zone podjednako naglašeni, s tim da je bočni snop smrtonosne zone dominantan.
- artiljerijski projektili (122mm M76, 122mm OF-462) imaju izražen bočni snop smrtonosne zone, dok prednji snop praktično ne postoji.
- bojeve glave raketnih projektila (128mm M63, 128mm M87) imaju izrazito naglašen bočni i zadnji snop smrtonosne zone. Prednji snop smrtonosne zone veoma je mali.
- Varijanta bojeve glave raketnog projektila 128mm M87 sa kompozicijom B ima najveću površinu smrtonosne zone.



Slika 5.2.4.1 Smrtonosna zona za bojeve glave:
128mm M63, 128mm M87 (TNT), 128mm M87 (Komp. B), 122mm OF-462, 122mm M76 (Komp. B) i 120mm W1

5.2.5 Analiza 2D smrtonosnih zona CAD metodom

Ulazne podatke za CAD modeliranje smrtonosne zone predstavlja niz tačaka na krivoj izogustina efikasnih fragmenata od 1 frag/m^2, te koordinate centara panela polukružne arene.

Nakon definisanja tačaka u kojima je gustina efikasnih fragmenata jednaka 1 frag/m^2, metodom interpolacije spline funkcijom u CAD softveru dobijene su krive izogustina koja ograničava smrtonosne zone bojevih glava. Ovo je drugi način definisanja 2D modela smrtonosne zone, prvi je bio korištenjem softvera Grapher©.

Nakon što je CAD metodom dobijena 2D smrtonosna zona bojeve glave, izvršena je analiza ugaone širine pojedinih dijelova smrtonosne zone.

Na slikama 5.2.5.1 - 5.2.5.6 prikazani su bočni, prednji i zadnji snop smrtonosne zone ispitivanih bojevih glava.

Za sve bojeve glave, dati su podaci o tipu eksploziva, mehaničkim osobinama materijala košuljice, odnosu mase eksploziva i tijela bojeve glave, te odnosu debljine tijela bojeve glave prema prečniku eksplozivnog punjenja.

Minobacački projektil 120mm W1

Eksploziv: TNT

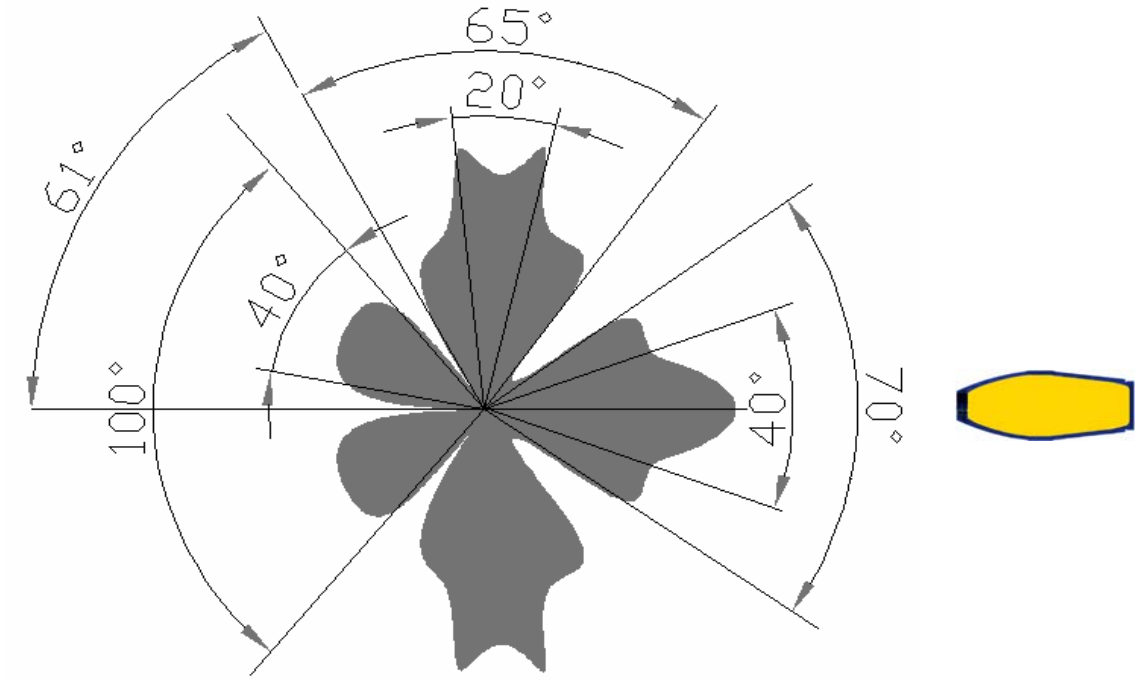
Materijal košuljice: Č.1737VP

σ_{vsr} = 495

σ_{msr} = 784

C_{eks}/M = 0,490

t/d = 0,0824



Slika 5.2.5.1 Ugaona širina snopova smrtonosne zone za bojevu glavu 120mm W1

Minobacački projektil 120mm W1 ima izražena sva tri snopa smrtonosne zone. Prednja dva snopa obuhvataju ugao od 100°, a svaki snop ubuhvata ugao od oko 40° (slika 5.2.5.1). Otprilike 60° mjereno od vrha projektila počinje bočni dio smrtonosne zone koji ima ukupni ugaoni opseg od 65°.

Bočni snop počinje pri polarnom uglu od oko 60°, mjereno od vrha projektila i obuhvata ugao širine oko 65°. Unutar bočnog snopa ističe se centralni dio bočnog snopa smrtonosne zone koji obuhvata ugao od oko 20°.

Zadnji snop smrtonosne zone obuhvata ugao širine oko 70°, sa izraženim centralnim dijelom snopa oko 40°.

Stijenka ovog projektila veoma je tanka (odnos t/d = 0,0824). Odnos mase eksploziva i tijela bojeve glave je C_{eks}/M = 0,490. Dizajn projektil 120mm W1 omogućava uniforman raspored smrtonosne zone, sa gotovo podjednako izraženim snopovima smrtonosne zone. Šupljine u smrtonosnoj zoni očite su na oko 50° i 120° gledano od vrha projektila (slika 5.2.5.1), pa se može pretpostaviti da, zavisno od stohastičnosti procesa fragmentacije, meta postavljena u ove dijelove smrtonosne zone može ostati sposobna za dalja dejstva.

Artiljerijski projektil 122mm M76

Eksploziv: kompozicija B

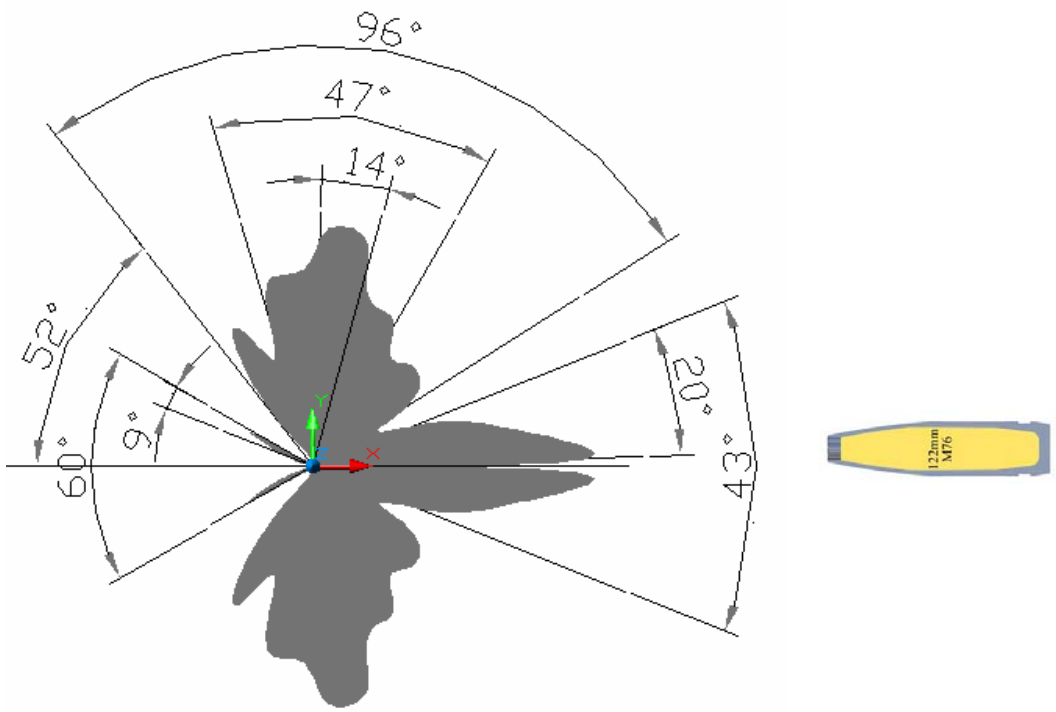
Materijal košuljice: čelik Č.9180VP

σ_v = 523 MPa

σ_M = 760 Mpa

C_{eks}/M = 0,263

t/d = 0,149



Slika 5.2.5.2 Ugaona širina snopova smrtonosne zone za bojevu glavu 122mm M76

Artiljerijski projektil 122mm M76, sa eksplozivnim punjenjem komp. B ima veoma interesantnu smrtonosnu zonu (slika 5.2.5.2). On gotovo da i nema prednjeg snopa, ali je zato bočni snop smrtonosne zone veoma širok i obuhata ugaoni segment od 96°. Unutar njega nalaze se još dva karakteristična snopa, ugaonih širina od po 47° i 14°. Zadnji snop zone obuhvata ugao od oko 43°.

Sa slike 5.2.5.2 zaključuje se da je efikasnost projektila 122mm M76 najveća na bočnom i zadnjem dijelu prostora oko bojeve glave. Ono što je neobično za ovaj projektil je da je meta koja stoji ispred detonirajuće bojeve glave (do ugla od oko 52° mjereno od vrha projektila) relativno sigurna da neće biti pogođena onesposobljavajućim fragmentom.

U poređenju sa projektilom 122mm OF-462, projektil 122mm M76 ima manji zadnji konus, veću vitkost prednjeg dijela, manju debljinu stijenke projektila, veću količinu eksploziva, a i duži je.

Artiljerijski projektil 122mm OF-462

Eksploziv: TNT

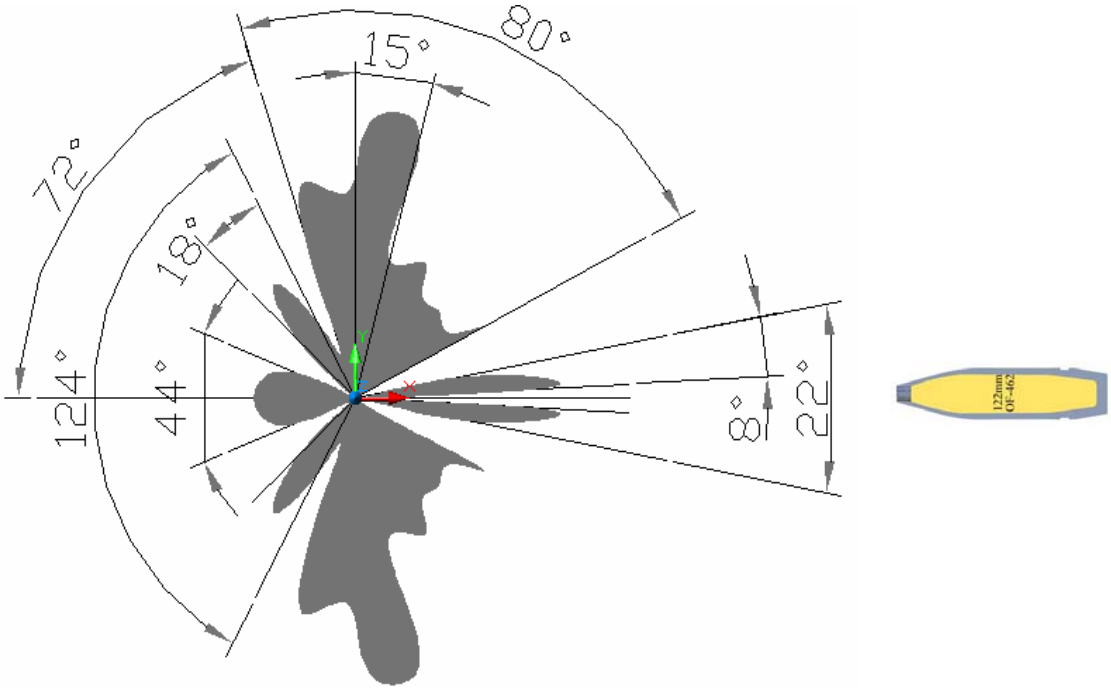
Materijal košuljice: čelik Č.1737VP

$\sigma_v = 441$

$\sigma_M = 731$

$C_{eks}/M = 0{,}200$

$t/d = 0{,}185$



Slika 5.2.5.3 Ugaona širina snopova smrtonosne zone za bojevu glavu 122mm OF-462

Artiljerijski projektil 122mm OF-462 ima neobično stohastičan i razuđen oblik smrtonosne zone (sl. 5.2.5.3), koja se generalno govoreći sastoji iz tri dijela. Prednji snop zone sastavljen je iz tri manja snopa, ugaone širine od po 18° i 44°. Bočni snop smrtonosne zone širok je 80° i ima izražen centralni dio, ugaone širine 15°. Zadnji dio zone veoma je mali, ugaone širine od oko 22°, i ne utiče bitno na efikasnost.

Projektil 122mm OF-462 razvijen je poslije II svjetskog rata, za razliku od projektila 122mm M76 koji je uveden u naoružanje osamdesetih godina prošlog vijeka. Zato projektil 122mm OF-

462 ima slabije performanse u pogledu efikasnosti dejstvom fragmenata u odnosu na projektil 122mm M76. To je posljedica manje količine eksploziva TNT (koji uz to i ima manju detonaionu brzinu i gustinu od Komp. B), većeg odnosa *t/d* (deblja stijenka), manjeg odnosa C_{eks}/M, manje vitkosti prednjeg dijela kod projektila 122mm OF-462, itd.

Bojeva glava raketnog projektila 128mm M63

Eksploziv: TNT

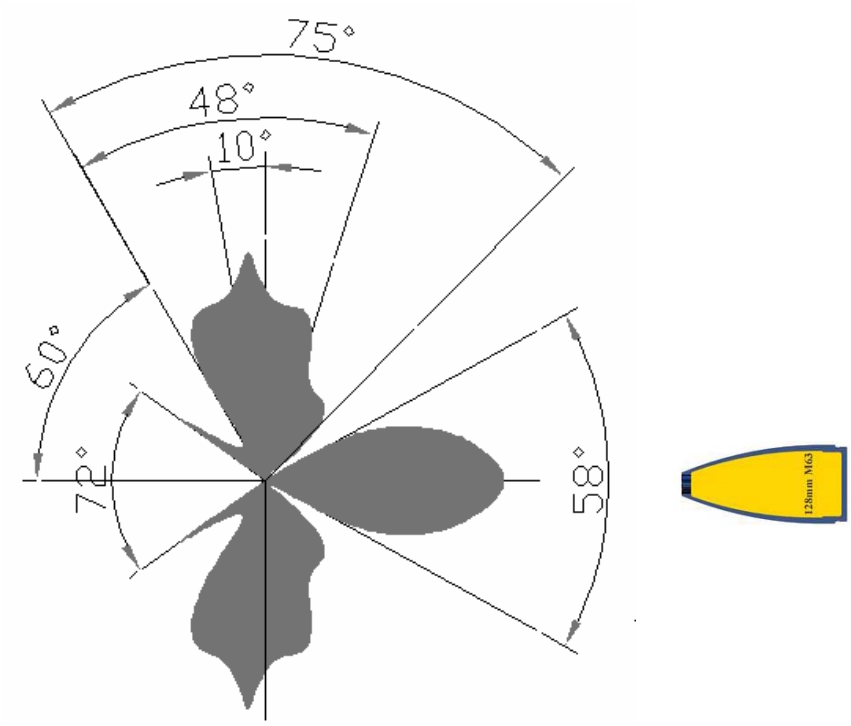
Materijal košuljice: čelik Č.1737VP

$\sigma_v = 495$

$\sigma_M = 784$

$C_{eks}/M = 0{,}405$

$t/d = 0{,}093$



Slika 5.2.5.4 Ugaona širina snopova smrtonosne zone za bojevu glavu 128mm M63

Kod bojeve glave raketnog projektila 128mm M63 (sl. 5.2.5.4), sa eksplozivnim punjenjem TNT, interesantna je veličina zadnjeg snopa smrtonosne zone koji ima dosta veliku ugaonu širinu snopa od 58° (skoro kao i bočni snop).

Prednji snop veoma je mali i ne utiče bitno na efikasnost ove bojeve glave.

Bočni snop smrtonosne zone BG 128mm M63 obuhvata ugao od 75°, sa izraženim centralnim segmentom širine 48°.

Velika površina zadnjeg snopa smrtonosne zone utiče na to da ukoliko se cilj nalazi iza detonirajuće bojeve glave 128mm M63, u ugaonom opsegu od 150° do 210° gledano od vrha bojeve glave, onda je vjerovatnoća onesposobljavanja tog cilja uveliko uvećana.

Bojeva glava raketnog projektila 128mm M87

Eksploziv: TNT

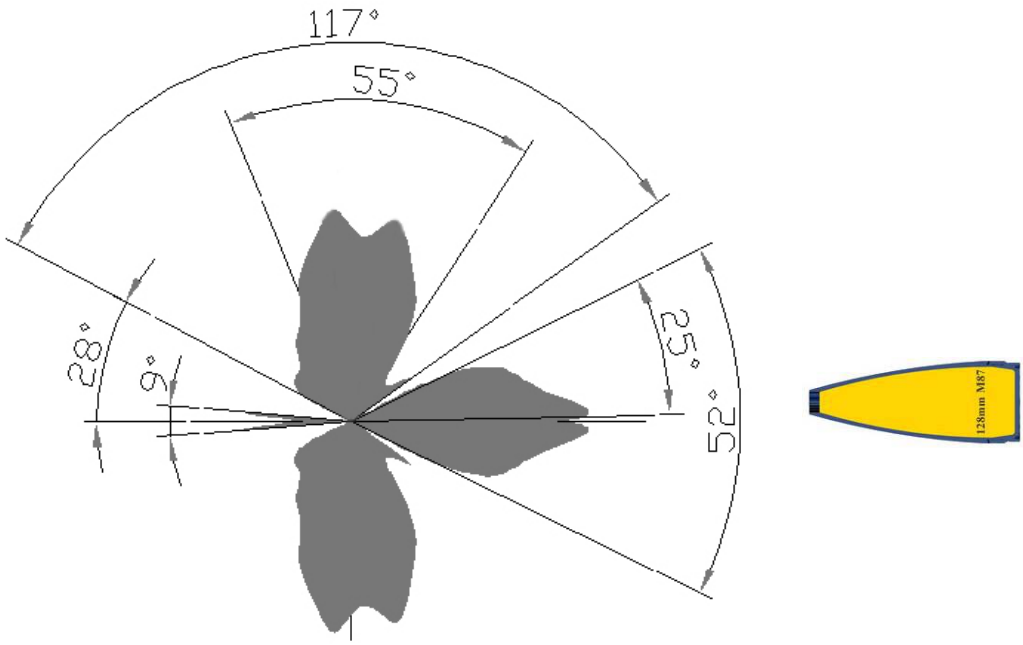
Materijal košuljice: čelik Č.1737VP

$\sigma_v = 495$

$\sigma_M = 784$

$C_{eks}/M = 0{,}474$

t/d = 0,083



Slika 5.2.5.5 Ugaona širina snopova smrtonosne zone za bojevu glavu 128mm M87, TNT

Na slikama 5.2.5.5 i 5.2.5.6 prikazane su smrtonosne zone za bojeve glave raketnog projektila 128mm M87 (TNT i Komp. B), modificiranu i poboljšanu verziju modela 128mm M63.

Kod bojeve glave M87 sa TNT-om (slika 5.2.5.5) smrtonosna zona sastoji se iz dva glavna snopa, bočnog i zadnjeg snopa. Bočni snop smrtonosne zone ima veoma veliku ugaonu širinu (117°). Unutar nje nalazi se karakteristični dio smrtonosne zone, ugaone širine 55°.

Zadnji snop smrtonosne zone ima manji ugao obuhvata od bočnog snopa (52°). Postoji velika vjerovatnoća onesposobljavanja vojnika koji se nalazi iza detonirajuće bojeve glave 128mm M87, sa TNT-om. Nedostatak je mala prednja zona, koja ne utiče bitno na efikasnost ovog projektila.

Eksploziv: kompozicija B

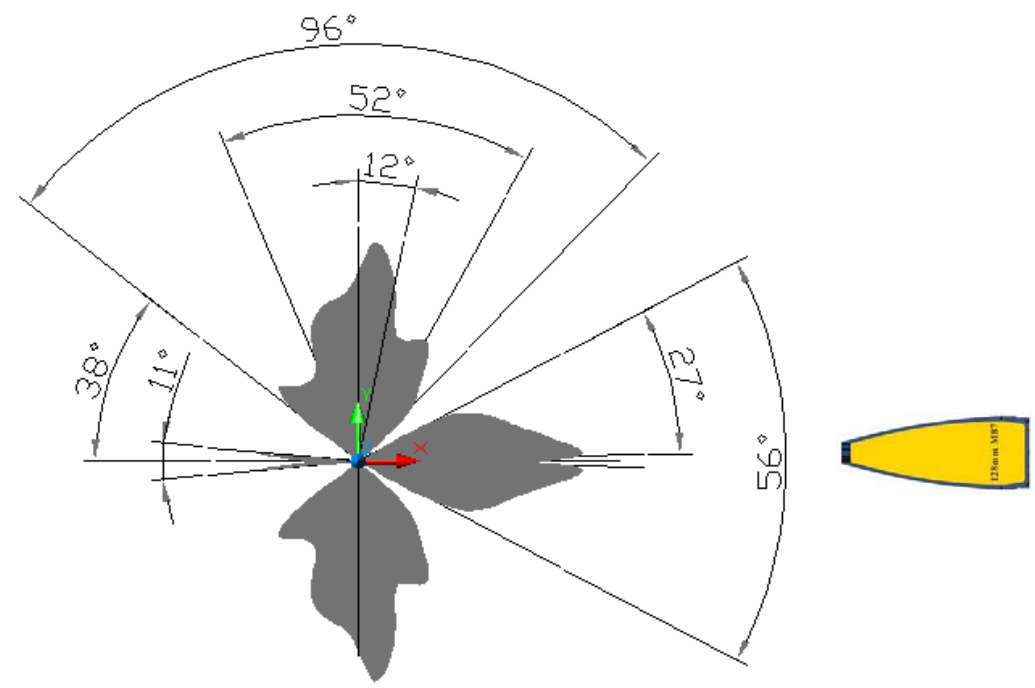
Materijal košuljice: čelik Č.1737VP

$\sigma_v = 495$

$\sigma_M = 784$

$C_{eks}/M = 0{,}516$

t/d = 0,083



Slika 5.2.5.6 Ugaona širina snopova smrtonosne zone za bojevu glavu 128mm M87, Komp. B

Korištenjem eksploziva komp.B u bojevoj glavi 128mm M87 (slika 5.2.5.6) izgled smrtonosne zone se nije mnogo promjenio u odnosu na varijantu sa TNT-om. I u ovom slučaju izraženi su bočni i prednji snop smrtonosne zone, gdje bočni snop obuhvata ugao od oko 96°, a zadnji snop - ugao od 56°.

Bojeva glava 128mm M87 predstavlja poboljšanu (optimiziranu) verziju bojeve glave raketnog projektila 128mm M63, sa većim odnosom C_{eks}/M, manjim odnosom t/d, većom vitkosti i korištenjem brizantnijeg eksploziva. Najveća prednost koja je dobijena novim dizajnom i novim eksplozivom predstavlja povećanje površine smrtonosne zone i širine bočnog snopa zone.

5.2.6 Predviđanje 3D smrtonosne zone

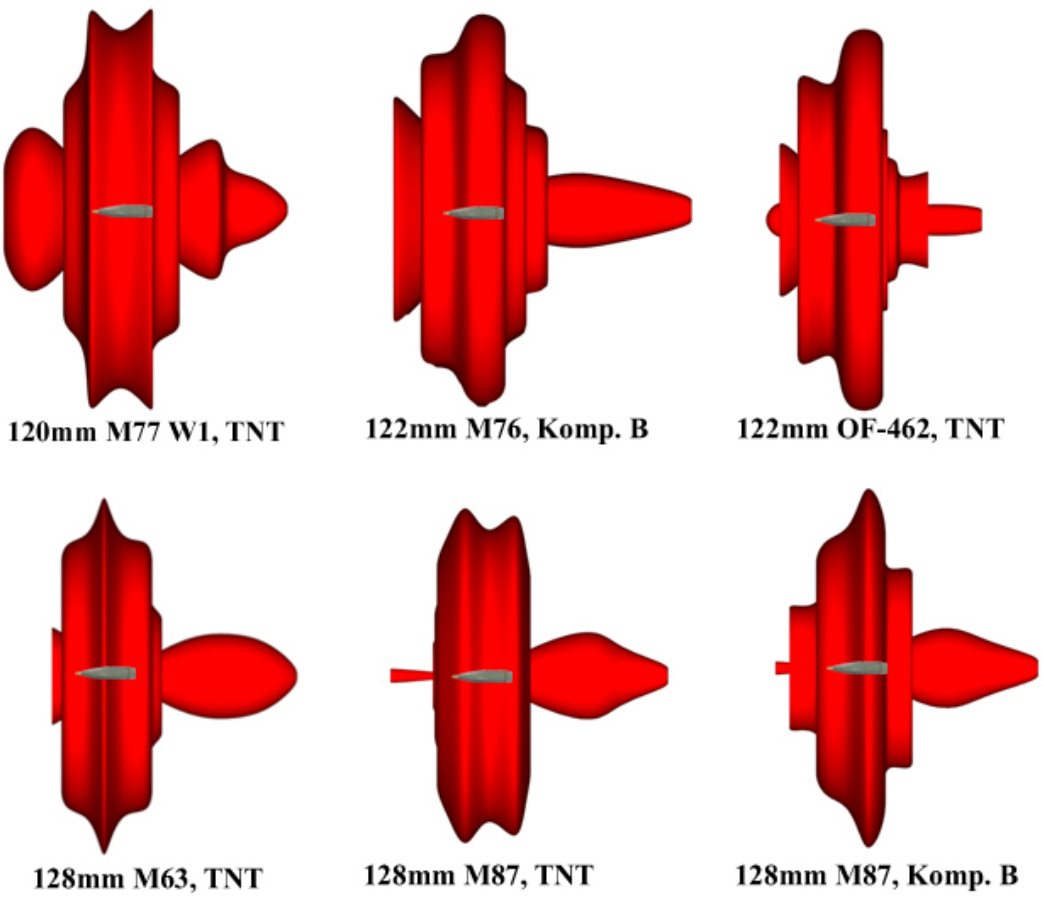
Predviđanje 3D smrtonosne zone izvršeno je koristeći AutoCAD©, softverski paket za CAD modeliranje. Ulazni podaci za modeliranje bile su tačke u prostoru oko bojeve glave sa istom gustinom efikasnih fragmenata (1 frag/m^2).

Da bi se na osnovu 2D smrtonosne zone mogla dobiti 3D zona, potrebno je dobijene spline krive (krive izogustina) predstaviti preko krive koju je moguće rotirati, a to se postiže alatkom Polyline©. Primjenom spomenutog alata, dobijena 2D zona se alatom Revolve© softverski transformiše rotacijom oko aksijalne ose bojeve glave, u traženu 3D smrtonosnu zonu.

Na slici 5.2.6.1 prikazane su 3D smrtonosne zone, dobijene za ispitivane bojeve glave (6 modela). Prikazane 3D zone nisu prikazane u razmjeri.

Na slici 5.2.6.1, u centru svake 3D smrtonosne zone nalazi se projektil koji služi kao orjentir pravca gađanja i položaja vrha projektila.

Dobijene 3D zone određene su za uslov nultog napadnog ugla i detonacije bojeve glave na tlu, korištenjem Interface-a za CAD modeliranje smrtonosnih zona, eksperimentalnih podataka, te numeričkih i CAD metoda, opisanih u prethodnim poglavljima.



Slika 5.2.6.1 3D smrtonosne zone za ispitivane bojeve glave

Slika 5.2.6.1 pokazuje prostornu (zapreminsku) smrtonosnu zonu za date bojeve glave. Veoma interesantni modeli koji su dobijeni modeliranjem CAD metodama omogućavaju analizu smrtonosne zone u prostoru, analizu smrtonosne zone pod različitim padnim uglovima bojeve glave, za različite nivoe terena, izračunavanje površine projekcije, ali i zapremine smrtonosne zone.

Napravljena je analiza smrtonosnih zapremina koje obuhvataju prostor oko detonirajućih bojevih glava i kod kojih je gustina efikasnih fragmenata jednaka ili veća od 1 frag/m^2.

Rezultati su prikazani u tabeli 5.2.6.1.

Tabela 5.2.6.1 Vrijednosti smrtonosnih zapremina

Projektil ili bojeva glava	**Maksimalna smrtonosna zapremina - V_s (m^3)**
120mm W1 (TNT)	10490
122mm OF-462 (TNT)	11149
122mm M76 (Komp. B)	15212
128mm M63 (TNT)	9643
128mm M87 (TNT)	12897
128mm M87 (Komp. B)	15027

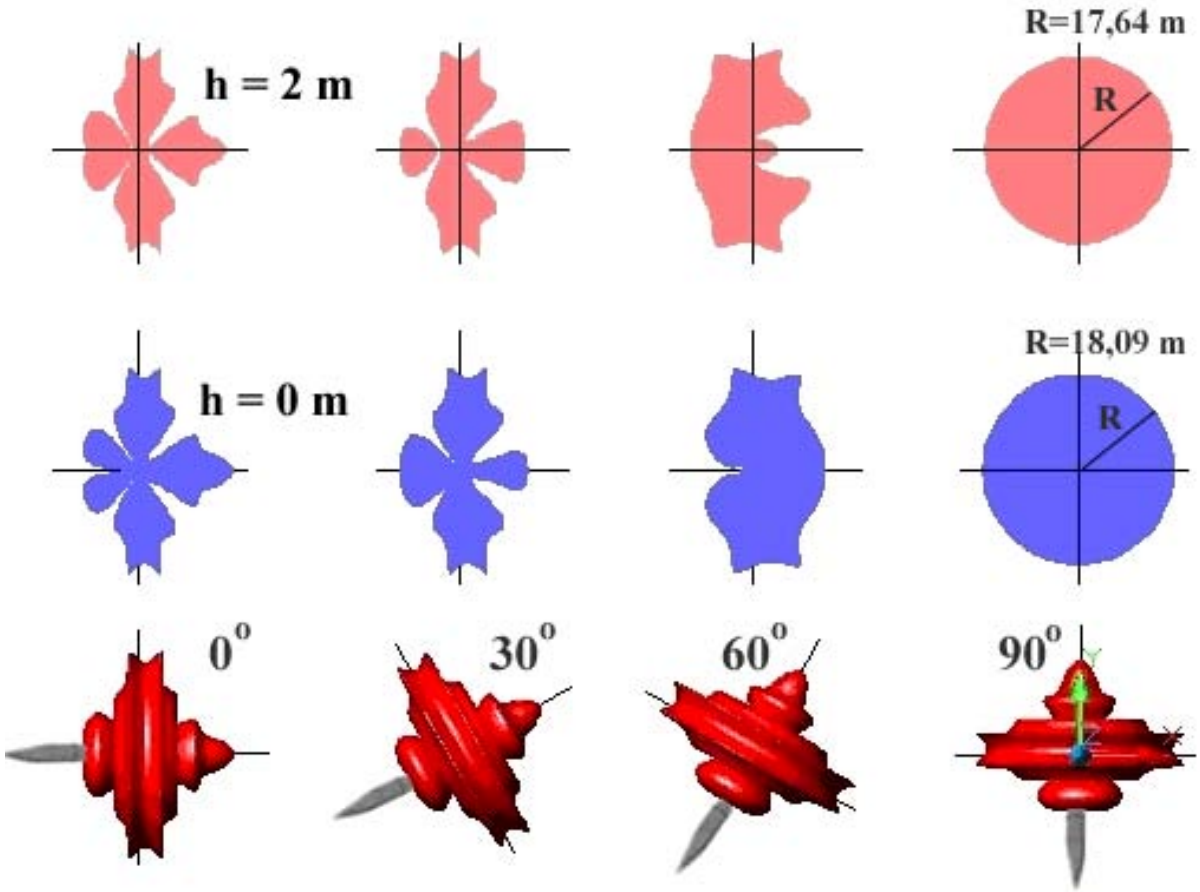
Podaci iz tabele 5.2.6.1 predstavljaju vrijedne podatke jer daju sveukupnu procjenjenu veličinu smrtonosne zone u prostoru za pojedine bojeve glave. Tako se može donijeti sud da najveću smrtonosnu zapreminu ima bojeva glava 122mm M76 (komp. B) - 15212m^3, a najmanju bojeva glava raketnog projektila 128mm M63 (TNT) - 9643 m^3.

Da bi se simulirali borbeni uslovi i različite taktičke situacije na terenu, dobijena 3D smrtonosna zona se može postaviti u različitim napadnim uglovima bojeve glave i za različite uvjete na terenu (položaj borca).

U softveru AutoCAD© izvršena je rotacija 3D zone oko ordinate (ose okomite na aksijalnu osu bojeve glave) za uglove od 30°, 60° i 90°. Ovim postupkom simulirani su različiti napadni uglovi bojeve glave.

Nakon modeliranja različitih napadnih uglova, pristupilo se presjecanju dobijenih 3D zona, alatom Section©, sa dvije ravni. Prva ravan predstavlja ravan tla, a druga je paralelna prvoj ravni, i nalazi se na visini 2m od nje. Time se uzima u obzir maksimalna moguća visina vojnika na terenu koji može biti izložen djelovanju fragmenata.

Na slikama 5.2.6.2-5.2.6.7 prikazani su 3D smrtonosne zone, projekcije površine tih zona sa dvije ravni terena (h = 0m i h = 2m iznad tla) za različite napadne uglove bojevih glava.



Slika 5.2.6.2 Prikaz 3D smrtonosne zone i njenih projekcija za različite napadne uglove bojeve glave 120mm W1 (TNT) i nivoe terena

Na slici 5.2.6.2 prikazani su 3D smrtonosne zone za bojevu glavu 120mm W1, sa eksplozivnim punjenjem TNT. Rotacijom osnovne zone (dobijene za nulti napadni ugao) za uglove 30°, 60° i 90°, dobijene su 3D zone koje simuliraju smrtonosnu zonu za date napadne uglove.

Presjekom tih 3D zona sa ravni tla (h = 0m) i ravni koja se nalazi na 2m visine od tla (h = 2m) dobijene su projekcije površine smrtonosne zone, prikazane crvenom i plavom bojom, respektivno.

Sa slike 5.2.6.2 može se uočiti trend povećanja površine projekcije smrtonosne zone A_s sa povećanjem napadnog ugla α. Tako je najveća površina projekcije smrtonosne zone dobijena za najveći napadni ugao, ugao od 90°. Projekcija smrtonosne zone na tlo, za napadni ugao od 90°,

uvijek je kružnica. Radijus kružnice projekcije smrtonosne zone za napadni ugao od 90° i za nivo tla je 18,09 m, za nivo h = 2m on iznosi 17,64 m.

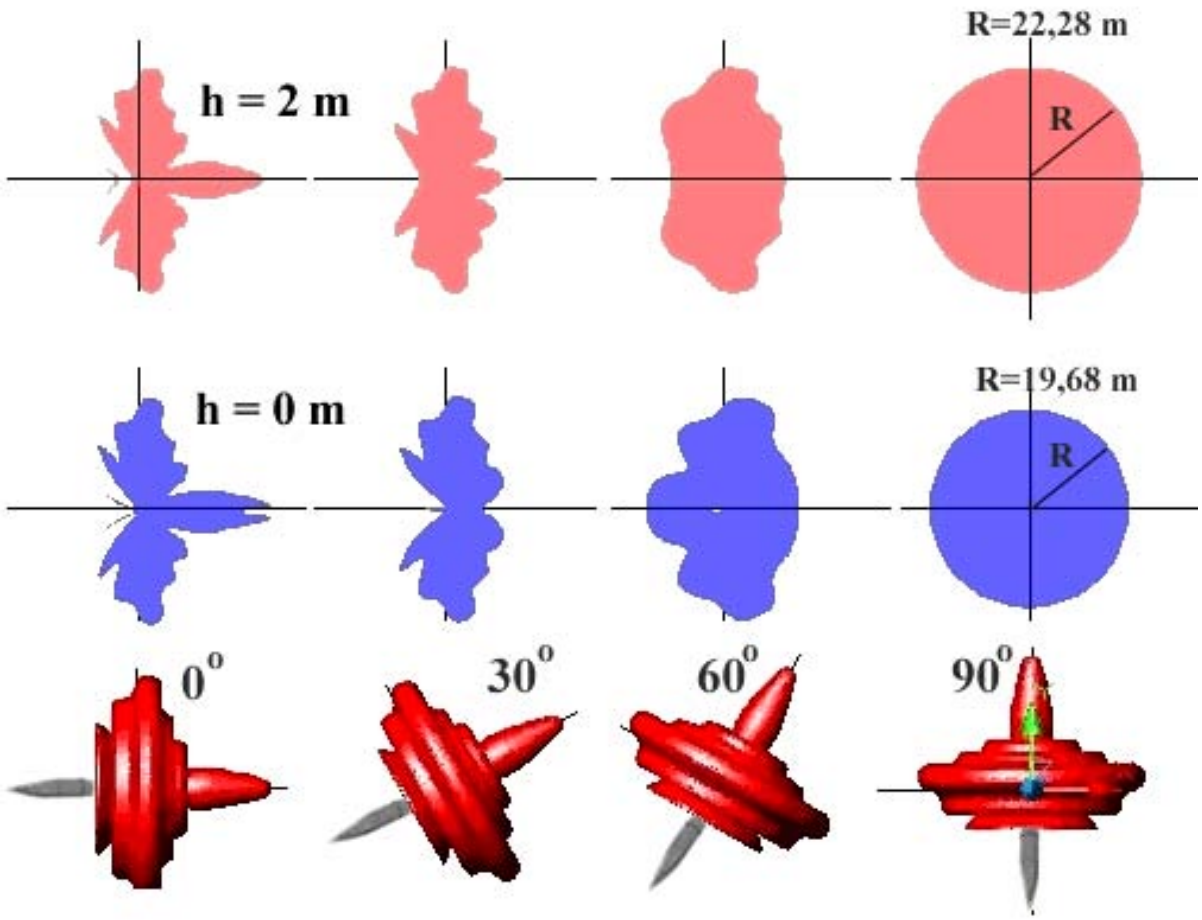
Minobacački projektili, kao što je ovaj, djeluju uvijek pod velikim napadnim uglovima što predstavlja veliku prednost ovih projektila u odnosu napr. na artiljerijske projektile.

Upotrebom brizantnog eksploziva (napr. kompozicije B) i primjenom visoko-fragmentacionih čelika za izradu tijela bojeve glave, minobacački projektili imaju neophodan kapacitet da budu veoma efikasni tipovi HE bojevih glava.

Pregled površina projekcija smrtonosnih zona, prikazanih na slici 5.2.6.2, predstavljene su u tabeli 5.2.6.2.

Na slikama 5.2.6.3 i 5.2.6.4 dat je prikaz projekcija smrtonosnih zona za artiljerijske projektile 122mm, modeli M76 (komp. B) i OF-462 (TNT), i to za različite napadne uglove projektila. Naravno, i u ovom slučaju smrtonosne zone očigledno se povećavaju sa povećavanjem napadnog ugla bojeve glave.

Artiljerijski projektil 122mm M76 (sl. 5.2.6.3) ima značajno veću smrtonosnu zonu od projektila 122mm OF-462, što se naročito očituje za napadne uglove veće od 60°.



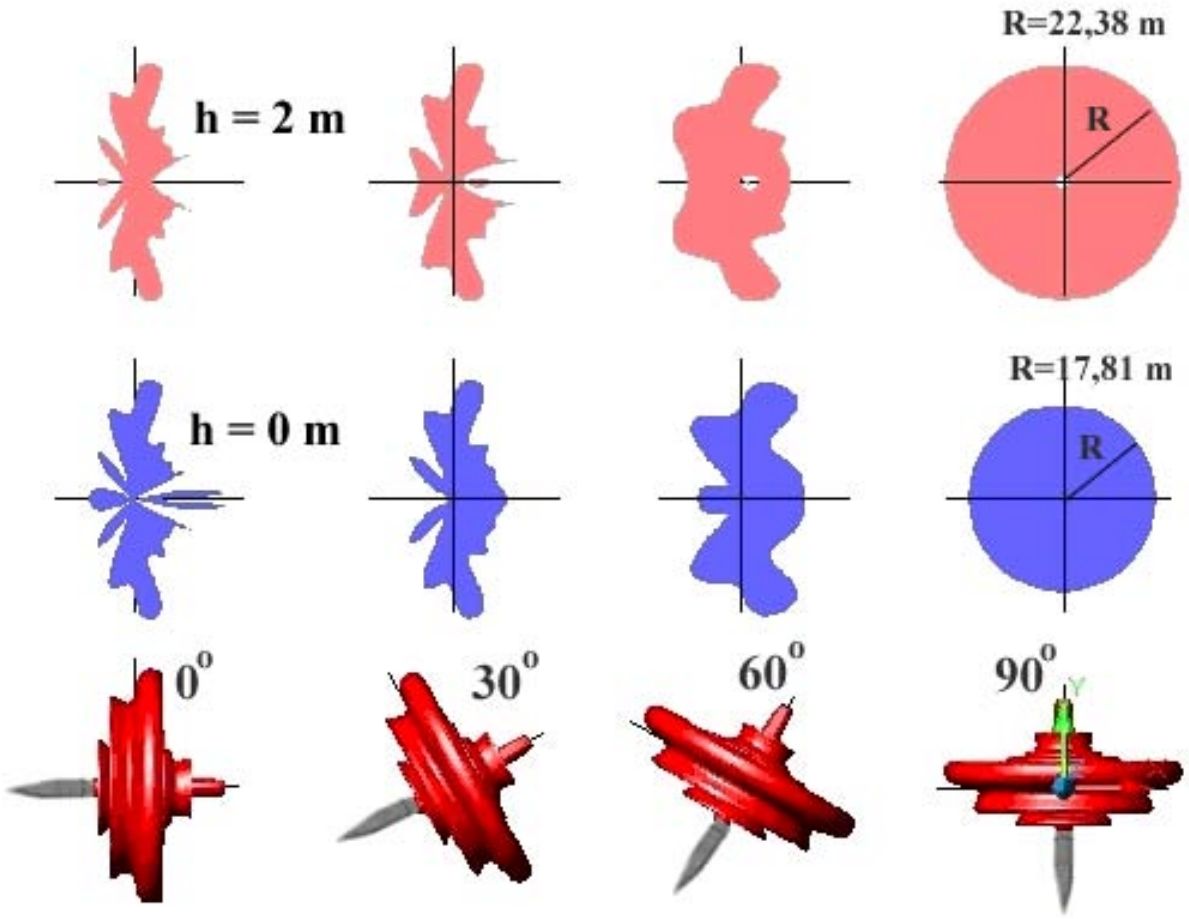
Slika 5.2.6.3 Prikaz 3D smrtonosne zone i njenih projekcija za različite napadne uglove bojeve glave 122mm M76 (Komp. B) i nivoe terena

Projektil 122mm OF-462 (sl. 5.2.6.4) ima dosta razuđenu smrtonosnu zonu, posebno za napadne uglove manje od 30°. Interesantna je pojava povećanja smrtonosne zone kod ovih bojevih glava za visinski nivo od 2 m u odnosu na ravan tla (h = 0 m), kao što se može vidjeti sa dijagrama prikazanih na datim slikama. Ta pojava nastaje uslijed veoma izraženog centralnog snopa

bočnog dijela smrtonosne zone, što se može vidjeti sa slike 5.2.6.4 za bojevu glavu 122mm OF-462 pod napadnim uglom od 90°.

Radijus kružnice projekcije smrtonosne zone za napadni ugao od 90° i za nivo tla je 19,68m, za nivo h = 2m on iznosi 22,28 m (za projektil 122 M76), dok kod bojeve glave 122mm OF-462 radijus kružnice projekcije smrtonosne zone za napadni ugao od 90° i za nivo tla je 17,81 m, za nivo h = 2m on iznosi 22,38 m.

Pregled površina projekcija smrtonosnih zona za artiljerijske projektile 122mm M76 i 122mm OF-462 predstavljene su u tabeli 5.2.6.2.

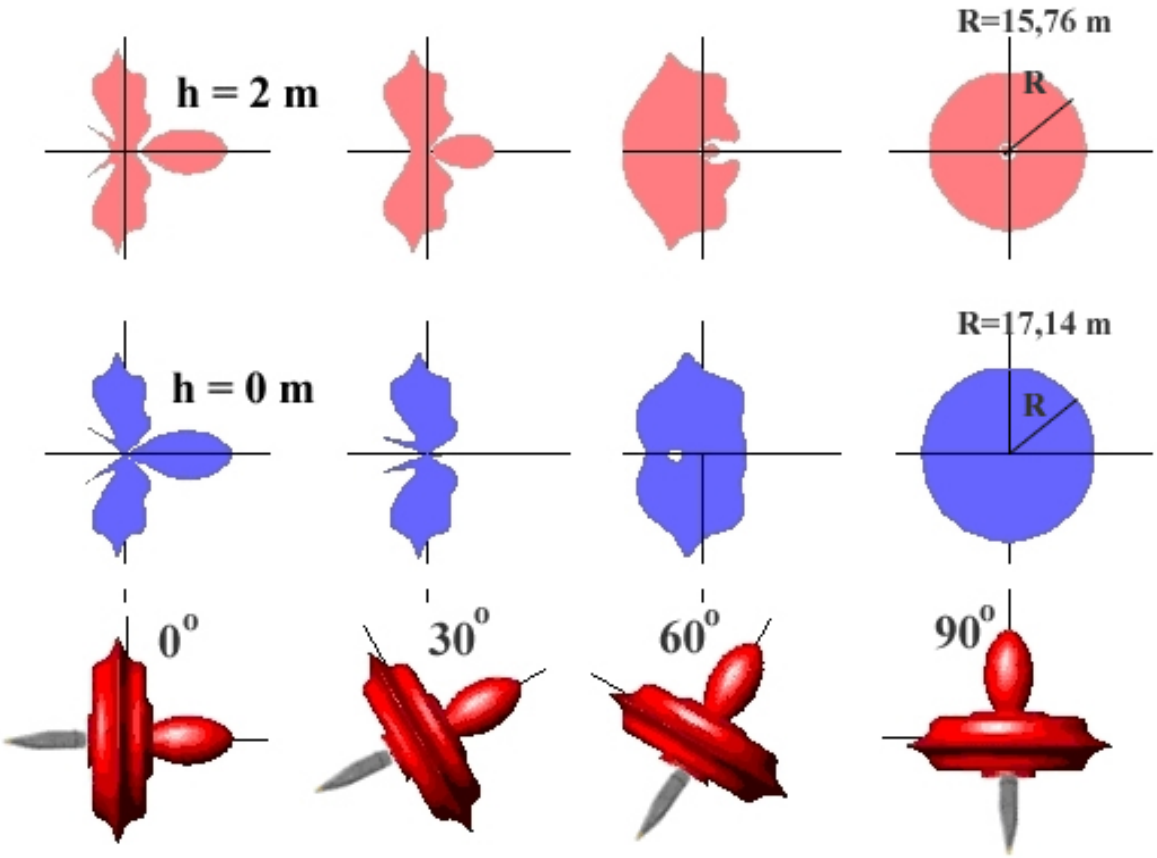


Slika 5.2.6.4 Prikaz 3D smrtonosne zone i njenih projekcija za različite napadne uglove bojeve glave 122mm OF-462 (TNT) i nivoe terena

Na slici 5.2.6.5 dat je prikaz projekcija smrtonosne zone, za različite napadne uglove bojeve glave raketnog projektila 128mm M63, sa eksplozivom TNT. U odnosu na projektile 122mm, M76 i OF-462, kod bojeve glave 128mm M63 se sa povećanjem visine (h = 2m) smrtonosna zona smanjuje, kao što se vidi sa slike 5.2.6.5.

Kod bojeve glave 128mm M63 (sl. 5.2.6.5) primjećuje se da, iako prednji snop smrtonosne zone za manje napadne uglove (< 30°) skoro da i ne postoji, pri većim napadnim uglovima (napr. 60°) prednji dio smrtonosne zone postaje izraženiji nego zadnji dio. Radijus kružnice projekcije zone smrtonosnog dejstva kod ove bojeve glave, za nivo tla (h = 0m) iznosi 17,4 m, a za nivo h = 2m on iznosi 15,76 m.

Pregled površina projekcija smrtonosnih zona za bojevu glavu 128mm M63 prikazane su u tabeli 5.2.6.2.



Slika 5.2.6.5 Prikaz 3D smrtonosne zone i njenih projekcija za različite napadne uglove bojeve glave 128mm M63 (TNT) i nivoe terena

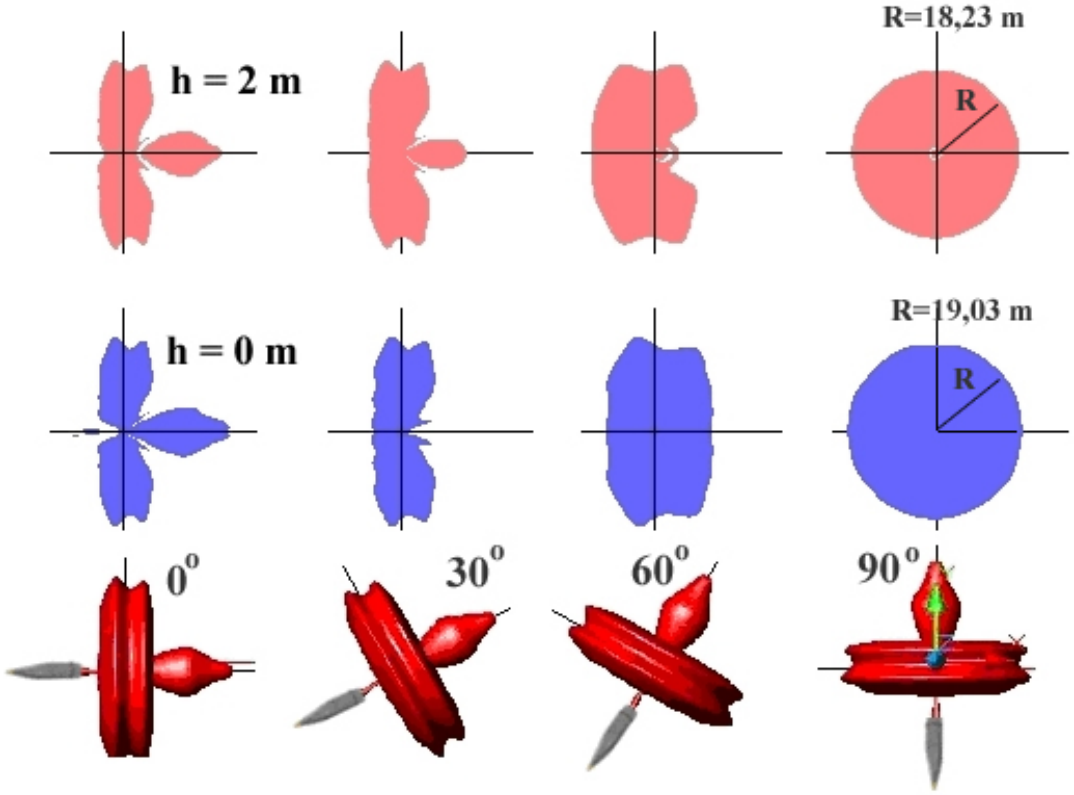
Na slikama 5.2.6.6 i 5.2.6.7 predstavljene su 3D smrtonosne zone i njihove projekcije na horizontalnu ravan za bojeve glave raketnog projektila 128mm M87, sa eksplozivnim punjenjem od Komp. B i TNT-a, i za različite napadne uglove projektila.

Kod varijante bojeve glave 128mm M87 sa TNT-om, ne primjećuje se značajna promjena površine smrtonosne zone sa promjenom visine (h = 0 i h = 2m).

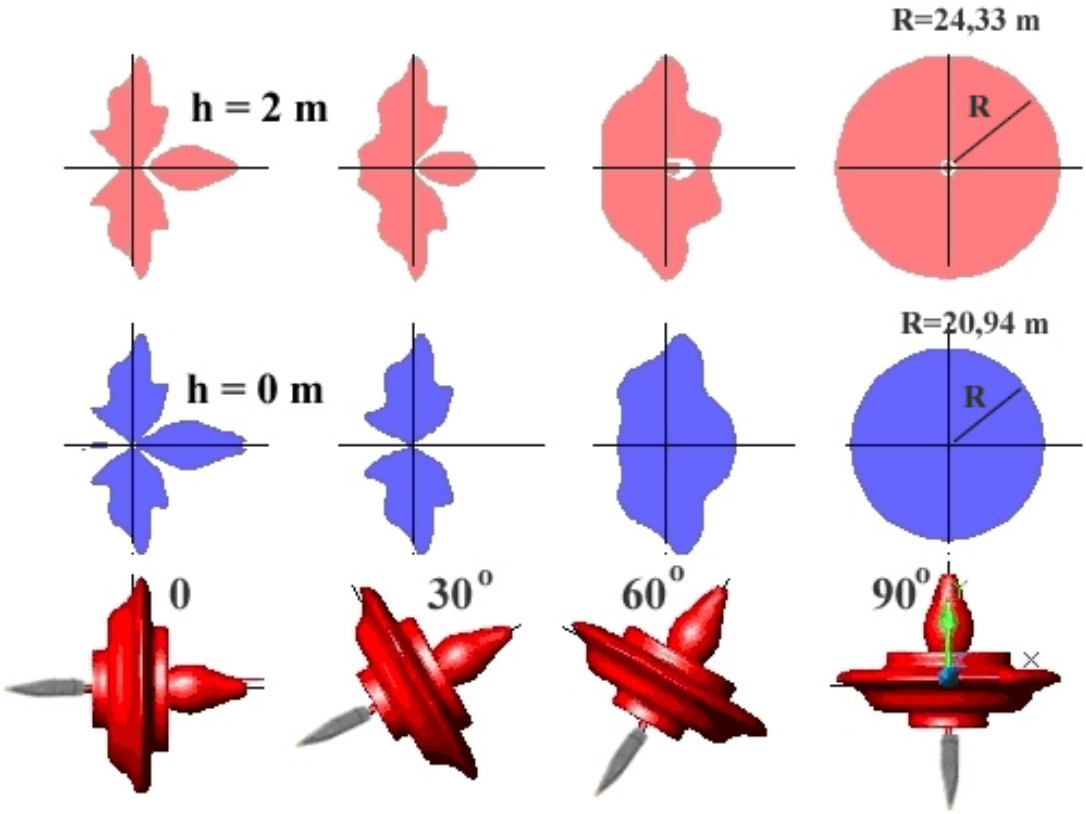
Međutim, kod bojeve glave 128mm M87 sa kompozicijom B situacija je drugačija. Projekcija smrtonosne zone veća je nego kod varijante sa TNT, što pokazuje da se samo promjenom eksplozivnog punjenja može utjecati značajno na površinu projekcije smrtonosne zone bojeve glave.

Smrtonosna zona za nivo h = 2m veća je nego smrtonosna zona na tlu (h = 0m) kod varijante sa komp. B.

Pregled površina projekcija smrtonosnih zona za bojevu glavu 128mm M87 (TNT i Komp. B) prikazane su, također, u tabeli 5.2.6.2.



Slika 5.2.6.6 Prikaz 3D smrtonosne zone i njenih projekcija za različite napadne uglove bojeve glave 128mm M87 (TNT) i nivoe terena



Slika 5.2.6.7 Prikaz 3D smrtonosne zone i njenih projekcija za različite napadne uglove bojeve glave 128mm M87 (Komp. B) i nivoe terena

Nakon definisanja 3D smrtonosne zone za različite napadne uglove bojeve glave i različite visine, softverskim putem u AutoCAD©-u alatkom Area©, određene su vrijednosti površina projekcija smrtonosnih zona A_s.

U tabeli 5.2.6.2 prikazane su vrijednosti površina projekcija smrtonosnih zona A_s za date bojeve glave, za nultu ravan (ravan tla) i ravan koja se nalazi 2m iznad tla, te za različite padne uglove bojeve glave.

Tabela 5.2.6.2 Vrijednosti površina projekcija smrtonosnih zona za nultu ravan (tlo) i ravan na 2m iznad tla, i za različite padne uglove bojeve glave.

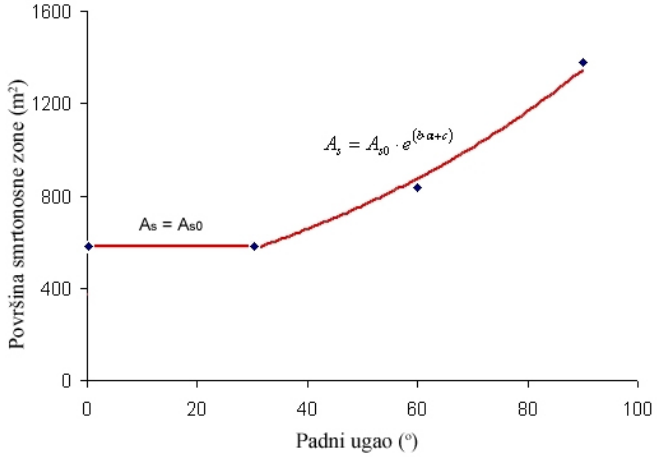
Bojeva glava	**Površina projekcije smrtonosne zone A_s (m^2)**							
	A_{s0} (h = 0 m)				**A_{s2} (h = 2 m)**			
	0°	**30°**	**60°**	**90°**	**0°**	**30°**	**60°**	**90°**
120mm M77 W1 (TNT)	496,3	474,7	622,9	1028,6	481,6	468,4	578,3	978,1
122mm M76 (Komp. B)	585,1	542,6	887,4	1217,2	567,7	573,9	824,6	1559,5
122mm OF-462 (TNT)	397,9	430,4	630,4	996,9	362,5	427,1	672,3	1570,4
128mm M63 (TNT)	432,2	345,7	653,8	951,2	416,2	401,7	607,6	775,2
128mm M87 (TNT)	524,9	447,9	797,4	1138,2	501,9	501,3	727,2	1041,9
128mm M87 (Komp. B)	583,7	495,4	838,3	1377,5	561,0	591,3	832,2	1854,8

Iz tabele 5.2.6.2 može se uočiti da za visinski nivo terena h = 0m najveću površinu projekcije smrtonosne zone za nulti padni ugao ima projektil 122mm M76 sa komp. B. Za isti visinski nivo, i padne uglove bojeve glave od 30° i 60°, takođe, najveću površinu projekcije smrtonosne zone ima projektil 122mm M76. Ipak, kod padnog ugla bojeve glave od 90°, najveću površinu projekcije smrtonosne zone ima bojeva glava raketnog projektila 128mm M87, sa komp. B.

Što se tiče visinskog nivoa terena h = 2m, za nulti napadni ugao, situacija je slična - najveću površinu projekcije smrtonosne zone ima projektil 122mm M76 sa komp. B. Međutim, za sve ostale padne uglove bojeve glave (30°, 60° i 90°) najveću površinu projekcije smrtonosne zone ima bojeva glava raketnog projektila 128mm M87, sa komp. B.

Uočena je pojava da se kod većine projektila u rasponu od 0° do 30° smanjuje površina projekcije smrtonosne zone, dok se kod pojedinih bojevih glava ova površina povećava (napr. 122mm M76).

Na osnovu analize podataka prikazanih u tabeli 9, vidljivo je da pri napadnom uglu do 30° nema značajnije promjene površine projekcije smrtonosne zone. Tek sa daljim povećavanjem napadnog ugla dolazi do značajnog povećanja površine projekcije smrtonosne zone, koje postižu svoj maksimum za padni ugao bojeve glave od 90°. Promjena površine projekcije smrtonosne zone može se posmatrati kao dvostepena funkcija (slika 5.2.6.8).



Slika 5.2.6.8 Usvojena dvostepena aproksimaciona funkcija

Prvi dio aproksimacione dvostepene funkcije može se izraziti kao $A_s = A_{s0}$, gdje je A_{s0} - površina projekcije smrtonosne zone na nivou tla (h = 0m) za napadni ugao od 0°.

Pretpostavlja se da je površina projekcije smrtonosne zone A_s pri padnom uglu od 30° jednaka površini projekcije smrtonosne zone za nulti napadni ugao.

Drugi dio aproksimacione funkcije, prema izvršenoj analizi, može se predstaviti u opštem obliku kao:

$$A_s = A_{s0} \cdot e^{(b_1 \cdot \alpha + c_1)}$$

gdje su b_1 i c_1 konstante koje se dobijaju regresionom analizom, a α - padni ugao bojeve glave.

Tabela 5.2.6.3 Vrijednosti koeficijenata b_1 i c_1, te koeficijenta korelacije za dati model aproksimacione funkcije

Projektil ili bojeva glava	**Model aproksimacione funkcije:** $A_s = A_{s0} \cdot e^{(b_1 \cdot \alpha + c_1)}$		
	b_1	c_1	*koef. korelacije*
120mm W1 (TNT)	0,3959	0,2898	0,96
122mm OF-462 (TNT)	0,459	0,4597	1
122mm M76 (komp. B)	0,3541	0,3861	0,99
128mm M63 (TNT)	0,3893	0,4022	0,99
128mm M87 (TNT)	0,379	0,3994	0,99
128mm M87 (komp. B)	0,4488	0,402	0,99

U tabeli 5.2.6.3 predstavljeni su rezultati analize korištenjem modela aproksimacione funkcije za date bojeve glave. Koeficijent korelacije blizak jedinici pokazuje dobro slaganje aproksimacione krive sa dobijenim podacima.

Vrijednost koeficijenta b_1 kreće se u intervalu od 0,3541 do 0,4488, a koeficijenta c_1 u intervalu od 0,2898 do 0,4597.

Vojnik u ležećem položaju ima najmanju izloženu površinu (0,1 m^2), dok vojnik u stojećem položaju ima najveću izloženu površinu (0,5 m^2). Vrijednost izložene površine vojnika u jurišnom položaju iznosi 0,37 m^2.

Generalno se može reći da se površina projekcije smrtonosne zone za oba analizirana visinska nivoa terena (0 i 2m) povećava sa povećanjem padnog ugla bojeve glave, za sve ispitivane bojeve glave.

To znači da se i vjerovatnoća onesposobljavanja vojnika na terenu povećava. Budući da se i izložena površina vojnika povećava za jurišni i stojeći položaj vojnika, u odnosu na ležeći, logično je zaključiti da se vjerovatnoća onesposobljavanja vojnika dodatno povećava u ovim borbenim položajima.

Izložena površina vojnika u stojećem položaju (0,5m^2) u odnosu na ležeći položaj (0,1m^2) veća je za 5 puta (400%).

Povećanje površine projekcije smrtonosne zone za padni ugao bojeve glave od 90° u odnosu na padni ugao 0° za sve bojeve glave nalazi se u intervalu od 2,08 (108%) kod projektila 122mm M76 do 2,5 (150%) kod projektila 122mm OF-462.

Sve ovo ukazuje na činjenicu da sa povećanjem padnog ugla bojeve glave i izložene površine vojinika na terenu dolazi do značajnog povećanja vjerovatnoće onesposobljavanja borca na bojištu.

5.3 Eksperimentalna ispitivanja fragmentacije u Pit uređajima

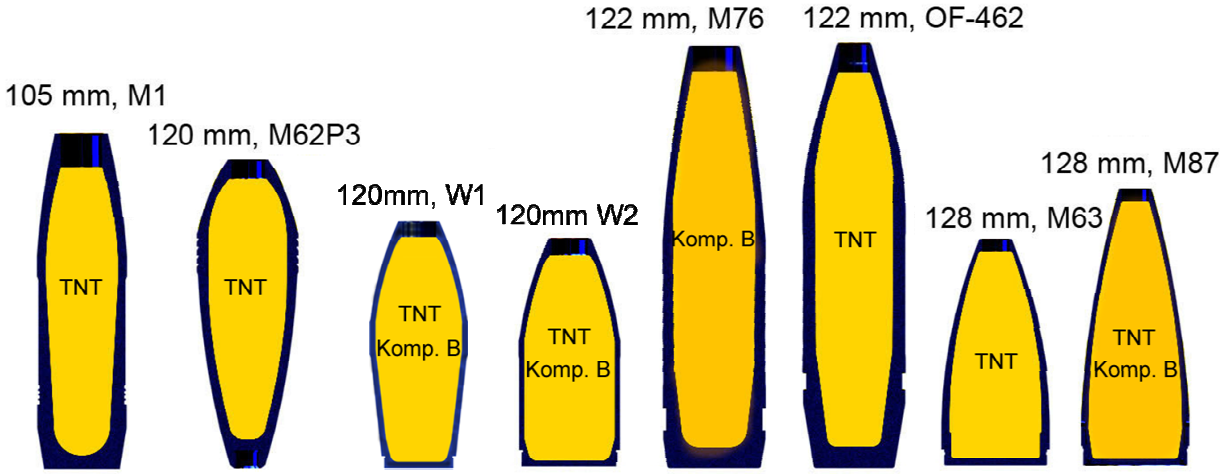
Eksperimentalni podaci, dobijeni fragmentacijom bojevih glava u Pit uređajima, koriste se za predviđanje uticaja eksplozivnog punjenja, materijala tijela bojeve glave, i dizajna bojeve glave na parametre masene distribucije fragmenata.

Pit test fragmentacije izvršen je sa slijedećim bojevim glavama i projektilima (tabela 5.3.1):

Tabela 5.3.1 Bojeve glave i projektili ispitivani u Pit uređaju

Minobacački projektili	Artiljerijski projektili	Bojeve glave raketnih projektila
120mm M62P3 - 1 opit 120mm W1 - 6 opita 120mm W2 - 6 opita	105mm M1 - 4 opita 122mm OF-462 - 4 opita 122mm M76 - 4 opita	128mm M63 - 1 opit 128mm M87 (TNT) - 5 opita

Na slici 5.3.1 prikazani su projektili i bojeve glave raketnih projektila sa kojima je vršena analiza masene distribucije fragmenata.



Slika 5.3.1 Ispitivane bojeve glave

U tabelama 5.3.2 - 5.3.4, za ispitivane minobacačke i artiljerijske projektile, te bojeve glave raketnih projektila (slika 5.3.1), predstavljeni su podaci o tipu eksploziva, vrsti materijala košuljice, mehaničkim karakteristikama datih materijala (granica razvlačenja σ_v, zatezna čvrstoća σ_m, relativno izduženje ε, relativno suženje ψ, te bezdimenzionalni maseni i geometrijski odnosi C_{eks}/M i t/d.

Tabela 5.3.2 Prikaz parametara ispitivanih minobacačkih projektila

Minobacački projektili	Eksploziv	Materijal koš.	σ_v (MPa)	σ_m (MPa)	ε (%)	ψ (%)	C_{eks}/M	t/d
120mm M62P3	TNT	Č.1534VP	324	589	22,5-23,7	-	0,253	0,151
120mm W1	TNT Komp. B	Č.4135VP Č.9180VP Č.1737VP	874-966 523-627 441-549	973-1031 760-861 731-837	20-21 19-22 20-22,5	56,2-56,6 42,9-50,3 35-42,3	0,490 0,534	0,0824
120mm W2	TNT Komp. B	Č.4135VP Č.9180VP Č.1737VP	874-966 523-627 441-549	973-1031 760-861 731-837	20-21 19-22 20-22,5	56,2-56,6 42,9-50,3 35-42,3	0,533 0,581	0,0720

Tabela 5.3.3 Prikaz parametara ispitivanih artiljerijskih projektila

Artiljerijski projektili	Eksploziv	Materijal koš.	σ_v (MPa)	σ_m (MPa)	ε (%)	ψ (%)	C_{eks}/M	t/d
122mm M76	Komp. B	Č.9180VP	523	760	19-22	-	0,263	0,149
122mm OF-462	TNT	Č.1737VP	441	731	20-22,5	-	0,200	0,185

Tabela 5.3.4 Prikaz parametara ispitivanih bojevih glava raketnih projektila

BG raket. projektila	Eksploziv	Materijal koš.	σ_v (MPa)	σ_m (MPa)	ε (%)	ψ (%)	C_{eks}/M	t/d
128mm M63	TNT	Č.1737VP	441-549	731-837	20-22,5	-	0,405	0,093
128mm M87	TNT Komp. B	Č.1737VP	441-549	731-837	20-22,5	-	0,474 0,516	0,083

U tabeli 5.3.5 prikazani su podaci dobijeni fragmentacijom bojevih glava u Pit uređajima.

Tabela 5.3.5 Podaci dobijeni fragmentacijom bojevih glava u Pit uređajima

Projektil	Materijal košuljice	Tip eksploziva	Masene grupe, g	Sr. broj fragmenata testne grupe	Sr. masa fragmenata testne grupe, g
105mm M1	Č.9180VP	TNT	do 0.5	359.5	130.75
			0.5 - 1	422.5	300
			1 - 2	379.25	535.25
			2 - 3	193.25	474
			3 - 5	245	966.5
			5 - 10	254.25	1773.5
			10 - 15	113.5	1400
			15 - 20	78.75	1353.75
			20 - 30	75.75	1833.25
			30 - 50	52	1941.25
			50 - 75	11	664.5
			75 - 100	2	162.5
120mm M62P3	Č.1534VP	TNT	do 1	2109	844
			1 - 2	524	754
			2 - 3	264	649
			3 - 5	289	1139
			5 - 10	269	1955
			10 - 20	145	1988
			20 - 30	27	657
			30 - 50	8	266
			50 - 100	2	147
120mm W1	Č.4135VP	TNT	do 1	885	572
			1-2	324	466
			2-3	146	416
			3-5	227	835
			5-10	199	1334
			10-20	88	1171
			20-30	20	445
			30-50	7	264
			50-100	2	118
120mm W1	Č.9180VP	TNT	do 1	1961	1117
			1-2	372	619
			2-3	221	575
			3-5	233	975
			5-10	137	971
			10-20	47	620
			20-30	4	100
			30-50	1	47
			50-100	2	136

120mm W1	Č.1737VP	TNT	do 1	1801	1084
			1-2	344	578
			2-3	202	545
			3-5	238	986
			5-10	202	1377
			10-20	52	675
			20-30	1	30
			30-50	1	40
			50-100	2	105
120mm W1	Č.4135VP	Komp. B	do 1	1933	864
			1-2	573	783
			2-3	231	588
			3-5	236	919
			5-10	168	1127
			10-20	58	839
			20-30	9	223
			30-50	3	110
			50-100	1	93
120mm W1	Č.9180VP	Komp. B	do 1	2233	1203
			1-2	589	867
			2-3	309	792
			3-5	201	865
			5-10	100	741
			10-20	19	249
			20-30	2	52
			30-50	1	31
			50-100	2	169
120mm W1	Č.1737VP	Komp. B	do 1	3076	1248
			1-2	583	864
			2-3	287	688
			3-5	214	893
			5-10	114	806
			10-20	19	243
			20-30	2	35
			30-50	1	36
			50-100	2	115
120mm W2	Č.4135VP	TNT	do 1	1353	575
			1-2	316	464
			2-3	217	530
			3-5	242	964
			5-10	162	1160
			10-20	68	919
			20-30	10	236
			30-50	4	153
			50-100	2	182
120mm W2	Č.9180VP	TNT	do 1	1738	790
			1-2	532	751
			2-3	280	680
			3-5	264	1018
			5-10	170	1157
			10-20	40	523
			20-30	4	100
			30-50	2	87
			50-100	3	166
120mm W2	Č.1737VP	TNT	do 1	2144	936
			1-2	544	776
			2-3	252	628
			3-5	242	962
			5-10	156	1094
			10-20	44	575
			20-30	5	122
			30-50	3	95

			50-100	1	103
120mm W2	Č.4135VP	Komp. B	do 1 1-2 2-3 3-5 5-10 10-20 20-30 30-50 50-100	2000 471 256 258 129 40 4 4 2	844 688 606 985 885 528 107 150 120
120mm W2	Č.9180VP	Komp. B	do 1 1-2 2-3 3-5 5-10 10-20 20-30 30-50 50-100	2515 661 288 205 102 29 4 2 2	1073 970 719 808 710 379 100 87 161
120mm W2	Č.1737VP	Komp. B	do 1 1-2 2-3 3-5 5-10 10-20 20-30 30-50 50-100	2402 547 246 222 128 43 4 3 2	1025 788 602 861 887 543 91 118 170
122mm M76	Č.9180VP	Komp. B	do 0.5 0.5 - 1 1 - 2 2 - 3 3 - 5 5 - 10 10 - 15 15 - 20 20 - 30 30 - 50	2064.50 1292.33 1182.17 574.67 614.50 529.17 236.50 47.83 22.83 3.83	387.83 923.83 1677 1399.83 2373.17 3644 3178.33 1122.00 841.17 265
122mm OF-462	Č.1737VP	TNT	do 0.5 0.5 - 1 1 - 2 2 - 3 3 -5 5 -10 10 - 15 15 - 20 20 - 30 30 - 50 50 - 75 75 - 100	2716.50 896.75 589.25 360 413.25 493.25 219 117.75 91 46.50 13.10 1	778 692 874.25 869.75 1620.50 3508.25 2418.25 2044.50 2429 1769.50 764.25 92.50
128mm M63	Č.1737VP	TNT	do 0.5 0.5-1 1-2 2-3 3-5 5-10 10-15 15-20 20-30 30-50 50-70	639 535 457 233 298 250 46 12 6 3 1	217.5 383.5 650.2 570 1157 1680 552 207 133.25 98.3 48.5

128mm M87	Č.1737VP	TNT	do 0.5 0.5 - 1 1 - 2 2 - 3 3 - 5 5 - 10 10 - 15 15 - 20 20 - 30 30 - 50 50 - 75 75 - 100	1140 1074 888 353 267 109 9 0.5 0.5 2 0.5 0.5	388.7 765 1255 861 1007 720 103 9 11 81.7 31 40
128mm M87	Č.1737VP	Komp. B	do 0.5 0.5 - 1 1 - 2 2 - 3 3 - 5 5 - 10 10 - 15 15 - 20 20 - 30 30 - 50 50 - 75 75 - 100	906 1226.75 897.75 382 322.5 185.5 39.5 10.75 9.25 7 7.5 4.75	315.25 852 1247 922.25 1229 1256.25 465.25 183.5 224.5 258.5 462 406

Zakon masene distribucije fragmenata odredit će se primjenom metode Mott-a i metode Held-a.

Metoda Mott-a omogućava predviđanje kumulativnog broja fragmenata *N(m)* u funkciji od srednje mase fragmenta *m*, i predstavlja se u obliku:

$$N(m) = \left[\frac{M}{(2 \cdot \mu)}\right] \cdot e^{\left(-\frac{m}{\mu}\right)^{1/2}}$$

Mott-ov koeficijent μ zavisi od vrste eksploziva i geometrije bojeve glave.

Metoda Held-a omogućava predviđanje kumulativne mase fragmenata *M(n)* u zavisnosti od kumulativnog broja fragmenata *n*:

$$M(n) = M_0\left(1 - e^{-B_H \cdot n^{\lambda_H}}\right)$$

Held-ove konstante B_H i λ_H odredit će se regresionom analizom eksperimentalno dobijenih podataka.

Osim toga, metoda Held-a omogućava predviđanje mase fragmenta *m*, u zavisnosti od kumulativnog broja fragmenata *n*:

$$m = M_0 \cdot B_H \cdot \lambda_H \cdot n^{\lambda_H - 1} \cdot e^{-B_H n^{\lambda_H}}$$

Cilj eksperimentalnog istraživanja je da se uz pomoć metoda Mott-a i Held-a utvrdi kako pojedini parametri (dizajn bojeve glave, vrsta eksplozivnog punjenja, mehaničke karakteristike materijala tijela bojeve glave) utiču na pojedine koeficijente (koeficijent μ kod metode Mott-a i konstante B_H i λ_H kod metode Held-a), a sve sa ciljem da se skraćivanja vremena i troškova u fazi eksperimentalnih istraživanja.

Ulazni podaci za obadvije metode (Mott i Held) su isti. To su podaci o srednjem broju fragmenata testne grupe i srednjoj masi fragmenata testne grupe, klasificirani prema masenim grupama, dobijeni Pit testovima (tabela 5.3.5). Eksperimentalni podaci iz Pit testova statistički su obrađeni.

U tabeli 5.3.6 prikazane su izračunate vrijednosti Mott-ovog koeficijenta μ za ispitivane bojeve glave. Koeficijent μ određen je bez korekcija u pravcu optimiziranja mase sakupljenih fragmenata.

Tabela 5.3.6 Mott-ov koeficijent μ za ispitivane bojeve glave

Bojeva glava	Eksploziv	μ
105mm M1	TNT	2,6166
120mm M62P3	TNT	1,9445
120mm W1	TNT	0,8762
120mm W1	Komp. B	0,7097
120mm W2	TNT	0,8260
120mm W2	Komp. B	0,6691
122mm OF-462	TNT	3,3483
122mm M76	Komp. B	2,0016
128mm M63	TNT	1,1441
128mm M87	TNT	0,8866
128mm M87	Komp. B	0,7183

Kod minobacačkih projektila vrijednost μ kreće se u intervalu od 0,6691 za 120mm W2 (Komp. B) do 1,9445 za 120mm M62P3 (TNT).

Bojeve glave raketnih projektila imaju vrijednost μ od 0,7183 za 128mm M87 (Komp. B) do 1,1441 za 128mm M63 (TNT).

Vrijednost Mott-ovog koeficijenta μ za artiljerijske projektile je najveća i iznosi 2,0016 za 122mm M76 (Komp. B), te 3,3483 za 122mm OF-462 (TNT).

Može se uočiti da su vrijednosti koeficijenta μ slične kod minobacačkih projektila i bojevih glava raketnih projektila. Ove dvije vrste municije imaju veći odnos mase eksploziva prema masi tijela bojeve glave C_{eks}/M nego što je to slučaj sa artiljerijskim projektilima.

Također, korištenjem brizantnijeg eksploziva (Komp. B) u odnosu na TNT primjećuje se trend smanjivanja vrijednosti koeficijenta μ, kao što je to slučaj kod bojevih glava 120mm W1 (Komp. B) i 128mm M87 (Komp. B).

Sa druge strane, artiljerijski projektili imaju dosta veće vrijednosti koeficijenta μ u odnosu na minobacačke projektile i BG raketnih projektila. Ovi projektili imaju manji relativni odnos mase eksploziva prema masi tijela projektila C_{eks}/M, veću debljinu tijela projektila u odnosu na minobacačke projektile i BG raketnih projektila. Kod artiljerijskih projektila takođe je primjetan trend smanjenja konstante μ kada se koristi eksploziv veće energije.

U tabeli 5.3.7 predstavljene su dobijene vrijednosti Held-ovih konstanti B_H i λ_H za ispitivane bojeve glave (za različite vrste eksploziva i različite vrste materijala tijela bojevih glava).

Ove konstante dobijene su softverskom regresionom analizom (MS Excell©), a u tabeli 5.3.7 je, također, prikazana i vrijednost koeficijenta korelacije regresionih funkcija.

Koeficijenti korelacije imaju vrijednosti bliske jedinici, što znači da regresione funkcije dobro odgovaraju eksperimentalnim podacima.

Tabela 5.3.7 Vrijednosti Held-ovih konstante B_H i λ_H i koeficijenta korelacije r^2

Bojeva glava	Eksploziv	Materijal košuljice	B_H	λ_H	Koeficijent korelacije r^2
105mm M1	TNT	Č. 9180VP	0,0177	0,7134	0,9974
120mm M62P3	TNT	Č.1534VP	0,0098	0,741	0,9994
120mm W1	TNT	Č. 9180VP	0,0167	0,6409	0,9983
120mm W1	TNT	Č. 4135VP	0,0131	0,7412	0,9996
120mm W1	TNT	Č. 1737VP	0,0121	0,6931	0,9984
120mm W1	Komp. B	Č. 9180VP	0,0162	0,6144	0,9973
120mm W1	Komp. B	Č. 4135VP	0,0156	0,6616	0,992
120mm W1	Komp. B	Č. 1737VP	0,0149	0,6218	0,9972
120mm W2	TNT	Č. 9180VP	0,0159	0,652	0,9977
120mm W2	TNT	Č. 4135VP	0,0203	0,6596	0,997
120mm W2	TNT	Č. 1737VP	0,0167	0,6363	0,9966
120mm W2	Komp. B	Č. 9180VP	0,0213	0,579	0,9969
120mm W2	Komp. B	Č. 4135VP	0,0167	0,6497	0,9986
120mm W2	Komp. B	Č. 1737VP	0,0214	0,5954	0,9977
122mm OF-462	TNT	Č. 1737VP	0,0046	0,8135	0,9951
122mm M76	Komp. B	Č. 9180VP	0,0061	0,743	0,9985
128mm M63	TNT	Č. 1737VP	0,0084	0,7739	0,9986
128mm M87	TNT	Č. 1737VP	0,0151	0,6125	0,9924
128mm M87	Komp. B	Č. 1737VP	0,0186	0,6101	0,9931

Ukoliko se uporede rezultati iz tabele 5.3.7 za minobacačke projektile 120mm W1 i W2, može se zaključiti da sa promjenom materijala tijela projektila, značajnije se mijenjaju vrijednosti konstante B_H nego konstante λ_H.

Za isti materijal tijela minobacačkog projektila, ukoliko se mijenja tip eksplozivnog punjenja primjećuje se trend povećanja koeficijenta B_H kada se koristi eksploziv veće energije (Komp. B), dok se sa druge strane u tom slučaju vrijednost koeficijenta λ_H smanjuje.

Komparirajući vrijednosti konstanti B_H i λ_H kod artiljerijskih projektila 122mm, OF-462 i M76, može se uočiti da se promjenom dizajna projektila, i upotrebom brizantnijeg eksploziva (slučaj projektila 122mm M76 sa Komp. B) konstanta B_H povećava, a konstanta λ_H smanjuje.

I kod bojevih glava raketnih projektila 128mm M63 i M87 primjetan je porast koeficijenta B_H i smanjenje konstante λ_H sa porastom detonacione brzine eksploziva.

Ako se uporede bojeva glava 128mm M63 i BG 128mm M87, sa eksplozivnim punjenjem TNT, i istim tipom materijala tijela BG, ali različitim dizajnom bojeve glave, može se zaključiti da se optimiziranjem dizajna BG (vitkiji prednji dio, veća količina eksploziva, tanje tijelo bojeve glave) primjećuje trend povećanja konstante B_H, a smanjenja λ_H.

U istraživanjima masene distribucije fragmenata kod HE bojevih glava 30mm i 35mm M. Held [2] je dobio vrijednosti konstanti B_H i λ_H čiji je red veličina veoma sličan vrijednostima dobijenim u magistarskom radu.

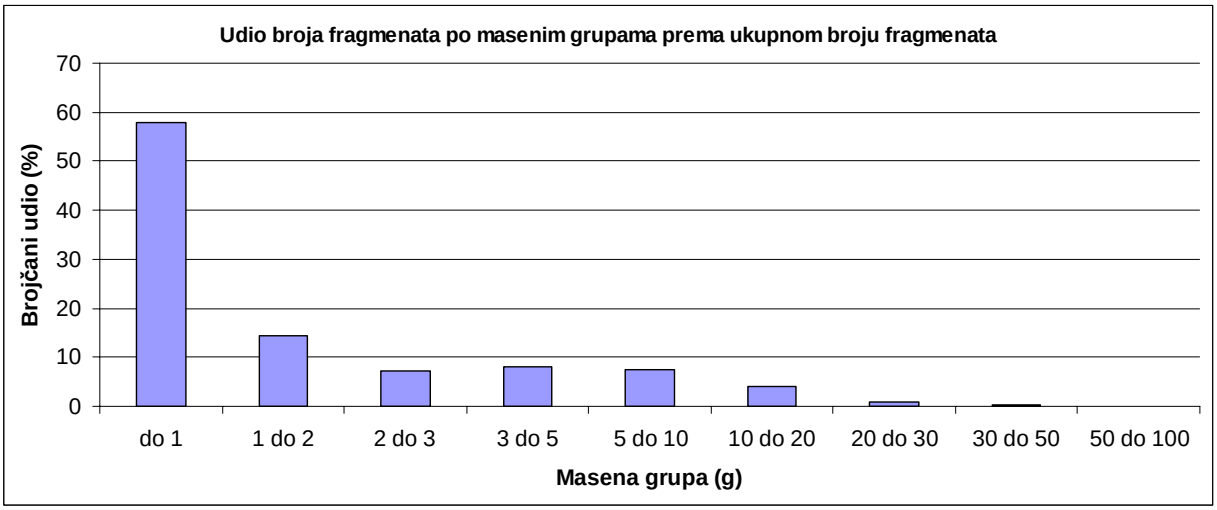
5.3.1 Predviđanje masene distribucije fragmenata kod minobacačkih projektila

Izvršena su istraživanja masene distribucije fragmenata za minobacačke projektile 120mm M62P3, te za dvije varijante projektila 120mm, W1 i W2 (slika 5.3.1).

Projektil 120mm M62P3 predstavlja standardni minobacački projektil koji se koristio u našoj zemlji, dok minobacački projektili 120mm W1 i W2 predstavljaju modifikaciju projektila 120mm M62P3.

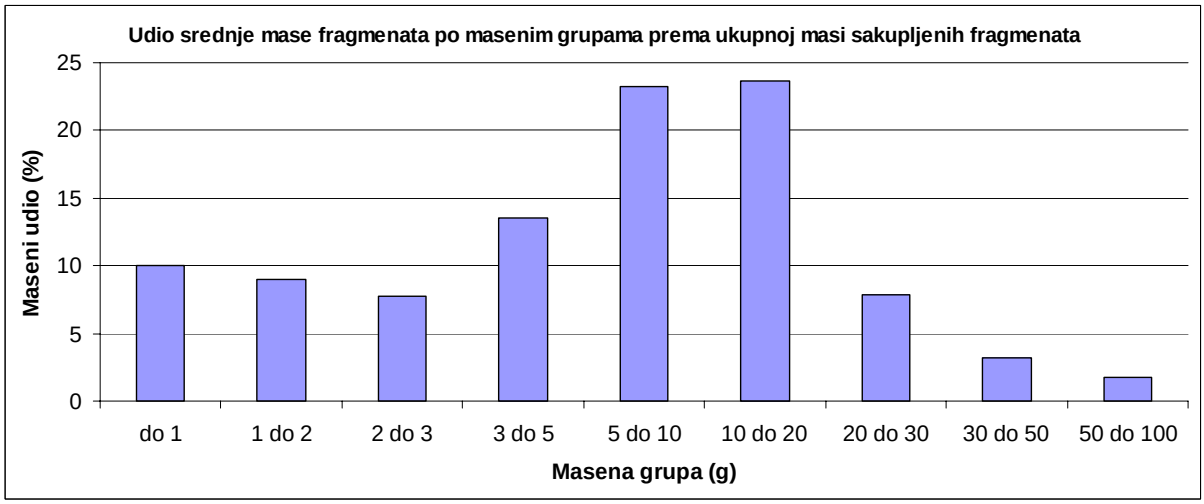
Izvršeni su pit testovi na modelu 120mm M62P3 koji je bio napunjen TNT-om i modelima 120mm W1 i W2, sa dva tipa eksploziva (TNT i Komp. B), te 3 vrste materijala tijela (Č.9180VP, Č.4135VP i Č.1737VP).

Na osnovu eksperimentalnih podataka fragmentacije BG **120mm M62P3** urađena je analiza udjela broja fragmenata po masenim grupama prema ukupnom broju sakupljenih fragmenata i udjela srednje mase fragmenata po masenim grupama prema ukupnoj masi sakupljenih fragmenata (slika 5.3.1.1, slika 5.3.1.2).



Slika 5.3.1.1 Udio broja fragmenata po masenim grupama prema ukupnom broju sakupljenih fragmenata za BG 120mm M62P3 (TNT)

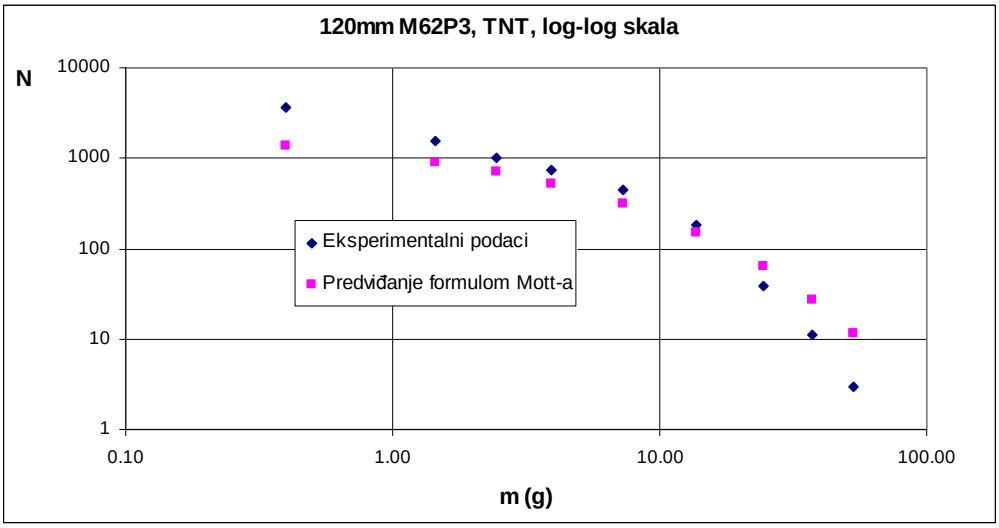
Sa dijagrama na slici 5.3.1.1 može se zaključiti da je kod bojeve glave 120mm M62P3 daleko najveći broj fragmenata mase do 1g (oko 58% od ukupnog broja sakupljenih fragmenata).



Slika 5.3.1.2 Udio srednje mase fragmenata po masenim grupama prema ukupnoj masi sakupljenih fragmenata za BG 120mm M62P3 (TNT)

Slika 5.3.1.2 pokazuje jednu interesantnu činjenicu, a to je da najveći udio u masi sakupljenih fragmenata imaju fragmenti mase 5 do 20 g (oko 47% od ukupne mase fragmenata).

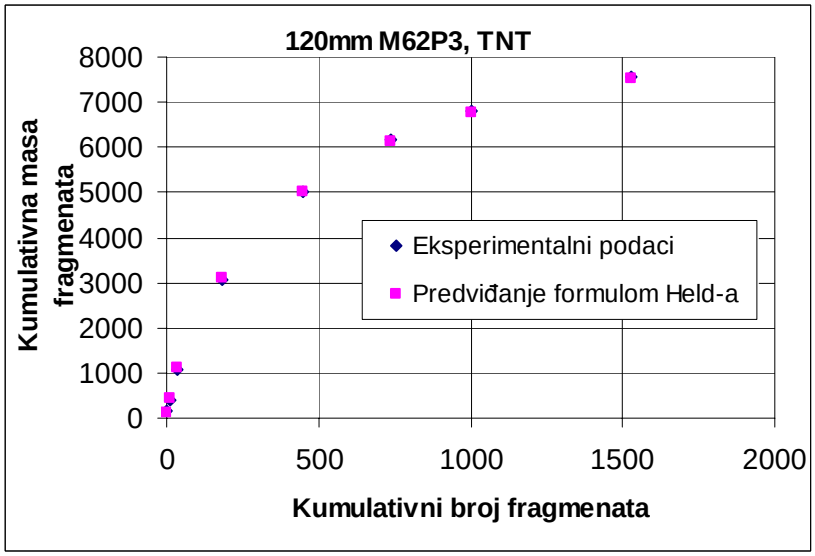
Na slikama 5.3.1.3 - 5.3.1.4 prikazani su dijagrami masene distribucije fragmenata za datu bojevu glavu, dobijeni analizom eksperimentalnih podataka, te koristeći metodologije Mott-a i Held-a.



Slika 5.3.1.3 Dijagram kumulativnog broja fragmenata N u funkciji od srednje mase fragmenta m (120mm M62P3, TNT)

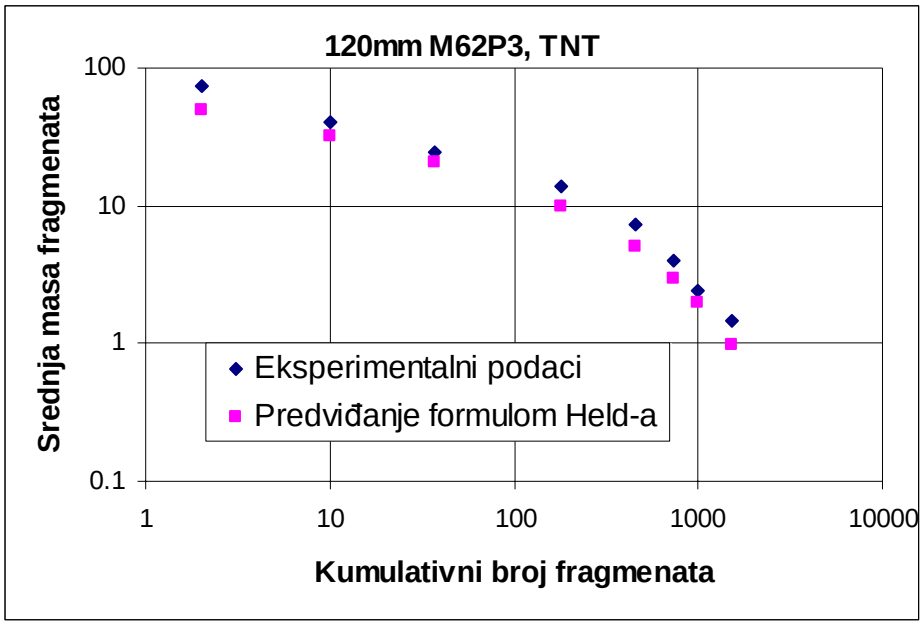
Na slici 5.3.1.3 prikazan je dijagram kumulativnog broja fragmenata u funkciji od srednje mase fragmenata po masenim grupama za projektil 120mm M62P3 (TNT), i to koristeći podatke dobijene eksperimentalnim ispitivanjem (Pit test) i koristeći metodu Mott-a za predviđanje kumulativnog broja fragmenata *N*. Ose koordinatnog sistema prikazane su u logaritamskoj skali. Dijagram na sl. 2 pokazuje da predviđanje kumulativnog broja fragmenata formulom Mott-a pokazuje slabija slaganja sa krivom dobijenom na osnovu eksperimentalnih podataka, posebno za fragmente srednje mase manje od 1g i veće od 50g.

Pokazana slabija slaganja prisutna su zbog toga što nije vršena optimizacija mase fragmenata, i prisutnih gubitaka u masi (uslijed nedovoljno preciznog sakupljanja fragmenata, zato što se dio mase fragmenata pretvorio u sitnu prašinu, itd.)



Slika 5.3.1.4 Dijagram kumulativne mase fragmenata M u zavisnosti od kumulativnog broja fragmenata n (120mm M62P3, TNT)

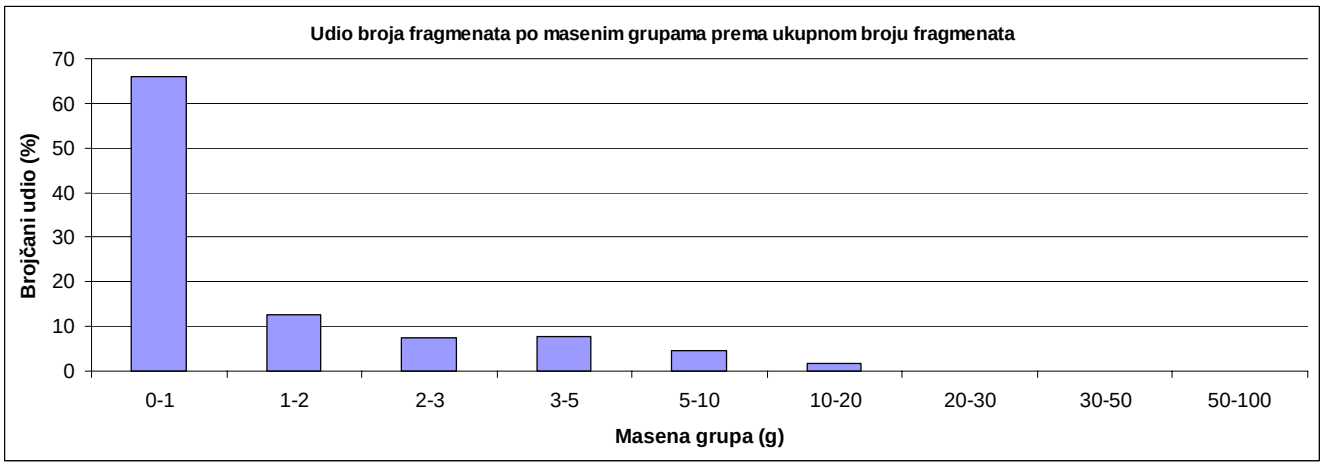
Na slici 5.3.1.4 predstavljen je dijagram kumulativne mase fragmenata u zavisnosti od kumulativnog broja fragmenata za istu bojevu glavu (120mm M62P3). Koordinatne ose dijagrama su u linearnoj skali. Primjećuje se dobro slaganje eksperimentalnih podataka sa predviđanjem kumulativne mase fragmenata metodom Held-a.



Slika 5.3.1.5 Dijagram srednje mase fragmenata u zavisnosti od kumulativnog broja fragmenata n (120mm M62P3, TNT)

Slika 5.3.1.5 sadrži dijagram koji pokazuje funkcionalnu zavisnost srednje mase fragmenata od kumulativnog broja fragmenata za bojevu glavu 120mm M62P3. Koordinatne ose predstavljene su u logaritamskoj skali. Vrijednosti dobijene primjenom metode Held-a pokazuju odstupanja od vrijednosti dobijenih korištenjem eksperimentalnih podataka. Primjetan je isti trend funkcionalne zavisnosti, ali predviđanja srednje mase fragmenata metodom Held-a pokazuju nešto niže vrijednosti srednje mase u odnosu na eksperimentalne podatke.

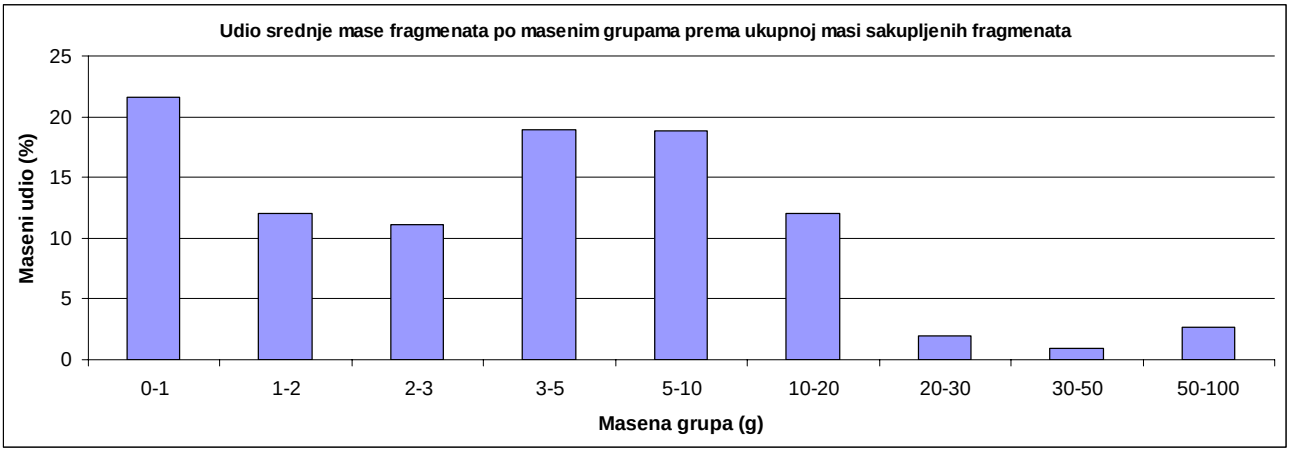
Slijedeći minobacački projektil koji je analiziran je **120mm W1**, napunjen sa TNT-om, dok je materijal tijela bojeve glave Č.9180VP.



Slika 5.3.1.6 Udio broja fragmenata po masenim grupama prema ukupnom broju sakupljenih fragmenata za BG 120mm W1 (TNT, Č.9180VP)

Urađena je analiza udjela broja fragmenata po masenim grupama prema ukupnom broju sakupljenih fragmenata i udjela srednje mase fragmenata po masenim grupama prema ukupnoj masi sakupljenih fragmenata (slika 5.3.1.6, slika 5.3.1.7).

Sa dijagrama na slici 5.3.1.6 može se zaključiti da je kod bojeve glave 120mm W1 (TNT, Č.9180VP) najdominantniji broj fragmenata mase do 1g (oko 66% od ukupnog broja sakupljenih fragmenata).

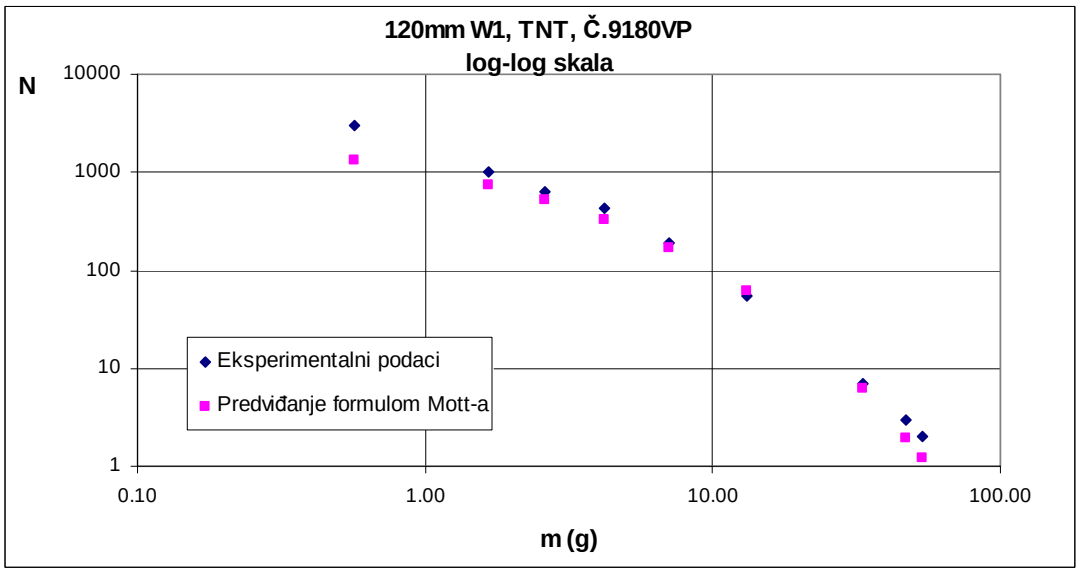


Slika 5.3.1.7 Udio srednje mase fragmenata po masenim grupama prema ukupnoj masi sakupljenih fragmenata za BG 120mm W1 (TNT, Č.9180VP)

Slika 5.3.1.7 pokazuje da najveći udio u masi sakupljenih fragmenata za BG 120mm W1 imaju fragmenti mase do 1 g (oko 22% od ukupne mase fragmenata). Posmatrajući masene grupe fragmenata do 20g može se reći da te masene grupe čine 95% mase sakupljenih fragmenata.

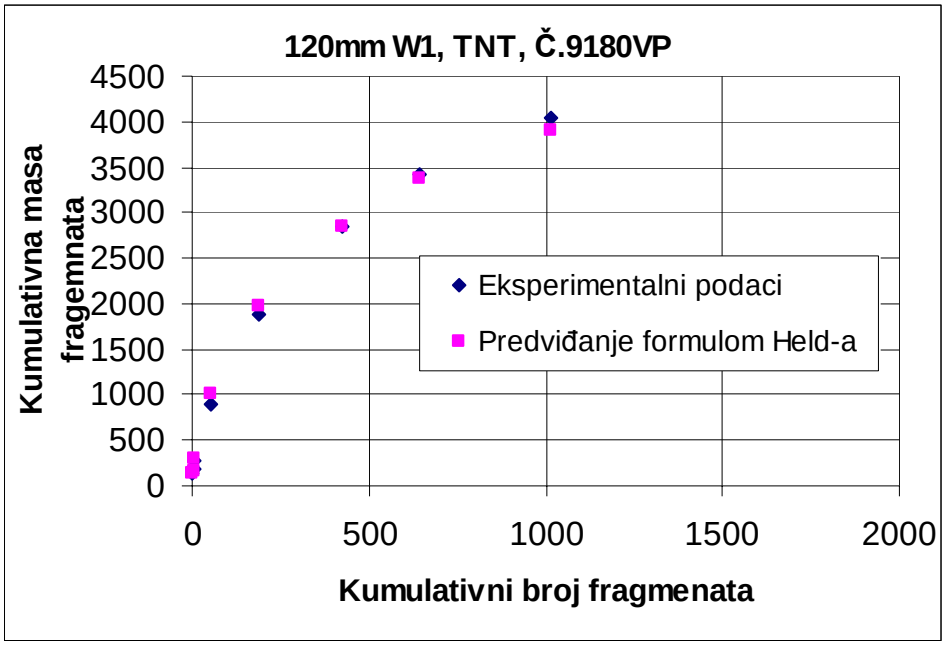
Na slikama 5.3.1.8-5.3.1.10 prikazani su dijagrami masene distribucije fragmenata za bojevu glavu 120mm W1, dobijeni analizom eksperimentalnih podataka, te koristeći metodologije Mott-a i Held-a.

Na slici 5.3.1.8 prikazan je dijagram kumulativnog broja fragmenata u funkciji od srednje mase fragmenata po masenim grupama za projektil 120mm W1 (TNT, Č.9180VP), koristeći podatke dobijene eksperimentalnim ispitivanjem i metodu Mott-a za predviđanje kumulativnog broja fragmenata *N*.



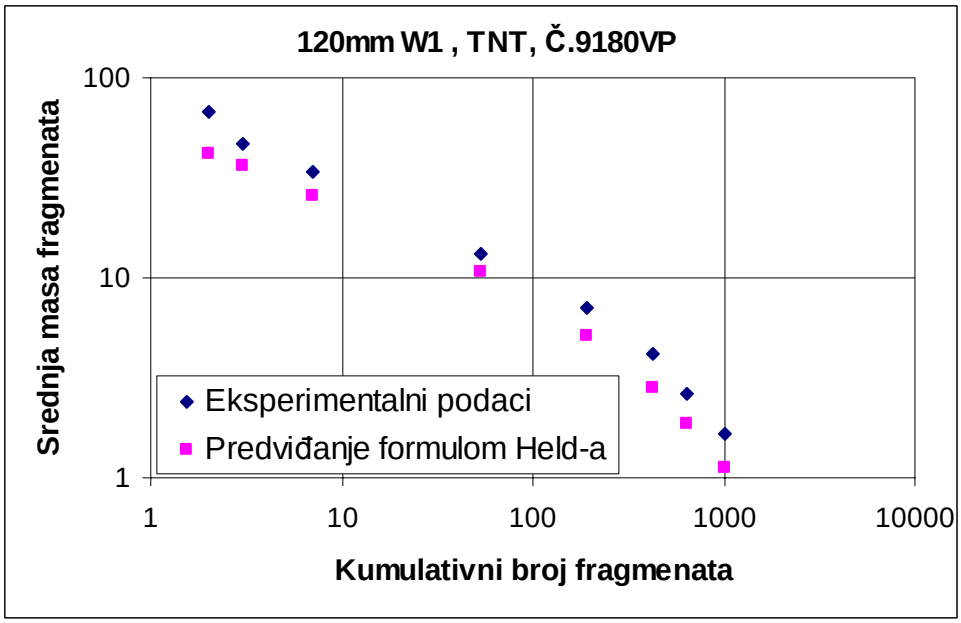
Slika 5.3.1.8 Dijagram kumulativnog broja fragmenata N u funkciji od srednje mase fragmenta m (120mm W1, TNT, Č.9180VP)

Dijagram na sl. 5.3.1.8 pokazuje da predviđanje kumulativnog broja fragmenata formulom Mott-a pokazuje dobra slaganja sa krivom dobijenom na osnovu eksperimentalnih podataka za masene grupe od 2g do 30g, dok se za male mase (<1g) i veće mase (>50g) fragmenata primjećuju odstupanja od eksperimentalnih podataka, tj. dobijaju se niže vrijednosti kumulativnog broja fragmenata.



Slika 5.3.1.9 Dijagram kumulativne mase fragmenata M u zavisnosti od kumulativnog broja fragmenata n (120mm W1, TNT, Č.9180VP)

Na slici 5.3.1.9 predstavljen je dijagram kumulativne mase fragmenata u zavisnosti od kumulativnog broja fragmenata za bojevu glavu 120mm W1 (TNT, Č.9180VP). Primjećuje se dobro slaganje eksperimentalnih podataka sa predviđanjem kumulativne mase fragmenata metodom Held-a za veće kumulativne mase fragmenata. Kod manjih kumulativnih masa fragmenata postoje izvjesna odstupanja od eksperimentalne krive.



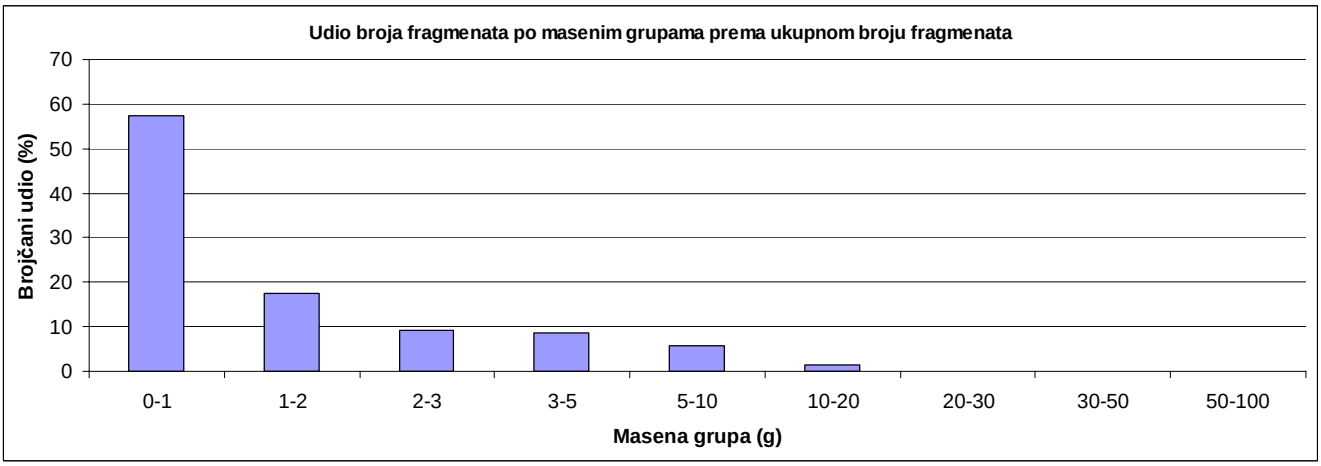
Slika 5.3.1.10 Dijagram srednje mase fragmenata u zavisnosti od kumulativnog broja fragmenata n (120mm W1, TNT, Č.9180VP)

Na slici 5.3.1.10 predstavljen je dijagram srednje mase fragmenata u zavisnosti od kumulativnog broja fragmenata za bojevu glavu 120mm W1 (TNT, Č.9180VP).

Vrijednosti dobijene primjenom metode Held-a pokazuju nešto veća odstupanja od vrijednosti dobijenih korištenjem eksperimentalnih podataka. I u ovom slučaju, kao i kod BG 120mm M62P3, predviđanja srednje mase fragmenata metodom Held-a pokazuju nešto manje vrijednosti srednje mase fragmenata u odnosu na eksperimentalne podatke.

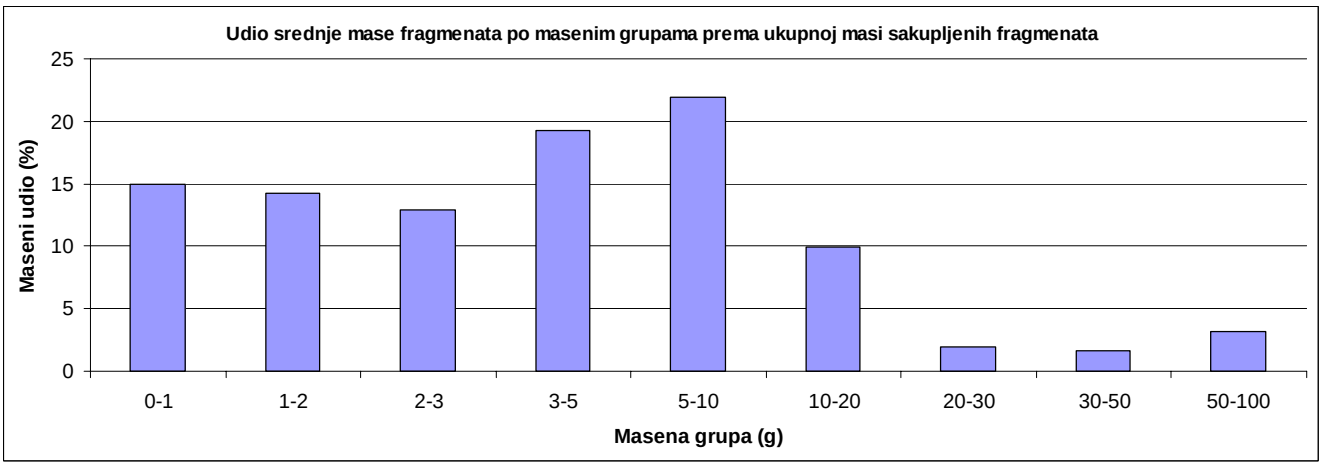
Analizirana je i masena distribucija bojeve glave **120mm W2**, napunjene TNT-om, sa materijalom košuljice Č.9180VP. Ova bojeva glava predstavlja drugu varijantu BG 120mm, sa nešto manjim geometrijskim odnosom *t/d* nego kod varijante 120mm W1.

Na slikama 5.3.1.11 i 5.3.1.12 prikazana je analiza udjela broja fragmenata po masenim grupama prema ukupnom broju sakupljenih fragmenata i udjela srednje mase fragmenata po masenim grupama prema ukupnoj masi sakupljenih fragmenata za BG 120mm W2, sa eksplozivom TNT.



Slika 5.3.1.11Udio broja fragmenata po masenim grupama prema ukupnom broju sakupljenih fragmenata za BG 120mm W2 (TNT, Č.9180VP)

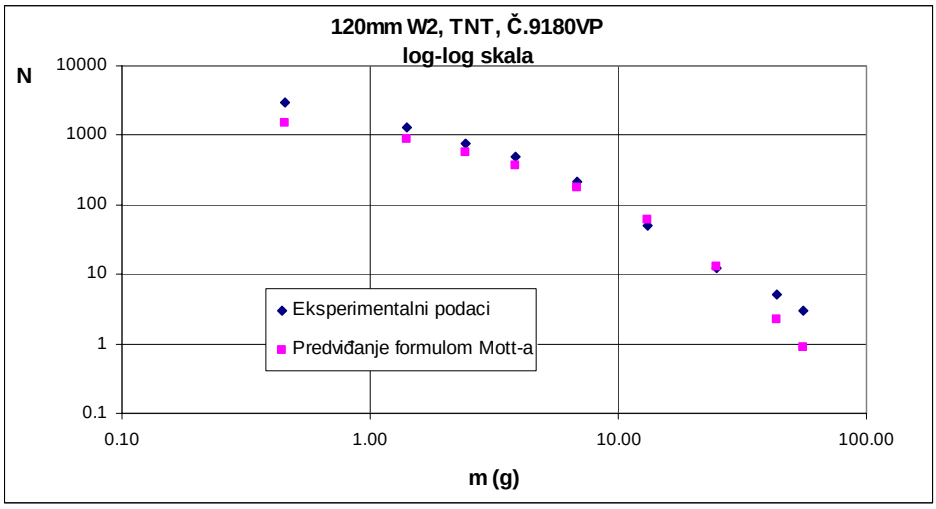
Sa dijagrama na slici 5.3.1.11 može se zaključiti da je kod bojeve glave 120mm W2 (TNT, Č.9180VP) najveći broj fragmenata mase do 1g (oko 57% od ukupnog broja sakupljenih fragmenata). Taj brojčani udio fragmenata opada eksponencijalno kako se povećavaju srednje mase fragmenata.



Slika 5.3.1.12 Udio srednje mase fragmenata po masenim grupama prema ukupnoj masi sakupljenih fragmenata za BG 120mm W2 (TNT, Č.9180VP)

Slika 5.3.1.12 pokazuje da kod BG 120mm W2 (TNT, Č.9180VP) najveći udio u masi sakupljenih fragmenata imaju fragmenti mase 3 do 10g (oko 41% ukupne mase fragmenata). Ovi fragmenti nose oko 15% ukupnog broja fragmenata.

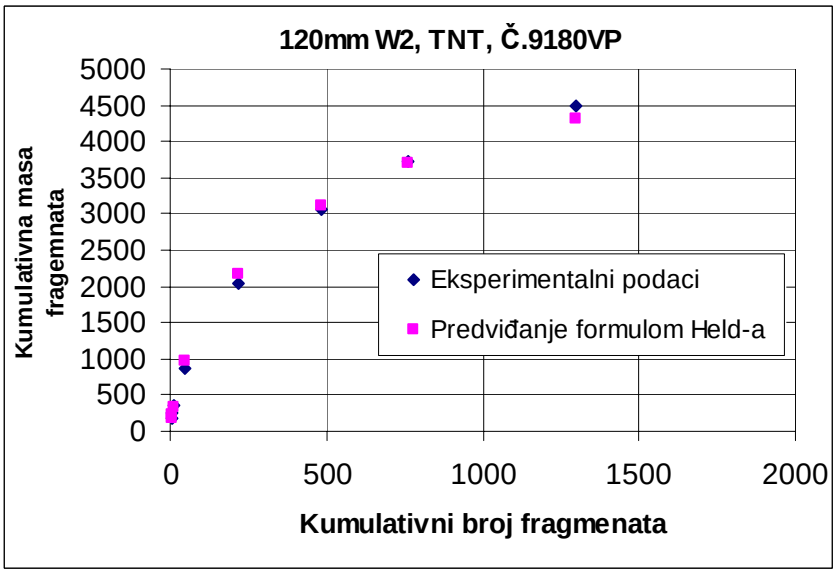
Na slikama 5.3.1.13 i 5.3.1.15 prikazani su dijagrami masene distribucije fragmenata za bojevu glavu 120mm W2, dobijeni analizom eksperimentalnih podataka, te koristeći metodologije Mott-a i Held-a.



Slika 5.3.1.13 Dijagram kumulativnog broja fragmenata N u funkciji od srednje mase fragmenta m (122mm W2, TNT, Č.9180VP)

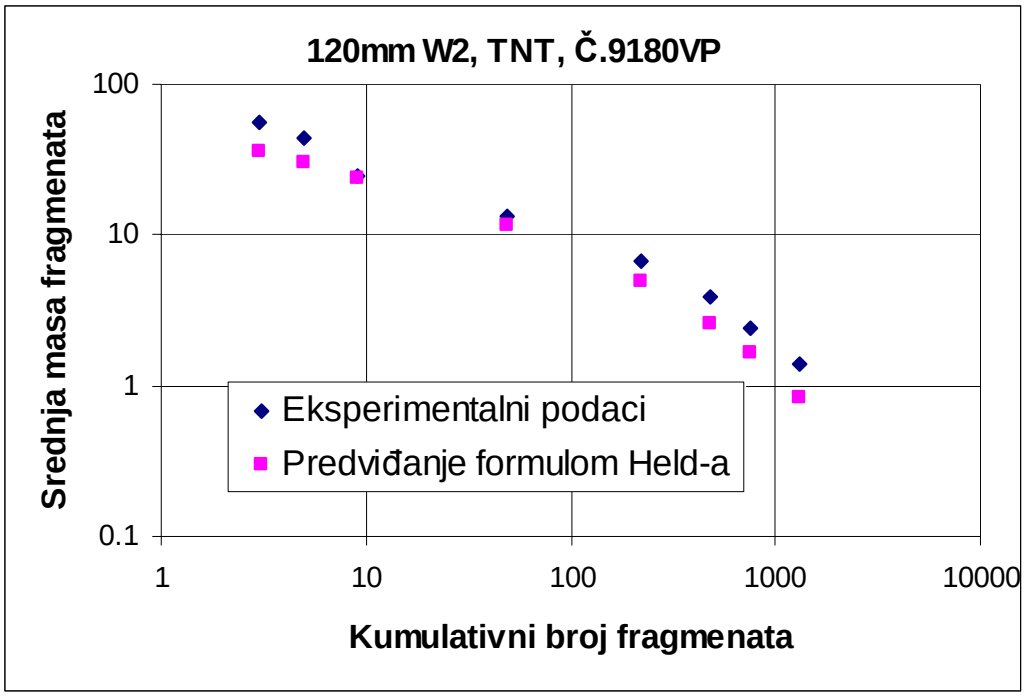
Na slici 5.3.1.13 nalazi se dijagram kumulativnog broja fragmenata u funkciji od srednje mase fragmenata po masenim grupama za projektil 120mm W2 (TNT, Č.9180VP), koristeći podatke dobijene eksperimentalnim ispitivanjem (Pit test) i koristeći metodu Mott-a za predviđanje kumulativnog broja fragmenata *N*.

Može se izvesti zaključak da predviđanje kumulativnog broja fragmenata formulom Mott-a pokazuje dobra slaganja sa krivom dobijenom na osnovu eksperimentalnih podataka za masene grupe od 3g do 20g, dok se za male mase (<1g) i veće mase (>50g) fragmenata primjećuju odstupanja od eksperimentalnih podataka - dobijaju se manje vrijednosti kumulativnog broja fragmenata.



Slika 5.3.1.14 Dijagram kumulativne mase fragmenata M u zavisnosti od kumulativnog broja fragmenata n (120mm W2, TNT, Č.9180VP)

Na slici 5.3.1.14 predstavljen je dijagram kumulativne mase fragmenata u zavisnosti od kumulativnog broja fragmenata za bojevu glavu 120mm W2 (TNT, Č.9180VP). Kod manjih kumulativnih masa fragmenata postoje izvjesna odstupanja od eksperimentalne krive - dobijaju se nešto veće vrijednosti, dok kod većih kumulativnih masa fragmenata formula Held-a daje nešto manje vrijednosti kumulativne mase nego što je slučaj sa eksperimentalnim podacima.



Slika 5.3.1.15 Dijagram srednje mase fragmenata u zavisnosti od kumulativnog broja fragmenata n (120mm W2, TNT, Č.9180VP)

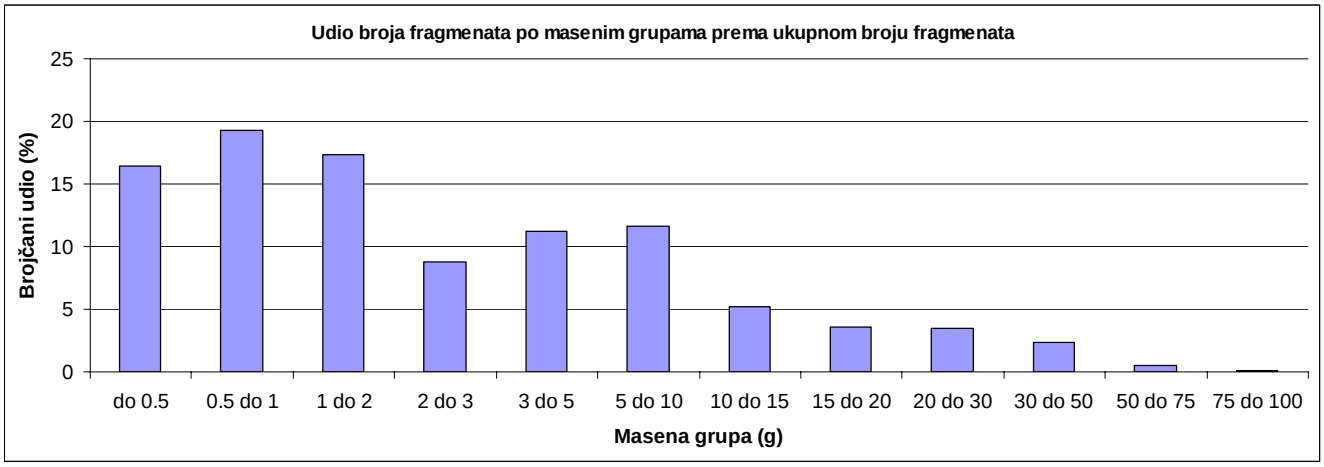
Na slici 5.3.1.15 predstavljen je dijagram srednje mase fragmenata u zavisnosti od kumulativnog broja fragmenata za bojevu glavu 120mm W2 (TNT, Č.9180VP). Vrijednosti dobijene primjenom metode Held-a pokazuju odstupanja od vrijednosti dobijenih korištenjem eksperimentalnih podataka. Predviđanja srednje mase fragmenata metodom Held-a pokazuju nešto manje vrijednosti srednje mase fragmenata u odnosu na eksperimentalne podatke, posebno za najmanje i najveće masene grupe fragmenata.

5.3.2 Predviđanje masene distribucije fragmenata kod artiljerijskih projektila

Izvršena su istraživanja masene distribucije fragmenata za artiljerijske projektile 105mm M1, 122mm OF-462 i 122mm M76 (slika 5.3.1).

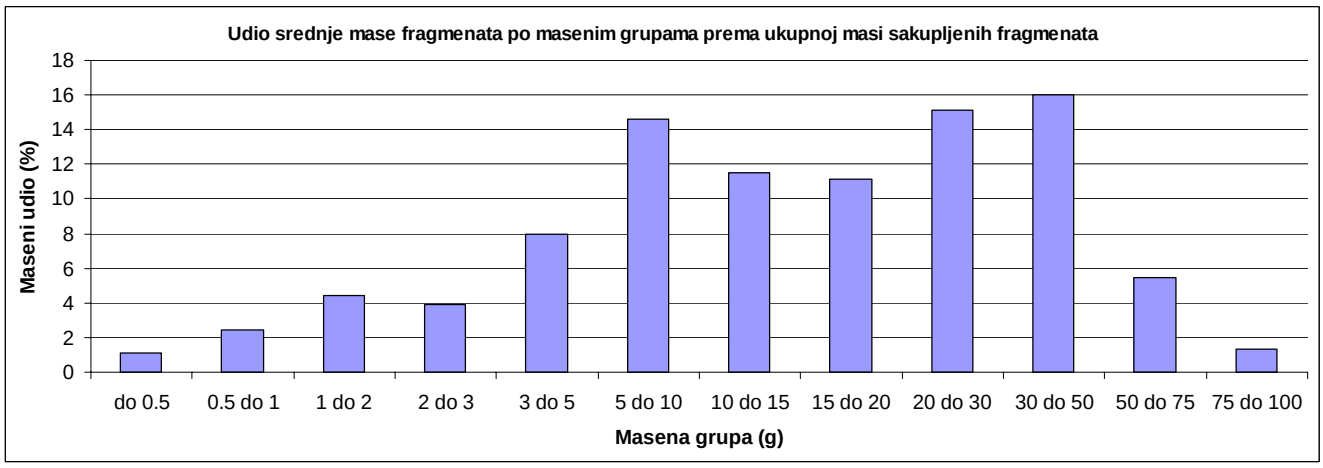
Projektil 105mm M1 je bio napunjen TNT-om, projektil 122mm M76 sa Komp. B, a projektil 122mm OF-462 sa TNT-om. Eksperimentalni podaci dati su u tabeli 5.3.5.

Na osnovu eksperimentalnih podataka fragmentacije projektila **105mm M1** urađena je analiza udjela broja fragmenata po masenim grupama prema ukupnom broju sakupljenih fragmenata i udjela srednje mase fragmenata po masenim grupama prema ukupnoj masi sakupljenih fragmenata (slika 5.3.2.1 i 5.3.2.2).



Slika 5.3.2.1 Udio broja fragmenata po masenim grupama prema ukupnom broju sakupljenih fragmenata za 105mm M1 (TNT)

Dijagram na slici 5.3.2.1 pokazuje da najveći udio u broju fragmenata imaju fragmenti mase do 2g (oko 53% od ukupnog broja fragmenata). Posmatrajući veću grupu fragmenata može se izvući zaključak da fragmenti sa srednjom masom do 10g imaju 85%-tni udio u broju fragmenata u odnosu na ukupan broj sakupljenih fragmenata. Za razliku od minobacačkih projektila kod ovog projektila primjetna je ravnomjernija distribucija udjela broja fragmenata prema masenim grupama.



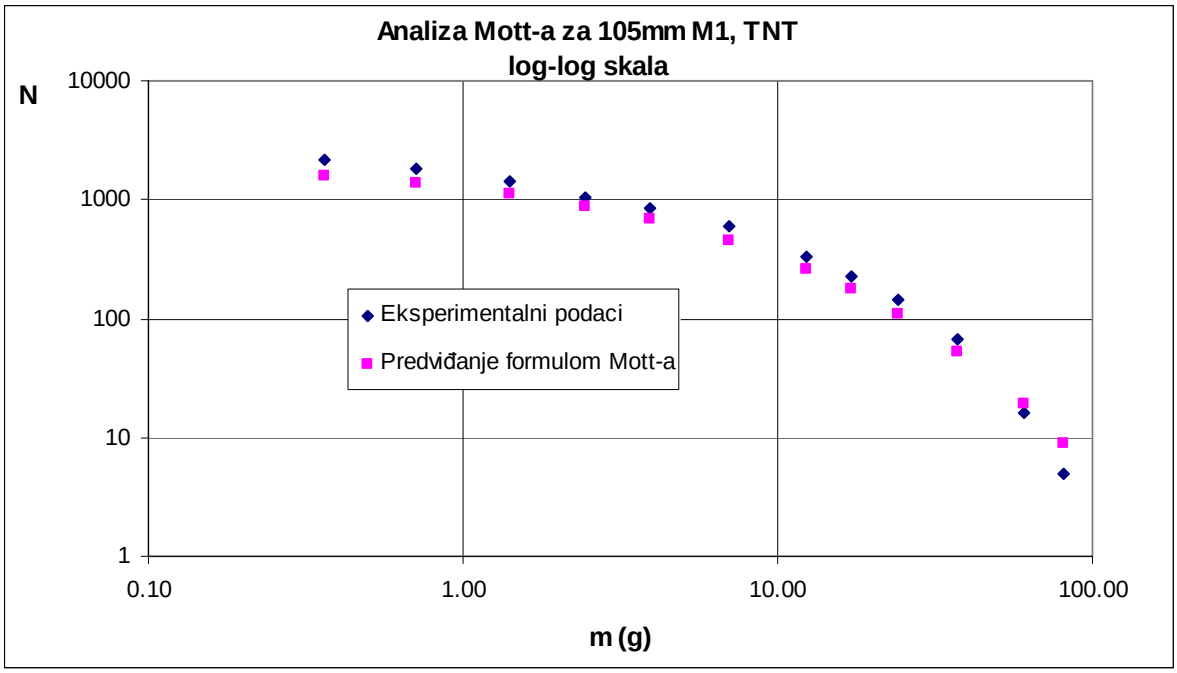
Slika 5.3.2.2 Udio srednje mase fragmenata po masenim grupama prema ukupnoj masi sakupljenih fragmenata za 105mm M1 (TNT)

Slika 5.3.2.2 pokazuje da kod projektila 105mm M1 (TNT) najveći udio u masi sakupljenih fragmenata imaju fragmenti mase od 5 do 50g (oko 68% ukupne mase fragmenata).

I u ovom slučaju može se primjetiti razlika u odnosu na analizirane minobacačke projektile. Artiljerijski projektil 105mm M1 ima veći odnos *t/d* nego minobacački projektili, što znači da tijelo artiljerijskih projektila ima veću debljinu (zbog sigurnosti u cijevi oružja).

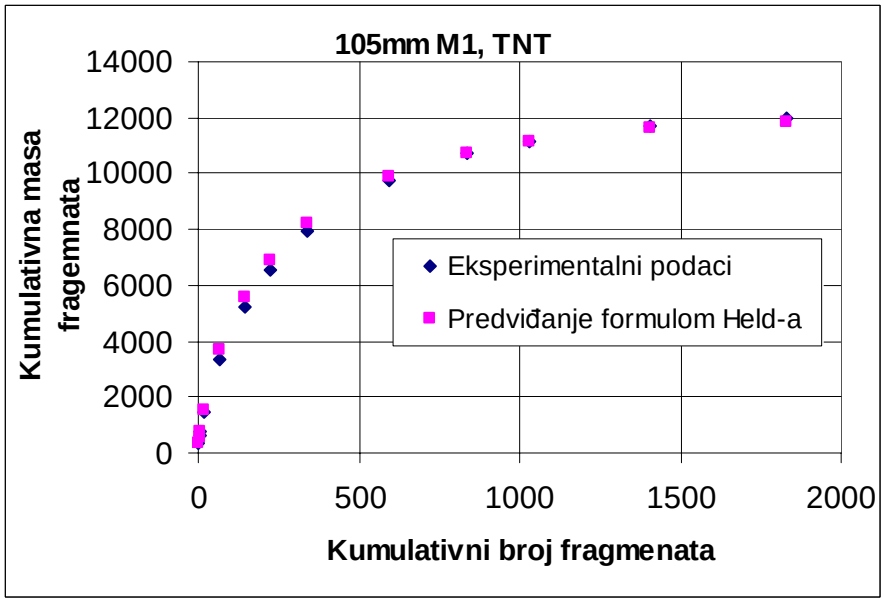
Na slikama 5.3.2.3 - 5.3.2.5 prikazani su dijagrami masene distribucije fragmenata za bojevu glavu 105mm M1, dobijeni analizom eksperimentalnih podataka, te koristeći metodologije Mott-a i Held-a.

Na slici 5.3.2.3 prikazan je dijagram kumulativnog broja fragmenata u funkciji od srednje mase fragmenata po masenim grupama za projektil 105mm M1.



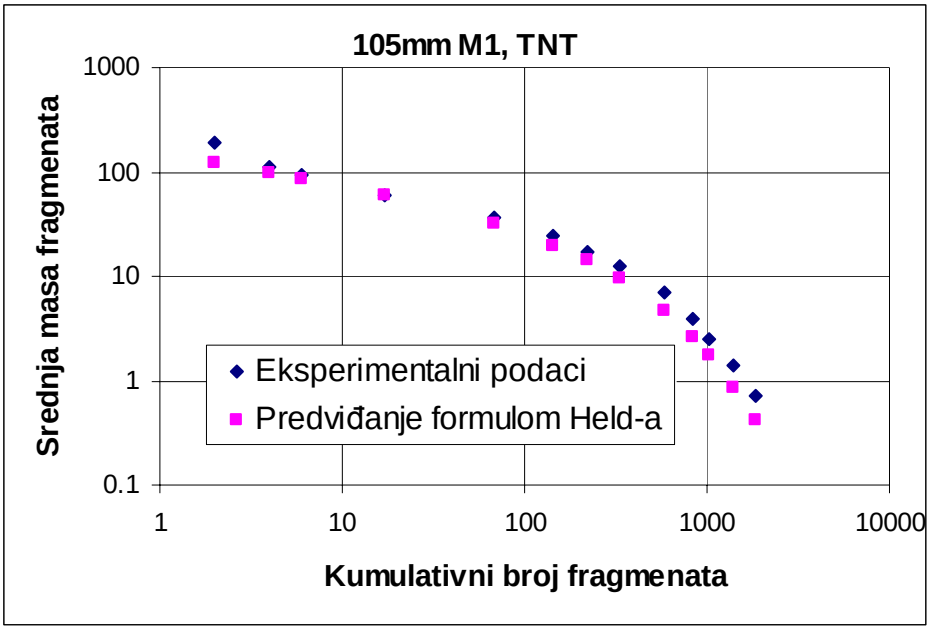
Slika 5.2.2.3 Dijagram kumulativnog broja fragmenata N u funkciji od srednje mase fragmenta m (105mm M1, TNT)

Predviđanje kumulativnog broja fragmenata formulom Mott-a pokazuje odstupanja u odnosu na eksperimentalne podatke. Za fragmente srednje mase do 50g predviđanja metodom Mott-a daju nešto manje vrijednosti kumulativnog broja fragmenata nego što su eksperimentalno dobijene vrijednosti, dok je za fragmente srednje mase veće od 50g to upravo suprotno.



Slika 5.3.2.4. Dijagram kumulativne mase fragmenata M u zavisnosti od Kumulativnog broja fragmenata n (105mm M1, TNT)

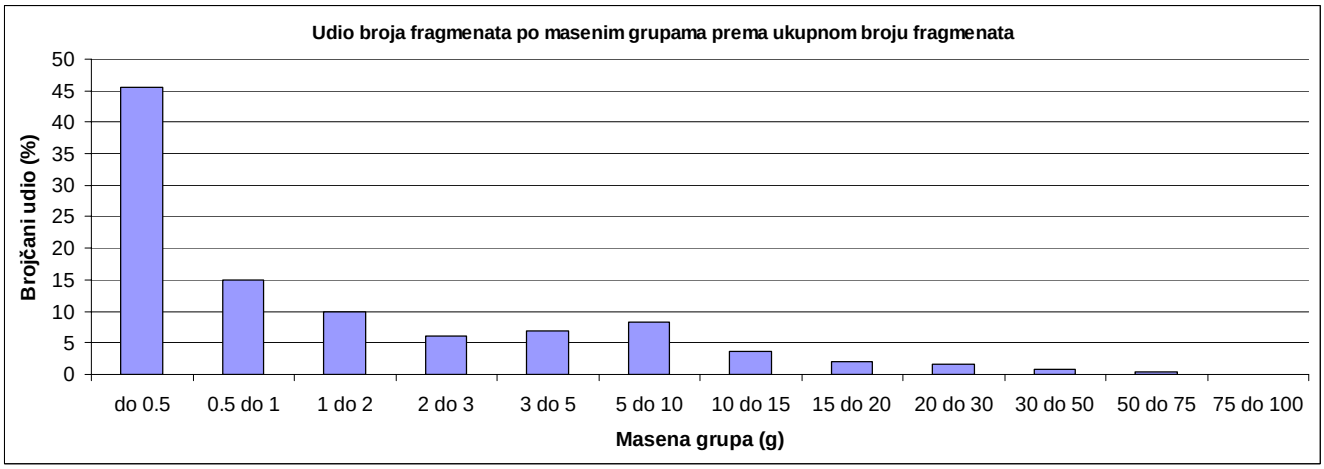
Na slici 5.3.2.4 predstavljen je dijagram kumulativne mase fragmenata u zavisnosti od kumulativnog broja fragmenata za bojevu glavu 105mm M1. Primjećuje se dobro slaganje eksperimentalnih podataka sa predviđanjem kumulativne mase fragmenata metodom Held-a, posebno za veće kumulativne mase fragmenata.



Slika 5.3.2.5 Dijagram srednje mase fragmenata u zavisnosti od kumulativnog broja fragmenata n (105mm M1, TNT)

Na slici 5.3.2.5 predstavljen je dijagram srednje mase fragmenata u zavisnosti od kumulativnog broja fragmenata za bojevu glavu 105mm M1. Vrijednosti dobijene primjenom metode Held-a pokazuju odstupanja od vrijednosti dobijenih korištenjem eksperimentalnih podataka, posebno za masene grupe manje od 5g.

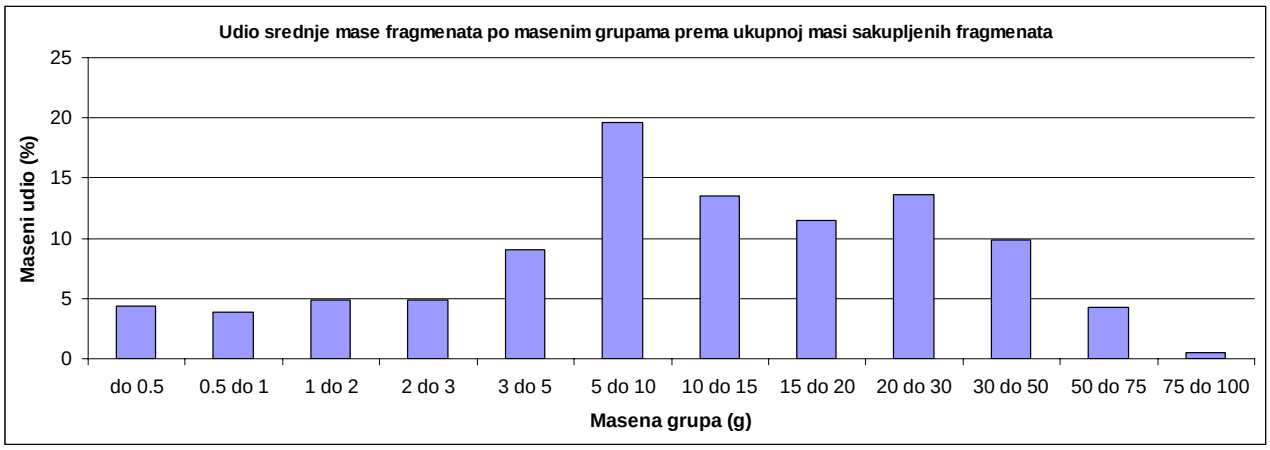
Izvršeno je predviđanje udjela broja fragmenata po masenim grupama prema ukupnom broju sakupljenih fragmenata i udjela srednje mase fragmenata po masenim grupama prema ukupnoj masi sakupljenih fragmenata (slika 5.3.2.6 i 5.3.2.7) za projektil **122mm OF-462**.



Slika 5.3.2.6 Udio broja fragmenata po masenim grupama prema ukupnom broju sakupljenih fragmenata za 122mm OF-462 (TNT)

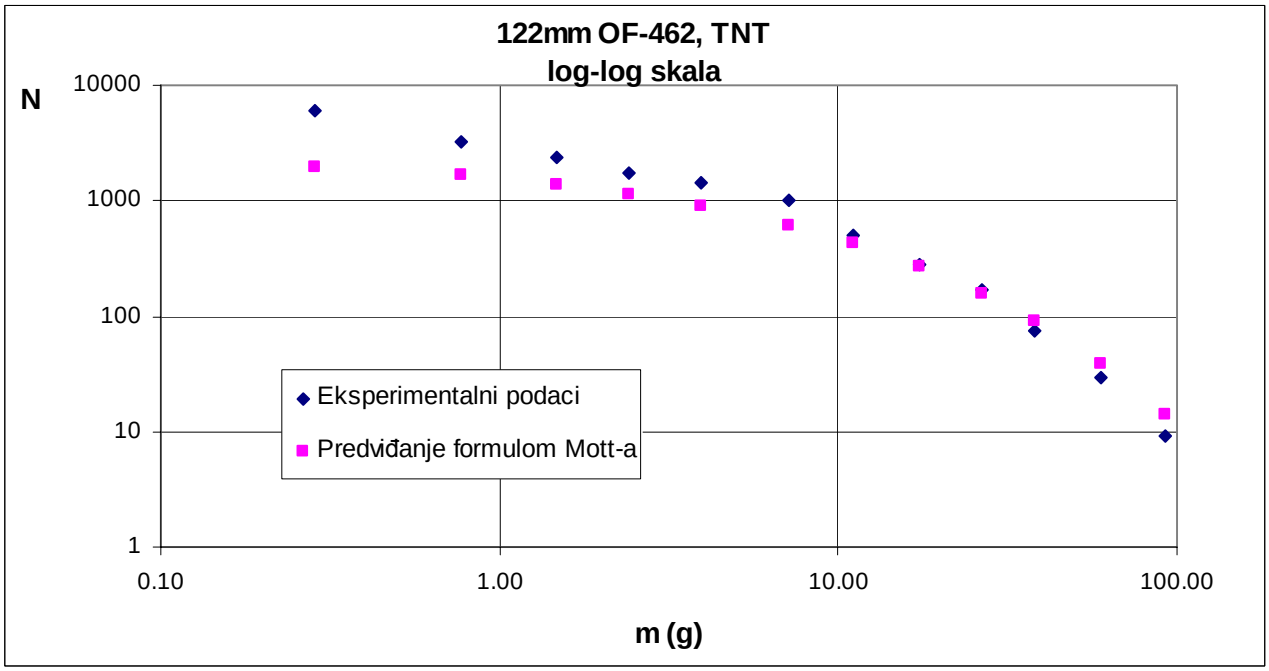
Na slici 5.3.2.6 predstavljen je dijagram koji pokazuje da najveći udio u broju fragmenata imaju fragmenti mase do 0,5g (oko 45,5% od ukupnog broja fragmenata). Primjetna je značajna razlika u distribuciji udjela broja fragmenata u odnosu na projektil 105mm M1 koji ima dosta ravnomjernu raspodjelu za masene grupe do 10g.

Slika 5.3.2.7 pokazuje da kod projektila 122mm OF-462 (TNT) najveći udio u masi sakupljenih fragmenata imaju fragmenti mase od 5 do 10g (oko 20% ukupne mase fragmenata). Fragmenti srednje mase od 3g do 50g čine oko 77% ukupne mase sakupljenih fragmenata.



Slika 5.3.2.7 Udio srednje mase fragmenata po masenim grupama prema ukupnoj masi sakupljenih fragmenata za 122mm OF-462 (TNT)

Na slikama 5.3.2.8 i 5.3.2.9 prikazani su dijagrami masene distribucije fragmenata za bojevu glavu 122mm OF-462, dobijeni analizom eksperimentalnih podataka, te koristeći metodologije Mott-a i Held-a.

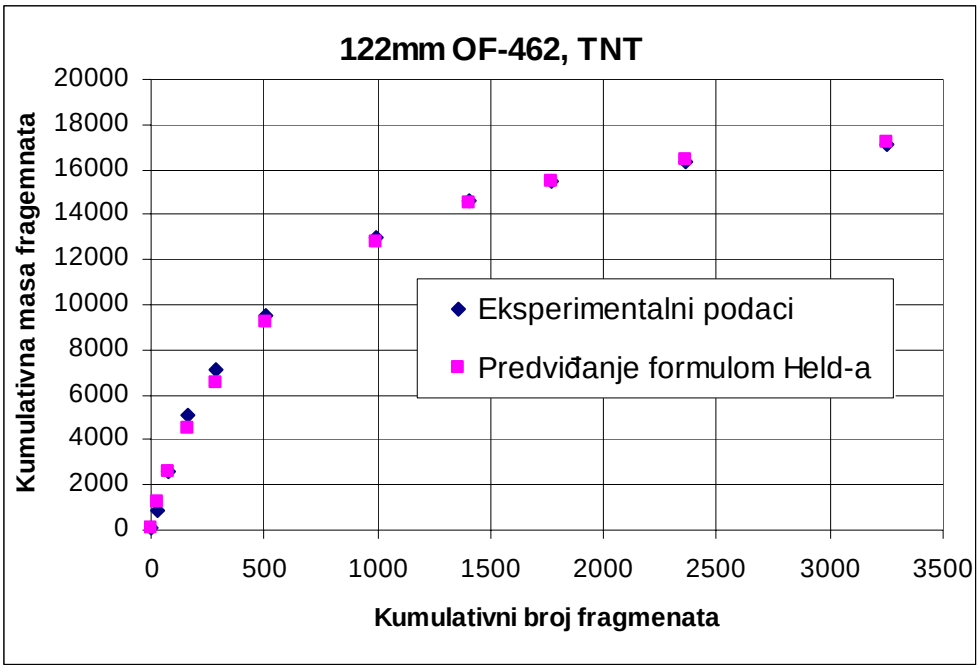


Slika 5.3.2.8 Dijagram kumulativnog broja fragmenata N u funkciji od srednje mase fragmenta m (122mm OF-462, TNT)

Na slici 5.3.2.8 nalazi se dijagram kumulativnog broja fragmenata u funkciji od srednje mase fragmenata po masenim grupama za projektil 122mm OF-462.

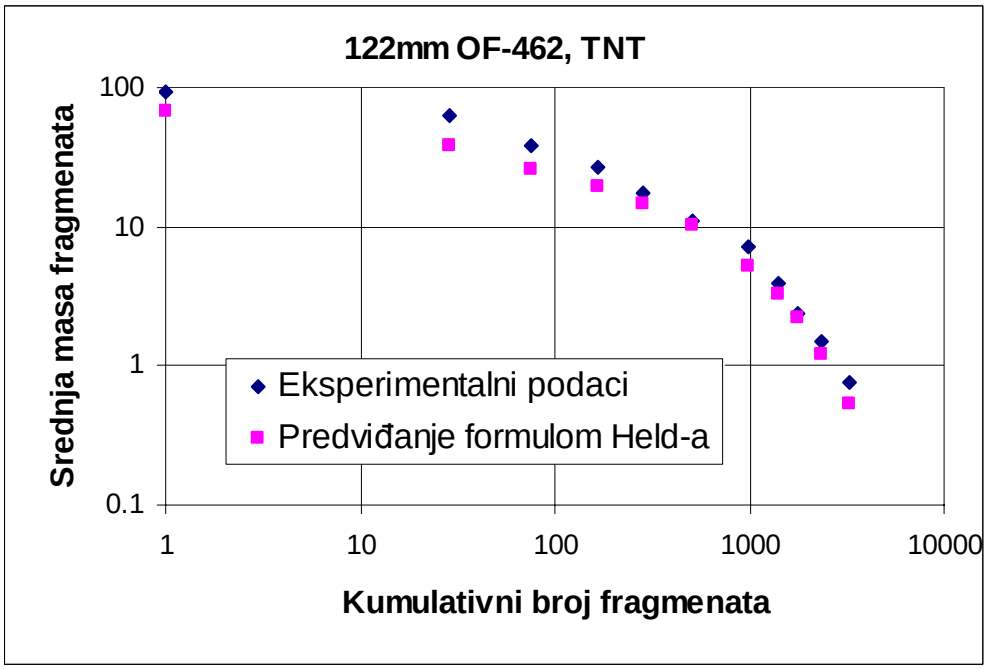
Predviđanje kumulativnog broja fragmenata formulom Mott-a pokazuje veća odstupanja u odnosu na eksperimentalne podatke naročito za masene grupe fragmenata do 10g, što je posljedica neoptimizacije mase fragmenata u ulaznim podacima. Za fragmente srednje mase iznad 10g predviđanja metodom Mott-a daju nešto veće vrijednosti kumulativnog broja fragmenata nego što su eksperimentalno dobijene vrijednosti.

Na slici 5.3.2.9 predstavljen je dijagram kumulativne mase fragmenata u zavisnosti od kumulativnog broja fragmenata za projektil 122mm OF-462. Primjećuje se dobro slaganje eksperimentalnih podataka sa predviđanjem kumulativne mase fragmenata metodom Held-a.



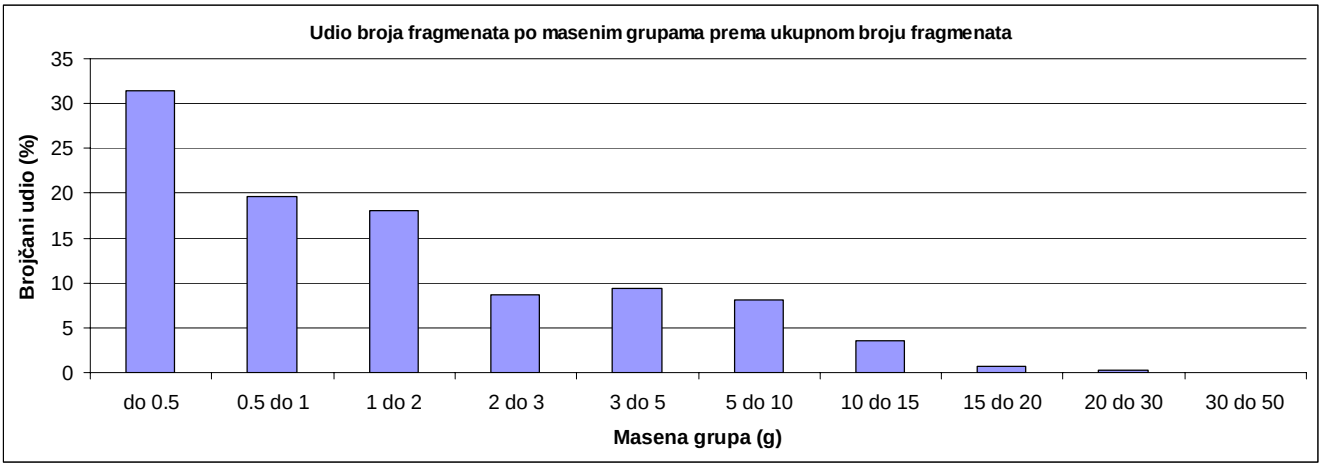
Slika 5.3.2.9 Dijagram kumulativne mase fragmenata M u zavisnosti od kumulativnog broja fragmenata n (122mm OF-462, TNT)

Na slici 5.3.2.10 prikazan je dijagram srednje mase fragmenata u zavisnosti od kumulativnog broja fragmenata za projektil 122mm OF-462. Vrijednosti dobijene primjenom metode Held-a pokazuju odstupanja od vrijednosti dobijenih korištenjem eksperimentalnih podataka, posebno za masene grupe veće od 10g, dok je za manje masene grupe (< 10g) primjetno dobro slaganje sa eksperimentalnim podacima.



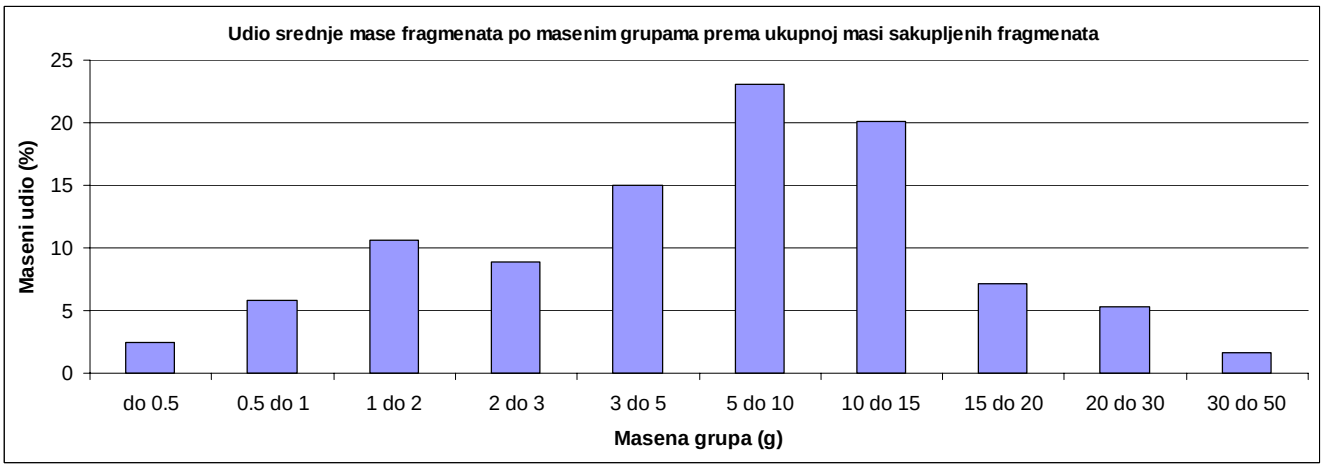
Slika 5.3.2.10 Dijagram srednje mase fragmenata u zavisnosti od kumulativnog broja fragmenata n (122mm OF-462, TNT)

Izvršeno je predviđanje udjela broja fragmenata po masenim grupama prema ukupnom broju sakupljenih fragmenata i udjela srednje mase fragmenata po masenim grupama prema ukupnoj masi sakupljenih fragmenata (slika 5.3.2.11 i 5.3.2.12) i za projektil **122mm M76**, sa eksplozivnim punjenjem Kompozicija B.



Slika 5.3.2.11 Udio broja fragmenata po masenim grupama prema ukupnom broju sakupljenih fragmenata za 122mm M76 (Komp. B)

Na slici 5.3.2.11 predstavljen je dijagram udjela broja fragmenata po masenim grupama prema ukupnom broju sakupljenih fragmenata za projektil 122mm M76 (Komp. B). Za razliku od projektila 122mm OF-462, projektil 122mm M76 ima ravnomjerniju distribuciju udjela broja fragmenata za masene grupe do 10g. Tako je dominantan uticaj masene grupe do 0,5g (oko 31,5% od ukupnog broja fragmenata), a fragmenti mase manje od 10g čine oko 95% ukupnog broja sakupljenih fragmenata.

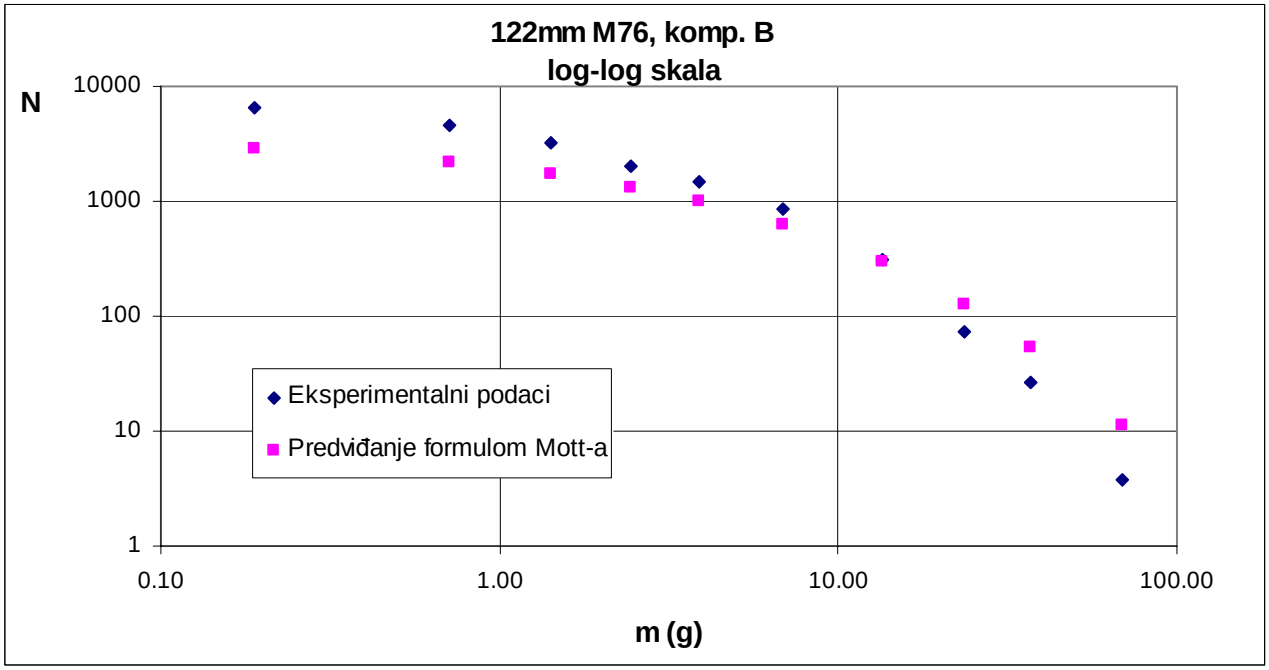


Slika 5.3.2.12 Udio srednje mase fragmenata po masenim grupama prema ukupnoj masi sakupljenih fragmenata za 122mm M76 (Komp. B)

Veoma interesantan dijagram udjela srednje mase fragmenata po masenim grupama prema ukupnoj masi sakupljenih fragmenata za projektil 122mm M76 (Komp. B) na slici 5.3.2.12 podsjeća na Gausovu distribuciju, sa centralnim dijelom u području masene grupe od 5 - 10g. Upravo fragmenti ove masene grupe čine najveći dio sakupljene mase fragmenata (oko 23% ukupne mase fragmenata), međutim njihov broj je relativno mali (oko 8% ukupnog broja fragmenata).

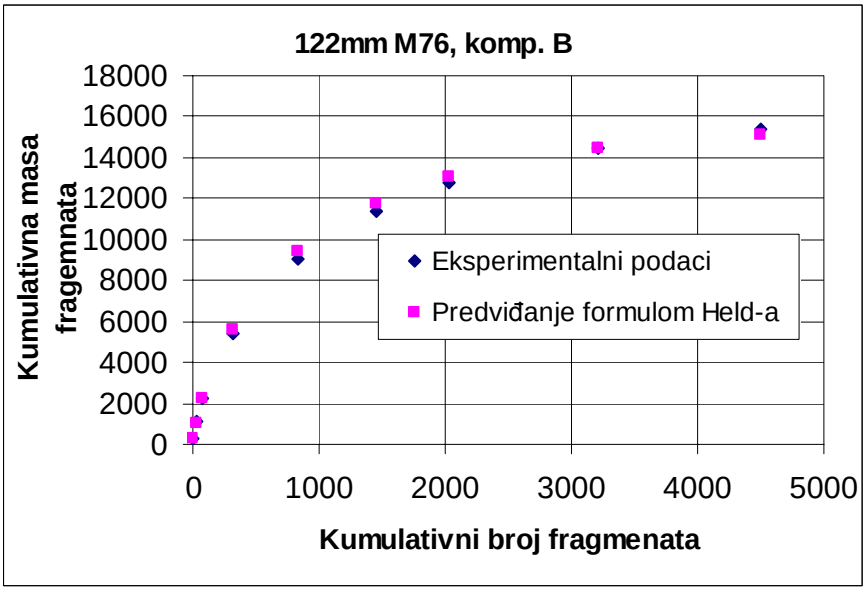
Na slikama 5.3.2.13 i 5.3.2.15 prikazani su dijagrami masene distribucije fragmenata za bojevu glavu 122mm M76, dobijeni analizom eksperimentalnih podataka, te koristeći metodologije Mott-a i Held-a.

Na slici 5.3.2.13 nalazi se dijagram kumulativnog broja fragmenata u funkciji od srednje mase fragmenata po masenim grupama za projektil 122mm M76.



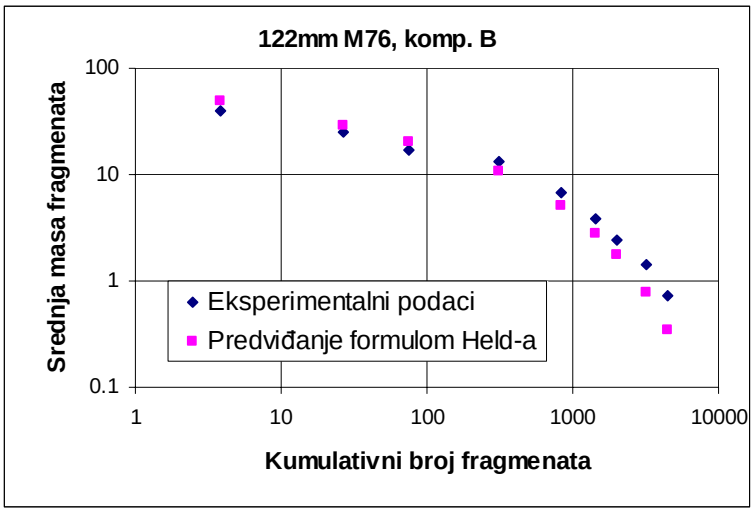
Slika 5.3.2.13 Dijagram kumulativnog broja fragmenata N u funkciji od srednje mase fragmenta m (122mm M76, Komp. B)

Predviđanje kumulativnog broja fragmenata za projektil 122mm M76 formulom Mott-a pokazuje odstupanja u odnosu na eksperimentalne podatke. Za srednje mase fragmenata manje od 20g predviđanje kumulativnog broja fragmenata formulom Mott-a daje manje vrijednosti nego eksperimentalni podaci, a za mase fragmenata veće od 20g predviđanje formulom Mott-a daje nešto veće vrijednosti.



Slika 5.3.2.14 Dijagram kumulativne mase fragmenata M u zavisnosti od kumulativnog broja fragmenata n (122mm M76, Komp. B)

Na slici 5.3.2.14 predstavljen je dijagram kum. mase fragmenata u zavisnosti od kum. broja fragmenata za projektil 122mm M76. Primjećuje se dobro slaganje eksperimentalnih podataka sa predviđanjem kumulativne mase fragmenata metodom Held-a, posebno za veći kumulativni broj fragmenata.



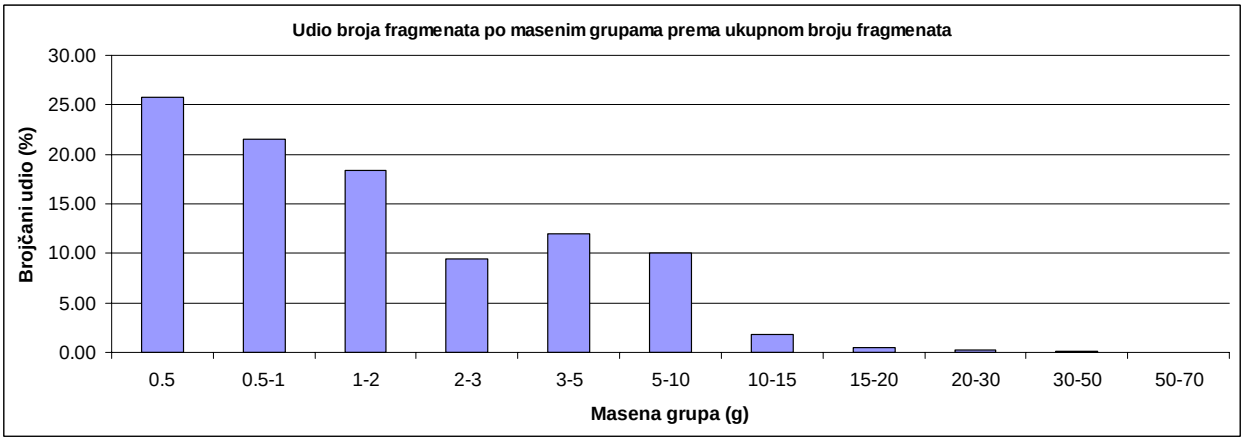
Slika 5.3.2.15 Dijagram srednje mase fragmenata u zavisnosti od kumulativnog broja fragmenata n (122mm M76, Komp. B)

Na slici 5.3.2.15 prikazan je dijagram srednje mase fragmenata u zavisnosti od kumulativnog broja fragmenata za projektil 122mm M76. Vrijednosti dobijene primjenom metode Held-a pokazuju odstupanja (manje vrijednosti) od vrijednosti dobijenih korištenjem eksperimentalnih podataka, posebno za masene grupe manje od 10g, dok je za veće masene grupe primjetno bolje slaganje sa eksperimentalnim podacima, sa trendom pokazivanja nešto većih vrijednosti srednje mase fragmenata korištenjem metode Held-a.

5.3.3 Predviđanje masene distribucije fragmenata kod bojevih glava raketnih projektila

Izvršena su istraživanja masene distribucije fragmenata za bojeve glave raketnih projektila 128mm M63 i 128mm M87 (slika 5.3.1). Pit testovi izvršeni su na bojevoj glavi 128mm M63, napunjenoj TNT-om, dok je BG 128mm M87 ispitana sa dva tipa eksploziva, TNT i Komp. B.

Na osnovu eksperimentalnih podataka fragmentacije BG raketnog projektila **128mm M63 (TNT)** urađena je analiza udjela broja fragmenata po masenim grupama prema ukupnom broju sakupljenih fragmenata i udjela srednje mase fragmenata po masenim grupama prema ukupnoj masi sakupljenih fragmenata (slika 5.3.3.1, slika 5.3.3.2).

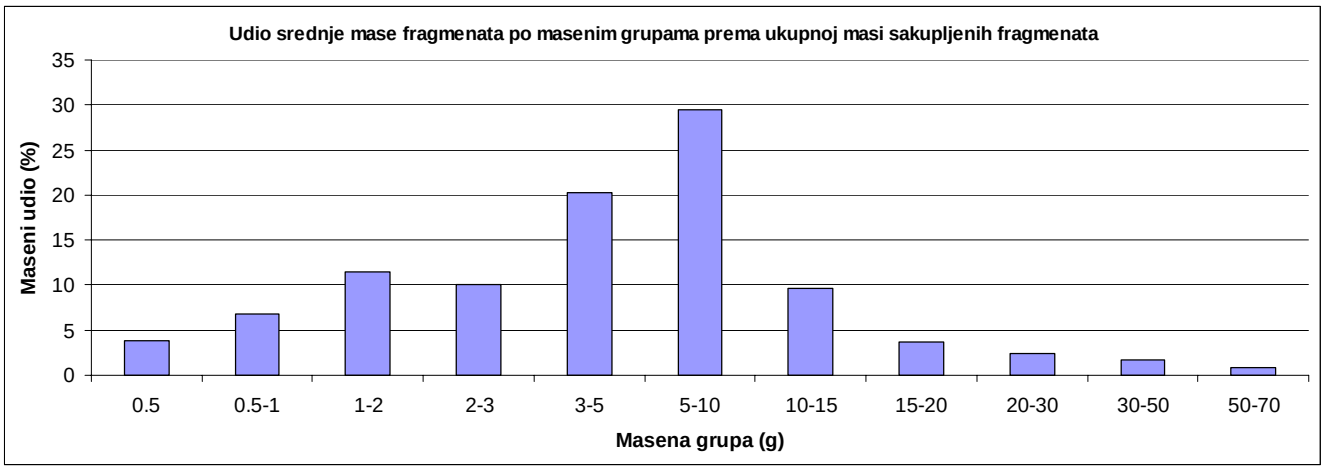


Slika 5.3.3.1 Udio broja fragmenata po masenim grupama prema ukupnom broju sakupljenih fragmenata za 128mm M63 (TNT)

Dijagram na slici 5.3.3.1 pokazuje dosta ravnomjeran raspored udjela broja fragmenata za masene grupe do 10g. Ove masene grupe zajedno čine oko 97% ukupnog broja fragmenata.

Dijagram udjela srednje mase fragmenata po masenim grupama prema ukupnoj masi sakupljenih fragmenata za BG 128mm M63 (TNT) na slici 5.3.3.2 ima oblik Gausove raspodjele, sa centralnim dijelom za masenu grupu od 5-10g. Ova masena grupa čini oko 30% mase sakupljenih fragmenata. Slijedeća grupa fragmenata sa izraženim masenim uticajem su fragmenti srednje mase 3-5g, koji čine oko 20% ukupne mase fragmenata.

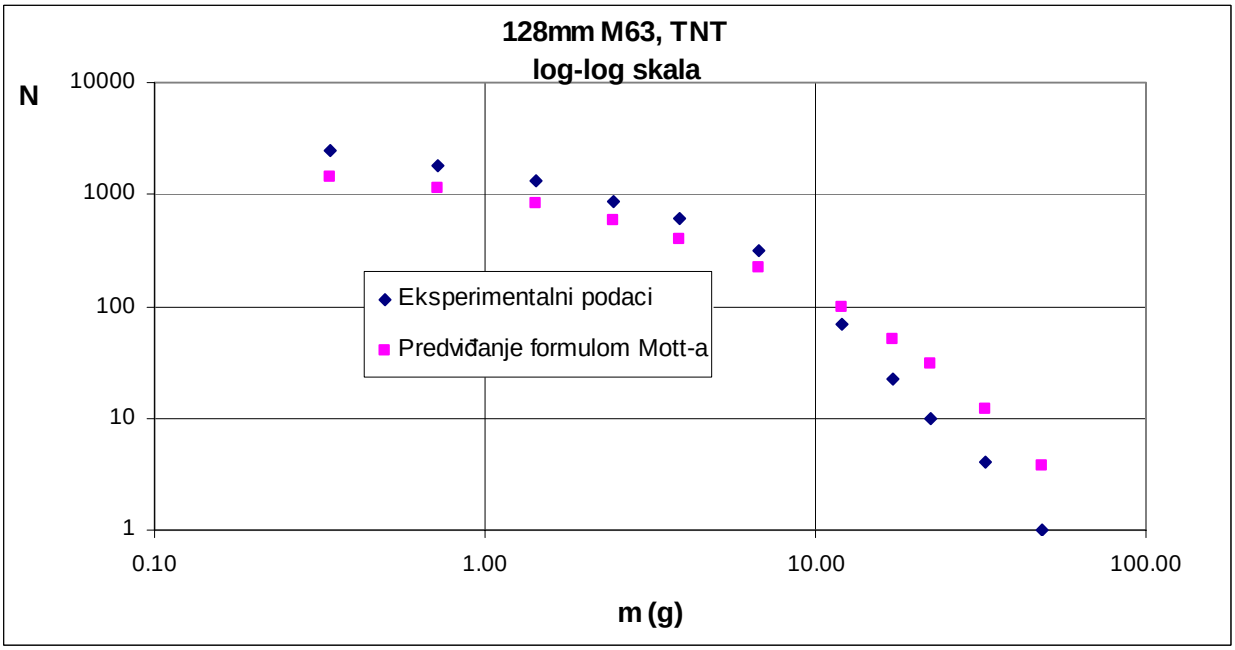
Svi manji fragmenti, srednje mase do 2-3g, čine oko 31% mase fragmenata.



Slika 5.3.3.2 Udio srednje mase fragmenata po masenim grupama prema ukupnoj masi sakupljenih fragmenata za 128mm M63 (TNT)

Na slikama 5.3.3.3 - 5.3.3.4 prikazani su dijagrami masene distribucije fragmenata za bojevu glavu raketnog projektila 128mm M63, napunjenu TNT-om, dobijeni analizom eksperimentalnih podataka, te koristeći metodologije Mott-a i Held-a.

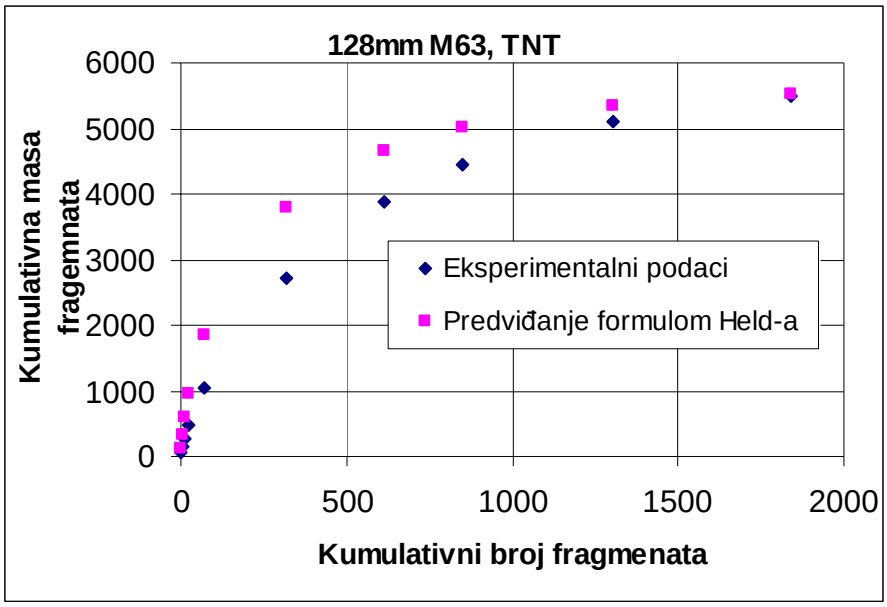
Na slici 5.3.3.3 je dijagram kumulativnog broja fragmenata u funkciji od srednje mase fragmenata po masenim grupama za BG 128mm M63.



Slika 5.3.3.3 Dijagram kumulativnog broja fragmenata N u funkciji od srednje mase fragmenta m (128mm M63, TNT)

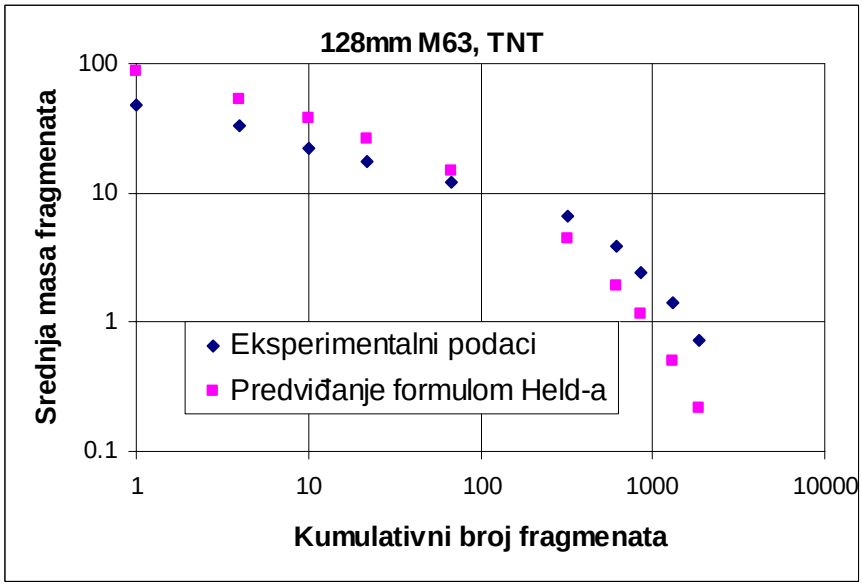
Predviđanje kumulativnog broja fragmenata *N* za BG 128mm M63 formulom Mott-a (slika 5.3.3.3) pokazuje značajna odstupanja u odnosu na eksperimentalne podatke. Za srednje mase fragmenata manje od 10g predviđanje kumulativnog broja fragmenata formulom Mott-a daje manje vrijednosti nego eksperimentalni podaci, a za mase fragmenata veće od 10g predviđanje formulom Mott-a daje veće vrijednosti.

Metoda izdvajanja metalnih fragmenata je uzrokovala da je izgubljen veliki dio izuzetno malih fragmenata.



Slika 5.3.3.5 Dijagram kumulativne mase fragmenata M u zavisnosti od kumulativnog broja fragmenata n (128mm M63, TNT)

Na slici 5.3.3.5 predstavljen je dijagram kumulativne mase fragmenata u zavisnosti od kumulativnog broja fragmenata za BG 128mm M63. Ovaj dijagram pokazuje izrazito loše slaganje eksperimentalnih podataka sa predviđanjem kumulativne mase fragmenata metodom Held-a.



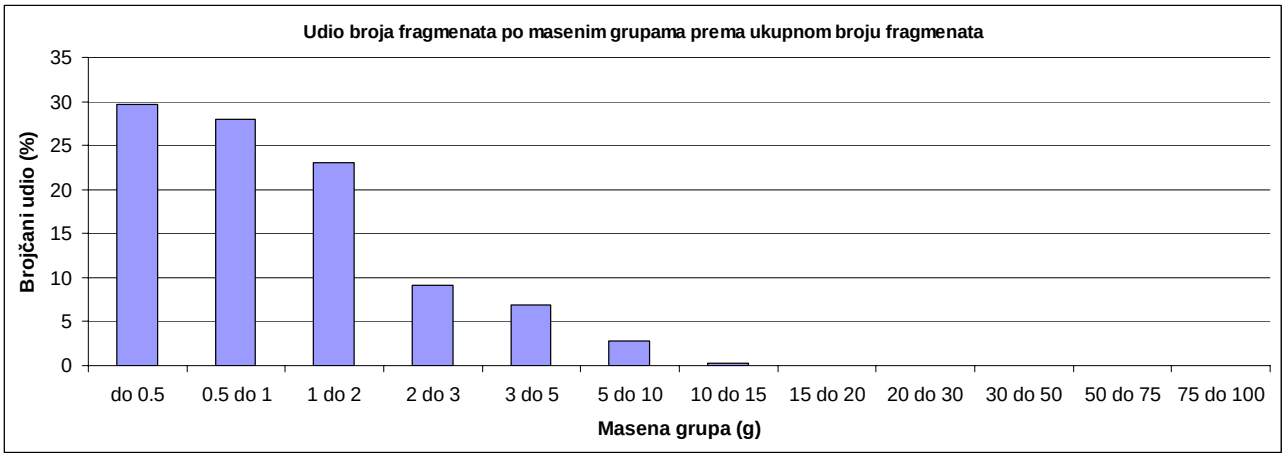
Slika 5.3.3.6 Dijagram srednje mase fragmenata u zavisnosti od kumulativnog broja fragmenata n (128mm M63, TNT)

Na slici 5.3.3.6 prikazan je dijagram srednje mase fragmenata u zavisnosti od kumulativnog broja fragmenata za BG 128mm M63. Vrijednosti dobijene primjenom metode Held-a pokazuju odstupanja od vrijednosti dobijenih korištenjem eksperimentalnih podataka. Tako se korištenjem metode Held-a za srednje mase fragmenata manje od 10g dobijaju manje vrijednosti nego eksperimentalne, a za mase veće od 10g dobijaju se veće vrijednosti.

Urađena je analiza masene distribucije za bojevu glavu raketnog projektila **128mm M87**, koji predstavlja modifikovanu i poboljšanu verziju projektila 128mm M63. Ispitivane su dvije varijante BG 128mm M87, jedna sa TNT-om i druga sa Komp. B.

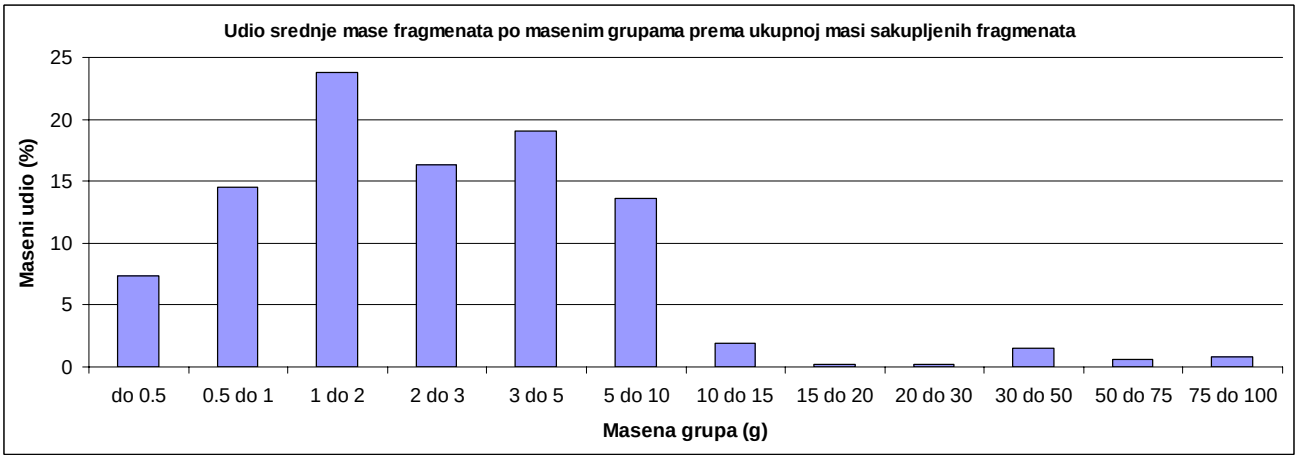
Na osnovu eksperimentalnih podataka fragmentacije BG raketnog projektila **128mm M87 (TNT)** urađena je analiza udjela broja fragmenata po masenim grupama prema ukupnom broju sakupljenih fragmenata i udjela srednje mase fragmenata po masenim grupama prema ukupnoj masi sakupljenih fragmenata (slika 5.3.3.7, slika 5.3.3.8).

Na slici 5.3.3.7 predstavljen je dijagram udjela broja fragmenata po masenim grupama prema ukupnom broju sakupljenih fragmenata za BG 128mm M87 (TNT). Može se zaključiti da najveći broj fragmenata potiče iz masene grupe do 0,5g (oko 30% svih fragmenata). Takođe, primjećuje se da fragmenti manjih masa (< 2g) čine generalno najbrojniju skupinu, i njihov brojčani udio je oko 80% svih sakupljenih fragmenata.



Slika 5.3.3.7 Udio broja fragmenata po masenim grupama prema ukupnom broju sakupljenih fragmenata za 128mm M87 (TNT)

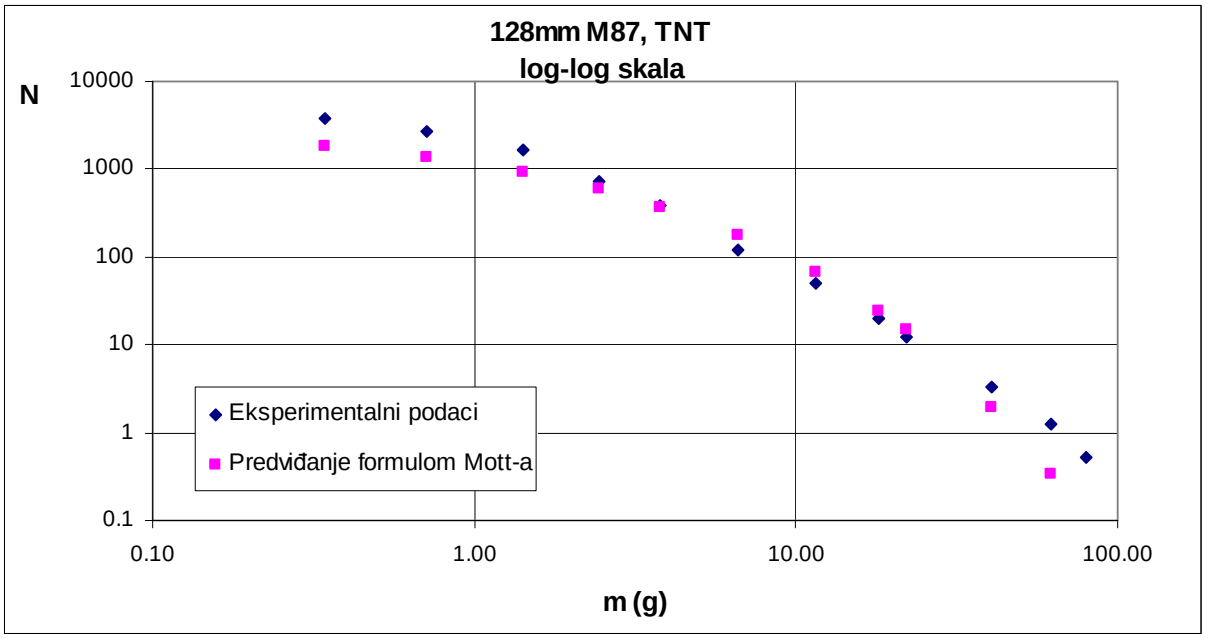
Dijagram udjela srednje mase fragmenata po masenim grupama prema ukupnoj masi sakupljenih fragmenata za BG 128mm M87 (TNT) na slici 5.3.3.8 pokazuje da je dominantan maseni uticaj fragmenata srednje mase 1-2g (oko 23% ukupne mase fragmenata).



Slika 5.3.3.8 Udio srednje mase fragmenata prema ukupnoj masi fragmenata za 128mm M87 (TNT)

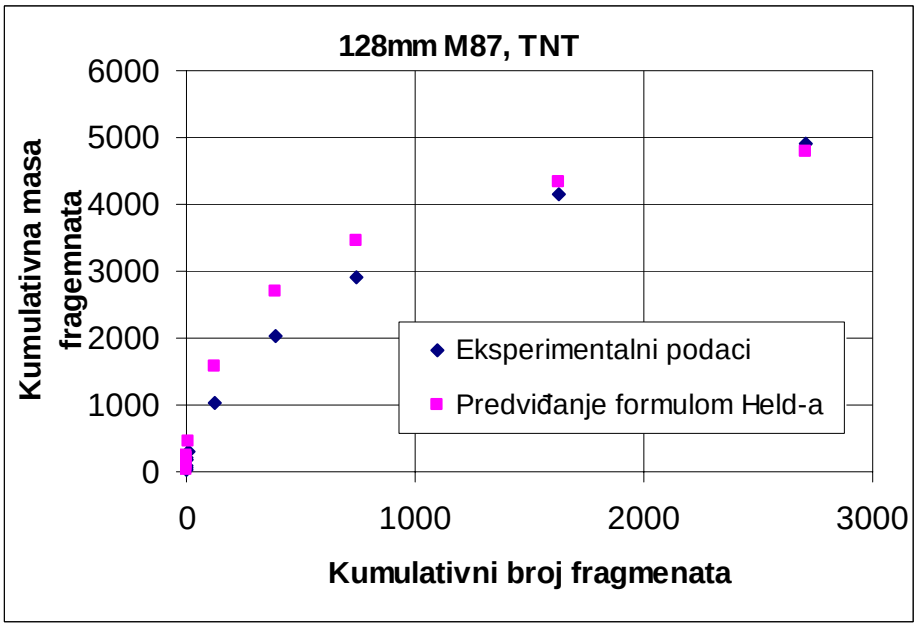
Generalno se može reći da fragmenti manje mase (<10g) čine najveći dio mase, i to oko 94,5% ukupne mase svih fragmenata, što je karakteristično za bojeve glave raketnih projektila, zbog velikog odnosa C_{eks}/M.

Predviđanje kumulativnog broja fragmenata *N* za BG 128mm M87 (TNT) formulom Mott-a (slika 5.3.3.9) pokazuje dobro slaganje sa eksperimentalnim podacima, za masene grupe fragmenata od 3-10g. Za manje i veće masene grupe predviđanje kumulativnog broja fragmenata formulom Mott-a daje nešto manje vrijednosti nego eksperimentalni podaci.



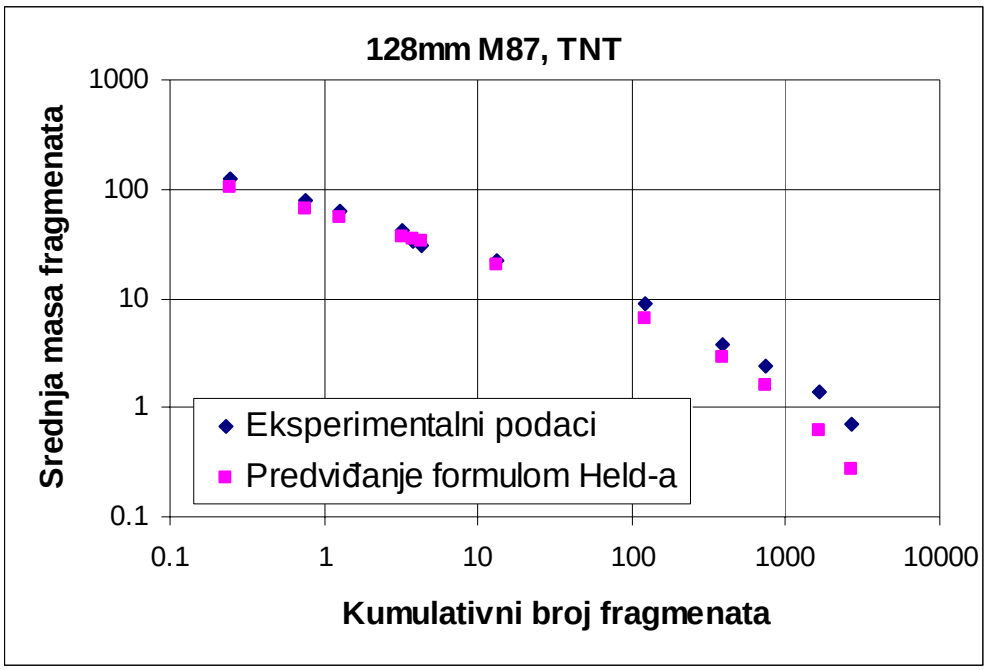
Slika 5.3.3.9 Dijagram kumulativnog broja fragmenata N u funkciji od srednje mase fragmenta m (128mm M87, TNT)

Na slici 5.3.3.10 predstavljen je dijagram kumulativne mase fragmenata u zavisnosti od kumulativnog broja fragmenata za BG 128mm M87 (TNT). Ovaj dijagram pokazuje slabije slaganje eksperimentalnih podataka sa predviđanjem kum. mase fragmenata metodom Held-a.



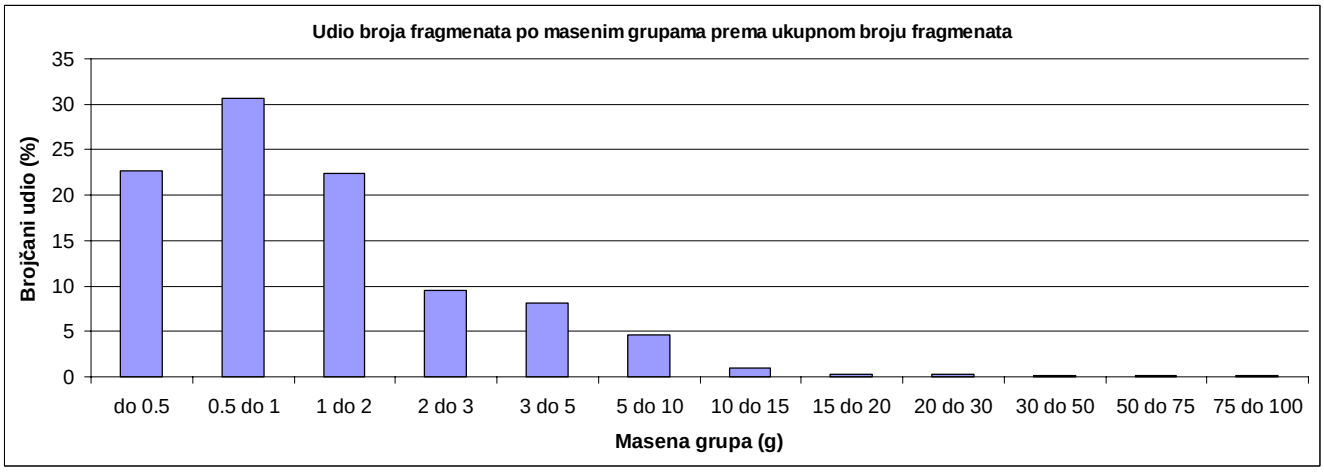
Slika 5.3.3.10 Dijagram kumulativne mase fragmenata M za BG 128mm M87, TNT

Na slici 5.3.3.11 prikazan je dijagram srednje mase fragmenata u zavisnosti od kumulativnog broja fragmenata za BG 128mm M87 (TNT). Vrijednosti dobijene primjenom metode Held-a pokazuju veoma dobro slaganje sa eksperimentalnim podacima, naročito za srednje mase fragmenata veće od 10g.



Slika 5.3.3.11 Dijagram srednje mase fragmenata u zavisnosti od kumulativnog broja fragmenata n (128mm M87, TNT)

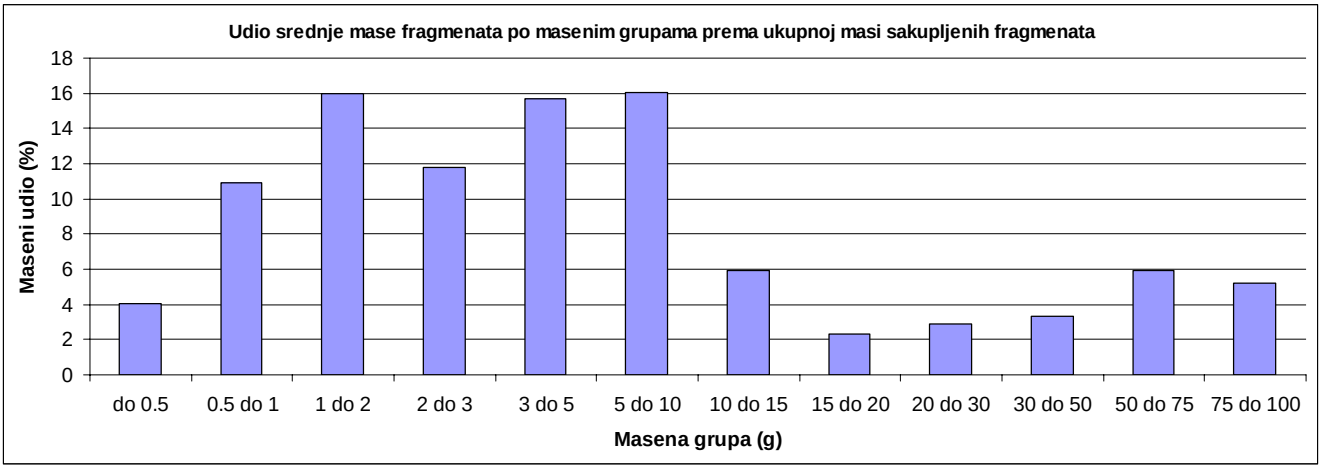
Na osnovu eksperimentalnih podataka fragmentacije BG raketnog projektila **128mm M87 (eksploziv: Komp. B)** urađena je analiza udjela broja fragmenata po masenim grupama prema ukupnom broju sakupljenih fragmenata i udjela srednje mase fragmenata po masenim grupama prema ukupnoj masi sakupljenih fragmenata (slika 5.3.3.12, slika 5.3.3.13).



Slika 5.3.3.12 Udio broja fragmenata po masenim grupama prema ukupnom broju sakupljenih fragmenata za 128mm M87 (Komp. B)

Na slici 5.3.3.12 predstavljen je dijagram udjela broja fragmenata po masenim grupama prema ukupnom broju sakupljenih fragmenata za BG 128mm M87 (Komp. B). Najveći broj fragmenata potiče iz masene grupe do 0,5-1g (oko 31% svih fragmenata). Primjetno je i da fragmenti manjih masa (< 2g) čine najbrojniju skupinu fragmenata, a njihov brojčani udio je oko 76% svih sakupljenih fragmenata.

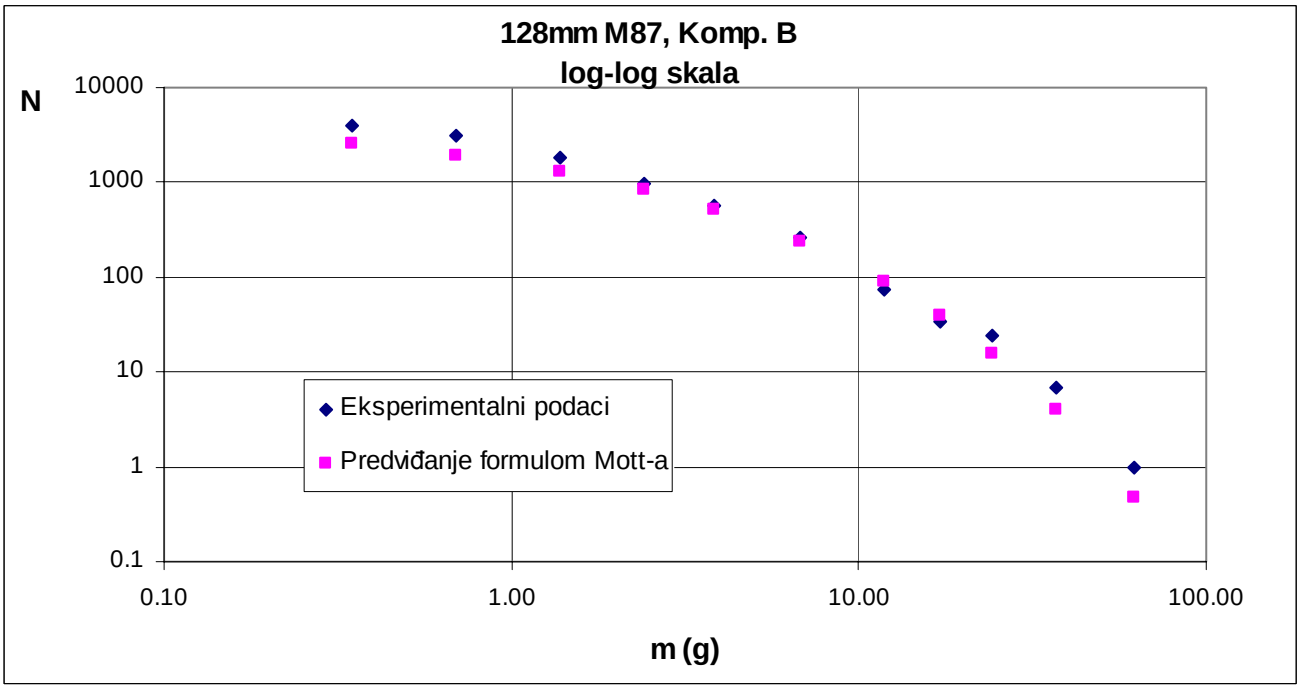
Ukoliko se uporede dijagrami sa slika 5.3.3.7 i 5.3.3.12 može se primjetiti da se korištenjem eksploziva Komp. B smanjio brojčani udio fragmenata mase manje od 0,5g.



Slika 5.3.3.13 Udio srednje mase fragmenata po masenim grupama prema ukupnoj masi sakupljenih fragmenata za 128mm M87 (Komp. B)

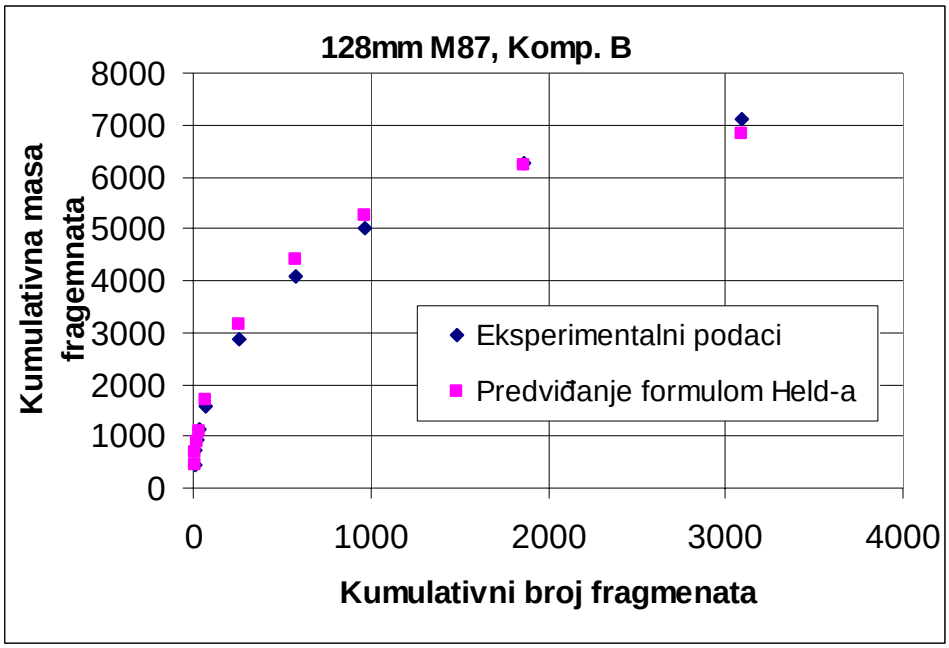
Dijagram udjela srednje mase fragmenata po masenim grupama prema ukupnoj masi sakupljenih fragmenata za BG 128mm M87 (Komp. B) na slici 5.3.3.13 pokazuje da fragmenti mase 0,5-10g imaju najveći udio u ukupnoj masi fragmenata (oko 70% ukupne mase).

Komparacijom dijagrama sa slika 5.3.3.8 i 5.3.3.13može se uočiti da je kod BG 128mm M87 sa Komp. B primjetan ravnomjerniji maseni udio grupa fragmenata nego u slučaju korištenja eksploziva TNT.



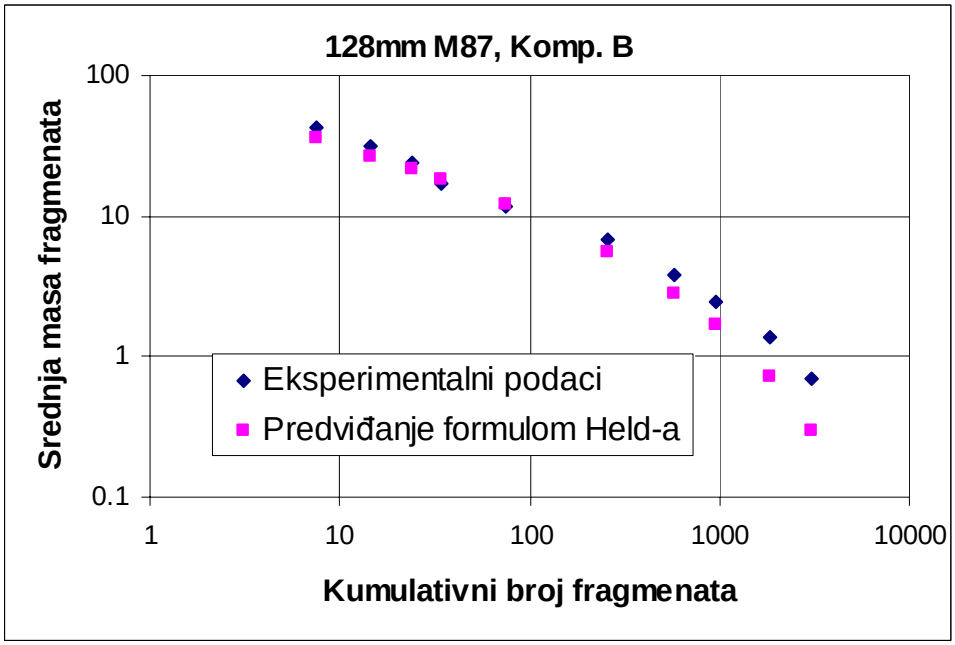
Slika 5.3.3.14 Dijagram kumulativnog broja fragmenata N u funkciji od srednje mase fragmenta m (128mm M87, Komp. B)

Predviđanje kumulativnog broja fragmenata *N* za BG 128mm M87 (Komp. B) formulom Mott-a (slika 5.3.3.14) pokazuje dobro slaganje sa eksperimentalnim podacima, za masene grupe fragmenata od 1-50g. Za manje i veće masene grupe predviđanje kumulativnog broja fragmenata formulom Mott-a daje nešto manje vrijednosti nego eksperimentalni podaci, što je posljedica gubitka mase (metalni prah).



Slika 5.3.3.15 Dijagram kumulativne mase fragmenata M u zavisnosti od kumulativnog broja fragmenata n (128mm M87, Komp. B)

Na slici 5.3.3.15 predstavljen je dijagram kumulativne mase fragmenata u zavisnosti od kumulativnog broja fragmenata za BG 128mm M87 (Komp. B). Ovaj dijagram pokazuje dobro slaganje eksperimentalnih podataka sa predviđanjem kumulativne mase fragmenata metodom Held-a.



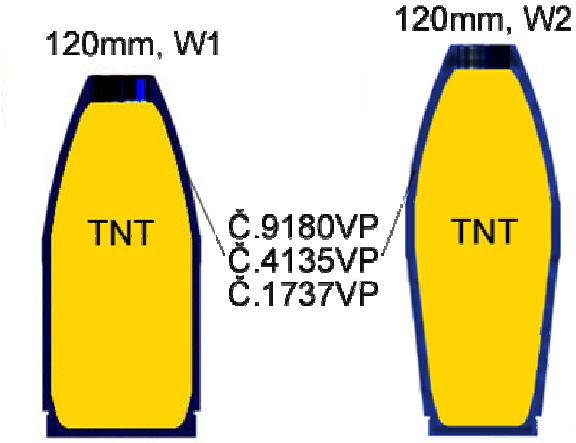
Slika 5.3.3.16 Dijagram srednje mase fragmenata u zavisnosti od kumulativnog broja fragmenata n (128mm M87, Komp. B)

Na slici 5.3.3.16 prikazan je dijagram srednje mase fragmenata u zavisnosti od kumulativnog broja fragmenata za BG 128mm M87 (Komp. B). Vrijednosti dobijene primjenom metode Held-a pokazuju veoma dobro slaganje sa eksperimentalnim podacima, naročito za srednje mase fragmenata veće od 10g.

5.3.4 Istraživanje uticaja materijala tijela bojeve glave na masenu distribuciju fragmenata

U analizi uticaja materijala tijela bojeve glave na masenu distribuciju fragmenata korištene su dvije varijante minobacačkog projektila 120mm, W1 i W2, napunjene eksplozivom TNT (sl. 5.3.4.1).

Korišteni su eksperimentalni podaci fragmentacije u Pit-u (tabela 5.3.5), sa tri različita materijala tijela projektila, i to Č.4135VP, Č.9180VP. i Č.1737VP.



Slika 5.3.4.1 Bojeve glave 120mm W1 i W2

Podaci o tipu materijala košuljice, mehaničkim karakteristikama materijala tijela projektila 120mm W1 i W2, te masenim i geometrijskim odnosima date su u tabeli 5.3.4.1.

Tabela 5.3.4.1 Podaci o ispitivanim bojevim glavama

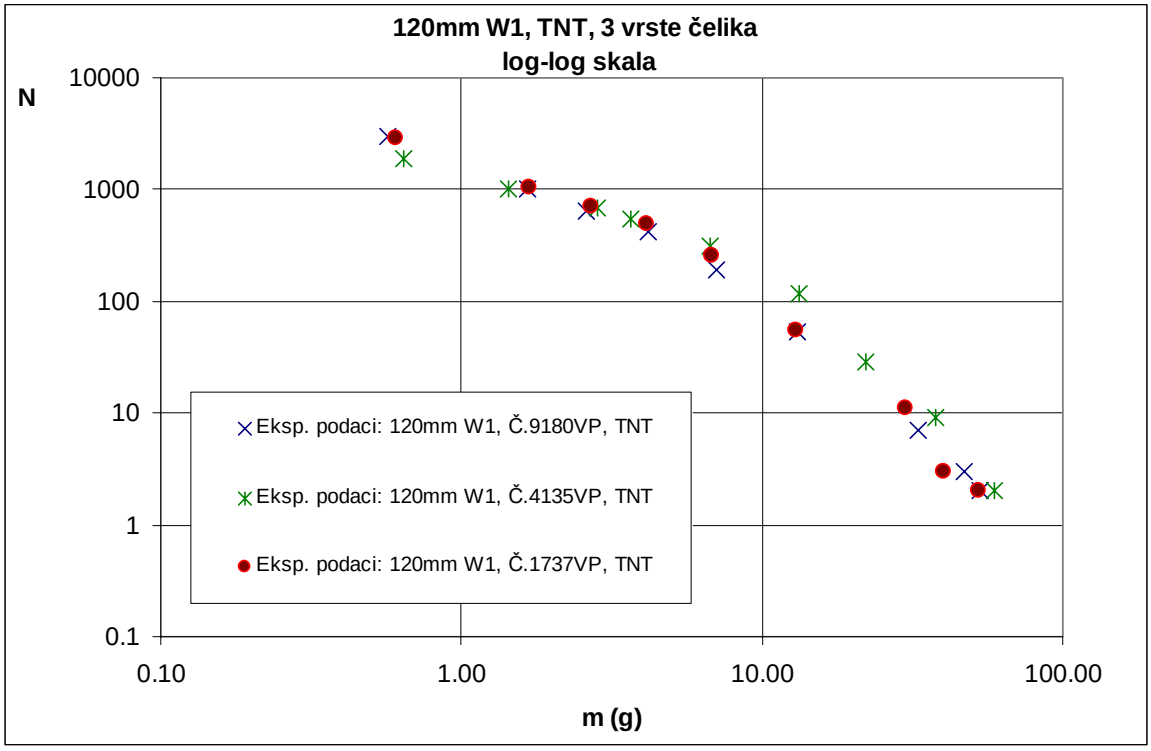
BG	Eksploziv	Materijal koš.	σ_{vsr} (MPa)	σ_{msr} (MPa)	ε_{sr} (%)	ψ_{sr} (%)	C_{eks}/M	t/d
120mm W1	TNT	Č.4135VP Č.9180VP Č.1737VP	920 575 495	1002 810,5 784	20,5 20,5 21,25	56,4 46,6 38,65	0,490	0,0824
120mm W2	TNT	Č.4135VP Č.9180VP Č.1737VP	920 575 495	1002 810,5 784	20,5 20,5 21,25	56,4 46,6 38,65	0,533	0,0720

Iz tabele 5.3.4.1 može se zaključiti da BG 120mm W2 ima manji odnos *t/d*, a veći odnos C_{eks}/M u odnosu na varijantu 120mm W1. To znači da je tijelo BG 120mm W2 tanje i da ona sadrži nešto više eksplozivnog punjenja nego varijanta 120mm W1.

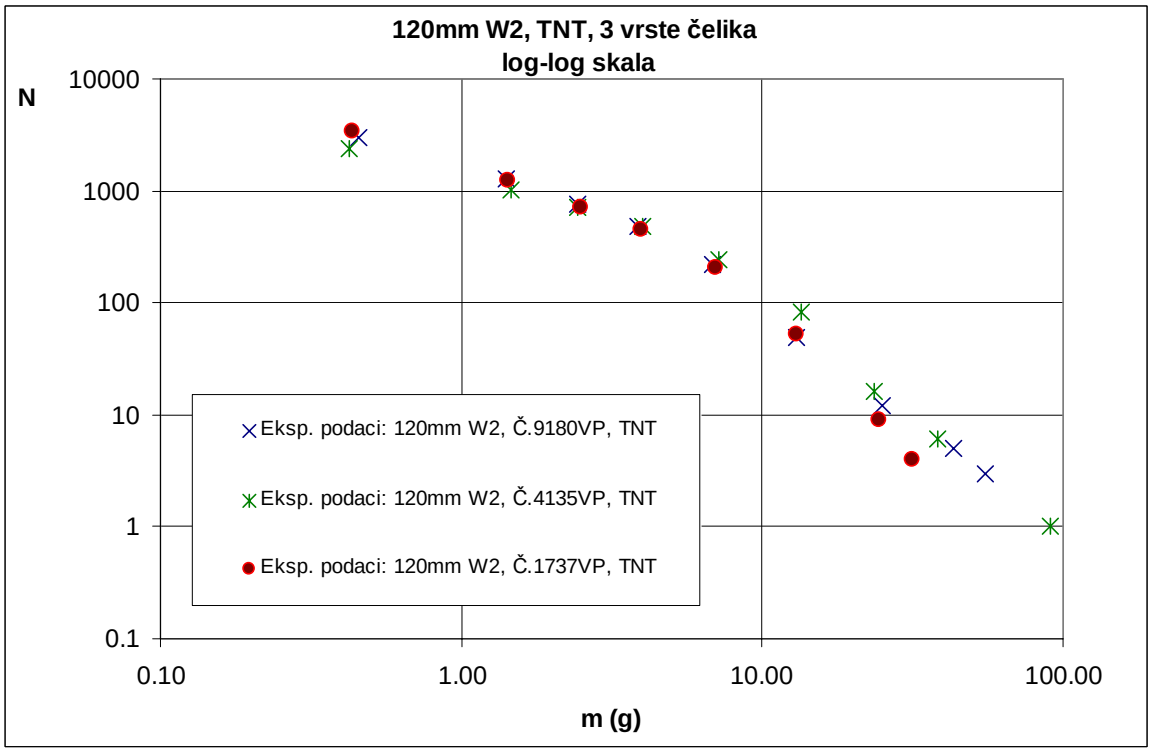
Također, odnosi zatezne čvrstoće prema granici razvlačenja datih materijala BG su:

- za materijal Č.4135VP: $\sigma_m / \sigma_v = 1{,}089$
- za materijal Č.9180VP: $\sigma_m / \sigma_v = 1{,}409$
- za materijal Č.1737VP: $\sigma_m / \sigma_v = 1{,}584$

Na slikama 5.3.4.2 i 5.3.4.3 dat je prikaz komparativne analize masenih distribucija na osnovu eksperimentalnih podataka dobijenih rasprskavanjem u Pit uređaju, za po tri bojeve glave 120mm W1 i 120mm W2, sa različitim materijalima tijela bojeve glave.



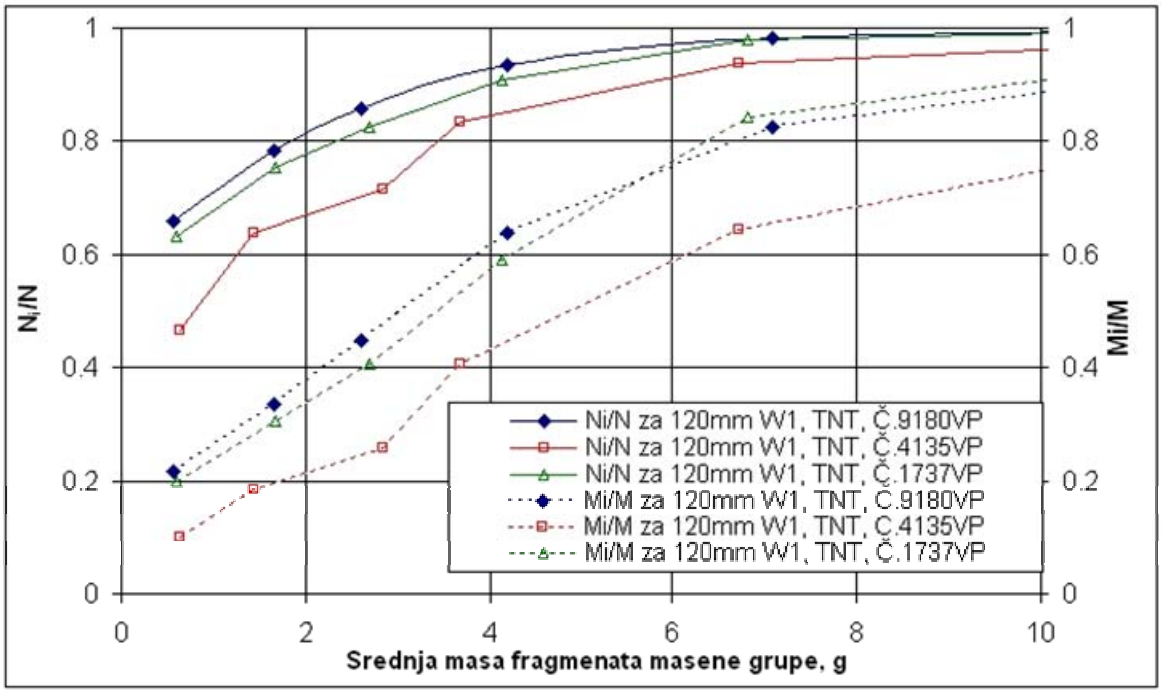
Slika 5.3.4.2 Komparacija eksperimentalno dobijenih rezultata i rezultata dobijenih analizom masene distribucije Mott-ovom formulom za minobacačku BG 120mm W1, napunjenu TNT-om, i 3 različita materijala tijela BG



Slika 5.3.4.3 Komparacija eksperimentalno dobijenih rezultata i rezultata dobijenih analizom masene distribucije Mott-ovom formulom za minobacačku BG 120mm W2, napunjenu TNT-om, i 3 različita materijala tijela BG

Sa dijagrama na slikama 5.3.4.2 i 5.3.4.3 veoma je teško izvući zaključke pri komparaciji masene distribucije bojevih glava 120mm W1 i W2, sa različitim materijalima tijela bojeve glave.

Prema metodologiji definiranoj u radu [19] podaci se mogu prikazati na drugačiji način. Uspostavljena je veza između odnosa kumulativnog broja fragmenata prema ukupnom broju fragmenata i kumulativne mase fragmenata prema ukupnoj masi fragmenata za sve tri varijante materijala tijela bojevih glava.



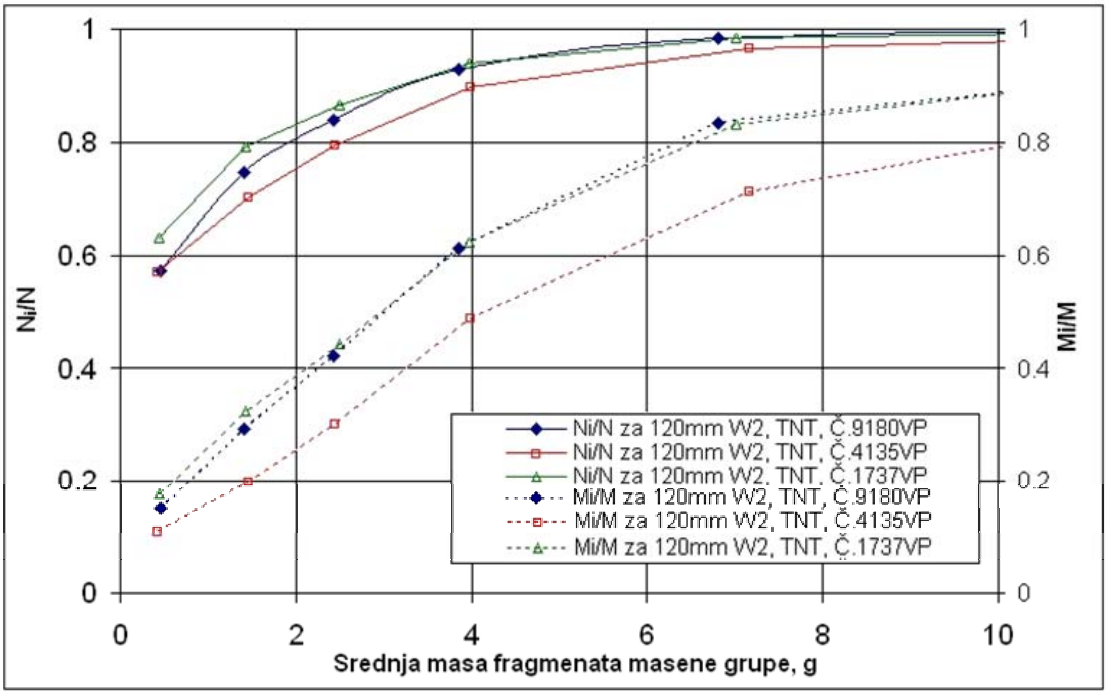
Slika 5.3.4.4 Zavisnost odnosa Ni/N i Mi/M od srednje mase fragmenata masnih grupa za BG 120mm W1, sa TNT, za tri različita materijala tijela bojeve glave

Dijagram na slici 5.3.4.4 pokazuje da bojeva glava 120mm W1 sa materijalom tijela Č.9180VP ili Č.1737 generiše više fragmenata manje mase u odnosu na bojevu glavu sa materijalom tijela Č.4135VP. To se može objasniti činjenicom da je odnos σ_m / σ_v kod materijala Č.9180VP i Č.1737 veći nego kod materijala Č.4135 (za 29,4 do 45,4%), što znači da imaju veću zonu plastične deformacije.

Uzimajući u obzir zakon o očuvanju mase, veći volumen bojeve glave prouzrokuje reduciranje debljine tijela bojeve glave, a što konačno ima za posljedicu nastanak većeg broja fragmenata, manje mase.

Što se tiče masenog udjela pojedinih masenih grupa fragmenata, sa slike 5.3.4.4 može se vidjeti da bojeva glava 120mm W1 sa materijalom tijela Č.9180VP pokazuje veći maseni udio manjih masenih grupa (do 5g), u odnosu na varijante ove bojeve glave sa materijalom tijela Č.1737VP ili Č.4135VP. Za masene grupe veće od 5 grama najveći maseni udio fragmenata pokazuje varijanta bojeve glave sa čelikom Č.1737VP.

Sa slike 5.3.4.5 mogu se izvući slični zaključci kao sa sl. 5.3.4.4. Na dijagramu (sl. 5.3.4.5) može se primjetiti da bojeva glava 120mm W2 sa materijalom tijela Č.1737 generiše najviše fragmenata manje mase. Varijanta bojeve glave 120mm W2 sa materijalom tijela Č.9180VP daje u ovom slučaju nešto manji broj fragmenata nego varijanta sa materijalom tijela Č.1737VP.



Slika 5.3.4.5 Zavisnost odnosa N_i/N i M_i/M od srednje mase fragmenata masnih grupa za BG 120mm W2, sa TNT, za tri različita materijala tijela bojeve glave

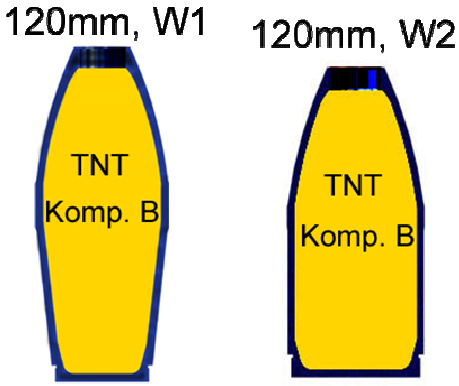
Slika 5.3.4.5 pokazuje da bojeva glava 120mm W1 sa materijalom tijela Č.1737VP ima najveći maseni udio manjih masenih grupa (do 4g), dok za masene grupe veće od 4g bojeva glava 120mm W1 sa materijalom tijela Č.9180VP ima najveći maseni udio fragmenata.

Jedan od praktičnih zaključaka koji se može izvesti je da bojeva glava 120mm koja za materijal tijela koristi čelik Č.1737VP može pokazati bolju efikasnost protiv pješadijskih meta, dok je bojeva glava sa materijalom tijela Č.9180VP pogodnija za lako oklopljena vozila i druge mete sličnih parametara.

Čelik Č.4135 je kod obje varijante tijela bojevih glava 120mm W1 i 120mm W2 pokazao inferiornost u odnosu na ostala dva tipa materijala.

5.3.5 Analiza uticaja tipa eksploziva na masenu distribuciju fragmenata

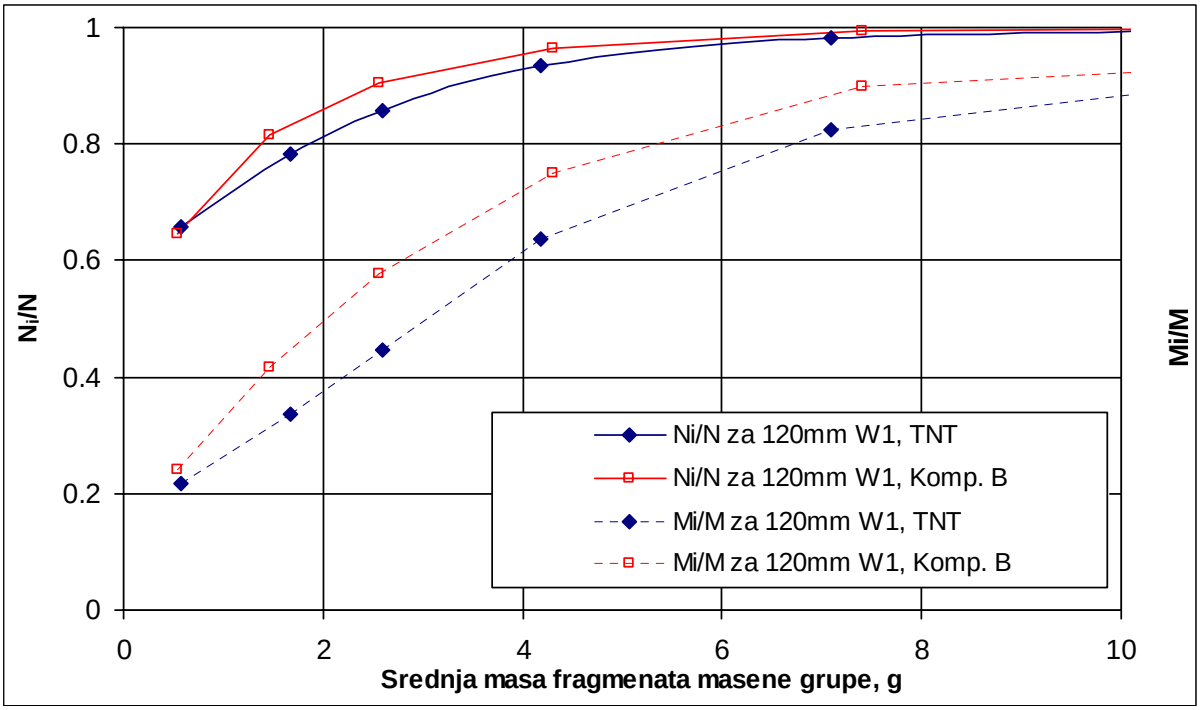
Prilikom istraživanja uticaja tipa eksplozivnog punjenja bojeve glave na masenu distribuciju fragmenata korišteni su minobacački projektili 120mm W1 i 120mm W2 (slika 5.3.5.1).



Slika 5.3.5.1 Bojeve glave 120mm W1 i 120mm W2

U analizi su korišteni eksperimentalni podaci fragmentacije u Pit uređaju (tabela 5.3.5), sa dva tipa eksplozivnog punjenja, TNT i Kompozicija B. Materijal tijela bojevih glava je ostao isti, Č. 9180VP.

Koristeći metodologiju opisanu u radu [19] dobijenu podaci su prezentirani na slijedeći način. Uspostavljena je veza između odnosa kumulativnog broja fragmenata prema ukupnom broju fragmenata i kumulativne mase fragmenata prema ukupnoj masi fragmenata za obadvije varijante eksplozivnog punjenja bojevih glava, TNT i Komp. B.



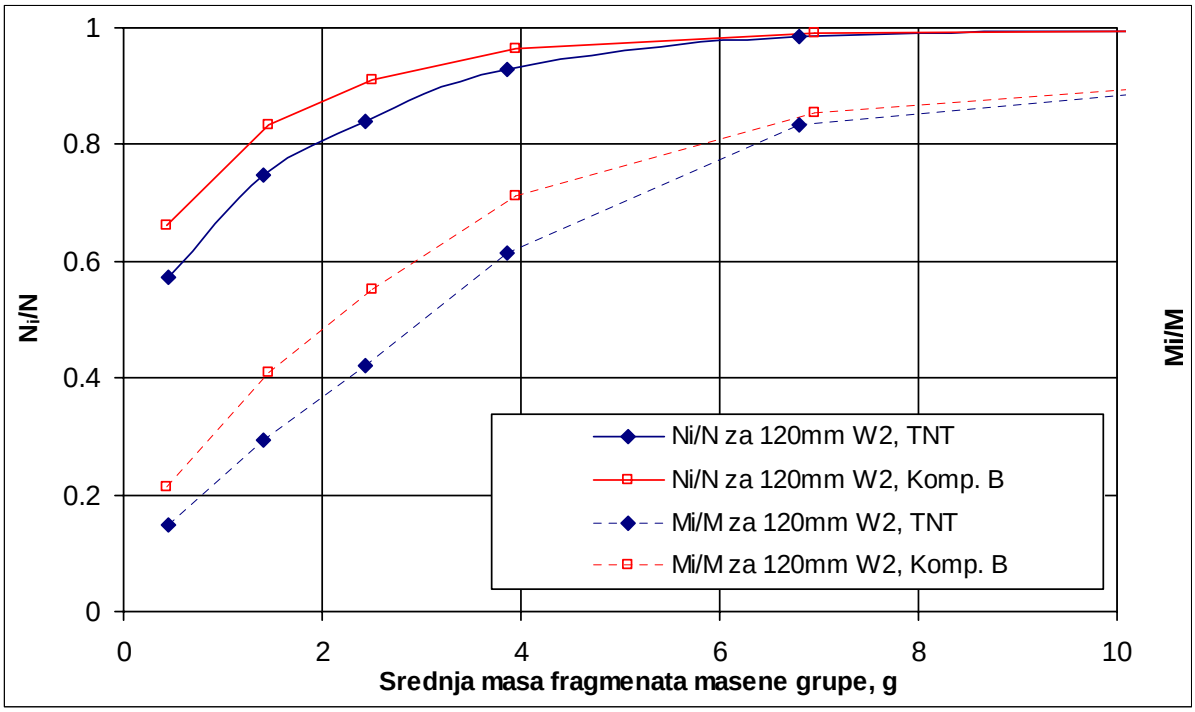
Slika 5.3.5.2 Zavisnost odnosa N_i/N i M_i/M od srednje mase fragmenata masenih grupa za BG 120mm W1, za dva tipa eksplozivnih punjenja, TNT i Komp. B

Na slikama 5.3.5.2 i 5.3.5.3 prikazane su zavisnosti odnosa N_i/N i M_i/M od srednje mase fragmenata masenih grupa za BG 120mm W i 120mm W2, za dva tipa eksplozivnih punjenja, TNT i Komp. B.

Dijagrami na slikama 5.3.5.2 i 5.3.5.3 pokazuju da bojeve glave W1 i W2 koje sadrže eksplozivno punjenje Komp. B generišu više fragmenata manje srednje mase, u poređenju sa bojevim glavama W1 i W2 koje sadrže eksploziv TNT.

Bojeva glava 120mm W1 sa Komp. B ima u masenim grupama, sa srednjom masom manjom od 10g, dominantno veći broj fragmenata i veći maseni udio ovih fragmenata.

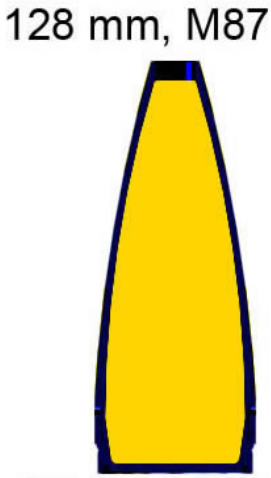
Na slici 5.3.5.3 može se uočiti, također, da tip i energetski potencijal eksploziva igra veoma bitnu ulogu prilikom fragmentacije bojevih glava. Bojeva glava 120mm W2 sa Komp. B, slično kao BG 120mm W1, ima u svim masenim grupama srednje mase manje od 10g, veći broj fragmenata i veći maseni udio ovih fragmenata, nego što je to slučaj sa varijantom BG W2 koja sadrži TNT.



Slika 5.3.5.3 Zavisnost odnosa N_i/N i M_i/M od srednje mase fragmenata masenih grupa za BG 120mm W2, za dva tipa eksplozivnih punjenja, TNT i Komp. B

5.3.6 Analiza geometrije fragmenata

Osim analize masene distribucije fragmenata, izvršena je analiza dimenzija fragmenata za bojevu glavu raketnog projektila 128mm M87 (sl. 5.3.6.1), napunjenu TNT-om i Komp. B. Izvršena je detonacija osam bojevih glava 128mm M87, po četiri za svaki tip eksploziva.



Slika 5.3.6.1 Analizirana bojeva glava (128m M87, TNT i Komp. B)

Nakon fragmentacije Pit testom, izvađeno je po sedam slučajnih uzoraka fragmenata iz svake masene grupe do 20 gr (za ekspl. punjenje TNT) i do 10g (za ekspl. punjenje komp. B), te je izvršeno premjeravanje tri dimenzije fragmenata. Izmjereni podaci dostupni su u tabelama 5.3.6.1 i 5.3.6.2.

Premjeravanje fragmenata za masene grupe do 10g, odnosno 20g izvršeno je zbog toga što najveći broj fragmenata potiče iz masenih grupa do 20g, a one, takođe, imaju i najveći maseni udio u ukupnoj masi sakupljenih fragmenata.

Tabela 5.3.6.1. Izmjerene geometrijske vrijednosti fragmenata za bojevu glavu 128mm M87, sa Komp. B

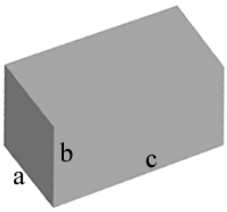
Masene grupe fragmenata (g)																	
0 - 0,5g			**0,5 - 1g**			**1,0 - 2,0 g**			**2 - 3 g**			**3 - 5 g**			**5-10 g**		
a	**b**	**c**	**a**	**b**	**c**	**a**	**b**	**c**	**a**	**b**	**c**	**a**	**b**	**c**	**a**	**b**	**c**
3.5	2.5	10	6	3	12	5	4	18	9	5	30	8	5	30	6	3	37
4.5	3	10	5	3	14	7	5	20	6	4	26	10	6	25	7	4	28
5.5	3	10	4	3	12	7	5	15	6	3	28	7	4	26	8	4.5	34
5	3.5	10	6	4	15	6	2	20	7	5	28	8	6	29	8	4	40
4	3	11	5	4	17	5	3	18	7	4	25	8	5	29	8	5	40
5	3	9	5	3	15	7	3	20	7	4	23	7	5	24	8	4	35
4.5	5	8	4.5	3.5	12	6	5	18	7	4	30	8	5.5	22	9	7	35

Tabela 5.3.6.2 Izmjerene geometrijske vrijednosti fragmenata za bojevu glavu 128mm M87, sa TNT-om

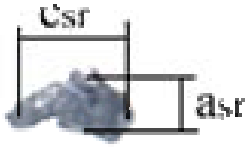
Masene grupe fragmenata (g)																				
0 - 0,5g			**0,5 - 1g**			**1,0 - 2,0 g**			**2 - 3 g**			**3 - 5 g**			**5-10 g**			**10-20 g**		
a	**b**	**c**	**a**	**b**	**c**	**a**	**b**	**c**	**a**	**b**	**c**	**a**	**b**	**c**	**a**	**b**	**c**	a	b	c
6	3	12	6	5	16	8	5	20	6	4	24	7	7	26	8	5	35	9	7	50
6	2.5	14	5	4	14	7	4	18	6	5	25	7	6	24	9	6	37	11	7	42
5.5	3	14	5	3	17	8	3	20	7	5	23	7	6	26	10	5	40	10	7	44
5	2.5	16	8	5	11	-	-	-	8	6	23	7	6	26	10	5	35	11	7	38
6.5	4	16	-	-	-	-	-	-	7	6	20	8	5	30	11	6	42	11	7	42
5	3	12	-	-	-	-	-	-	7	6	20	8	5	30	8	6	37	11	6	47
5	3	15	-	-	-	-	-	-	7	6	20	7	5	28	10	6	38	9	5	45

Pretpostavljeno je da je ekvivalentni oblik fragmenta pravougli paralelepiped sa dimenzijama *a* x *b* x *c* (slika 5.3.6.2). Dimenzija *a* predstavlja ekvivalentnu širinu fragmenta, *b* je ekvivalentna visina fragmenta, a *c* njegova ekvivalentna dužina. Ovaj model nazvan je model ekvivalentne geometrije fragmenata.

Na slici 5.3.6.3 prikazan je oblik realnog fragmenta, sa srednjim vrijednostima njegovih dimenzija c_{sr} i širine a_{sr}.



Sl. 5.3.6.2 Ekvivalentni oblik fragmenta

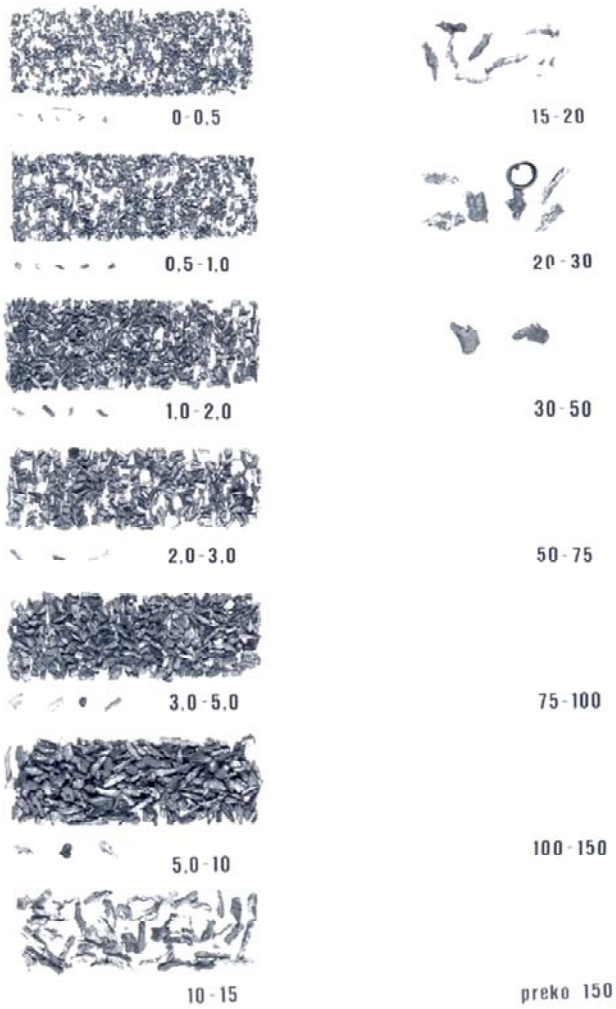


Sl. 5.3.6.3 Realni oblik fragmenta sa srednjim vrijednostima dužine c_{sr} i širine a_{sr}

Podaci o izmjerenim dimenzijama fragmenata statistički su obrađeni, kako bi se dobile srednje vrijednosti izmjerenih dimenzija fragmenata a_{sr}, b_{sr} i c_{sr}.

Ekvivalentni oblik fragmenta je pravougli paralelepiped, pa se ekvivalentna površina fragmenta A_{ekv} određuje upotrebom izraza:

$$A_{ekv} = 2(a_{sr} \cdot b_{sr} + a_{sr} \cdot c_{sr} + b_{sr} \cdot c_{sr}) \qquad (5.3.6.1)$$



Slika 5.3.6.4 Karakteristični oblici fragmenata različitih masenih grupa kod bojeve glave 128mm M87 [52]

Na slici 5.3.6.4 prikazani su karakteristični oblici fragmenata za različite masene grupe, nastali fragmentacijom bojeve glave 128mm M87.

Izvršena je analiza dimenzija fragmenata koristeći dvije metode.

Prva metoda podrazumijeva analizu geometrije fragmenata koristeći eksponencijalne funkcije koje se dobiju kada ekvivalentnu širinu *a* i ekvivalentnu dužinu *c* izrazimo u funkciji od ekvivalentne visine fragmenata *b*.

Ako ekvivalentnu širinu *a* i ekvivalentnu dužinu fragmenata *c* izrazimo u funkciji ekvivalentne visine *b*, može se napisati:

$$a = k_1 \cdot b$$

$$c = k_2 \cdot b$$

$$b = b \tag{5.3.6.2}$$

Masa fragmenta može se izraziti kao

$$m_{fr} = \rho_{fr} \cdot V_{fr} \tag{5.3.6.3}$$

Zapremina fragmenta koji je u ovom modelu pretpostavljen kao paralelepiped jednaka je:

$$V_{fr-ekv} = a \cdot b \cdot c = k_1 \cdot b \cdot b \cdot k_2 \cdot b = k_n \cdot b_3 \tag{5.3.6.4}$$

gdje je koeficijent $k_n = k_1 \cdot k_2$.

Sada se može napisati:

$$m_{fr} = \rho_{fr} \cdot k_n \cdot b^3 \tag{5.3.6.5}$$

gdje je koeficijent k_n:

$$k_n = \frac{m_{fr}}{\rho_{fr} \cdot b^3} \tag{5.3.6.6}$$

ili

$$b^3 = \frac{m_{fr}}{\rho_{fr} \cdot k_n} = \frac{1}{\rho_{fr} \cdot k_n} \cdot m_{fr} \tag{5.3.6.7}$$

odnosno

$$b = \left(\frac{m_{fr}}{\rho_{fr} \cdot k_n} \right)^{\frac{1}{3}} = l \cdot m_{fr}^{\frac{1}{3}} \tag{5.3.6.8}$$

pri čemu je

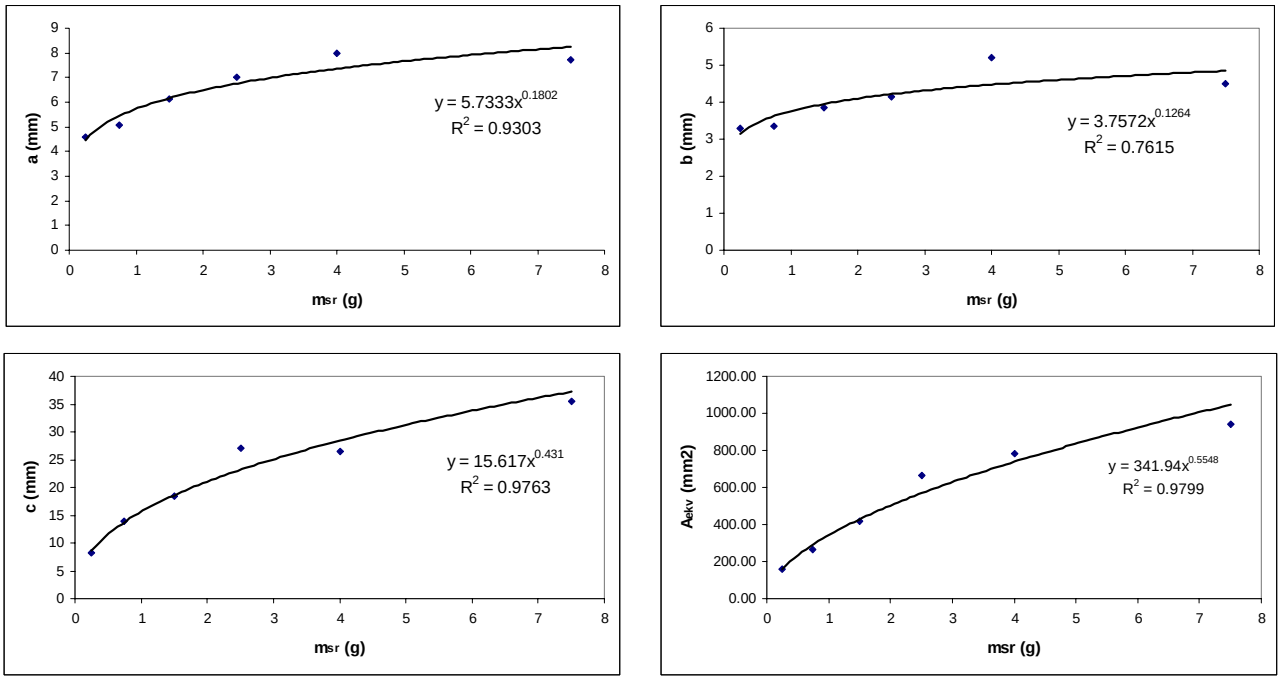
$$l = \left(\rho_{fr} \cdot k_n \right)^{-\frac{1}{3}} \tag{5.3.6.9}$$

Ako se usvoji zavisnost dimenzije fragmenta u funkciji njegove mase m_{fr}, može se pisati

$$G_i = p_i \cdot m_{fr}^{r_i} \tag{5.3.6.10}$$

gdje je G_i izabrana razmatrana dimenzija fragmenta, a p_i i r_i koeficijenti koji se određuju na bazi regresione analize dimenzija fragmenata za date masene grupe.

Na slici 5.3.6.5 prikazani su dijagrami ekvivalentnih dimenzija fragmenata *a*, *b* i *c*, te ekvivalentne površine fragmenata A_{ekv} u funkciji od masene grupe fragmenata, za bojevu glavu 128mm M87, sa eksplozivnim punjenjem Komp. B.



Slika 5.3.6.5 Regresiona analiza eksponencijalnom funkcijom za dimenzije fragmenata bojeve glave 128mm M87, Komp. B

Sl. 5.3.6.5 prikazuje eksponencijalne funkcije kojim su aproksimirani podaci dobijeni eksperimentalnim istraživanjem, kao i koeficijent korelacije R^2 za pojedine funkcije. Ovaj koeficijent najmanji je za slučaj regresione analize ekvivalentne visine *b* u funkciji od mase fragmenata i iznosi 0,7615, a najveći kod analize ekvivalentne površine fragmenta A_{ekv} i jednak je 0,979.

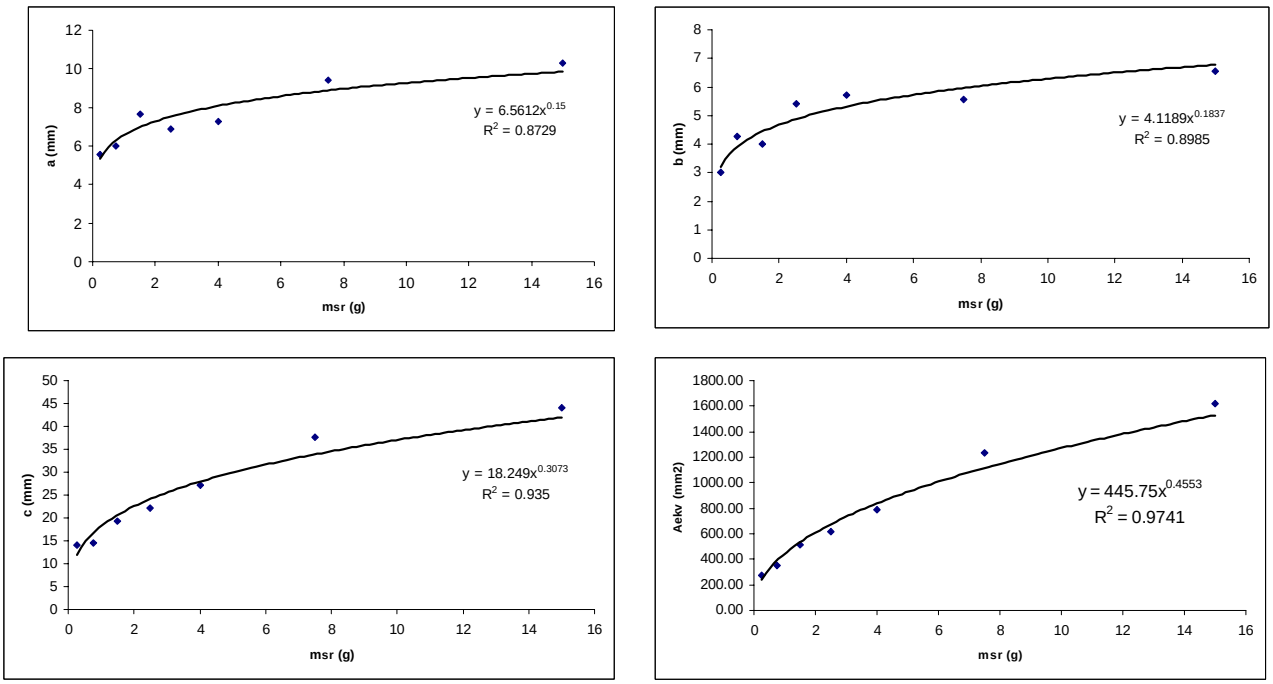
U tabeli 5.3.6.3 prikazane su vrijednosti koeficijenata p_i i r_i, dobijeni regresionom analizom dimenzija fragmenata za date masene grupe, nastalih fragmentacijom bojeve glave 128mm M87, napunjenje eksplozivom komp. B. Ovi koeficijenti prikazani su i na dijagramima sa slike 5.3.6.5.

Tabela 5.3.6.3 Koeficijenti p_i i r_i za BG 128mm M87, Komp. B

Dimenzija	p_i	r_i	Koeficijent korelacije
ekvivalentna širina - a	5,733	0,180	0,930
ekvivalentna visina - b	3,757	0,126	0,762
ekvivalentna dužina - c	15,617	0,431	0,976
ekvivalentna površina - A_{ekv}	341,940	0,555	0,979

Slična analiza napravljena je za istu bojevu glavu (128mm M87) sa eksplozivnim punjenjem TNT.

Na slici 5.3.6.6 prikazani su dijagrami ekvivalentnih dimenzija fragmenata *a*, *b* i *c*, te ekvivalentne površine fragmenata A_{ekv} u funkciji od masene grupe fragmenata, za bojevu glavu 128mm M87, sa eksplozivnim punjenjem TNT.



Slika 5.3.6.6 Regresiona analiza eksponencijalnom funkcijom za dimenzije fragmenata bojeve glave 128mm M87, TNT

Na sl. 5.3.6.6 prikazane su funkcije kojim su aproksimirani podaci dobijeni eksperimentalnim ispitivanjima, te koeficijent korelacije R^2. Koeficijent korelacije najmanji je za slučaj regresione analize ekvivalentne širine *a* u funkciji od mase fragmenata i iznosi 0,873, a najveći kod analize ekvivalentne površine fragmenta A_{ekv} i jednak je 0,974.

U tabeli 5.3.6.4 prikazane su vrijednosti koeficijenata p_i i r_i dobijenih analizom dimenzija fragmenata nastalih fragmentacijom bojeve glave 128mm M87, napunjenje eksplozivom TNT.

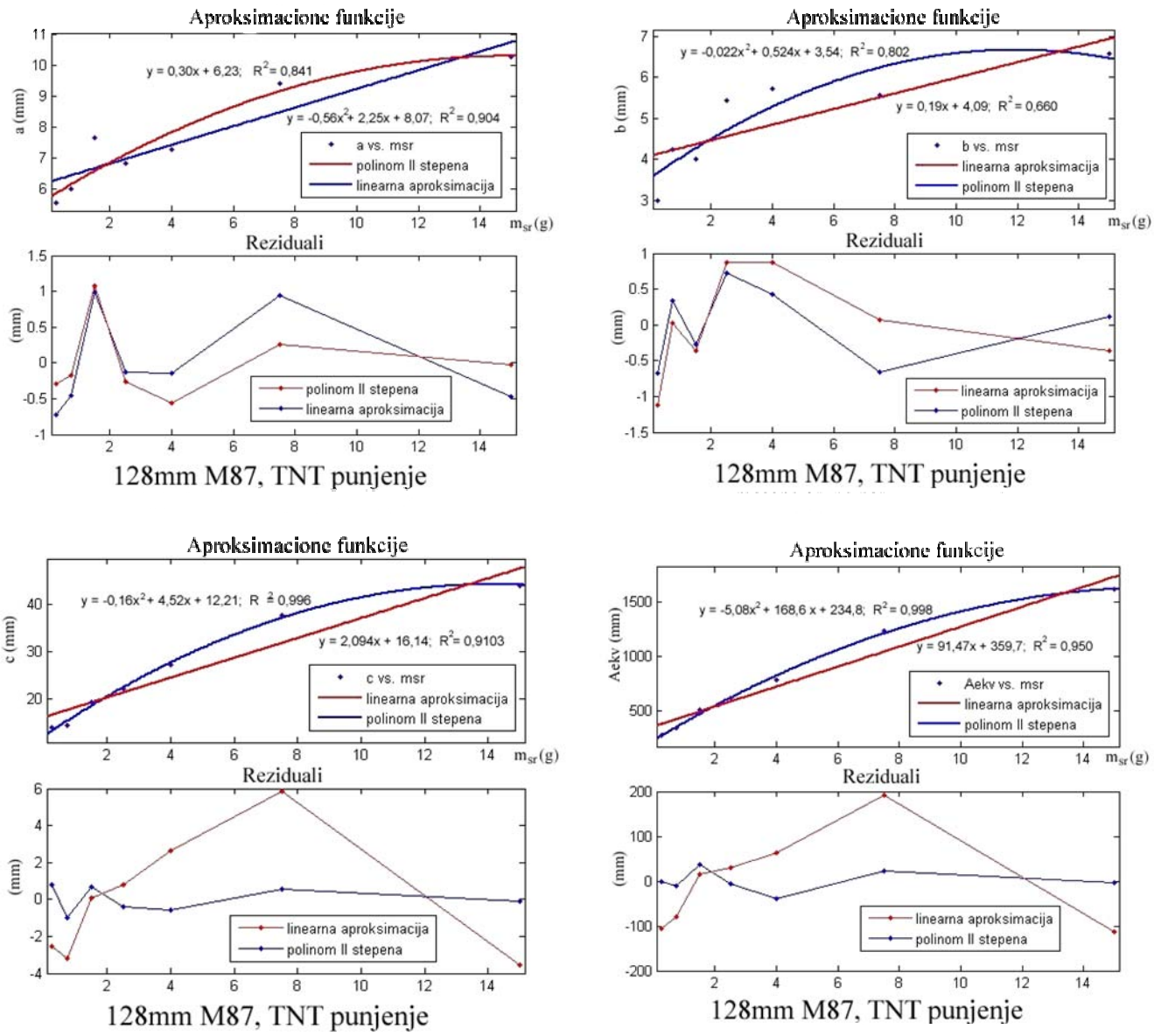
Tabela 5.3.6.4 Koeficijenti p_i i r_i za BG 128mm M87, TNT

Dimenzija	p_i	r_i	Koeficijent korelacije
ekvivalentna širina - a	6,561	0,150	0,873
ekvivalentna visina - b	4,119	0,184	0,898
ekvivalentna dužina - c	18,25	0,307	0,935
ekvivalentna površina - A_{ekv}	445,75	0,455	0,974

Druga metoda analize geometrije fragmenata bazira se na procjeni ovisnosti i korelacije geometrijskih karakteristika fragmenata sa srednjom masom fragmenata, komparirajući linearnu aproksimacijsku funkciju, predloženu od strane nekih autora [28], sa polinomom drugog stepena kao aproksimacijskom funkcijom koja daje bolju korelaciju sa eksperimentalnim podacima.

Rothenhausler [28] predlaže linearnu ovisnost geometrijskih karakteristika fragmenta o srednjoj masi fragmenata. Međutim, iz analize dobijenih podataka može se zaključiti da se bolja korelacija podataka postiže aproksimacijom polinomom drugog stepena. Zbog toga je dat komparativni prikaz te dvije aproksimativne funkcije, kako bi se mogli uporediti koeficijenti korelacije R^2 i reziduali.

Regresiona analiza izvršena je u softverskom paketu MatLab©, koristeći Curve Fitting Toolbox© koji je veoma pogodan za ovu vrstu analize. Na dobijenim dijagramima prikazani su i reziduali (dati u milimetrima) koji pokazuju odstupanje realnih podataka od aproksimacione krive, kako bi se moglo zaključiti kod kojih srednjih masa fragmenata dolazi do najvećeg odstupanja.

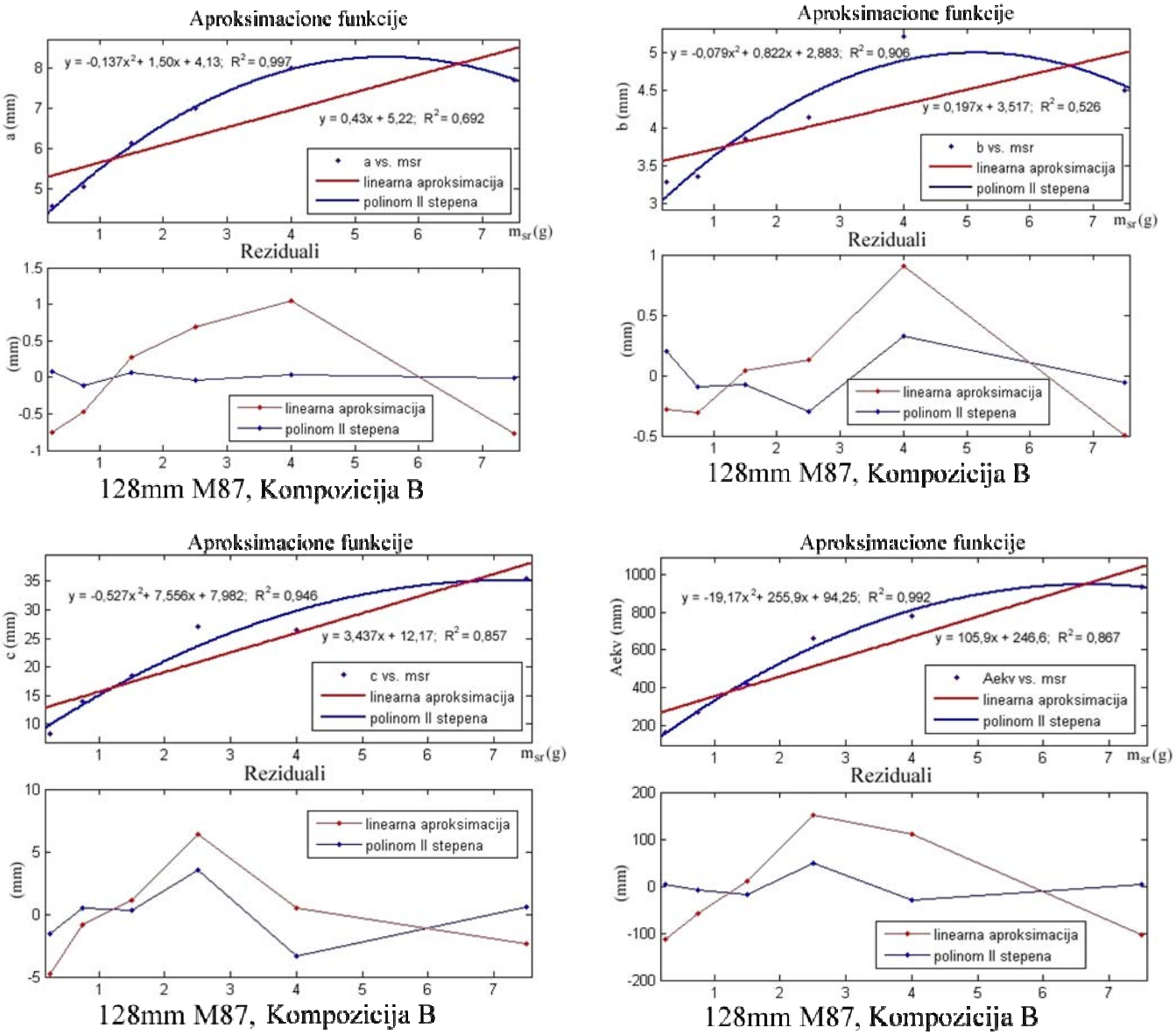


Slika 5.3.6.7 Regresiona analiza dimenzija fragmenata za BG 128mm M87, TNT

Slika 5.3.6.7 pokazuje regresionu analizu dimenzija fragmenata za BG 128mm M87, sa eksplozivom TNT. Sa dijagrama na sl. 5.3.6.7 može se uočiti veći koeficijent korelacije podataka R^2 (manji reziduali) kada se koristi polinom drugog stepena (oblika $y = ax^2 + bx + c$) kao aproksimacijska funkcija u odnosu na aproksimaciju linearnom funkcijom (oblika $y = ax + b$). To važi za sve analizirane dimenzije fragmenata, kao i ekvivalentnu površinu fragmenata A_{ekv}.

Najveća odstupanja aproksimacijske funkcije od eksperimentalnih podataka (najveći reziduali) primjećuju se kod analize ekvivalentne visine fragmenata *b* u funkciji od srednje mase fragmenata.

Na sl. 5.3.6.8 predstavljena je regresiona analiza dimenzija fragmenata za BG 128mm M87, sa eksplozivom Komp. B. I ovi dijagrama pokazuju da se dobije veći koeficijent korelacije podataka R^2 (manji reziduali) kada se koristi polinom drugog stepena kao aproksimacijska funkcija u odnosu na aproksimaciju linearnom funkcijom. Najveća odstupanja aproksimacijske funkcije od eksperimentalnih podataka (najveći reziduali) primjećuju se i u ovom slučaju kod analize ekvivalentne visine fragmenata *b* u funkciji od srednje mase fragmenata.



Slika 5.3.6.8 Regresiona analiza dimenzija fragmenata za BG 128mm M87, 128mm M87, Komp. B

5.4 Eksperimentalna ispitivanja fragmentacije u četvrtkružnoj areni

Predviđanje radijusa efikasnog dejstva HE bojeve glave zasniva se na korištenju eksperimentalnih podataka dobivenih ispitivanjem rasprskavanja bojeve glave u areni sa četiri četvrtkružna sektora.

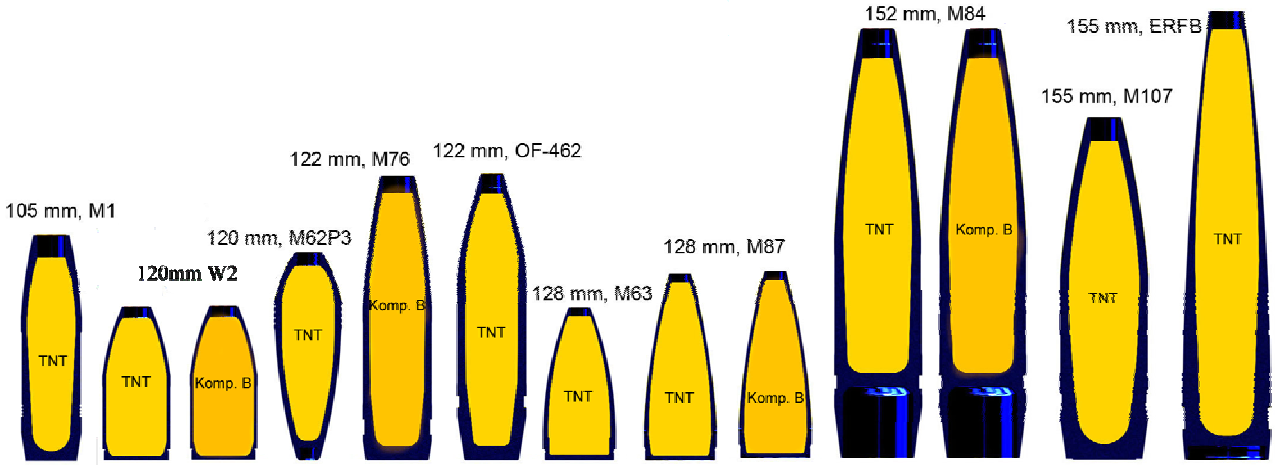
Izvršena su eksperimentalna ispitivanja slijedećih projektila, odnosno bojevih glava raketnih projektila (tabela 5.4.1).

Tabela 5.4.1 Bojeve glave ispitivane u četvrtkružnoj areni

Minobacački projektili	Artiljerijski projektili	Bojeve glave rak. projektila
120mm M62P3 (TNT) - 4 opita 120mm W2 (TNT) - 8 opita 120mm W2 (Komp. B) - 12 opita	105mm M1 (TNT) - 8 opita 122mm OF-462 (TNT) - 4 opita 122mm M76 (Komp. B) - 4 opita 152mm M84 (TNT) - 12 opita 152mm M84 (Komp. B) - 15 opita 155mm M107 (TNT) - 4 opita 155mm ERFB (TNT) - 3 opita	128mm M63 (TNT) - 2 opita 128mm M87 (TNT) - 4 opita 128mm M87 (Komp. B) - 4 opita

Rezultati testa fragmentacije u četvrtkružnoj areni omogućit će predviđanje radijusa efikasnog dejstva ispitivanih bojevih glava.

Testirane bojeve glave, sa prikazom korištenih eksploziva, predstavljeni su na slici 5.4.



Slika 5.4 Prikaz bojevih glava koje su ispitivane u četvrtkružnoj areni

Ova test metoda podrazumijeva pretpostavku uniformne raspodjele fragmenata po prostoru i omogućava procjenu udaljenosti od centra eksplozije pri kojoj je gustina efikasnih fragmenata jednaka 1 frag/m^2.

Ta udaljenost naziva se radijus efikasnog dejstva i koristi se za usporedbu performansi sličnih projektila.

U tabeli 5.4.2 prikazani su rezultati eksperimentalnih istraživanja u u četvrtkružnoj areni, zajedno sa podacima o vrijednostima radijusa sektora arene, visine sektora, te površine sektora izložene prema detonirajućoj bojevoj glavi.

Tabela 5.4.2 Rezultati istraživanja u četvrtkružnoj areni

Projektil	Radijusi sektora (m)	Visina sektora (m)	Površine sektora (m^2)	Srednji broj proboja
105mm M1 (TNT)	10	1.5	23.56	125.5
	15		35.34	50.5
	20		47.12	27.25
	30		70.68	18.5
120mm M62P3 (TNT)	10	2	31.41	94.5
	15		47.12	53
	20		62.83	21
	30		94.24	10
120mm W2 (TNT)	10	2	31.41	314.62
	15		47.12	199.12
	20		62.83	118.62
	30		94.24	62.5
120mm W2 (Komp. B)	10	2	31.41	281.16
	15		47.12	150.58
	20		62.83	97.5
	30		94.24	55.33
122mm OF-462 (TNT)	10	2	31.41	273
	15		47.12	183.17
	20		62.83	104.67
	30		94.24	49.67
122mm M76 (Komp. B)	10	2	31.41	586
	15		47.12	337.75
	20		62.83	222.13
	30		94.24	100.63
128mm M63 (TNT)	10	1.5	23.56	141
	15		35.34	105.5
	20		47.12	79
	30		70.68	48
128mm M87 (TNT)	10	1.5	23.56	270.25
	15		35.34	203
	20		47.12	136.25
	30		70.68	76.25
128mm M87 (Komp. B)	10	1.5	23.56	374.25
	15		35.34	282.25
	20		47.12	177.25
	30		70.68	121
152mm M84 (TNT)	15	2	47.124	157.125
	20		62.832	109.125
	30		94.248	58.75
	40		125.664	33.25
152mm M84 (Komp. B)	15	2	47.124	277.25
	20		62.832	179.625
	30		94.248	100.5
	40		125.664	61.75
155mm M107 (TNT)	15	2	47.124	160.5
	20		62.832	105.25
	30		94.248	52.25
	40		125.664	28
155mm ERFB (TNT)	15	2	47.124	418.67
	20		62.832	254
	30		94.248	138.33
	40		125.664	63

5.4.1 Predviđanje radijusa efikasnog dejstva HE bojeve glave

Za svaki četvrtkružni sektor na određenom rastojanju od centra eksplozije određuje se srednja gustina fragmenata po površini preko izraza:

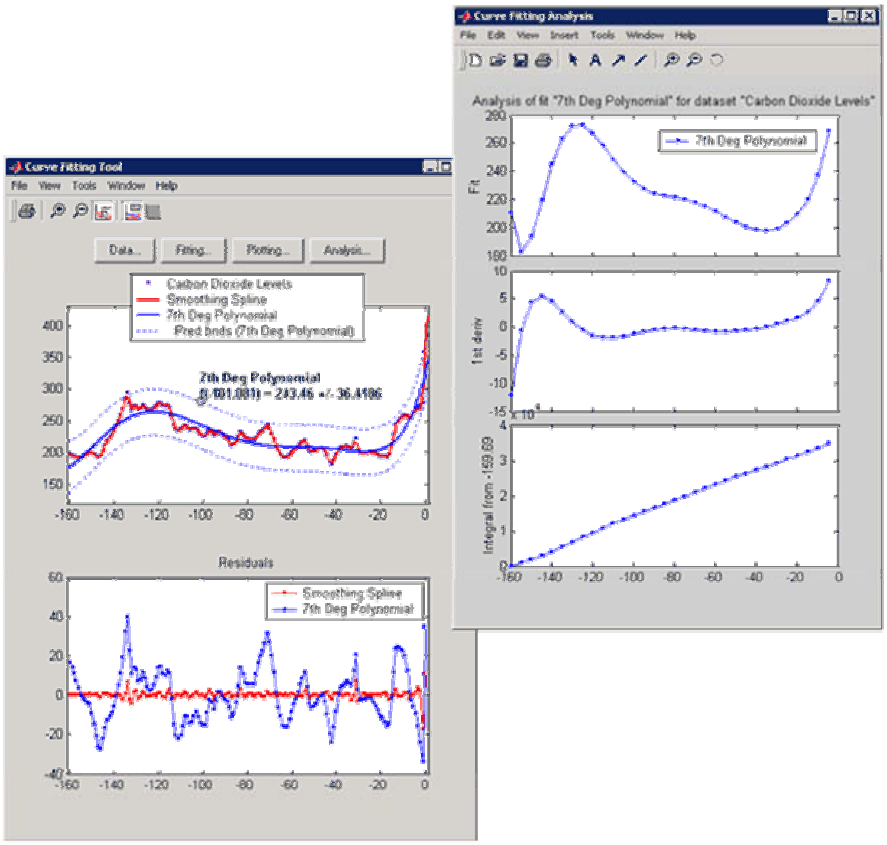
$$d_{si}(R_i) = \frac{n_{si}}{S_{si}}$$

gdje su:

n_{si} - broj efikasnih fragmenata kroz dati sektor četvrtkružne arene,
S_{si} - izložena površina sektora (S_s = ½ $R_k \cdot \pi \cdot h$, gdje je R_k radijus datog sektora, a h_s njegova visina - visina panela).

Za predviđanje regresione krive gustine efikasnih fragmenata u funkciji od udaljenosti od centra detonacije (za pojedine bojeve glave) i radijusa efikasnog dejstva korišten je softverski paket MatLab©, i to Curve Fitting Toolbox© u MatLab©-u.

Curve Fitting Toolbox© (slika 5.4.1.1), sa svojim grafičkim interfejsom omogućava regresionu analizu modela. Ona uključuje alatke za pregledanje i predprocesiranje podataka, razvoj i komparaciju standardnih i korisnički definisanih modela, te aproksimaciju i interpolaciju modela [74].



Slika 5.4.1.1 Curve Fitting Toolbox© u MatLab©-u [74]

Izvršeno je testiranje projektila, odnosno bojevih glava različitih kalibara, geometrijskih i masenih karakteristika i različitih tipova eksplozivnog punjenja.

U tabelama 5.4.1.1 - 5.4.1.3 dat je prikaz tipa eksplozivnog punjenja, mehaničke karakteristike materijala tijela bojeve glave, maseni odnos C_{eks}/M i geometrijski odnos t/d, za ispitivane projektile i bojeve glave.

Tabela 5.4.1.1 Podaci o vrsti eksplozivnog punjenja, mehaničke karakteristike materijala tijela bojeve glave, maseni odnos C_{eks}/M i geometrijski odnos t/d, za ispitivane minobacačke projektile

Minobacački Projektil	Eksploziv	Materijal košuljice	σ_{vsr} (MPa)	σ_{msr} (MPa)	C_{eks}/M	t/d
120mm M62P3	TNT	Č.1534VP	324	589	0,253	0,151
120mm W2	TNT	Č.1737VP	495	784	0,533	0,0720
120mm W2	Komp. B	Č.1737VP	495	784	0,581	0,0720

Tabela 5.4.1.2 Podaci o vrsti eksplozivnog punjenja, mehaničke karakteristike materijala tijela bojeve glave, maseni odnos C_{eks}/M i geometrijski odnos t/d, za ispitivane artiljerijske projektile

Artiljerijski Projektil	Eksploziv	Materijal košuljice	σ_{vsr} (MPa)	σ_{msr} (MPa)	C_{eks}/M	t/d
105mm M1	TNT	Č.9180VP	531	800	0,186	0,190
122mm OF-462	TNT	Č.1737VP	441	731	0,200	0,185
122mm M76	Komp. B	Č.9180VP	523	760	0,263	0,149
152mm M84	TNT	Č.4135VP	920	1002	0,205	0,152
152mm M84	Komp. B	Č.4135VP	920	1002	0,223	0,152
155mm M107	TNT	-	-	-	0,189	0,191
155mm ERFB	TNT	Č.4135VP	920	1002	0,215	0,172

Tabela 5.4.1.3 Podaci o vrsti eksplozivnog punjenja, mehaničke karakteristike materijala tijela bojeve glave, maseni odnos C_{eks}/M i geometrijski odnos t/d, za bojeve glave raketnih projektila

BG raketnog projektila	Eksploziv	Materijal košuljice	σ_{vsr} (MPa)	σ_{msr} (MPa)	C_{eks}/M	t/d
128mm M63	TNT	Č.1737VP	495	784	0,405	0,093
128mm M87	TNT	Č.1737VP	495	784	0,474	0,083
128mm M87	Komp. B	Č.1737VP	495	784	0,516	0,083

Tabele 5.4.1.4 - 5.4.1.6 pokazuju rezultate radijusa efikasnog dejstva, zajedno sa podacima o vrstama eksplozivnog punjenja koje je korišteno, tipu četvrtkružne arene (I^* - arena sa radijusima sektora 10, 15, 20 i 30m, II^{**} - arena sa radijusima 15, 20, 30 i 40m), koeficijentima korelacije aproksimacionih funkcija gustine efikasnih fragmenata, i procjenjenoj vrijednosti radijusa efikasnog dejstva ispitivanih bojevih glava.

Tabela 5.4.1.4 Podaci o rezultatima radijusa efikasnog dejstva za minobacačke projektile

Minobacački projektil	Eksploziv	Tip Arene	Aproksimaciona kriva	Koeficijent korelacije	Radijus efikasnog dejstva (m)
120mm M62P3	TNT	I^*	$d_s=1670\cdot(R_k)^{-2,741}$	0,995	14,98
120mm W2	TNT	I^*	$d_s=772\cdot(R_k)^{-1,991}$	0,995	28,21
120mm W2	Komp. B	I^*	$d_s=2976\cdot(R_k)^{-2,522}$	1	23,83

Tabela 5.4.1.5 Podaci o dobijenim rezultatima radijusa efikasnog dejstva za artilj. projektile

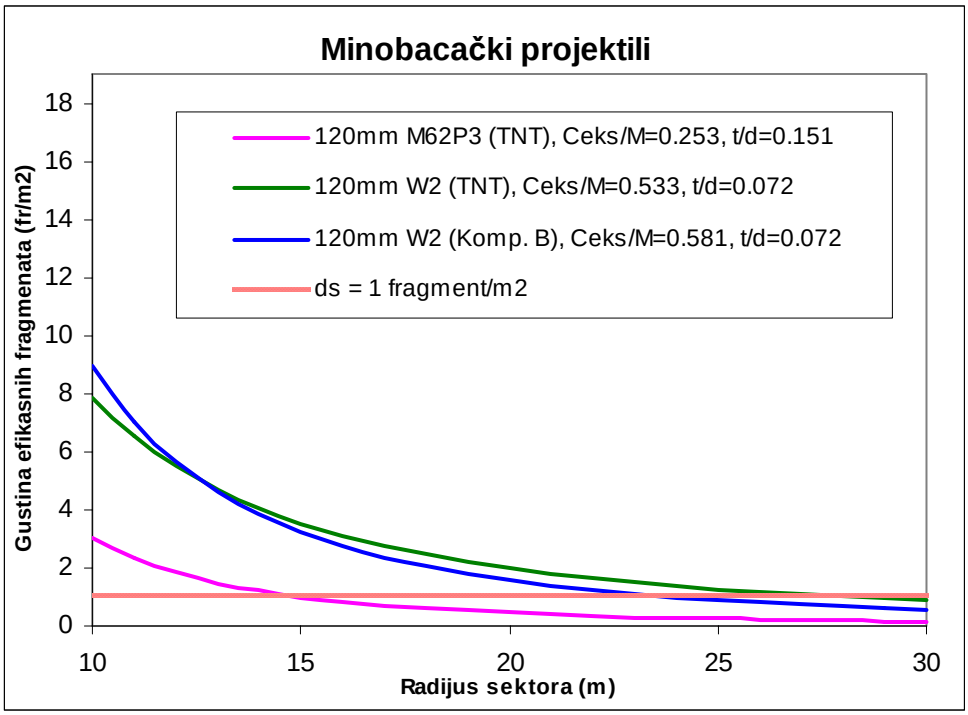
Artiljerijski projektil	Eksploziv	Tip Arene	Aproksimaciona kriva	Koeficijent korelacije	Radijus efikasnog dejstva (m)
105mm M1	TNT	I*	$d_s=7607\cdot(R_k)^{-3,156}$	0,999	16,97
122mm OF-462	TNT	I*	$d_s=1474\cdot(R_k)^{-2,226}$	0,995	26,51
122mm M76	Komp. B	I*	$d_s=4809\cdot(R_k)^{-2,41}$	0,999	33,69
152mm M84	TNT	II**	$d_s=2275\cdot(R_k)^{-2,407}$	0,998	24,8
152mm M84	Komp. B	II**	$d_s=5145\cdot(R_k)^{-2,501}$	0,999	30,46
155mm M107	TNT	II**	$d_s=3871\cdot(R_k)^{-2,596}$	0,999	24,1
155mm ERFB	TNT	II**	$d_s=14260\cdot(R_k)^{-2,725}$	0,999	33,43

Tabela 5.4.1.6 Podaci o rezultatima radijusa efikasnog dejstva za BG raketnih projektila

BG raketnih projektila	Eksploziv	Tip Arene	Aproksimaciona kriva	Koeficijent korelacije	Radijus efikasnog dejstva (m)
128mm M63	TNT	I*	$d_s=410,8\cdot(R_k)^{-1,834}$	0,998	26,62
128mm M87	TNT	I*	$d_s=959,2\cdot(R_k)^{-1,918}$	0,995	35,86
128mm M87	Komp. B	I*	$d_s=1345\cdot(R_k)^{-1,924}$	0,995	42,3

Analizom rezultata eksperimentalnih istraživanja minobacačkih projektila 120mm M62P3 (TNT), 120mm W2 (TNT) i 120mm W2 (Komp. B) u četvrtkružnoj areni, tip I, moguće je zaključiti da na radijus efikasnog dejstva projektila bitno utiče odnos C_{eks}/M, odnos t/d, tip eksploziva i vrsta materijala tijela projektila, odnosno bojeve glave.

Na dijagramu sa slike 5.4.1.2 predstavljene su funkcije gustine efikasnih fragmenata u zavisnosti od udaljenosti od centra detonacije za **minobacačke projektile** ispitivane u četvrtkružnoj areni. Isprekidana crvena linija predstavlja pravac gustine fragmenata od 1 frag/m^2.



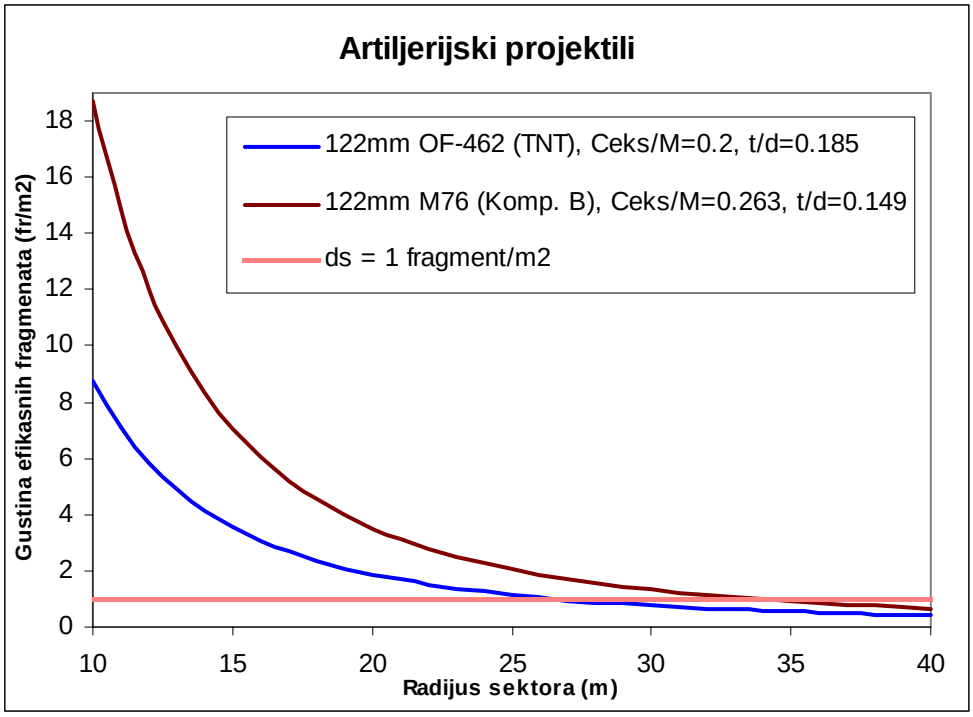
Slika 5.4.1.2 Komparacija radijusa efikasnog dejstva za minobacačke projektile

Od ispitivanih minobacačkih projektila najveći radijus efikasnog dejstva pokazao je projektil 120mm W2, napunjen sa TNT-om. Njegov radijus efikasnog dejstva je za 88% veći u odnosu na projektil 120mm M62P2, a za oko 18% veći u odnosu na projektil 120mm W2 sa Komp. B.

Projektili 120mm W2 (TNT) i 120mm W2 (Komp. B) imaju isti dizajn i tip materijala košuljice, dok materijal tijela za projektil 120mm M62P3 ima manju granicu razvlačenja i zateznu čvrstoću od materijala za projektile 120mm W2.

Odnos *t/d* kod projektila 120mm M62P3 je veći nego kod projektila 120mm W2, dok je odnos C_{eks}/M manji, što znači da projektili 120mm W2 imaju više eksploziva, i tanju stijenku projektila, čime se dobija više fragmenata, veće početne brzine, a time i većeg radijusa efikasnog dejstva.

Obradom rezultata eksperimentalnih istraživanja **artiljerijskih projektila** 122mm OF-462 (TNT) i 122mm M76 (Komp. B) moguće je konstatovati da projektil 122mm M76 sa eksplozivnim punjenjem Komp. B ima značajno veći radijus efikasnog dejstva (za oko 27% veći) u odnosu na projektil 122mm OF-462 sa TNT-om (tabela 5.4.5, slika 5.4.1.3).

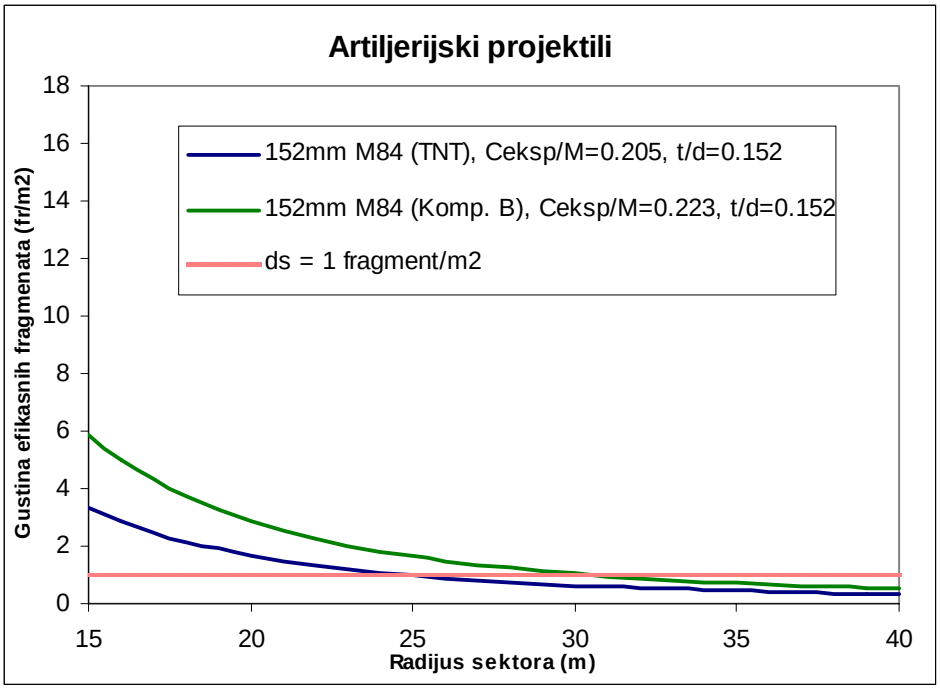


Slika 5.4.1.3 Komparacija radijusa efikasnog dejstva za artiljerijske projektile kalibra 122mm, OF-462 i M76

Projektil 122mm M76 ima veći odnos C_{eks}/M i nešto manji odnos *t/d*. Veći odnos C_{eks}/M utiče na povećanje brzine fragmenata, a veća detonaciona brzina eksploziva Komp. B u odnosu na TNT dodatno utiče na povećanje početne brzine fragmenata.

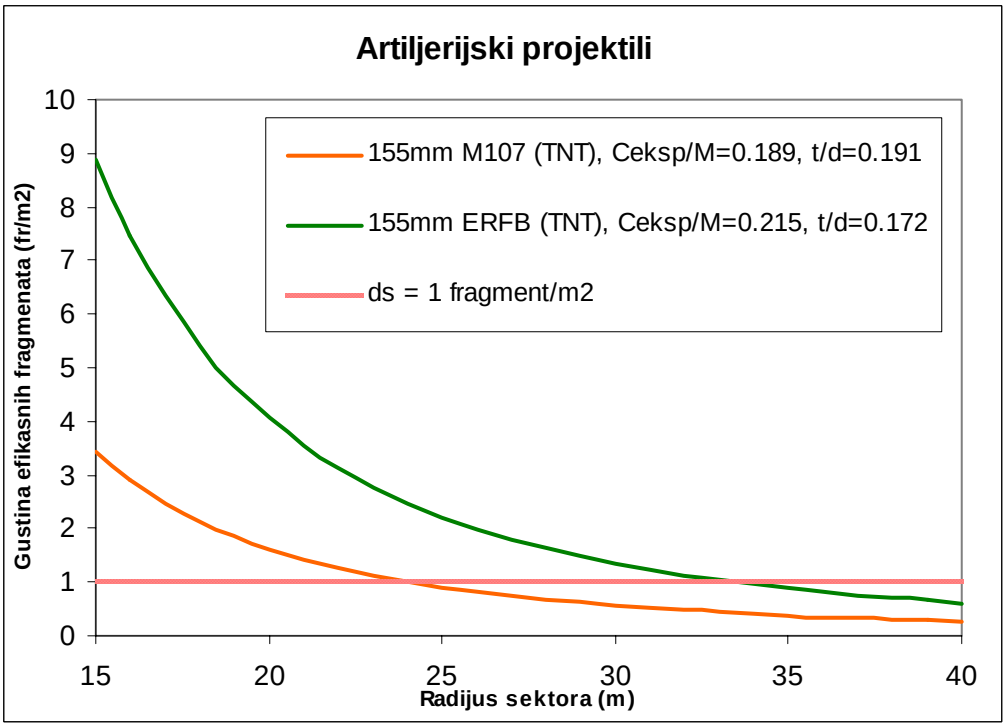
Osim projektila kalibra 122mm, analizirani su rezultati eksperimenata za artiljerijske projektile 152mm i 155mm.

Na slici 5.4.1.4 prikazani su dijagrami gustine efikasnih fragmenata za projektil 152mm M84 (TNT) i 152mm M84 (Komp. B).



Slika 5.4.1.4 Komparacija radijusa efikasnog dejstva za artiljerijske projektile 152mm M84 (TNT, Komp. B)

Komparacija radijusa efikasnog dejstva bojevih glava artiljerijskih projektila 152mm M84 (tabela 5.4.5, slika 5.4.1.4) pokazuje uticaj eksplozivnog punjenja na performanse bojeve glave. Za istu geometriju (*t/d* je jednako) i nešto povećan odnos C_{eksp}/M u korist varijante sa kompozicijom B, radijus efikasnog dejstva (30,46m) je za 23% veći kod bojeve glave koja u sebi sadrži kompoziciju B.



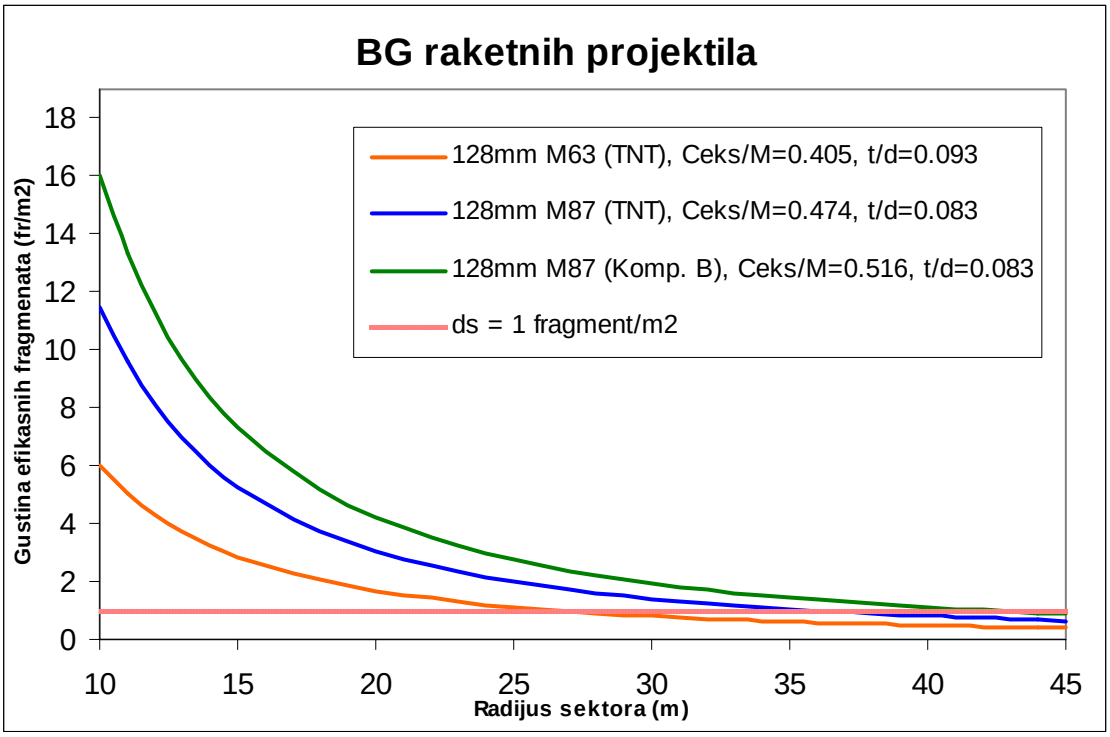
Slika 5.4.1.5 Komparacija radijusa ef. dejstva za artiljerijske projektile 155mm M107 i 155mm ERFB

Bojeva glava artiljerijskog projektila 155mm, ERFB, ima veći odnos C_{eksp}/M i manji odnos t/d, kao i značajno veću vitkost oživala, u usporedbi sa bojevom glavom 155mm M107 (sl. 5.4.1.5). Zato je i njen radijus efikasnog dejstva (33,41m) veći za 39% u odnosu na 155mm M107 (24,1m), kao što se može vidjeti iz tabele 5.4.5 i sa slike 5.4.1.5.

Dizajn projektila 155mm ERFB igra veoma značajnu ulogu u povećanju radijusa efikasnog dejstva. Sa slike 5.4 može se vidjeti da je ovo veoma vitak projektil sa optimiziranim dizajnom.

Analizom **bojevih glava raketnih projektila** 128mm, M63, sa eksplozivnim punjenjem TNT, te BG 128mm M87 sa eksplozivnim punjenjem TNT i Komp. B utvrđeno je da najveći radijus efikasnog dejstva ima bojeva glava M87 (42,3m), varijanta sa komp. B (tabela 5.4.6).

Bezdimenzionalni maseni odnos C_{eksp}/M je najveći kod modela 128mm M87 (komp. B), a najmanji kod 128mm M63 (TNT), dok je geometrijski odnos t/d veći kod BG 128mm M63 nego kod BG 128mm M87 sa TNT-om i Komp. B.



Slika 5.4.1.6 Komparacija radijusa efikasnog dejstva za BG raketnih projektila 128mm M63 (TNT), 128mm M87 (TNT) i 128mm M87 (Komp. B)

Mala debljina tijela bojevih glava raketnih projektila utiče na to da one imaju veliki broj fragmenata male mase. Bojeva glava M87 sa komp. B, daje veliki broj efikasnih fragmenata, zahvaljujući brizantnosti kompozicije B i dobrim fragmentacionim karakteristikama čelika Č.1737VP.

Varijanta bojeve glave M87 (sa komp. B), koja ima veći odnos C_{eksp}/M i vitkija je nego 128mm M63, ima za 60% veći radijus efikasnog dejstva nego bojeva glava 128mm M63 (TNT).

5.5 Analiza početne brzine fragmenata i ugla vektora brzine fragmenata

5.5.1 Početna brzina fragmenata

Prilikom predviđanja terminalne efikasnosti HE bojevih glava, analiza početne brzine fragmenata i ugla vektora brzine fragmenata veoma je značajna. Na osnovu podataka o početnoj brzini fragmenata mogu se odrediti domet fragmenata, brzina fragmenata u toku njegovog leta kroz atmosferu, itd.

Eksperimentalno određivanje početne brzine fragmenata predstavlja veoma skupa eksperimentalna istraživanja. Zbog toga je u ovom magistarskom radu početna brzina fragmenata određena metodom koja podrazumijeva interakciju analitičkih i CAD metoda.

Početna brzina fragmenata (formula Gurney-a) za cilindričnu konfiguraciju metalnog tijela i eksploziva može se odrediti preko izraza:

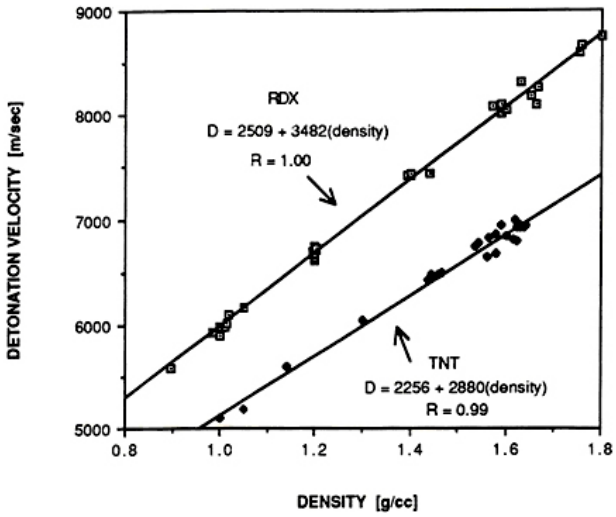
$$v_M = \frac{\sqrt{2E}}{\sqrt{\left(\frac{M}{C_{eks}} + \frac{1}{2}\right)}} = \sqrt{2E}\left[\frac{\frac{C_{eks}}{M}}{\left(1 + \frac{1}{2}\frac{C_{eks}}{M}\right)}\right]^{\frac{1}{2}}$$

Odnos C_{eks}/M predstavlja odnos mase eksploziva prema masi tijela bojeve glave, a izraz $\sqrt{2E}$ predstavlja tzv. konstantu Gurney-a koja se može predstaviti i u slijedećem obliku:

$$\sqrt{2 \cdot E} = 0{,}338 \cdot D(\rho)$$

gdje je D - detonaciona brzina eksploziva koja zavisi od gustine eksploziva.

Gustina eksploziva je, u opštem slučaju, različita za svaki projektil. U istraživanjima kvaliteta eksplozivnog punjenja [78], provedenim od strane švedske kompanije BOFORS za potrebe naše tvornice PRETIS, pokazano je da se kod artiljerijskog projektila 105mm M1 gustina eksplozivnog punjenja TNT mijenja po transverzalnom i longitudinalnom presjeku eksploziva, tj. okomito i paralelno sa osom simetrije eksplozivnog punjenja. Na osnovu dvanaest mjerenja gustine eksploziva utvrđeno je da je srednja gustina eksplozivnog punjenja TNT za ovaj projektil jednaka 1515 kg/m^3.



Slika 5.5.1.1 Zavisnost detonacione brzine eksploziva od gustine za eksplozive RDX i TNT [2]

Da bi se odredila detonaciona brzina eksploziva TNT za usvojenu srednju vrijednost gustine korišten je izraz (slika 5.5.1.1):

$$D_{TNT} = 2256 + 2800 \cdot \rho_{TNT}$$

Na osnovu rečenog, u analizi početne brzine fragmenata, vrijednost detonacione brzine za srednju gustinu eksploziva TNT od 1515 kg/m^3 iznosila je 6620 m/s.

Kod projektila koji sadrže eksplozivno punjenje Komp. B, odnos RDX i TNT eksploziva u eksplozivnoj smjesi iznosio je 50/50. Kod izračunavanja detonacijske brzine eksplozivne smjese Komp. B korišten je aditivni princip, primjenjen od strane Urizara [2]:

$$D_{sm} = \sum \varphi \cdot D$$

gdje su:
D_{sm} - detonacijska brzina smjese,
φ - volumni udio *i* - te komponente mješavine eksplozivnih komponenti smjese,
D - detonacijska brzina čistih eksploziva koji čine smjesu.

Detonacijska brzina čistih eksploziva RDX i TNT određena je korištenjem izraza (slika 5.5.1.1):

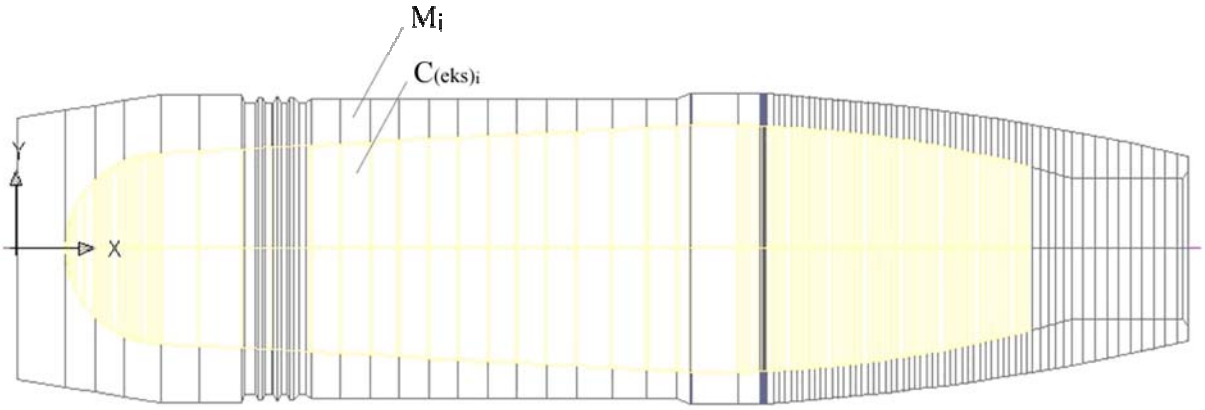
$$D_{RDX} = 2509 + 3482 \cdot \rho_{RDX}$$

$$D_{TNT} = 2256 + 2800 \cdot \rho_{TNT}$$

Srednja gustina eksploziva RDX korištenog u Komp. B iznosila je 1650 kg/m^3, a srednja gustina eksploziva TNT korištenog u Komp. B iznosila je 1580 kg/m^3 [8].

Za dati omjer (50:50) i izračunate detonacione brzine čistih eksploziva (D_{RDX} = 8255 m/s), D_{TNT} = 6806 m/s), detonaciona brzina smjese Komp. B iznosila je 7530 m/s.

Da bi se odredile početne brzine fragmenata za različite tačke na tijelu bojevih glava, izvršena je podjela 3D CAD modela bojevih glava na segmente, u opštem slučaju različite debljine (slika 5.5.1.2).



Slika 5.5.1.2 3D model bojeve glave podijeljen na segmente različite debljine

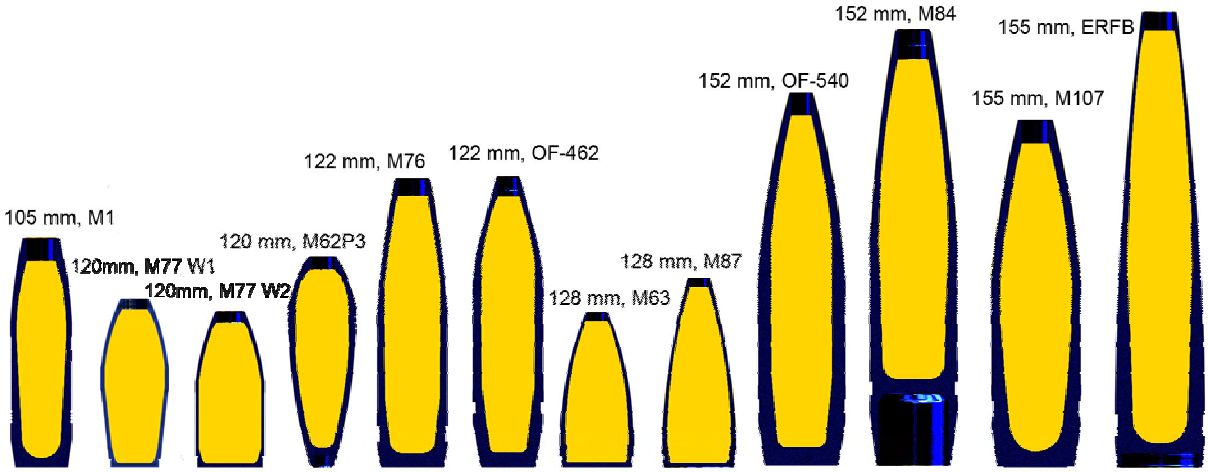
Za svaki segment (3D element) bojeve glave uspostavlja se odnos mase eksploziva prema masi košuljice (C_{eks}/m), a zatim se koristeći formulu Gurney-a, izračunavaju početne brzine fragmenata za svaki element bojeve glave koji sadrži eksplozivno punjenje. Time se omogućava procjena rasporeda početnih brzina fragmenata u zavisnosti od relativnog položaja segmenta bojeve glave.

Izvršena je analiza početne brzine fragmenata za projektile i bojeve glave raketnih projektila predstavljene u tabeli 5.5.1.

Tabela 5.5.1 Projektili i bojeve glave na kojima je vršena analiza početne brzine fragmenata

Minobacački projektili	Artiljerijski projektili	Bojeve glave rak. projektila
120mm M62P3 (TNT) 120mm W1 (TNT) 120mm W1 (Komp. B) 120mm W2 (TNT) 120mm W2 (Komp. B)	105mm M1 (TNT) 122mm OF-462 (TNT) 122mm M76 (Komp. B) 152mm M84 (TNT) 152mm OF-540 (TNT) 155mm M107 (TNT) 155mm ERFB (TNT)	128mm M63 (TNT) 128mm M87 (TNT) 128mm M87 (Komp. B)

Ispitivane bojeve glave prikazane su na slici 5.5.1.3.



Slika 5.5.1.3 Bojeve glave za koje je izvršena analiza početne brzine fragmenata

Rezultati modeliranja za svaku od razmatranih bojevih glava prikazani su na dijagramima predstavljenim na slikama 5.5.1.4 - 5.5.1.6.

Minobacački projektili

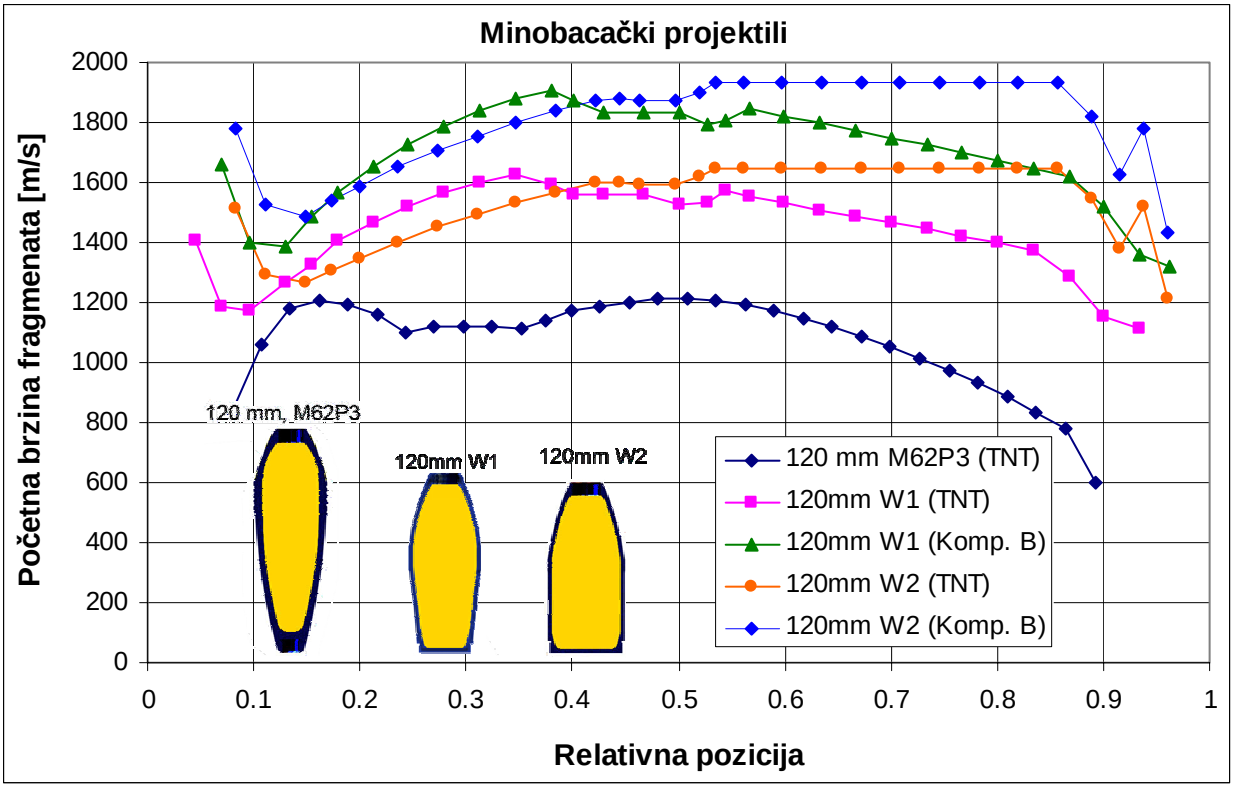
Na slici 5.5.1.4 prikazan je dijagram početnih brzina fragmenata za minobacačke projektile 120mm M62P3 (TNT), 120mm W1 (TNT, Komp. B) i 120mm W2 (TNT, Komp. B).

Početna brzina fragmenata za date projektile kreće se od minimalnih 600 m/s za zadnji segment projektila 120mm M62P3 (TNT) do maksimalnih 1950 m/s za cilindrični dio projektila 120mm W2, napunjen sa Komp. B. Maksimalna početna brzina fragmenata kod projektila 120mm M62P3 iznosi za prednji i bočni snop fragmenata oko 1200 m/s.

Primjećuju se značajno manje početne brzine fragmenata projektila 120mm M62P3 u odnosu na projektile 120mm W1 i W2. To je posljedica veće količine eksploziva (C_{eks}/M) unutar tijela BG u korist projektila 120mm W1 i W2.

Također, može se uočiti da projektili 120mm W1 i W2 sa eksplozivnim punjenjem Komp. B imaju veće početne brzine fragmenata u odnosu na one sa TNT-om, zbog veće detonacione brzine eksploziva Komp. B.

Poseban uticaj na početne brzine fragmenata ima dizajn tijela bojevih glava.



Slika 5.5.1.4 Početna brzina fragmenata u funkciji od relativnog položaja elemenata košuljice za minobacačke projektile 120mm M62P3, 120mm W1 i 120mm W2

Na karakter promjene krivih početnih brzina fragmenata na zadnjem dijelu bojevih glava veoma utiče dizajn bojeve glave. Najveće početne brzine fragmenata mogu se uočiti kod bojeve glave 120mm W2 zbog toga što je njen cilindrični dio veoma izražen i nastavlja se sve do samog dna bojeve glave, čime je odnos C_{eks}/M ostao skoro nepromijenjen.

Kod bojevih glava 120mm W1 i 120mm M62P3 to nije slučaj, pa je primjetno veće smanjenje početnih brzina fragmenata iz zadnjeg dijela tijela bojeve glave, posebno za BG 120mm M62P3 koja ima manju količinu eksploziva na zadnjem dijelu BG nego 120mm W1.

Artiljerijski projektili

Na slici 5.5.1.5 predstavljen je dijagram početnih brzina fragmenata za artiljerijske projektile 105mm M1 (TNT), 122mm M76 (Komp. B), 122mm OF-462 (TNT), 152mm M84 (TNT), 152mm OF-540 (TNT), 155mm M107 (TNT) i 155mm ERFB (TNT).

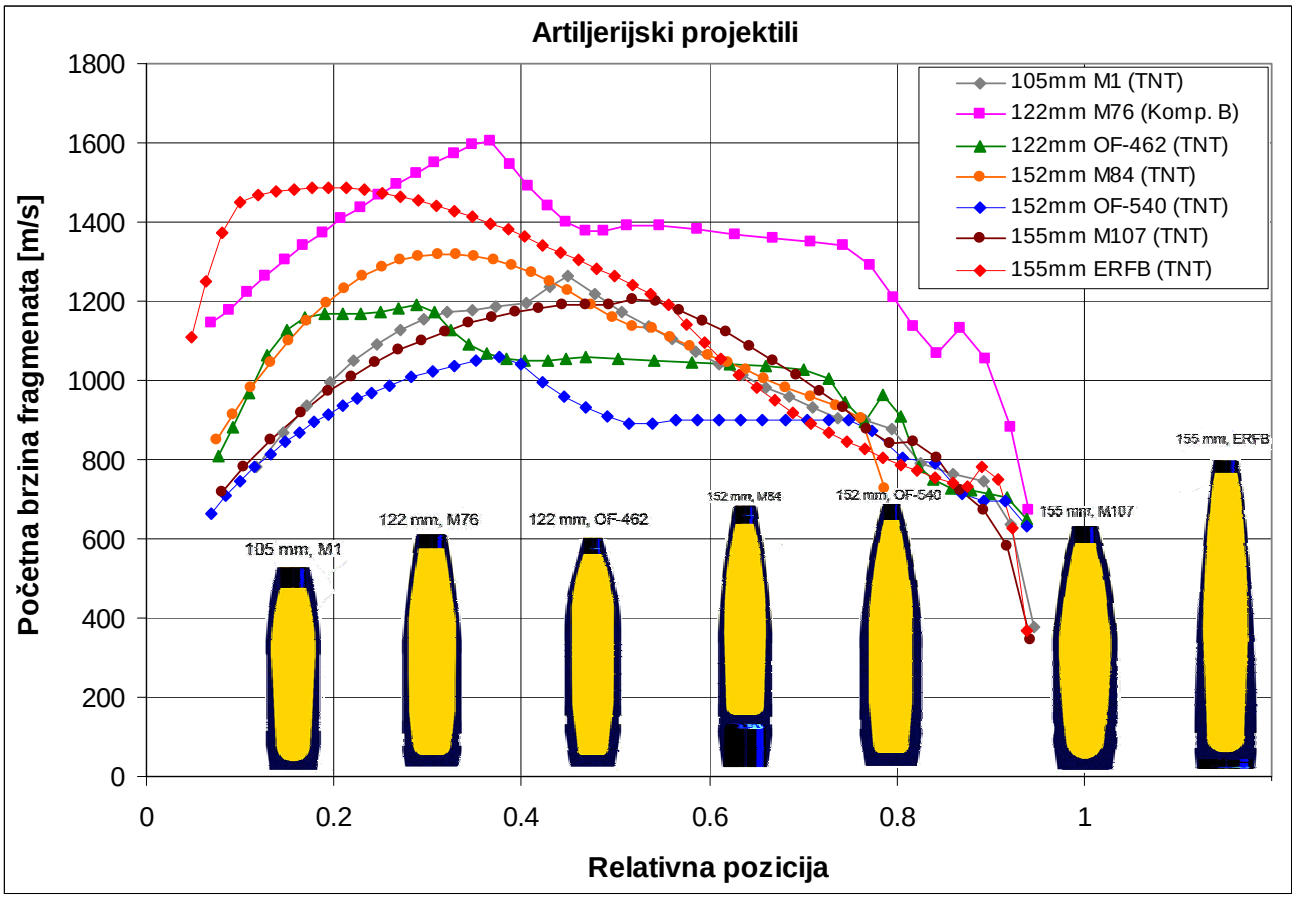
Dijagram pokazuje da najveću početnu brzinu fragmenata ima projektil 122mm M76 (maks. oko 1600 m/s za bočni snop fragmenata - fragmenti koji potiču iz centralnog dijela projektila).

Na karakter promjene početne brzine fragmenata kod artiljerijskog projektila 120mm M76 utiču velika vitkost ovog projektila, odnos C_{eks}/M koji je veći nego napr. kod projektila istog kalibra 122mm OF-462, korištenje Komp. B kao eksplozivnog punjenja, itd.

Najmanju početnu brzinu fragmenata (oko 650 m/s) ima projektil 152mm OF-540, sa eksplozivom TNT. Unutrašnja i spoljašnja trasa ovog projektila dosta je slična kao kod projektila 122mm OF-462 (TNT) koji takođe ima relativno male početne brzine fragmenata, posebno za fragmente iz centralnog i zadnjeg dijela projektila.

Što se tiče projektila 105mm M1 (TNT) on pokazuje trend povećanja početne brzine fragmenata idući prema centralnom dijelu projektila gdje početna brzina fragmenata dostiže svoj maksimum (oko 1300 m/s).

Projektil 152mm M84, slično kao i projektil 155mm ERFB, ima najveću početnu brzinu fragmenata koji potiču iz prednjeg dijela projektila, zbog velike vitkosti prednjeg dijela, i optimizirane unutrašnje trase projektila (mali odnos *t/d*, veći odnos C_{eks}/M).



Slika 5.5.1.5 Početna brzina fragmenata u funkciji od relativnog položaja elemenata košuljice za art. projektile 105mm M1, 122mm M76 i OF-462, 152mm M84 i OF-540, te 155mm M107 i ERFB

Projektil 155mm M107 ima maksimalnu početnu brzinu fragmenata koji potiču iz centralnog dijela projektila, oko 1200 m/s, dok je početna brzina fragmenata za prednji i zadnji dio ovog projektila dosta manja u odnosu na centralni dio.

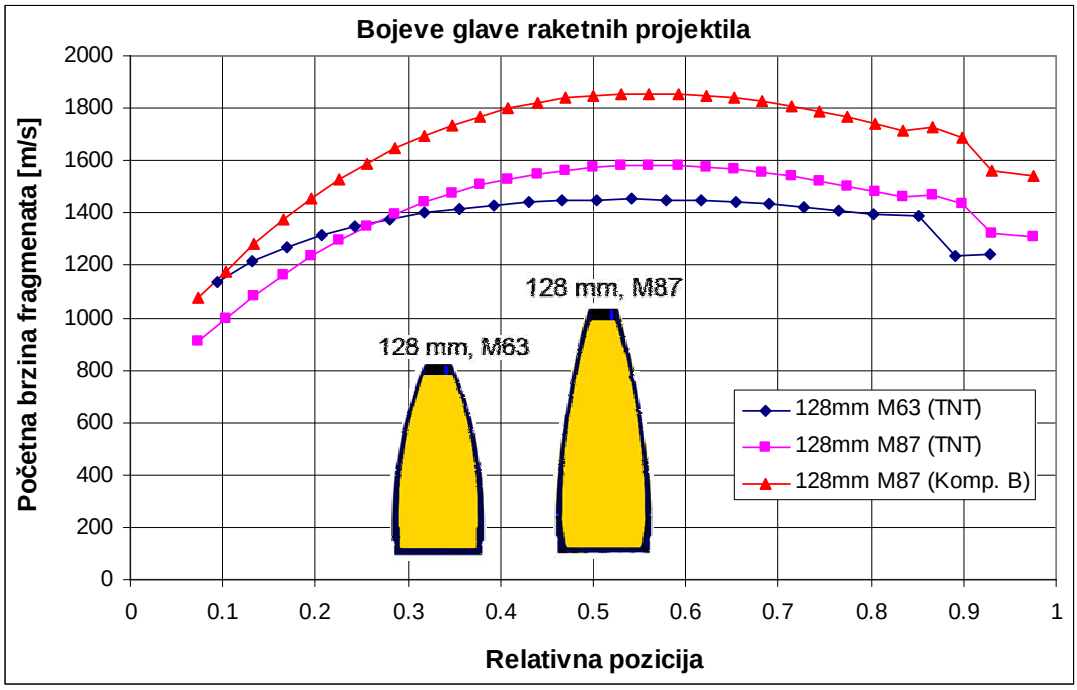
Sa dijagrama na slici 5.5.1.5 očit je uticaj unutrašnje i vanjske trase tijela bojeve glave na raspored početnih brzina fragmenata pojedinih segmenata bojeve glave. Na dijelovima tijela bojevih glava gdje je unutrašnja trasa neoptimizovana (veći odnos *t/d*, manji C_{eks}/M), kao što je slučaj sa zadnjim dijelom projektila, postoji znatno smanjenje početne brzine fragmenata, a time i njihove efikasnosti na cilju.

Bojeve glave raketnih projektila

Na slici 5.5.1.6 prikazan je dijagram početnih brzina fragmenata za bojeve glave raketnih projektila 128mm M63 (TNT), 128mm M87 (TNT) i 128mm M87 (Komp. B).

Najnižu početnu brzinu fragmenata ima bojeve glava 128mm M87, sa eksplozivom TNT, i to na prednjem dijelu projektila gdje je odnos C_{eks}/M nešto manji u odnosu na prednji dio tijela bojeve glave 128mm M63.

Najveća početna brzina fragmenata očita je kod BG 128mm M87, sa eksplozivom Komp. B, i iznosi oko 1850 m/s, za centralni dio bojeve glave.



Slika 5.5.1.6 Početna brzina fragmenata u funkciji od relativnog položaja elemenata košuljice za bojeve glave raketnih projektila 128mm M63 i 128mm M87

Na zadnjem dijelu bojeve glave, u sva tri slučaja, primjećuje se pad vrijednosti početnih brzina fragmenata, zbog smanjene količine eksploziva, a povećane mase tijela u tom segmentu bojevih glava.

5.5.2 Ugao vektora brzina fragmenata (Taylor-ov ugao)

Analiza ugla vektora brzine fragmenata prilikom fragmentacije HE bojeve glave izvršena je za bojeve glave kod kojih je analizirana početna brzina fragmenata.

Analitički izraz za određivanje ugla vektora brzine fragmenata glasi:

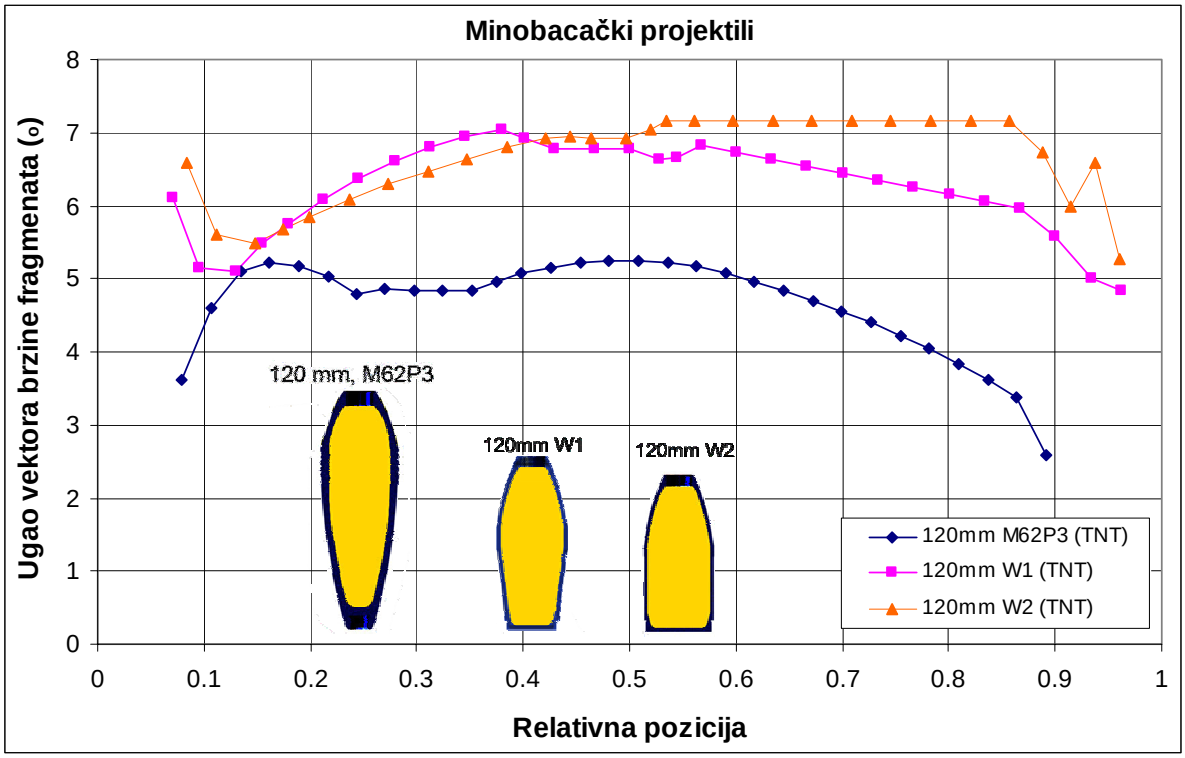
$$\theta_i = \arcsin\left(\frac{v_i}{2 \cdot D_i}\right)$$

Ovdje v_i označava početnu brzinu fragmenata za pojedini segment projektila, a D_i detonacionu brzinu eksploziva.

Analiza ugla vektora brzine fragmenata izvršena je za minobacačke projektile: 120mm M62P3 (TNT), 120mm W1 (TNT) i 120mm W2 (TNT), artiljerijske projektile: 105mm M1 (TNT), 122mm M76 (Komp. B), 122mm OF-462 (TNT), 155mm M107 (TNT) i 155mm ERFB (TNT), te bojeve glave raketnih projektila 128mm M63 (TNT) i 128mm M87 (TNT, Komp. B).

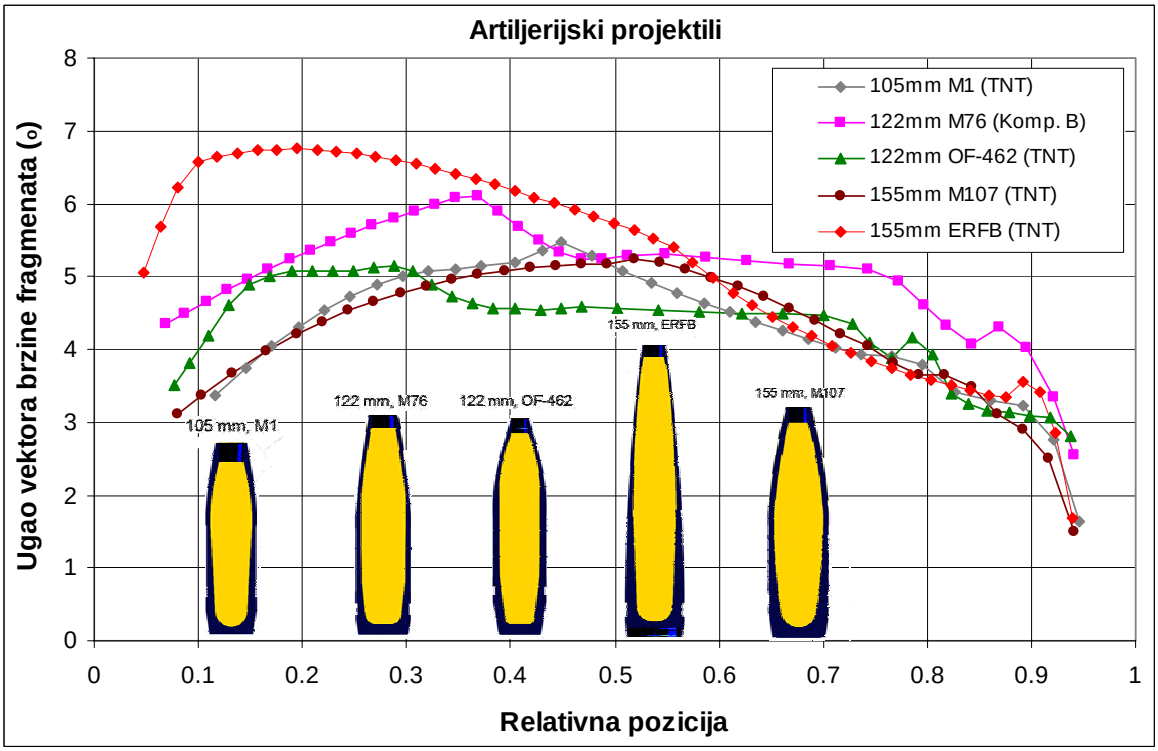
Na slici 5.5.2.1 prikazani su dijagrami ugla vektora brzine fragmenata u funkciji od relativnog položaja elemenata košuljice za **minobacačke projektile** 120mm M62P3, 120mm M77 W1 i 120mm M77 W2. Trend promjene ugla vektora brzine fragmenata isti je kao u slučaju početnih brzina fragmenata, jer je ugao vektora brzine fragmenata direktno proporcionalan početnoj brzini fragmenata.

U slučaju ispitivanih minobacačkih projektila, najmanji ugao vektora brzine fragmenata postiže projektil 120mm M62P3 (oko 2,5°), i to na svom zadnjem dijelu. Najveći ugao vektora brzine fragmenata ima projektil 120mm W2 (oko 7,2°) za fragmente koji potiču sa centralnog cilindričnog dijela bojeve glave.



Slika 5.5.2.1 Ugao vektora brzine fragmenata u funkciji od relativnog položaja elemenata košuljice za minobacačke projektile 120mm M62P3, 120mm W1 i 120mm W2

Slika 5.5.2.2 prikazuje dijagrame ugla vektora brzine fragmenata u funkciji od relativnog položaja elemenata košuljice za **artiljerijske projektile** 105mm M1, 122mm M76, 122mm OF-462, 155mm M107 i 155mm ERFB.

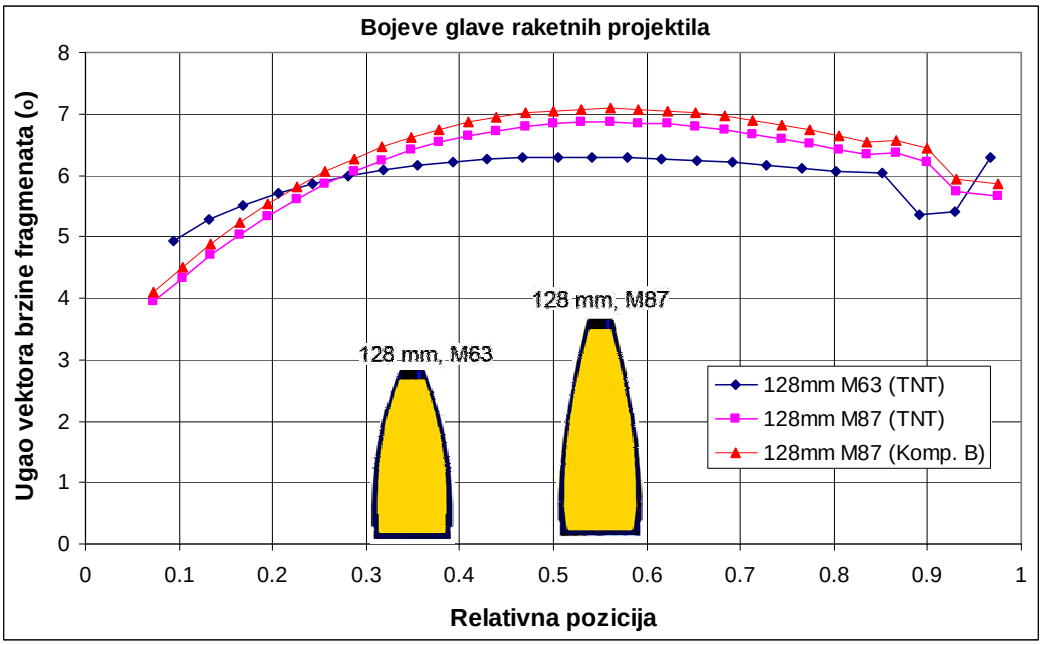


Slika 5.5.2.2 Ugao vektora brzine fragmenata u funkciji od relativnog položaja elemenata košuljice za art. projektile 105mm M1, 122mm M76, 122mm OF-462, 155mm M107 i 155mm ERFB

Ugao vektora brzine fragmenata kod ovih projektila kreće se u intervalu od 1,5° (fragmenti koji potiču iz zadnjeg dijela projektila 105mm M1, 155mm M107 i 155mm ERFB) do oko 6,5° (fragmenti iz prednjeg dijela projektila 155mm ERFB). Procjenjena prosječna vrijednost ugla vektora brzine fragmenata kod projektila 105mm M1 iznosi 5°, kod projektila 122mm M76 oko 5,5°, kod 122mm OF-462 on iznosi oko 4,5°, kod 155mm M107 oko 5° i kod projektila 155mm ERFB oko 6°. Projektil 155mm ERFB, sa eksplozivnim punjenjem TNT, ima najveći ugao vektora brzine fragmenata od oko 6,8°, i to za fragmente sa prednjeg dijela projektila.

Interesantno je primjetiti da su na dijagramu sa sl. 5.5.1.5 početne brzine fragmenata za projektil 122mm M76 veće nego kod projektila 155mm ERFB, ali su Taylor-ovi uglovi veći kod projektila 155mm ERFB (slika 5.5.2.2). Ugao vektora brzine fragmenata najmanji je za fragmente koji potiču iz zadnjeg dijela projektila, što je posljedica velike debljine tijela na ovom dijelu projektila, a manje količine eksploziva.

Na slici 5.5.2.3 prikazan je dijagram ugla vektora brzine fragmenata u funkciji od relativnog položaja elemenata košuljice za **bojeve glave raketnih projektila** 128mm M63 (TNT) i 128mm M87 (TNT, Komp. B).



Slika 5.5.2.3 Ugao vektora brzine fragmenata u funkciji od relativnog položaja elemenata košuljice za BG raketnih projektila 128mm M63 i 128mm M87

Interval vrijednosti ugla vektora brzine fragmenata za ove BG iznosi od 4° do 7°.

Bojeva glava 128mm M87 sa Komp. B ima pokazuje najveće vrijednosti ugla vektora brzine fragmenata. Međutim, ako se pogleda dijagram sa slike 5.5.1.6 i uporedi sa dijagramom na slici 5.5.2.3 može se uočiti da, iako su početne brzine fragmenata bile mnogo veće kod BG 128mm M87 sa Komp. B nego kod varijante iste BG sa TNT-om, vrijednosti ugla vektora brzine fragmenata za BG sa Komp. B nisu mnogo veće nego one kod varijante sa TNT-om.

Sa sl. 5.5.2.3 mogu se uočiti nešto veći uglovi vektora brzine fragmenata kod projektila 128mm M87 za centralni i zadnji dio projektila, dok bojeva glava 128mm M63 ima nešto veće uglove vektora brzine fragmenata koji potiču iz prednjeg dijela bojeve glave. To je posljedica većeg relativnog odnosa C_{eks}/M za prednji dio BG 128mm M63 u odnosu na BG 128mm M87.

Kao opšti zaključak može se konstatovati da je prosječna vrijednost Taylor-ovo ugla za centralni dio projektila u kome se nalazi najveći dio mase metala tijela BG i eksplozivnog punjenja iznosi između 4° i 7° za sve tipove projektila.

5.6 Analiza dinamike leta fragmenata

Analiza dinamike leta fragmenata bazira se na korištenju eksperimentalnih podataka dobijenih Pit testom i analitičkog izraza za određivanje efikasnog dometa pojedinačnog fragmenta:

$$x = \frac{2 \cdot m}{C_x \cdot S \cdot \rho_w} \ln \frac{v_0}{v}$$

gdje su:
m - srednja masa određene masene grupe fragmenata (kg),
C_x - aerodinamički koeficijent otpora fragmenta,
S - projekcija površine fragmenta okomita na pravac kretanja fragmenta (m^2),
ρ_w - gustina vazduha (kg/m^3),
v_0 - početna brzina fragmenata (m/s),
v - minimalna brzina fragmenta potrebna za onesposobljavanje vojnika (m/s).

Da bi se odredio efikasni domet pojedinačnog fragmenta za svaku masenu grupu fragmenata potrebno je poznavati vrijednost gustine vazduha ρ_w, projekciju površine fragmenta okomitu na pravac kretanja fragmenta S, aerodinamički koeficijent otpora fragmenta C_x, početnu brzina fragmenata v_0 i minimalnu brzina fragmenta potrebnu za onesposobljavanje vojnika v.

Usvaja se da je gustina vazduha konstantna i iznosi 1,23 kg/m^3.

Da bi odredili projekciju površine fragmenta okomitu na pravac kretanja fragmenta S i aerodinamički koeficijent otpora fragmenta C_x potrebno je fragment aproksimirati nekim geometrijskim tijelom. Kao ekvivalentni oblik fragmenta usvojen je oblik sfere.

Oblik fragmenata, aproksimiran sferom prečnika a_{ekv}, izračunava se korištenjem izraza:

$$a_{ekv} = \sqrt[3]{\frac{6 \cdot m}{\rho_k \cdot \pi}}$$

gdje je ρ_k - gustina materijala tijela bojeve glave. Usvaja se da je ρ_k konstantna, jednaka za sve bojeve glave, i iznosi 7800 kg/m^3.

Poznavanjem prečnika ekvivalentne sfere a_{ekv} određuje se odnos projekcije površine fragmenta okomite na pravac kretanja fragmenta S i njegove mase m za ekvivalentni sferični oblik fragmenta preko izraza:

$$\frac{S}{m} = \frac{3}{2 \cdot a_{ekv} \cdot \rho_k}$$

Da bi odredili početne brzine fragmenata v_0 za različite dijelove tijela bojeve glave potrebno je koristiti formulu Gurney-a. Na osnovu analize početnih brzina fragmenata moguće je utvrditi interval vrijednosti početnih brzina fragmenata za svaku bojevu glavu. Iz tog intervala usvaja se srednja vrijednost početne brzine fragmenata za dominantni bočni snop fragmenata.

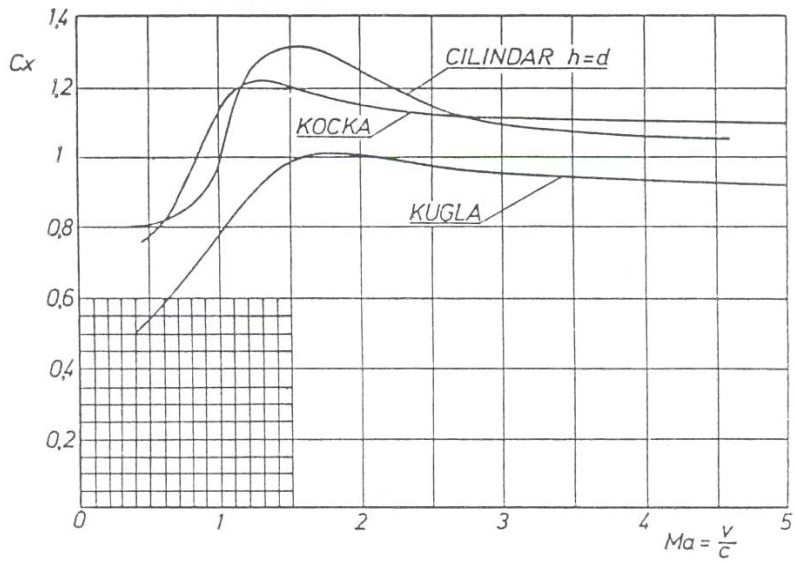
Prilikom određivanja minimalne brzine fragmenta potrebne za onesposobljavanje vojnika v korišten je američki kriterij, kojim se usvaja onesposobljavajući nivo kinetičke energije fragmenta E_{KS} od 80J:

$$E_{KS} = \frac{m \cdot v^2}{2} = 80J$$

Za usvojeni kriterij onesposobljavajućeg nivoa kinetičke energije i srednju masu fragmenta, minimalna brzina fragmenta u trenutku udara u cilj, potrebna za onesposobljavanje vojnika, dobija se preko izraza:

$$v_{\min} = \sqrt{\frac{2 \cdot E_{KS}}{m}}$$

Prilikom određivanja koefijenta otpora fragmenta oblika sfere C_x korišten je dijagram predstavljen na slici 5.6.1.



Slika 15.6.1 Koeficijent otpora C_x u funkciji od Mach-ovog broja za različite oblike fragmenata [9]

Interval brzina fragmenata za koji je usvojen koeficijent otpora sfere određen je iz uvjeta početne brzine fragmenta v_0 i minimalne brzine fragmenta u trenutku udara u cilj v.

Fragmenti se u svom letu prema cilju kreću supersoničnim brzinama (2 < Ma < 5). Promjena krive koeficijenta otpora C_x u zavisnosti od Mach-ovog broja (slika 5.6.1) za Mach-ove brojeve 2 - 5 može se aproksimirati pravcem, pa se za interval Mach-ovih brojeva, određen na osnovu intervala usvojene početne brzine v_0 i usvojene vrijednosti minimalne brzine fragmenta u trenutku udara u cilj v, određuje srednja vrijednost koeficijenta otpora C_x.

Izraz za procjenu efikasnog dometa pojedinačnog fragmenta x u zavisnosti od srednje mase fragmenta m može se napisati u proširenom obliku:

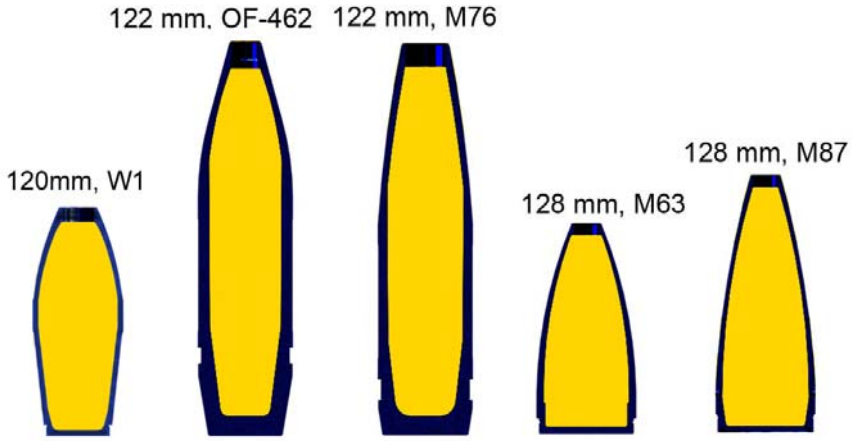
$$x_s = \frac{2 \cdot m}{C_x \cdot S \cdot \rho_w} \ln \frac{v_0}{\sqrt{\frac{2 \cdot E_{KS}}{m}}}$$

Analiza dinamike leta fragmenata izvršena je na slijedećim projektilima, odnosno bojevim glavama raketnih projektila (tabela 5.6.1).

Tabela 5.6.1 Analizirane bojeve glave

Minobacački projektil	Artiljerijski projektili	Bojeve glave raketnih projektila
120mm W1 (TNT)	122mm OF-462 (TNT) 122mm M76 (Komp. B)	128mm M63 (TNT) 128mm M87 (TNT)

Bojeve glave, predstavljene u tabeli 5.6.1, prikazane su na slici 5.6.2.



Slika 5.6.2 Bojeve glave koje su korištene u analizi dinamike leta fragmenata

U tabeli 5.6.2 prikazane su usvojene vrijednosti početne brzine fragmenata v_0 za dati projektil i minimalne brzine fragmenta u trenutku udara u cilj v, interval Mach-ovih brojeva koji se odnosi za interval početne brzine fragmenata i minimalne brzine fragmenta prilikom udara u cilj za najmanju masenu grupu, te srednja vrijednost aerodinamičkog koefijenta otpora fragmenta oblika sfere C_x, dobijena za dati interval Mach-ovih brojeva.

Tabela 5.6.2 Vrijednosti srednje početne brzine fragmenata, minimalne brzine fragmenta u trenutku udara u cilj, interval Mach-ovih brojeva, te srednja vrijednost aerodinamičkog koefijenta otpora fragmenta oblika sfere za ispitivane projektile i bojeve glave

Projektil ili BG raketnog projektila	Vrsta eksploziva	Srednja poč. brzina fragmenata (m/s)	Min. brzina fragm. u trenutku udara u cilj (m/s)	Interval Mach-ovih brojeva	Srednja vrijednost koef. otpora fragmenta oblika sfere
120mm W1	TNT	1600	530	1.6 - 4.7	0.96
122mm OF-462	TNT	1000	750	2.2 - 2.9	0.97
122mm M76	Komp. B	1500	920	2.7 - 4.4	0.93
128mm M63	TNT	1400	680	2.0 - 4.1	0.96
128mm M87	TNT	1500	710	2.1 - 4.4	0.95

U tabeli 5.6.3 dat je prikaz podataka (masene grupe fragmenata i srednja masa fragmenata testnih grupa) dobijenim ispitivanjem fragmentacije bojevih glava u Pit uređajima.

Tabela 5.6.3 Vrijednosti srednje mase fragmenata za date masene grupe ispitivanih projektila i bojevih glava raketnih projektila

BG ili projektil	**Masene grupe, g**	**Srednja masa fragmenata testne grupe, g**
120mm W1 (TNT)	do 1	0.57
	1-2	1.66
	2-3	2.60
	3-5	4.18
	5-10	7.09
	10-20	13.19
	20-30	25.00
	30-50	47.00
	50-70	68.00
122mm M76 (Komp. B)	do 0.5	0.19
	0.5 - 1	0.71
	1 - 2	1.42

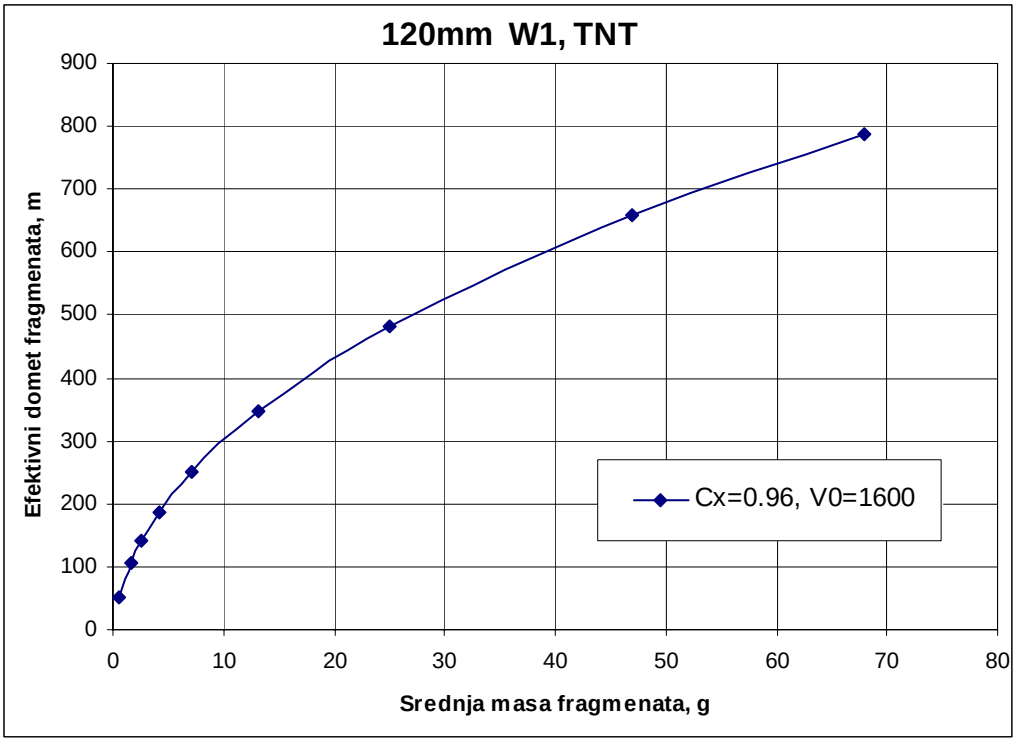
	2 - 3	2.44
	3 -5	3.86
	5 -10	6.89
	10 - 20	13.44
	20 - 30	23.46
	30 - 50	36.84
	50 - 70	69.13
122mm OF-462 (TNT)	do 0.5	0.29
	0.5 - 1	0.77
	1 - 2	1.48
	2 - 3	2.42
	3 -5	3.92
	5 -10	7.11
	10 - 15	11.04
	15 - 20	17.36
	20 - 30	26.69
	30 - 50	38.05
	50 - 70	58.79
128mm M63 (TNT)	do 0.5	0.34
	0.5-1	0.72
	1-2	1.42
	2-3	2.45
	3-5	3.88
	5-10	6.72
	10-15	12.00
	15-20	17.25
	20-30	22.21
	30-50	32.77
	50-70	51.00
128mm M87 (TNT)	do 0.5	0.32
	0.5 - 1	0.71
	1 - 2	1.41
	2 - 3	2.44
	3 - 5	3.77
	5 - 10	6.61
	10 - 15	11.44
	15 - 20	18.00
	20 - 30	22.00
	30 - 50	40.85
	50 - 70	62.00

Minobacački projektili

Izvršena je analiza efikasnog dometa fragmenata različitih masenih grupa za minobacački projektil 120mm W1, sa eksplozivnim punjenjem TNT (slika 5.6.2). Podaci o srednjoj masi fragmenata testnih grupa dati su u tabeli 5.6.3.

Uvrštavajući u izraz za procjenu efikasnog dometa fragmenta vrijednosti srednje mase određene masene grupe fragmenata, koeficijenta otpora fragmenta, projekcije površine fragmenta okomite na pravac kretanja fragmenta, gustine vazduha, početne brzine fragmenata i minimalne brzine fragmenta prilikom udara u cilj, dobijene su vrijednosti koje su prikazane na slici 5.6.3.

U tabeli 5.6.2 date su usvojene vrijednosti srednje početne brzine fragmenata, minimalne brzine fragmenta u trenutku udara u cilj, interval Mach-ovih brojeva, te srednja vrijednost aerodinamičkog koefijenta otpora fragmenta oblika sfere za projektil 120mm W1.



Slika 5.6.3 Dijagram efektivnog dometa fragmenata za minobacački projektil 120mm W1, TNT

Na slici 5.6.3 prikazan je dijagram efektivnog dometa fragmenata pojedinačnog fragmenta u zavisnosti od masene grupe fragmenata za projektil 120mm W1, sa eksplozivom TNT.

Dijagram pokazuje da teoretski maksimalni efikasni domet fragmenta za datu bojevu glavu iznosi oko 800m od tačke detonacije, što znači da pojedinačni fragment može doći do te udaljenosti.

Dobijena vrijednost maksimalnog efikasnog dometa fragmenta može poslužiti za definisanje sigurne udaljenosti na kojoj se smije nalaziti čovjek prilikom ispitivanja efikasnosti ove bojeve glave.

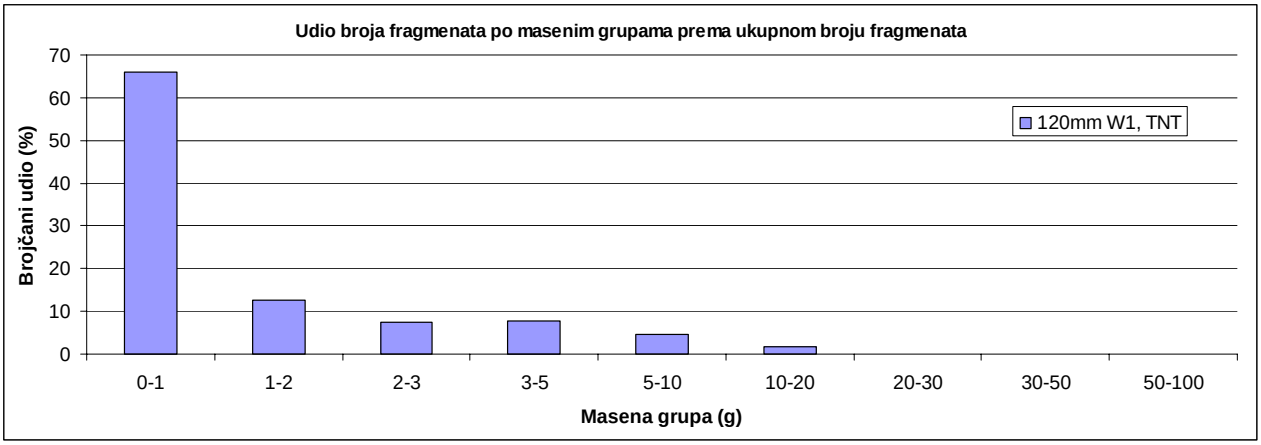
Na slici 5.6.4 predstavljena su dva dijagrama, jedan predstavlja brojčani udio masenih grupa fragmenata prema ukupnom broju fragmenata, a drugi maseni udio testnih grupa fragmenata prema ukupnoj masi fragmenata.

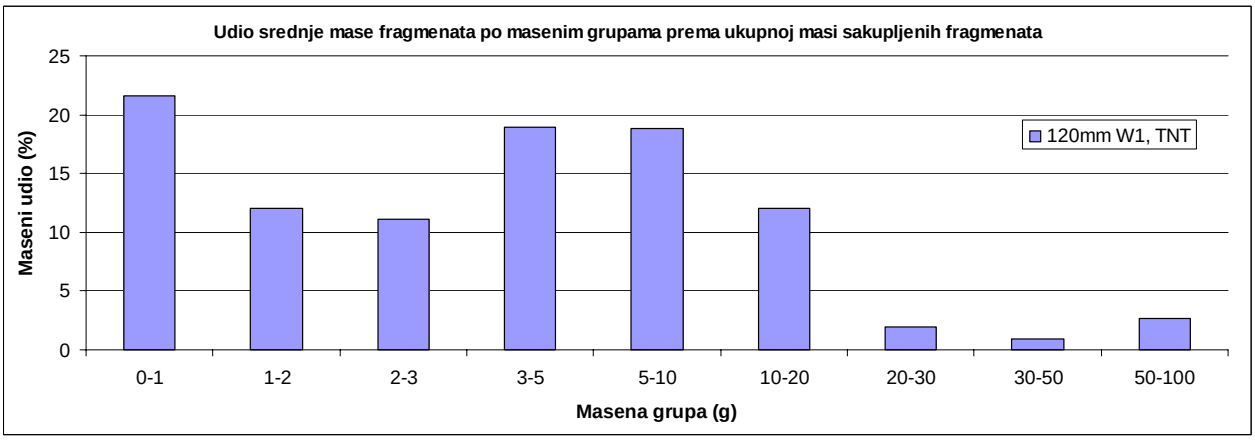
Sa dijagrama brojčanog udjela masenih grupa fragmenata prema ukupnom broju fragmenata može se zaključiti da najbrojniju masenu grupu fragmenata (1961 fragment) čine fragmenti mase do 1g, oko 66% ukupnog broja fragmenata.

Fragmenti ove mase, kako se može vidjeti sa dijagrama efektivnog dometa fragmenata na sl. 3 imaju maksimalni efektivni domet za pojedinačni fragment oko 50m do centra eksplozije.

Fragmenti mase do 1g čine oko 23% ukupne mase svih fragmenata.

Analizom prve tri masene grupe fragmenata (< 3g) može se uočiti da oko 45% mase fragmenata nosi 86% ukupnog broja fragmenata.





Slika 5.6.4 Dijagrami brojčanog i masenog udjela masenih grupa fragmenata prema ukupnom broju i masi sakupljenih fragmenata za projektil 120mm W1, TNT

Fragmenti veće srednje mase (>3g), iako imaju veliki udio u ukupnoj masi sakupljenih fragmenata, ne utiču bitno na smrtonosnu zonu bojeve glave jer je njihov broj veoma mali u odnosu na fragmente manje mase.

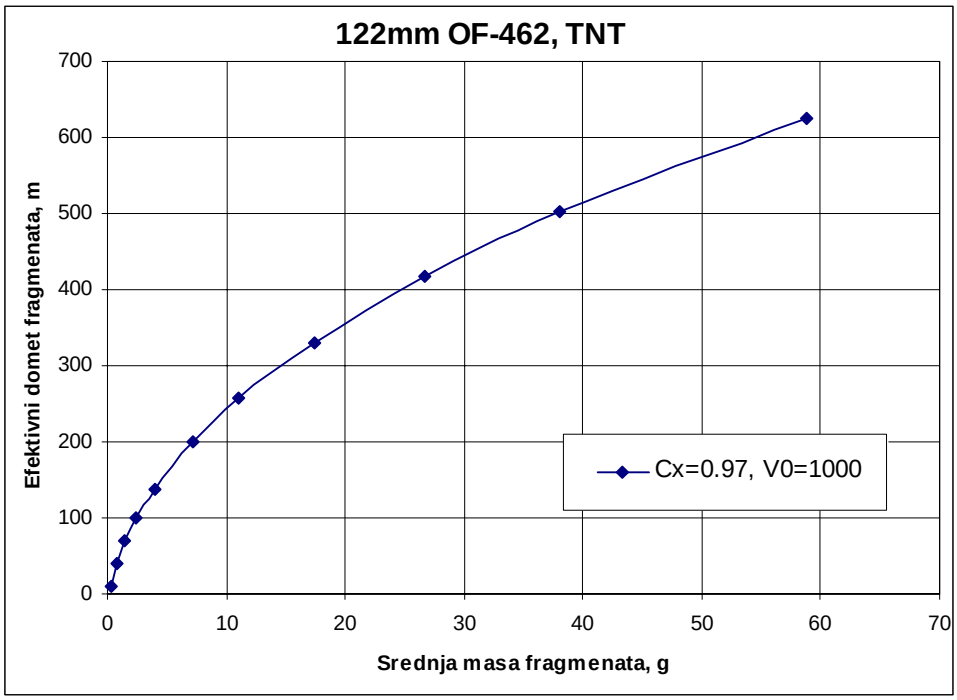
Artiljerijski projektili

Analiza efikasnog dometa fragmenata različitih masenih grupa izvršena je za dva tipa artiljerijskih projektila:

- 122mm OF-462, sa eksplozivnim punjenjem TNT, i
- 122mm M76, sa eksplozivom Komp. B.

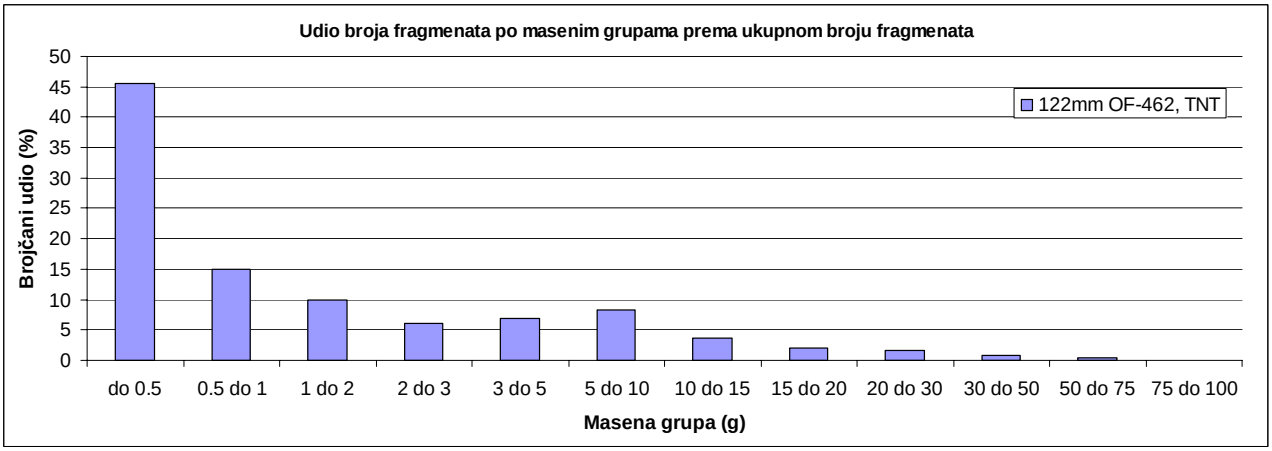
Na sl. 5.6.2 prikazani su artiljerijski projektili, a u tabeli 5.6.3 date su vrijednosti srednje mase fragmenata za date masene grupe ispitivanih projektila.

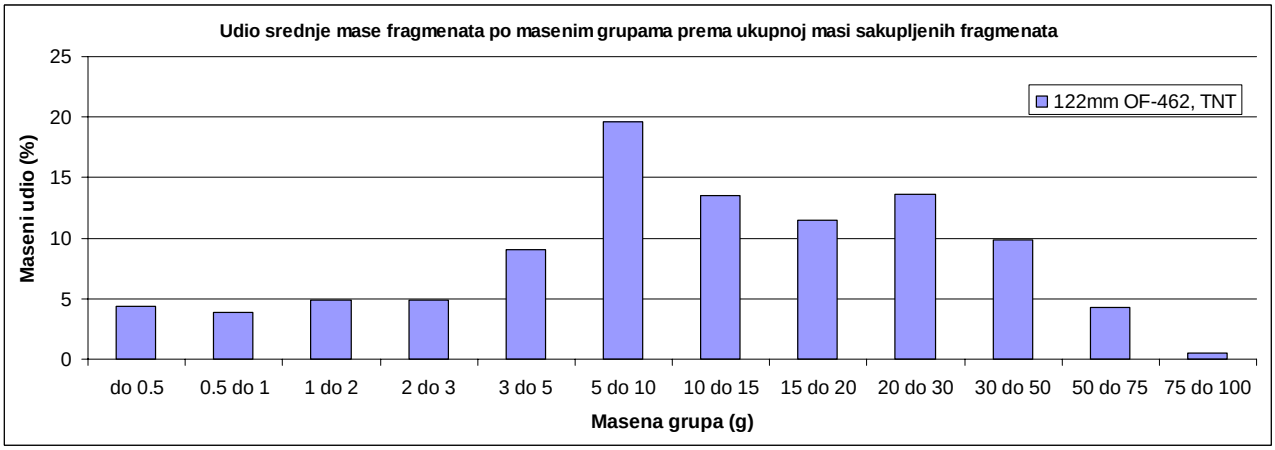
U tabeli 5.6.2 date su usvojene vrijednosti srednje početne brzine fragmenata, minimalne brzine fragmenta u trenutku udara u cilj, interval Mach-ovih brojeva, te srednja vrijednost aerodinamičkog koefijenta otpora fragmenta oblika sfere za projektile 122mm OF-462 i 122mm M76.



Slika 5.6.5 Dijagram efektivnog dometa fragmenata za projektil 122mm OF-462, TNT

Slika 5.6.5 pokazuje da teoretski maksimalni efikasni domet pojedinačnog fragmenta za projektil 122mm OF-462 iznosi oko 630m od tačke detonacije.



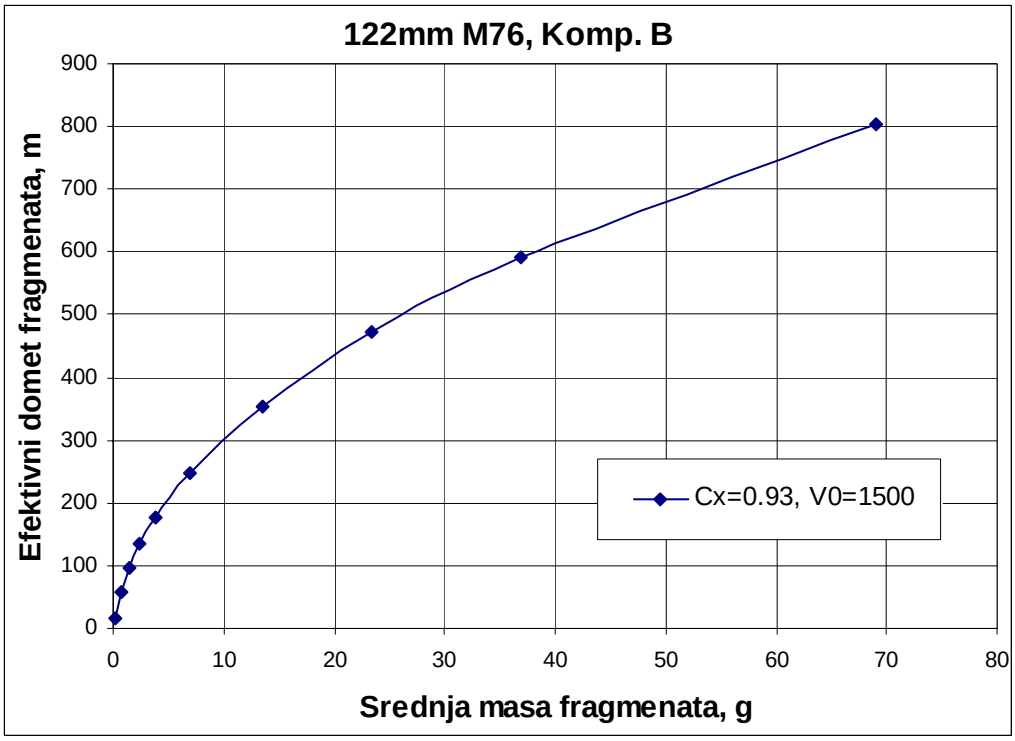


Slika 5.6.6 Dijagrami brojčanog i masenog udjela masenih grupa fragmenata prema ukupnom broju i masi sakupljenih fragmenata za artiljerijski projektil 122mm OF-462, TNT

Sa slike 5.6.6 može se uočiti da najbrojniju masenu grupu fragmenata (2717 fragmenata) čine fragmenti mase do 0,5g. Oni čine oko 46% ukupnog broja fragmenata. Fragmenti ove mase imaju maksimalni efektivni domet za pojedinačni fragment oko 48m do centra eksplozije.

Fragmenti mase do 0,5g čine svega 4,4% od ukupne mase sakupljenih fragmenata, što znači da 4,4% mase fragmenata nosi oko 46% svih fragmenata.

Iako kod artiljerijskog projektila 122mm OF-462 najveći udio u masi fragmenata čine masene grupe fragmenata od 5 do 50g (oko 70% ukupne mase), ovi fragmenti ne utiču značajno na smrtonosnu zonu jer ih ima relativno malo (oko 15%).



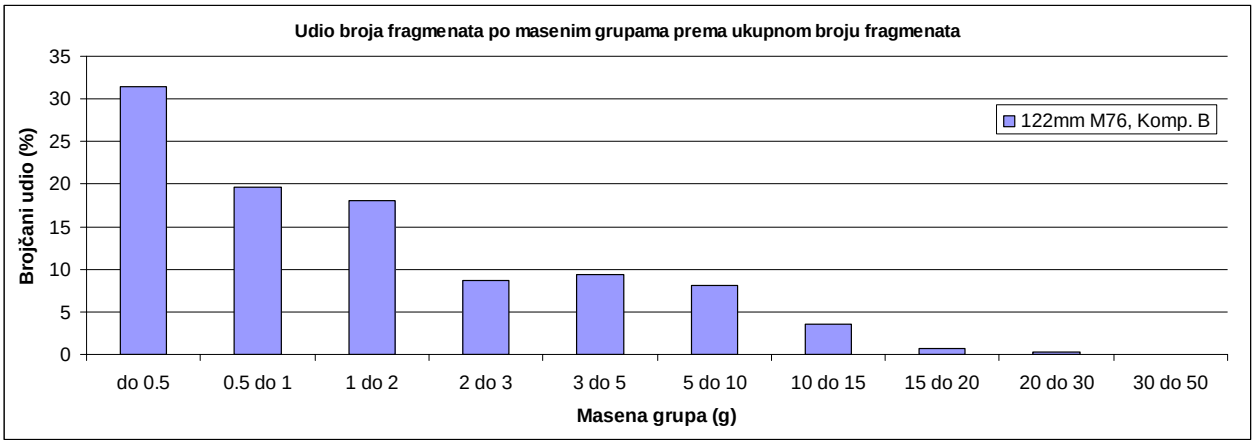
Slika 5.6.7 Dijagram efektivnog dometa fragmenata za projektil 122mm M76, Komp. B

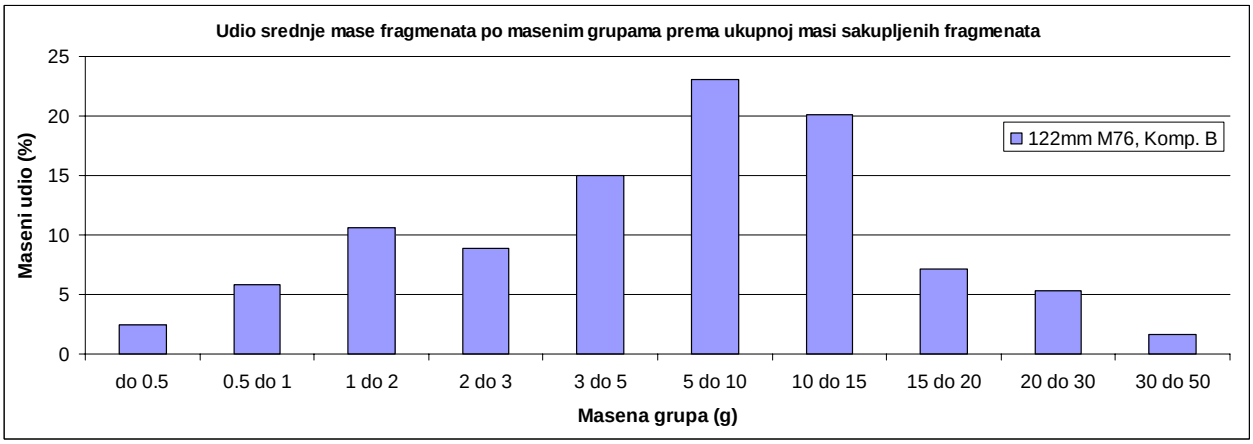
Na dijagramu sa sl. 5.6.7 predstavljena je funkcionalna zavisnost efektivnog dometa fragmenata od masene grupe fragmenata za artiljerijski projektil 122mm M76, sa eksplozivnim punjenjem Komp. B. Dijagram pokazuje da teoretski maksimalni efikasni domet pojedinačnog fragmenta za projektil 122mm M76 iznosi oko 800m od tačke eksplozije.

Na slici 5.6.8 prikazani su dijagrami brojčanog i masenog udjela masenih grupa fragmenata prema ukupnom broju i masi sakupljenih fragmenata za artiljerijski projektil 122mm M76, Komp. B.

Najbrojniju masenu grupu fragmenata kod ovog projektila čine fragmenti mase do 2g (slika 5.6.8). Oni čine oko 70% ukupnog broja fragmenata. Fragmenti ove mase imaju maksimalni efektivni domet za pojedinačni fragment oko 90m do centra eksplozije (slika 5.6.7).

Sa slike 5.6.8 može se uočiti da fragmenti mase do 2g čine tek 20% ukupne mase svih fragmenata, a njihov broj je oko 70% svih fragmenata. To potvrđuje ranije zaključke, izvedene za projektil 122mm OF-462, da ima mnogo više fragmenata manje mase, i oni utiču značajnije na smrtonosnu zonu nego fragmenti veće mase, kojih u slučaju projektila 122mm M76 ima manje od 30%, a čine 80% ukupne mase fragmenata.





Slika 5.6.8 Dijagrami brojčanog i masenog udjela masenih grupa fragmenata prema ukupnom broju i masi sakupljenih fragmenata za artiljerijski projektil 122mm M76, Komp. B

Bojeve glave raketnih projektila

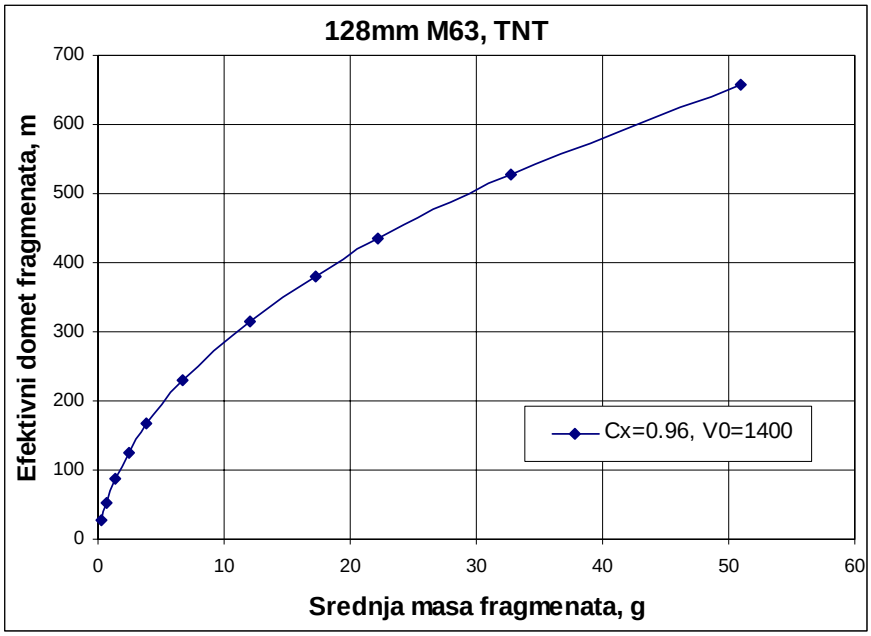
Izvršena je analiza efikasnog dometa fragmenata različitih masenih grupa za bojeve glave raketnih projektila 128mm M63 i 128mm M87, sa eksplozivnim punjenjem TNT (slika 5.6.2). Podaci o srednjoj masi fragmenata testnih grupa dati su u tabeli 5.6.3.

U tabeli 5.6.2 date su usvojene vrijednosti srednje početne brzine fragmenata, minimalne brzine fragmenta u trenutku udara u cilj, interval Mach-ovih brojeva, te srednja vrijednost aerodinamičkog koefijenta otpora fragmenta oblika sfere za BG 128mm M63 i 128mm M87.

Na slici 5.6.9 prikazan je dijagram efikasnog dometa fragmenta u zavisnosti od masene grupe fragmenata.

Na slici 5.6.10 prikazani su dijagrami brojčanog i masenog udjela masenih grupa fragmenata prema ukupnom broju i masi sakupljenih fragmenata za bojevu glavu 128mm M63, sa eksplozivom TNT.

Dijagram na slici 5.6.9 pokazuje da teoretski maksimalni efikasni domet pojedinačnog fragmenta za BG 128mm M63 iznosi oko 650m od tačke eksplozije.

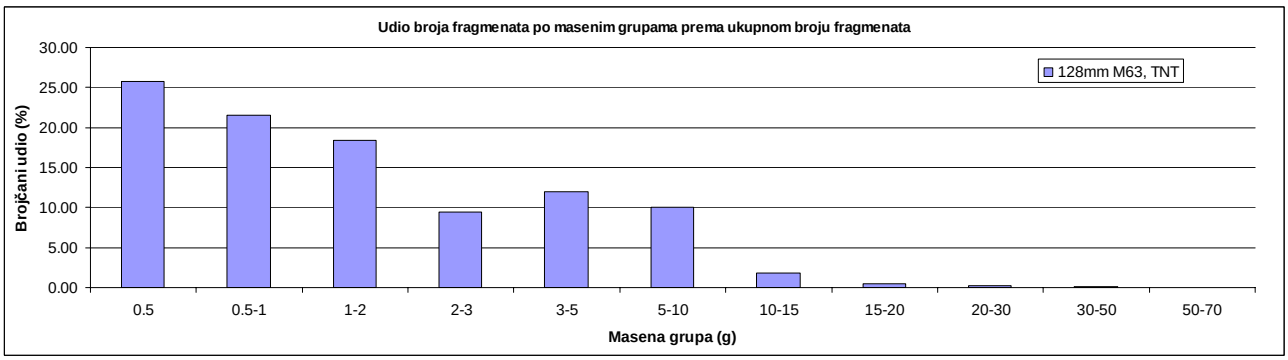


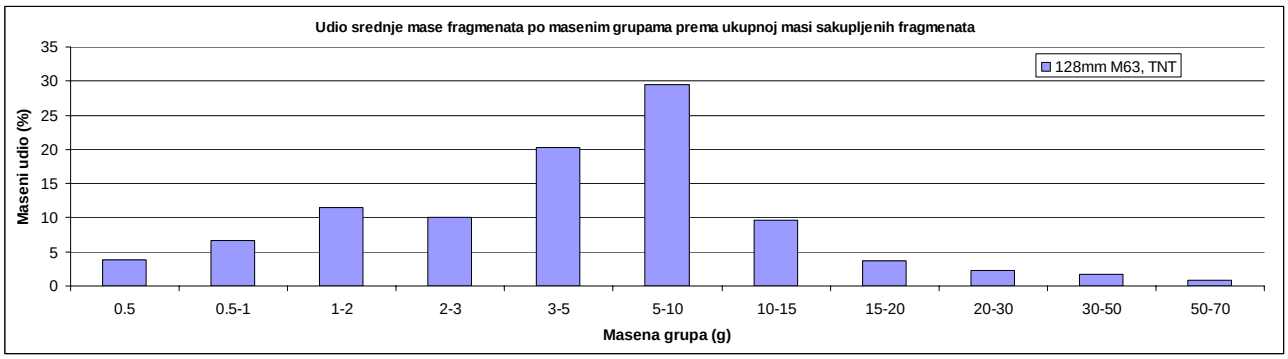
Slika 5.6.9 Dijagram efektivnog dometa fragmenata za BG rak. projektila 128mm M63, TNT

Najbrojniju masenu grupu fragmenata kod BG 128mm M63 čine fragmenti mase manje od 2g (slika 5.6.10). Oni čine oko 66% ukupnog broja fragmenata. Fragmenti ove mase imaju maksimalni efektivni domet za pojedinačni fragment oko 88m do centra eksplozije (slika 5.6.9).

Slika 5.6.10 pokazuje da fragmenti mase do 2g čine oko 21% ukupne mase svih fragmenata.

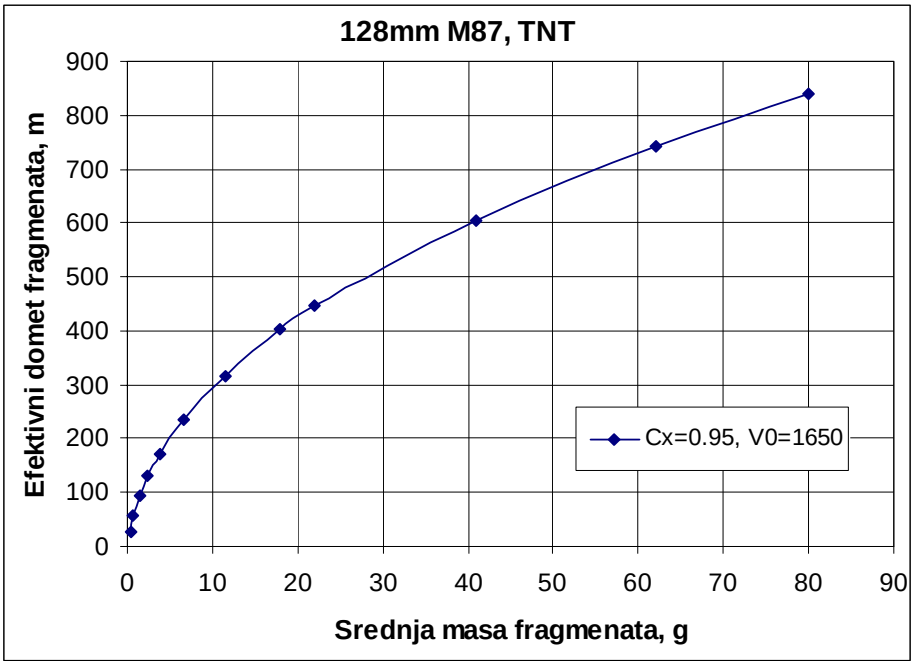
Kod ove bojeve glave fragmenti veće mase (5-10g) koji čine oko 30% ukupne mase fragmenata nose oko 10% svih fragmenata, što znači da većinom fragmenti masa manjih od 10g kod BG 128mm M63 participiraju u formiranju smrtonosne zone fragmenata.



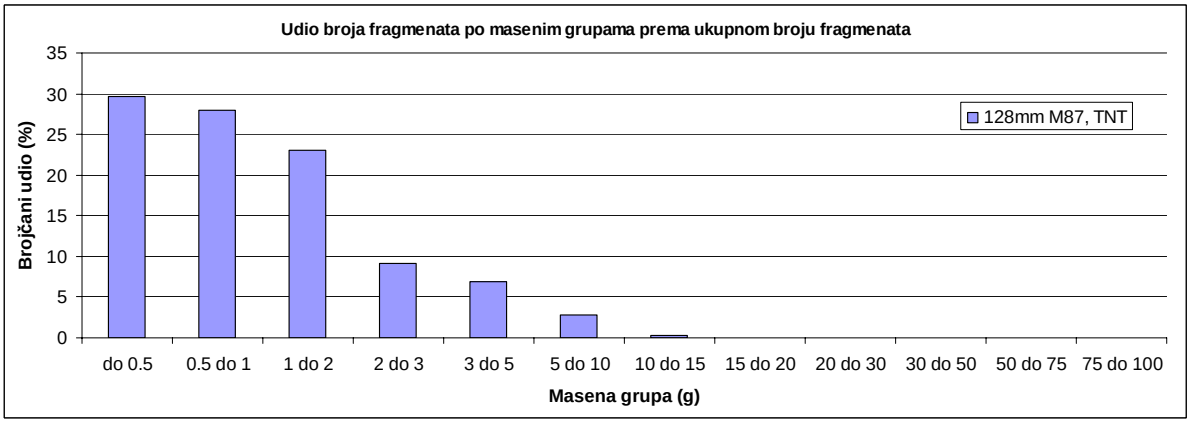


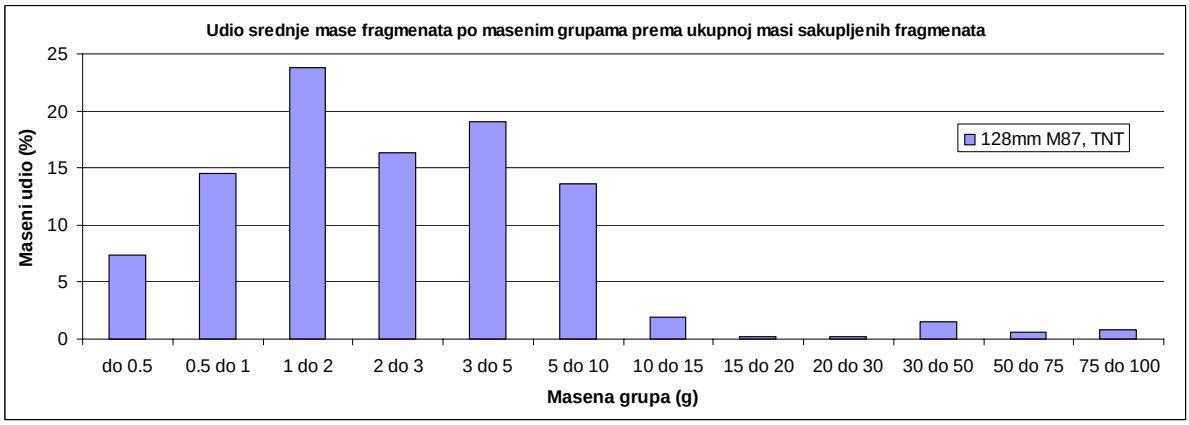
Slika 5.6.10 Dijagrami efektivnog dometa fragmenata, brojčanih i masenih udjela fragmenata, te smrtonosna zona za BG raketnog projektila 128mm M63, TNT

Na sl. 5.6.11 predstavljen je dijagram efikasnog dometa fragmenta u zavisnosti od masene grupe fragmenata koji pokazuje da teoretski maksimalni efikasni domet pojedinačnog fragmenta za BG 128mm M87 iznosi oko 850m od tačke eksplozije.



Slika 5.6.11 Dijagram efektivnog dometa fragmenata za BG rak. projektila 128mm M87, TNT





Slika 5.6.12 Dijagrami efektivnog dometa fragmenata, brojčanih i masenih udjela fragmenata, te smrtonosna zona za BG raketnog projektila 128mm M87, TNT

Na slici 5.6.12 prikazani su dijagrami brojčanog i masenog udjela masenih grupa fragmenata prema ukupnom broju i masi sakupljenih fragmenata za bojevu glavu 128mm M87, sa eksplozivom TNT.

Najbrojniju masenu grupu fragmenata kod BG 128mm M87 čine, takođe, fragmenti mase manje od 2g (slika 5.6.12). Oni čine oko 80% ukupnog broja fragmenata. Fragmenti ove mase imaju maksimalni efektivni domet za pojedinačni fragment oko 93m do centra eksplozije (slika 5.6.11). Slika 5.6.12 pokazuje da fragmenti mase do 2g čine oko 45% ukupne mase svih fragmenata.

Kod BG 128mm M87 fragmenti mase manje od 10g čine većinu mase sakupljenih fragmenata (oko 95%), dok je njihov brojčani udio oko 99% što potvrđuje prijašnji zaključak da su kod bojevih glava raketnih projektila fragmenti mase manje od 10g - efikasni fragmenti koji djeluju protiv ciljeva i učestvuju u formiranju smrtonosne zone fragmenata.

5.7 Analiza naponskog stanja bojeve glave u cijevi oružja

Analiza naponskog stanja bojeve glave u cijevi oružja izvršava se zbog provjere sigurnosti prilikom ispaljivanja projektila iz cijevi oružja, ali i zbog definisanja unutrašnje trase projektila.

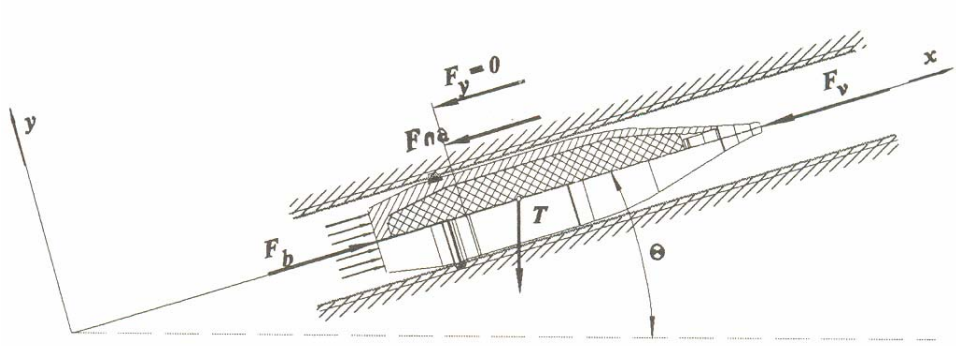
Kriterij sigurnosti prilikom ispaljivanja projektila odnosi se na provjeru maksimalnih napona koji se javljaju u komponentama projektila, a koji ne smiju biti veći od dozvoljenih napona, kako ne bi došlo do plastične deformacije tijela projektila unutar cijevi.

Vanjska trasa projektila obično je unaprijed određena, pa se dimenzionisanje tijela projektila uglavnom svodi na određivanje unutrašnje trase tijela projektila. Na osnovu dobijenih vrijednosti napona u tijelu projektila, moguće je na određenim mjestima izvršiti optimizaciju unutrašnje trase projektila, ali bitno je imati na umu da svako odstupanje i promjena unutrašnje trase tijela projektila neminovno utiče i na površinu smrtonosne zone HE bojeve glave.

Izvršena je analiza naponskog stanja u artiljerijskom projektilu 105mm M1, sa eksplozivnim punjenjem TNT. Korištena je analitička metoda i metoda numeričke simulacije.

5.7.1 Analitička metoda

Bojeve glave izložene su najvećem opterećenju u dva slučaja:
- u toku kretanja kroz cijev oružja, i
- na cilju.



Slika 5.7.1.1 Sile koje djeluju na bojevu glavu u toku kretanja kroz cijev oružja [6]

Na slici 5.7.1.1 prikazane su sile koje djeluju na bojevu glavu tokom njenog kretanja kroz cijev oružja. Translatorno kretanje centra mase bojeve glave određeno je slijedećom diferencijalnom jednačinom:

$$m\frac{d^2x}{dt^2} = \sum F = F_b - (F_u + F_{na} + F_v + F_{gx}) \qquad (5.7.1.1)$$

Rotaciono kretanje bojeve glave određeno je diferencijalnom jednačinom:

$$I_x \frac{d\omega}{dt} = M_x \qquad (5.7.1.2)$$

Ovdje su:

$\frac{d^2x}{dt^2}$ - Ubrzanje centra mase bojeve glave,
m - Masa bojeve glave,
F_b - Sila nastala uslijed djelovanja barutnih gasova,
F_u - Sila urezivanja vodećeg prstena,

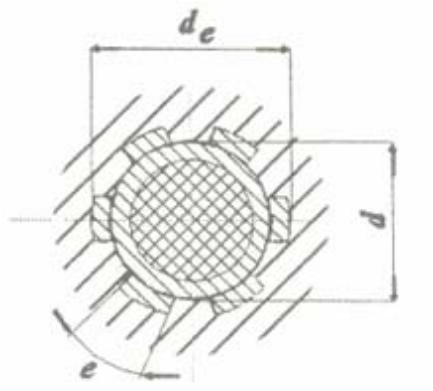
F_{na} - Aksijalna komponenta normalne sile vodećeg prstena,
F_v - Otpor zraka duž X - ose,
F_{gx} - Gravitaciona sila duž X - ose,
I_x - Moment tromosti (inercije) bojeve glave za X - osu,
ω - Ugaona brzina bojeve glave oko X - ose, i
M_x - Moment spoljašnjih sila, u odnosu na X - osu.

Ako se zanemari uticaj sila F_u, F_{na}, F_v, i F_{gx} koje su po intenzitetu mnogo manje od sile F_b, a sila F_b, nastala djelovanjem barutnih gasova, se predstavi izrazom $F_b = P \cdot S$, koristeći jednačinu (5.7.1.1) vrijedi:

$$m \cdot \frac{d^2x}{dt^2} = P \cdot S \tag{5.7.1.3}$$

gdje su:
m - Masa bojeve glave,
P - Pritisak u cijevi (uslijed dejstva barutnih gasova), i
S - Površina poprečnog presjeka cijevi oružja (sl. 5.7.2). Ona se određuje izrazom:

$$S = \frac{d^2\pi}{4} + \frac{e \cdot n}{2}(d_e - d) \tag{5.7.1.4}$$



Sl.5.7.1.2 Površina poprečnog presjeka cijevi oružja [6]

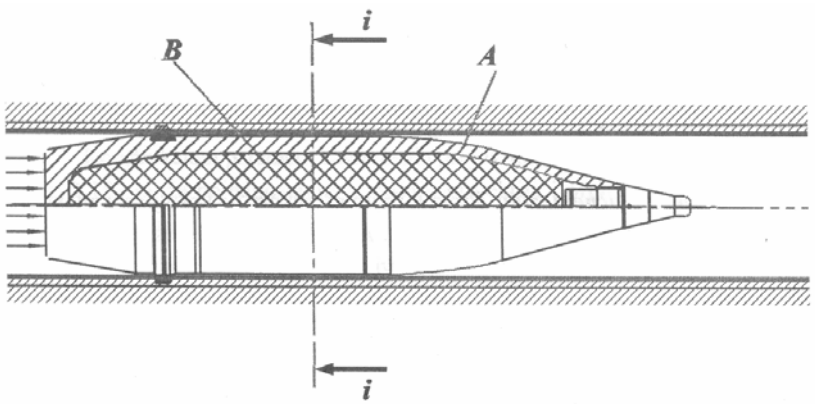
Izraz za ubrzanje bojeve glave postaje:

$$\frac{d^2x}{dt^2} = \frac{P}{m} \cdot \left(\frac{d^2\pi}{4} + \frac{e \cdot n}{2}(d_e - d) \right) \tag{5.7.1.5}$$

Maksimalno ubrzanje bojeve glave dobija se za slučaj maksimalnog pritiska barutnih gasova u cijevi oružja:

$$\frac{d^2x}{dt^2}_{\max} = \frac{P_{\max}}{m} \cdot \left(\frac{d^2\pi}{4} + \frac{e \cdot n}{2}(d_e - d) \right) \tag{5.7.1.6}$$

Za određivanje napona na pritisak u tijelu bojeve glave razmatra se presjek *i-i* koji dijeli tijelo bojeve glave u dva dijela: *A* i *B* (sl. 5.7.1.3).



Sl. 5.7.1.3 Određivanje napona na pritisak u tijelu bojeve glave [6]

Kretanje dijela *A* određeno je diferencijalnom jednačinom:

$$m_A \cdot \frac{d^2x}{dt^2} = F_{i-i} \tag{5.7.1.7}$$

gdje je m_A masa bojeve glave ispred *i-i* presjeka (dio *A*).

Sila F_{i-i} može se predstaviti kao proizvod napona na pritisak i površine poprečnog presjeka *i-i*:

$$F_{i-i} = \sigma_{i-i} \cdot S_{i-i} \tag{5.7.1.8}$$

Uvrštavanjem izraza (5.7.1.5) u (5.7.1.7), a potom silu F_{i-i} iz izraza (5.7.1.7) u jednačinu (5.7.1.8) dobija se formula za napon na pritisak u tijelu bojeve glave tokom kretanja kroz cijev oružja:

$$\sigma_{c_{i-i}} = \frac{1}{S_{i-i}} \frac{m_A}{m} \cdot P \cdot \left[\frac{d^2\pi}{4} + \frac{e \cdot n}{2}\left(d_e - d\right) \right] \tag{5.7.1.9}$$

Pri dizajniranju nove bojeve glave obično se proračuni vrše sa tzv. proračunskim pritiskom P_{cp} koji je veći od maksimalnog pritiska u cijevi. Koristimo izraz:

$$P_{cp} = k \cdot P_{\max} \tag{5.7.1.10}$$

U izrazu (5.7.1.10) *k* predstavlja konstantu koja uzima u obzir kalibar projektila i jednaka je 1,12 za bojeve glave kalibra većeg od 40mm, dok za bojeve glave kalibra manjeg od 40mm ona iznosi 1,15 [9].

Maksimalno naprezanje tijela bojeve glave u cijevi ne smije biti veće od granice razvlačenja materijala ni u jednoj tački tijela, pa mora biti zadovoljen uslov:

$$\sigma_{(\max)i} < \sigma_v \tag{5.7.1.11}$$

gdje su:

$\sigma_{(\max)i}$ - maksimalni proračunski naponi na pritisak u tijelu bojeve glave (Pa), a

σ_v - granica razvlačenja materijala (Pa).

Analitička metoda može se primjeniti za analizu naponskog stanja pojedinačnih komponenata bojeve glave. Postupak se sastoji u tome da se komponenta (npr. tijelo projektila ili eksplozivno punjenje) bojeve glave dijeli na segmente, obično različite debljine, gdje se za svaki segment (aproksimiran cilindrom za element eksplozivnog punjenja ili cilindričnim prstenom za element košuljice) dobija određena vrijednost napona.

5.7.1.1 Analiza naprezanja tijela artiljerijskog projektila 105mm M1

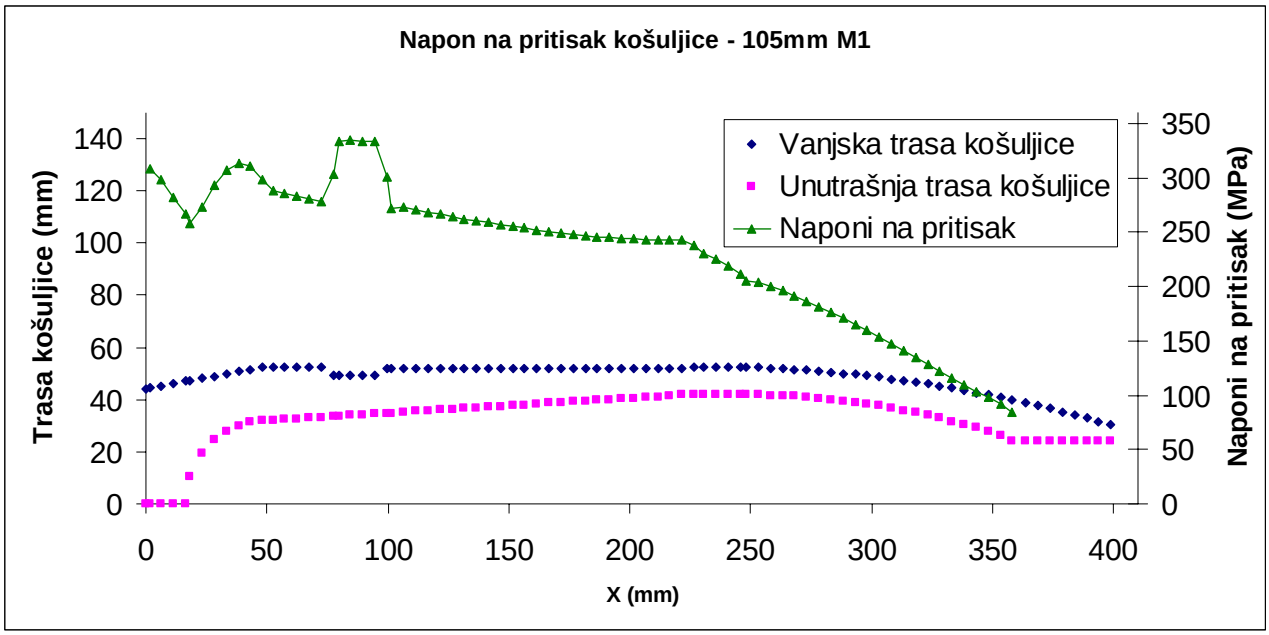
Korištenjem analitičkih izraza, urađena je analiza napona na pritisak tijela bojeve glave 105mm M1. Tijelo bojeve glave podjeljeno je na segmente dužine 10mm. Segmenti su aproksimirani cilindričnim prstenovima.

U proračunu je usvojen konstantan proračunski pritisak barutnih gasova P_{cp} koji djeluje na dno košuljice bojeve glave, i iznosi 260 MPa. Analiza je izvršena bez vodećeg prstena. Uzet je u obzir uticaj mase upaljača na veličinu inercijalne sile. Nije uzet u obzir uticaj mase eksploziva na tijelo projektila.

Kao materijal košuljice usvojen je čelik, gustine $\rho_č$ = 7860 kg/m^3, granice razvlačenja σ_v = 560 MPa i zatezne čvrstoće σ_M = 800 MPa. Masa bojeve glave 105mm M1 iznosi 15,06 kg, a masa upaljača 0,975 kg.

Na slici 5.7.1.1.1 prikazane su vrijednosti napona na pritisak u aksijalnom pravcu (u pravcu ose), za tijelo bojeve glave 105mm M1. Na dijagramu (sl. 5.7.1.1.1) su, također, prikazane unutrašnja i vanjska trasa tijela bojeve glave 105mm M1.

Može se zaključiti da se napon na pritisak povećava uslijed inercijalnih sila, idući prema dnu tijela projektila. Maksimalna vrijednost koju dostiže napon na pritisak je 350 MPa i to na mjestu gdje se nalazi vodeći prsten. Kao što je rečeno, u analizi nije uzet u obzir uticaj vodećeg prstena, pa je zbog promjene poprečnog presjeka na tom dijelu tijela projektila došlo do lokalnog povećanja napona na pritisak. Ipak, maksimalna vrijednost napona na košuljici manja od napona razvlačenja materijala košuljice (σ_v = 560 MPa).



Sl. 5.7.1.1.1 Određivanje naponskog stanja metodom podjele košuljice na segmente (105mm M1)

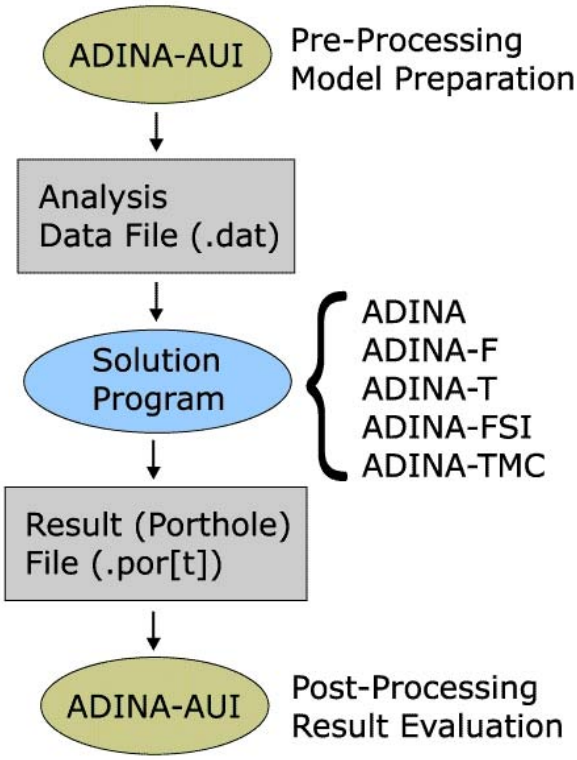
Nedostatak ove metode, iako dosta primjenjivane u praksi, je što ne oslikava složenost naponskog stanja u bojevoj glavi tokom njenog kretanja kroz cijev oružja. Takođe, ona ne uzima u obzir interakciju komponenata bojeve glave. Faza kretanja bojeve glave kroz cijev oružja traje svega nekoliko milisekundi. Za tih nekoliko milisekundi bojevoj glavi se saopštava veliko ubrzanje. U slučaju projektila 105mm M1 maksimalno ubrzanje iznosi 13 530·g ili 132 770 m/s.

Zbog kompleksnosti pomenutog procesa, pristupilo se numeričkom modeliranju naponskog stanja bojeve glave u cijevi oružja, kako bi se dobila jasnija slika o složenim naponskim stanjima, izvukli konkretni zaključci i rezultati uporedili sa analitičkom metodom.

5.7.2 Numeričko modeliranje naponskog stanja bojeve glave u cijevi oružja

Numerička simulacija naponskog stanja komponenata bojeve glave u cijevi oružja izvršena je koristeći ADINA© (**A**utomatic **D**ynamic **I**ncremental **N**onlinear **A**nalysis) System, softver baziran na metodi konačnih elemenata, koji se koristi za analizu napona i deformacija čvrstih tijela, tokova fluida i interakcije čvrstog tijela i fluida.

Na sl. 5.7.2.1 prikazana je struktura ADINA© softvera.



Sl. 5.7.2.1 Shematski prikaz strukture ADINA softvera

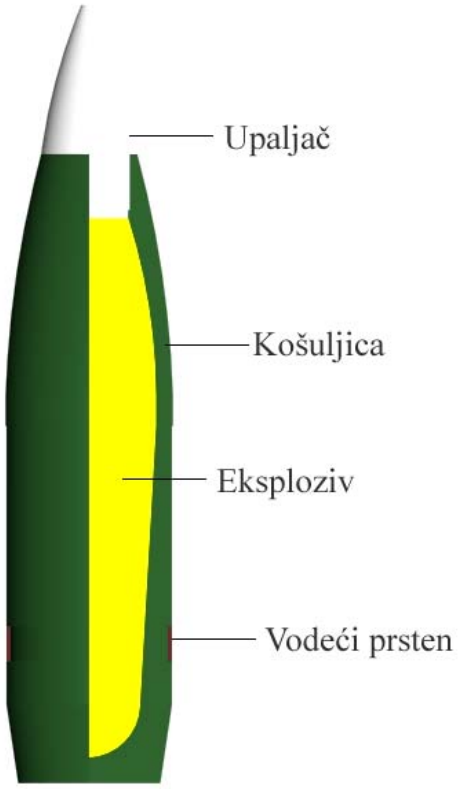
ADINA© se sastoji iz nekoliko modula:

- Modul za modeliranje i direktnu integraciju sa Parasolid baziranim CAD sistemima (Unigraphics, SolidWorks, IronCAD, SolidEdge),
- Modul za linearnu i nelinearnu analizu čvrstih tijela i struktura,
- CFD modul za analizu stišljivih i nestišljivih fluida,
- Modul za analizu prenosa toplote,
- Modul za analize strukturalnih interakcija, i
- Modul za termo-mehaničku analizu.

Model projektila

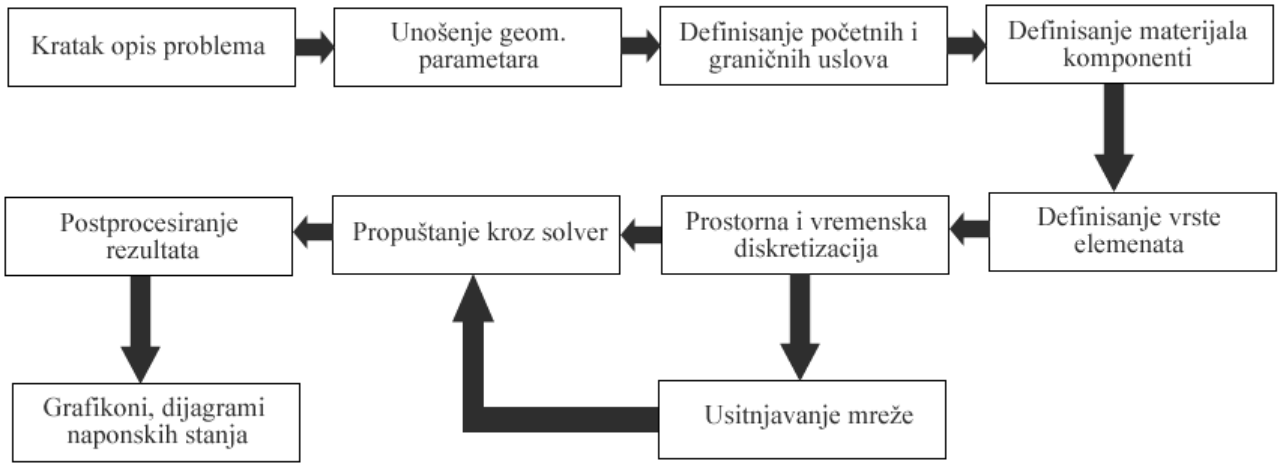
Model koji je analiziran (artiljerijski projektil 105mm M1, sl. 5.7.2.2) sastojao se iz slijedećih komponenti:

- Košuljica (tijelo) bojeve glave,
- Eksplozivno punjenje,
- Upaljač, i
- Vodeći prsten.



Slika 5.7.2.2 Artiljerijski projektil 105mm M1

Problem je razmatran kao nestacionaran. Pri analizi problema zanemaren je uticaj rotacije bojeve glave oko uzdužne ose. Model je osno simetričan. U analizi je uzeta u obzir promjena pritiska u cijevi sa vremenom.



Sl. 5.7.2.3 Dijagram toka za numeričku simulaciju modela bojeve glave 105mm M1

Na sl. 5.7.2.3 prikazan je dijagram toka za numeričku simulaciju modela bojeve glave 105mm M1 u softveru ADINA, a koji se sastoji od opisa problema, unošenja geometrijskih parametara modela, definisanja graničnih uslova i materijala komponenti, definisanje vrste elemenata, prostorne i vremenske diskretizacije modela, a zatim propuštanja kroz solver softvera, te postprocesiranje rezultata (grafikoni, dijagrami napona, itd).

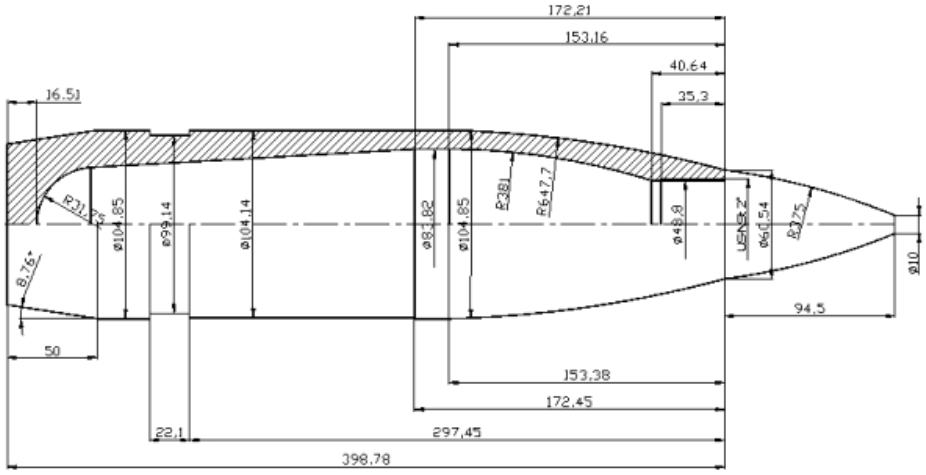
Diskretizacija vremenskog i prostornog domena

Diskretizacija vremena izvršena je sa 98 vremenskih koraka, konstantne vrijednosti 0,0001s, pa je ukupno vrijeme analize 0,0098s. Vrijeme od 9,8 ms odgovara vremenu djelovanja dinamičkog optrećenja (pritiska) u cijevi oružja na dno bojeve glave.

Prostorni domen je diskretiziran sa 9610 osnosimetričnih konačnih elemenata sa devet čvorova. Model je imao 39017 čvorova, odnosno oko 78034 stepeni slobode kretanja.

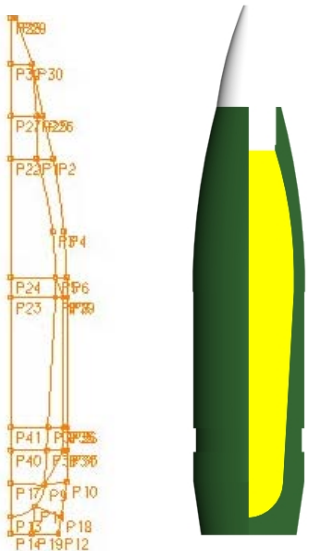
Geometrija

Definisanje geometrije bojeve glave prvi je korak u numeričkoj analizi naprezanja. Na osnovu geometrije bojeve glave 105mm M1 (sl. 5.7.2.4) određene su karakteristične tačke na bojevoj glavi koje su poslužile za definisanje numeričkog modela. Ukupna dužina analizirane bojeve glave je 494mm, a njen najveći prečnik iznosi 105mm.



Sl. 5.7.2.4 Dimenzionisani 2D model bojeve glave 105mm M1

Sa sl. 5.7.2.5 može se vidjeti da je geometrija bojeve glave modelirana bez ikakvih aproksimacija i uproštenja. Slika 5.7.2.5. lijevo predstavlja geometriju bojeve glave definisanu korištenjem ADINA softvera. Slika 5.7.2.5. desno prikazuje istu bojevu glavu modeliranu u AUTOCAD softveru. Komparacija pokazuje istovjetnost geometrija.



Sl. 5.7.2.5 2D model bojeve glave 105mm M1 (ADINA©) - lijevo
2D model bojeve glave 105mm M1 (AutoCAD©) - desno

Karakteristike materijala

Za definisanje materijala pojedinačnih komponenata u numeričkom modelu bojeve glave, koja se sastoji od košuljice, eksploziva, upaljača i vodećeg prstena, potrebno je poznavati mehaničke karakteristike materijala.

Kao materijal košuljice usvojen je čelik, granice razvlačenja σ_v = 560 MPa, i zatezne čvrstoće σ_M = 800 MPa.

Pretpostavlja se da je dati materijal elastičan i izotropan.

Numerički model pretpostavlja da je eksploziv fiksiran uz košuljicu i nema klizanja između njihovih površina.

Novija istraživanja pokazuju da je modul elastičnosti TNT-a oko 2,2 GPa [38], iako neka starija istraživanja ukazuju na veće vrijednosti modula elastičnosti TNT-a (oko 5,5 GPa) [39].

U proračunu je korištena vrijednost modula elastičnosti TNT-a od 2,2 GPa.

Ekvivalentni materijal upaljača, koji je usvojen kao elastičan i izotropan, izabran je na osnovu srednje gustine upaljača (dobijene koristeći poznate podatke o njegovoj masi i zapremini).

Vodeći prsten izrađen je od bakra, i za njega se usvaja da je elastičan i izotropan materijal. Karakteristike usvojenih materijala date su u tabeli 5.7.2.1.

Tabela 5.7.2.1 Mehaničke karakteristike usvojenih materijala

Materijal	Modul elastičnosti E (Pa)	Poisson-ov koeficijent υ	Gustina (kg/m^3) ρ
Čelik	$2{,}1\cdot10^{11}$	0,3	7860
Eksploziv	$2{,}2\cdot10^{9}$	0,4	1550
Ekvivalentni materijal upaljača	$1{,}16\cdot10^{11}$	0,32	4500
Bakar	$1{,}3\cdot10^{11}$	0,34	8960

Početni i granični uslovi

Početni uslovi

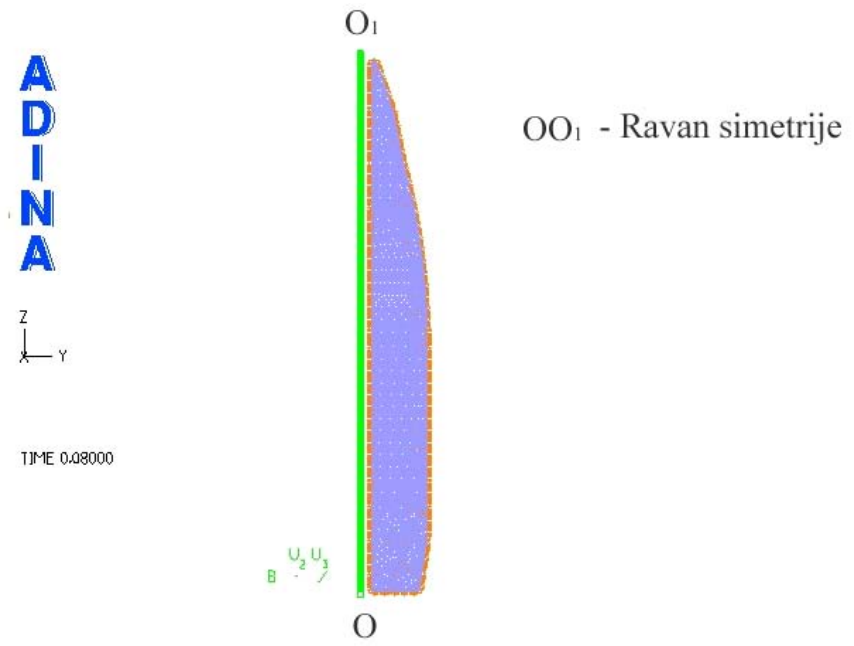
U početnom trenutku brzina bojeve glave i njeno pomjeranje bili su nula:

$$\text{za } t = 0, \quad v = 0 \ \text{ i } s = 0 \tag{5.7.1.12}$$

Granični uslovi po pomjeranju

Granični uslov po pomjeranju zadat je za ravan simetrije koja je prikazana zelenom bojom na sl. 5.7.2.6. U numeričkom smislu to znači da se linije na osi simetrije, koje predstavljaju ravan simetrije, ne mogu pomjerati, u slučaju projektila 105mm M1, u *y* pravcu.

Ostale površine bojeve glave su slobodne.



Sl. 5.7.2.6 Ravan simetrije modela u ADINA©-i

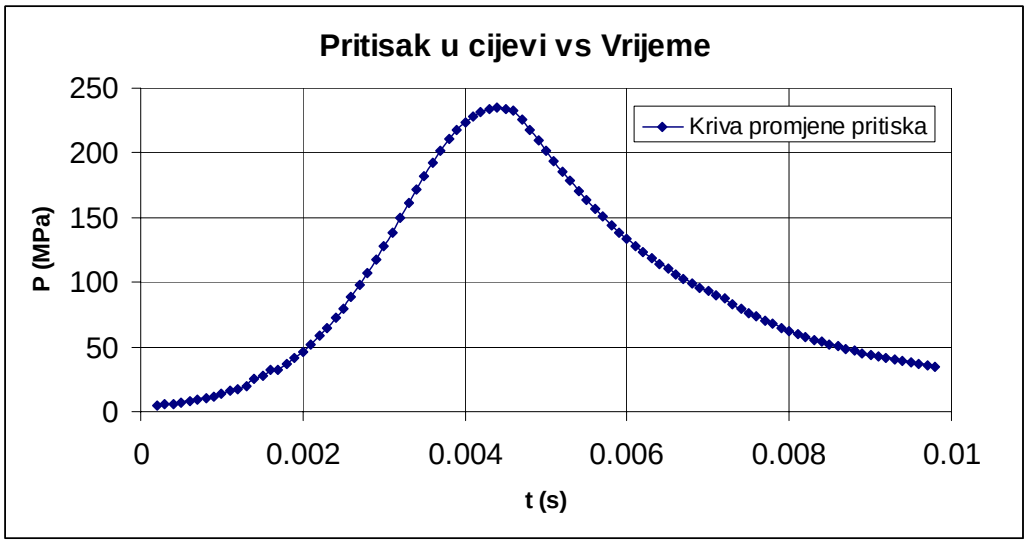
Granični uslovi po opterećenju

Na granicama prostornog domena tijela bojeve glave koja se deformiše poznato je opterećenje. Zadat je pritisak, nastao sagorijevanjem barutnih gasova.

Pritisak u cijevi, u zavisnosti od vremena, u opštem slučaju promjenljiv je. Za slučaj haubice 105mm [37] na sl. 5.7.2.7 prikazana je kriva zavisnosti pritiska barutnih gasova u cijevi od vremena. Vrijeme djelovanja pritiska na dno košuljice iznosi 9,8 ms.

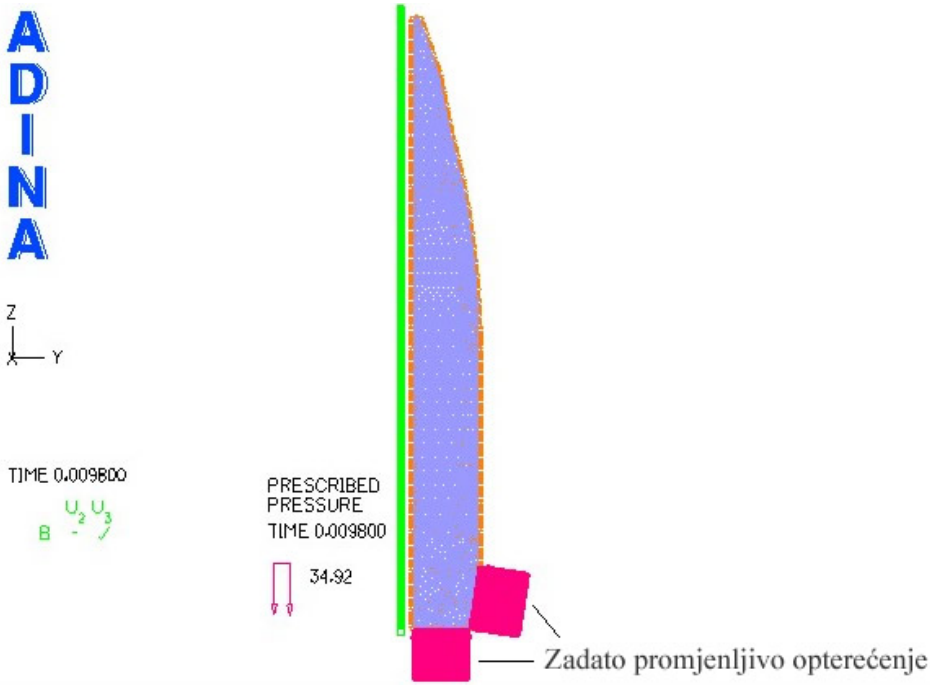
Najveći pritisak u cijevi, koji iznosi oko 230 Mpa, djeluje 4,4 ms od početka procesa.

U numeričkoj analizi uzeta je u obzir promjena pritiska barutnih gasova u cijevi oružja, u zavisnosti od vremena.



Sl. 5.7.2.7 Kriva promjene pritiska u zavisnosti od vremena za haubicu 105mm [37]

Na sl. 5.7.2.8 prikazan je način zadavanja promjenljivog pritiska koji djeluje na dno košuljice u vremenskom intervalu od 9,8 ms.



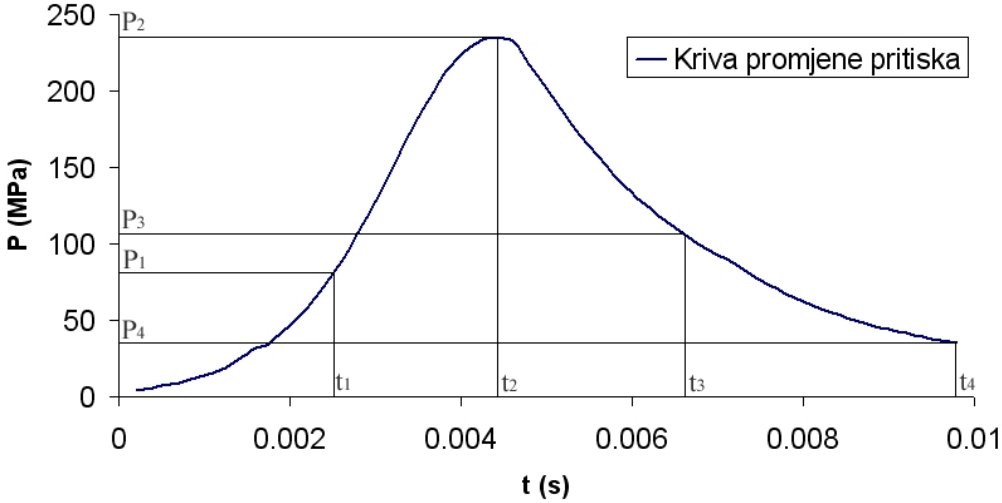
Sl. 5.7.2.8 Opterećenje na dnu košuljice bojeve glave

Analiza rezultata

Izvršena je analiza rezultata numeričkog modela. Na sl. 5.7.2.9 prikazane su karakteristične tačke koje su uzete u obzir prilikom analize naponskih stanja, te radijalnih pomjeranja i deformacija. Vrijeme t_1 = 2,5ms odgovara pritisku barutnih gasova koji u tom trenutku iznosi P_1 = 80MPa. U trenutku t_2 = 4,4ms pritisak u cijevi ima maksimalnu vrijednost od P_2 = 230 MPa. U trenutku t_3 = 6,5ms pritisak barutnih gasova iznosi P_3 = 110 MPa, a u zadnjem trenutku t_4 = 9,8ms pritisak iznosi P_4 = 35 MPa.

Za svaki dati trenutak analizirani su:

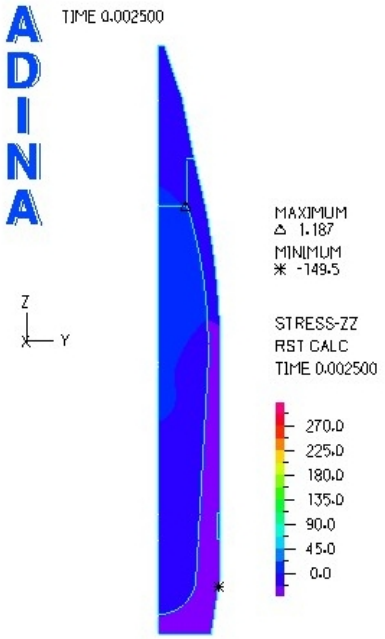
- Naponi u Z pravcu,
- Maksimalni i minimalni glavni naponi,
- Radijalna pomjeranja,
- Efektivni naponi.



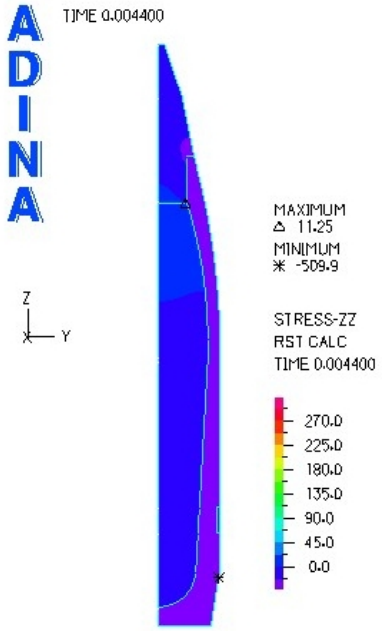
Sl. 5.7.2.9 Karakteristične tačke koje su uzete u obzir u analizi rezultata

Naponi u Z pravcu

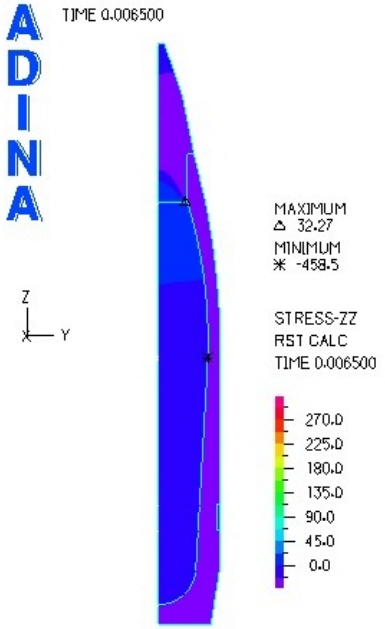
Na sl. 5.7.2.10 prikazani su dijagrami napona u Z pravcu, za različite vremenske korake. U trenutku t_1 = 2,5ms najveći napon na pritisak u Z pravcu iz nosio je -149,5 MPa, dok je napon na istezanje u Z pravcu, u tom trenutku iznosio 1,187 MPa (sl. 5.7.2.10.a). U trenutku t_2 = 4,4ms, kada je i pritisak gasova u cijevi maksimalan (P_2 = 230 MPa), maksimalni napon na pritisak iznosio je -509,9 MPa, a napon zatezanja 11,25 MPa (sl. 5.7.2.10.b). Za vrijeme t_3 = 6,5ms, najveća vrijednost napona na pritisak je bila -458,5 MPa, dok je napon zatezanja imao vrijednost 32,27 MPa (sl. 5.7.2.10.c). U zadnjem trenutku t_4 = 9,8ms došlo je do značajnog povećanja napona na zatezanje koji je iznosio 290,6 MPa, dok je napon na pritisak opao na vrijednost od -35,01 MPa (sl. 5.7.2.10.d).



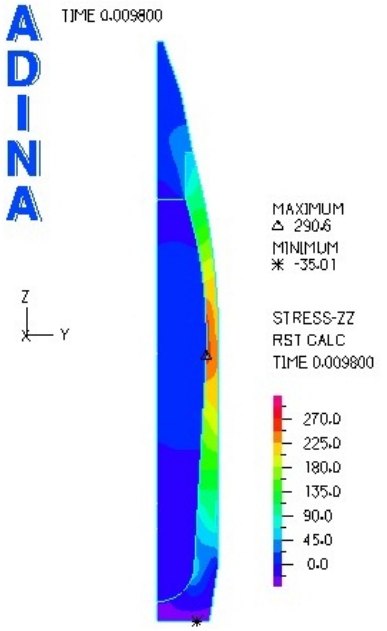
a. Napon u Z pravcu, t = 0,0025 s



b. Napon u Z pravcu, t = 0,0044 s



c. Napon u Z pravcu, t = 0,0065 s



d. Napon u Z pravcu, t = 0,0098 s

Sl. 5.7.2.10 Naponi u Z pravcu, za različite vremenske korake

Na dijagramima sa sl. 5.7.2.10 prikazane su i lokacije na tijelu projektila gdje su se pojavili najveći naponi na pritisak i zatezanje. U trenucima t_1 i t_2, najveći napon na pritisak pojavio se na zadnjem dijelu tijela projektila.

Za trenutak t_3 naveći napon na pritisak prisutan je na unutrašnoj strani centralnog dijela tijela projektila, dok je u trenutku t_4 napon na pritisak značajno smanjen, a maksimalna vrijednost napona na zatezanje (290,6 MPa) nalazi se, u centralnom dijelu tijela projektila.

Kod analitičke metode određivanja napona na pritisak u košuljici, koja je ranije spomenuta, najveća dobijena vrijednost napona na pritisak u Z pravcu iznosila je -350 MPa. Iz numeričke simulacije zaključuje se da je najveća dobijena vrijednost napona na pritisak u Z pravcu iznosila -509,9 MPa.

Kod obje metode, ovaj napon ne prelazi granicu razvlačenja materijala košuljice. Interesantno je primjetiti porast napona zatezanja košuljice kako pritisak u cijevi opada, a njena vrijednost za vrijeme t_4 = 9,8ms iznosi 290,6 MPa (sl. 5.7.2.10.d).

Maksimalni glavni naponi

Slika 5.7.2.11 prikazuje maksimalne glavne napone za datu bojevu glavu. Najveća vrijednost maksimalnog glavnog napona iznosi 290,9 MPa za t = 0,0098s (Sl. 5.7.2.11.d). Ova vrijednost pokazuje najveći napon istezanja u projektilu, dobijen u numeričkoj simulaciji.

Na sl. 5.7.2.11 prikazane su i lokacije na projektilu gdje su se pojavili maksimalni glavni naponi.

U trenutku t_1 najveći napon istezanja (maksimalni glavni napon) pojavio se na zadnjem dijelu tijela projektila, u blizini vodećeg prstena, i iznosi 11,45 MPa.

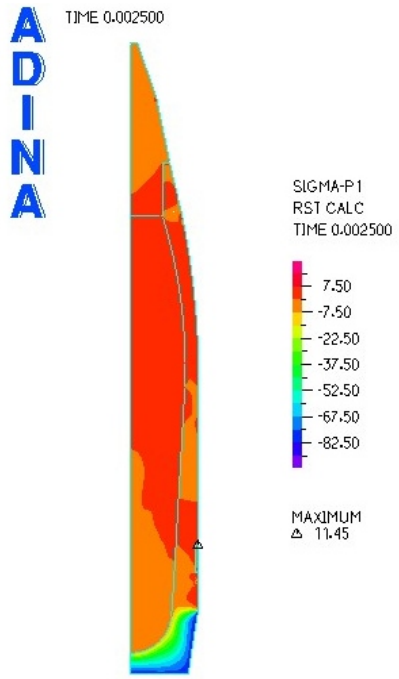
Za trenutak t_2 maksimalni glavni napon prisutan je, također, u blizini vodećeg prstena, i ima vrijednost 66,89 MPa.

U trenutku t_3 maksimalni glavni napon pojavio se u zadnjem dijelu upaljača, a iznosi 105,4 MPa.

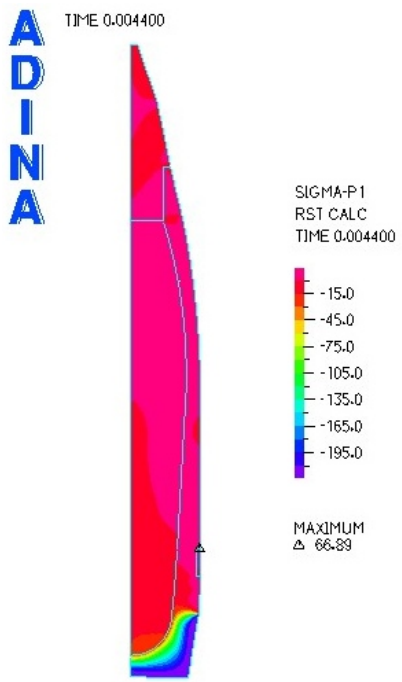
Unutrašnji dio centralnog dijela tijela projektila predstavlja tačku u trenutku t_4 sa najvećom vrijednosti maksimalnog glavnog napona od 290,9 MPa.

Na osnovu dobijenih vrijednosti maksimalnih glavnih napona i položaja tačaka sa najvećim vrijednostima maksimalnih glavnih napona moguće je donijeti sud o optimizaciji unutrašnje trase projektila.

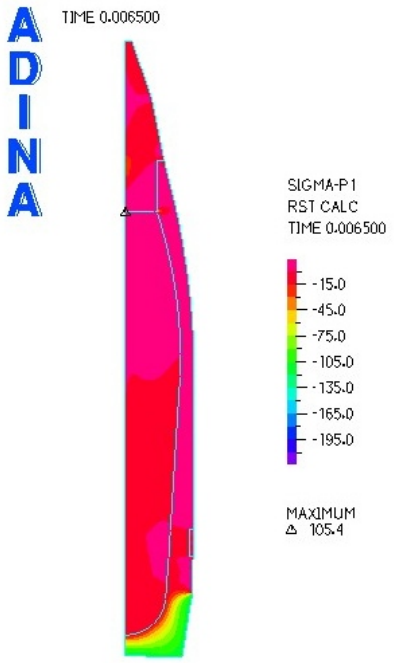
Dijagrami sa slike 5.7.2.11 pokazuju da je moguće optimizovati unutrašnju trasu projektila (smanjiti debljinu tijela projektila) na svim segmentima tijela osim na centralnom, jer je za dati segment dobijena najveća vrijednost maksimalnog glavnog napona.



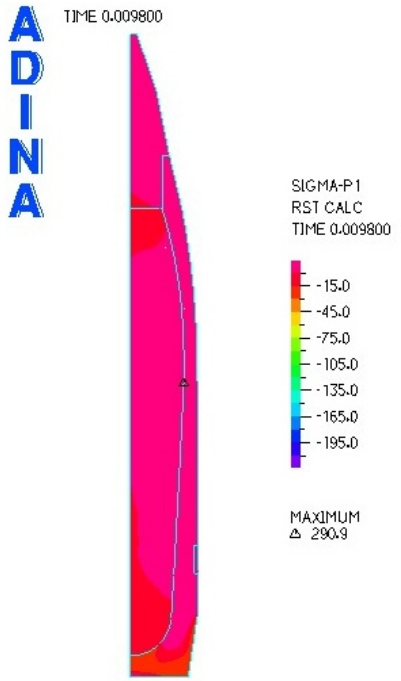
a. Maksimalni glavni napon, t = 0,0025 s



b. Maksimalni glavni napon, t = 0,0044 s



c. Maksimalni glavni napon, t = 0,0065 s



d. Maksimalni glavni napon, t = 0,0098 s

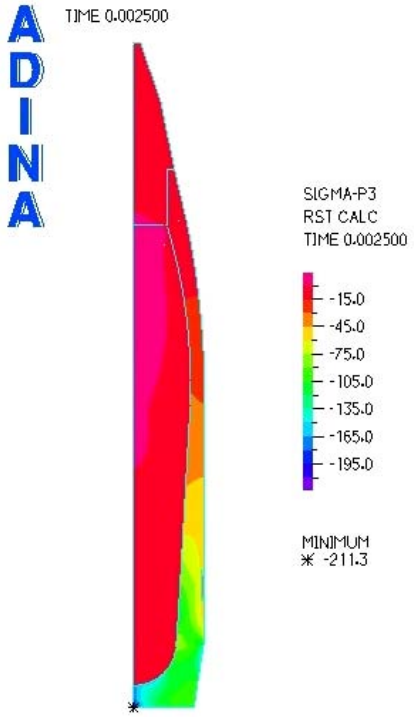
Sl. 5.7.2.11 Maksimalni glavni naponi, za različite vremenske korake

Minimalni glavni naponi

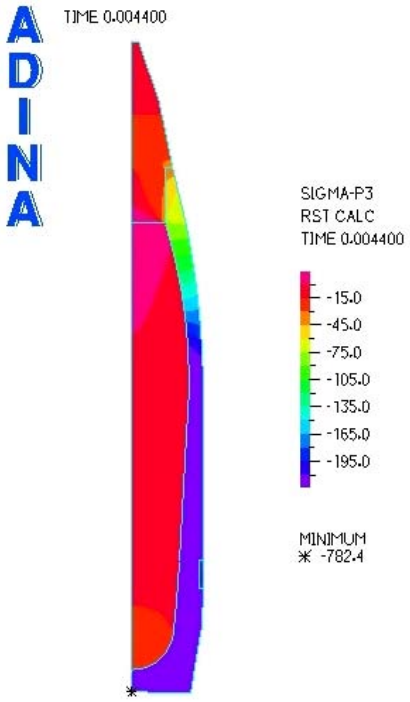
Na sl. 5.7.2.12 prikazani su minimalni glavni naponi, a najveća vrijednost minimalnog glavnog napona iznosi -782,4 MPa (sl. 5.7.2.12.b), za t_2 = 0,0044s, što predstavlja vrijednost napona u trenutku kada je pritisak barutnih gasova u cijevi najveći (P_2 = 230 MPa). Dobijena najveća vrijednost minimalnog glavnog napona predstavlja najveći napon na pritisak u bojevoj glavi. Ona prelazi granicu razvlačenja materijala košuljice koja iznosi σ_v = 560 MPa.

Iz ovoga se može zaključiti da je u analizi naponskih stanja najvažnije određivanje maksimalnih i minimalnih glavnih napona, i na osnovu dobijenih vrijednosti može se donositi sud o sigurnosnom kriteriju za materijal košuljice u cijevi.

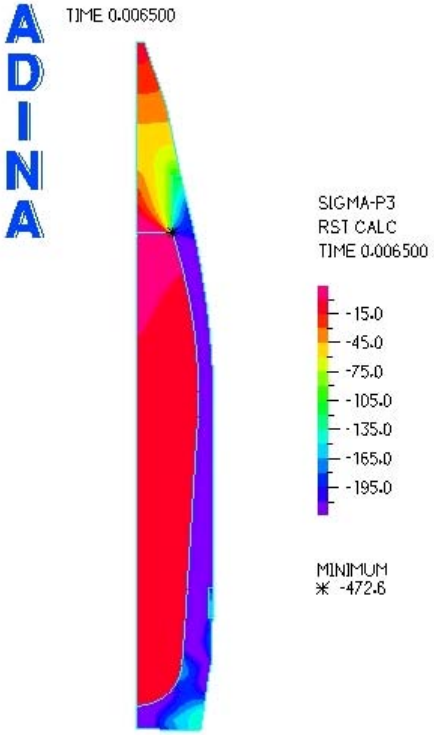
Na sl. 5.7.2.12 prikazane su lokacije na projektilu gdje su se pojavili minimalni glavni naponi.



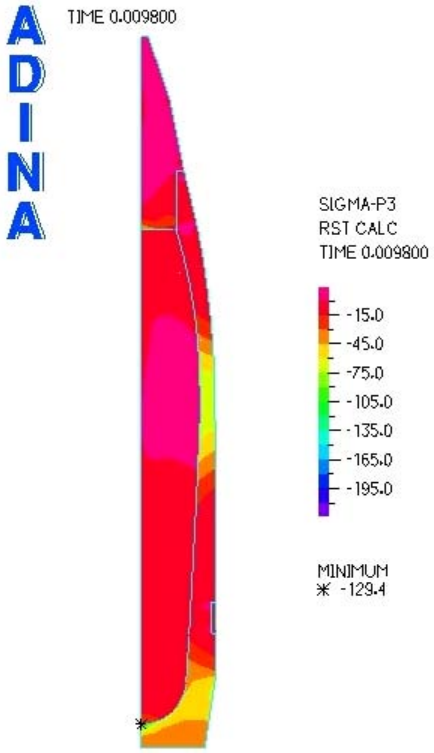
a. Minimalni glavni napon, t = 0,0025 s



b. Minimalni glavni napon, t = 0,0044 s



c. Minimalni glavni napon, t = 0,0065 s



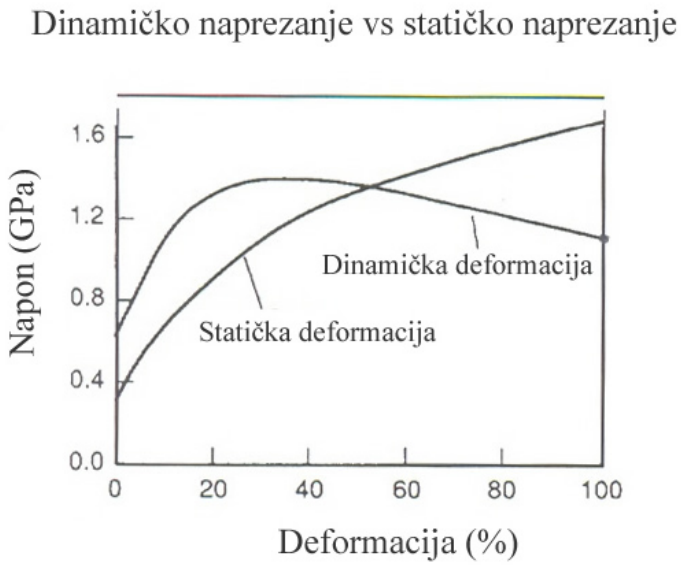
d. Minimalni glavni napon, t = 0,0098 s

Sl. 5.7.2.12 Minimalni glavni naponi, za različite vremenske korake

U trenutku t_1 najveći napon na pritisak (minimalni glavni napon) pojavio se na dnu projektila, i iznosi -211,3 MPa. Za trenutak t_2 minimalni glavni napon ima najveću vrijednost (-782,4 MPa), takođe za tačku na dnu projektila. U trenutku t_3 najveća vrijednost minimalnog glavnog napona iznosi -476,6 MPa, a pojavljuje se u tački prednjeg dijela tijela projektila. Za trenutak t_4 najveća vrijednost minimalnog glavnog napona iznosi -129,4 MPa, i to u tački na donjem dijelu tijela projektila koja je u kontaktu sa eksplozivnim punjenjem.

Mehaničke osobine materijala (granica razvlačenja, zatezna čvrstoća, itd) određuju se na osnovu statičkih ispitivanja materijala. Ipak, vrijednosti ovih mehaničkih osobina značajno zavise od brzine deformacije materijala, i detaljnije analize zahtjevaju poznavanje ponašanja materijala u statičkim i dinamičkim uslovima. Mehaničke osobine materijala u statičkim uslovima eksploatacije mogu se lako izmjeriti, i poslužiti kao osnova za njihovo proučavanje, međutim, karakteristike materijala u dinamičkim uslovima su od mnogo veće važnosti za razumijevanje ponašanja materijala koji je podvrgnut velikim brzinama deformacije [36].

Slika 5.7.2.13 pokazuje uticaj intenziteta brzine deformacije na mehaničke karakteristike materijala. Poredeći krive napona u funkciji od deformacije (sl. 5.7.2.13), za dinamička opterećenja (velika brzina deformacije) i statička opterećenja (manja brzina deformacije), vidimo da isti materijal koji je podvrgnut velikim brzinama deformacije ima znatno veću granicu razvlačenja nego u statičkim uvjetima gdje su brzine deformacije male [36]. Može se zaključiti da je materijal otporniji na plastičnu deformaciju u slučaju kada je izložen dinamičkom naprezanju, tj. većim brzinama deformacije, nego u slučaju statičkog naprezanja.



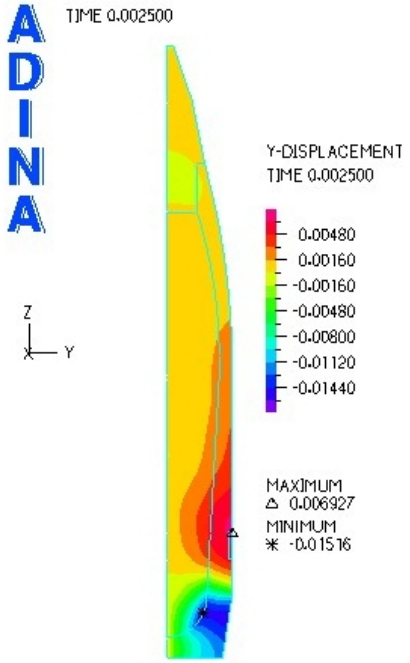
Sl. 5.7.2.13 Uticaj intenziteta brzine deformacije na mehaničke karakteristike materijala (materijal: osiromašeni Uranijum). Kriva dinamičke deformacije pokazuje ponašanje materijala koji je podvrgnut deformacijama reda 5000 s^{-1}, a kriva statičke deformacije pokazuje karakteristike materijala podvrgnutog deformaciji brzine 0,001 s^{-1} [36].

Radijalna pomjeranja

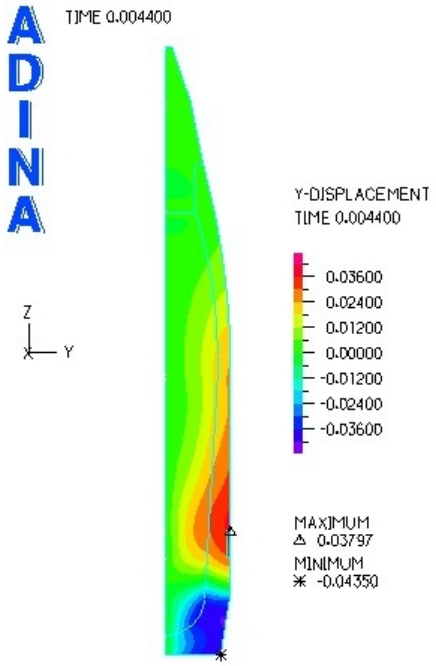
Na sl. 5.7.2.14 prikazana su radijalna pomjeranja (pomjeranja u Y - pravcu) bojeve glave, za različite vremenske korake.

U trenutku t_1 = 2,5 ms najveće pozitivno radijalno pomjeranje (u pozitivnom pravcu Y - ose) iznosilo 0,006927 mm, a najveće negativno radijalno pomjeranje iznosilo je -0,01516 mm (sl. 5.7.2.14.a). U trenutku t_2 = 4,4 ms najveće pozitivno radijalno pomjeranje iznosilo je 0,03797 mm, a najveće negativno radijalno pomjeranje iznosilo je -0,04350 mm (sl. 5.7.2.14.b). U trenutku t_3 = 6,5 ms najveće pozitivno radijalno pomjeranje iznosilo je 0,05292 mm, a najveće

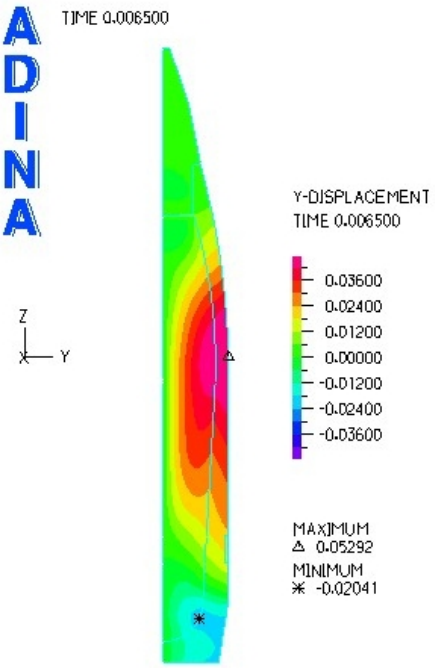
negativno radijalno pomjeranje iznosilo je -0,02041 mm (sl. 5.7.2.14.c). I za zadnji vremenski korak t_4 = 9,8 ms, najveće pozitivno radijalno pomjeranje iznosilo je 0,002805 mm, a najveće negativno radijalno pomjeranje iznosilo je -0,04273 mm (sl. 5.7.2.14.d). Može se zaključiti da dobijena radijalna pomjeranja pokazuju da se neće ostvariti kontakt bočne strane tijela bojeve glave sa unutrašnjom stranom cijevi oružja.



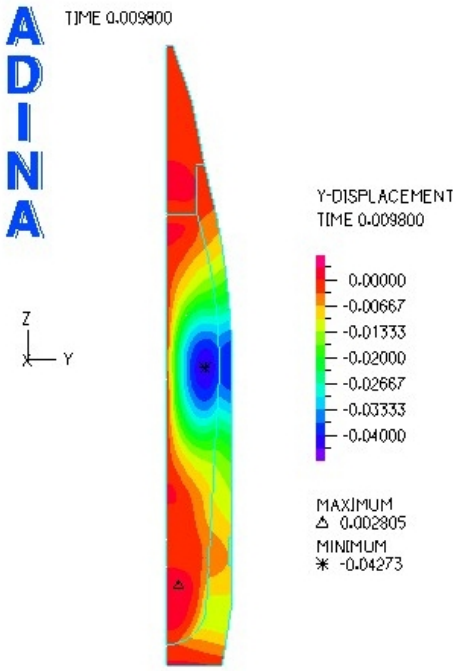
a. Radijalna pomjeranja (pomjeranja u Y - pravcu), t = 0,0025 s



b. Radijalna pomjeranja (pomjeranja u Y - pravcu), t = 0,0044 s



c. Radijalna pomjeranja (pomjeranja u Y - pravcu), t = 0,0065 s



5. Radijalna pomjeranja (pomjeranja u Y - pravcu), t = 0,0098 s

Sl. 5.7.2.14 Radijalna pomjeranja bojeve glave, za različite vremenske korake

Efektivni napon

Kod složenog naponskog stanja definiše se fiktivni napon, kojim kada se jednoosno napregne posmatrani konstruktivni element dobija se naponsko stanje kojim se može zamjeniti postojeće složeno naponsko stanje. Takav napon, koji izaziva zamišljeno stanje napona zove se ekvivalentni, idealni ili efektivni napon.

Efektivni napon σ_i složenog naponskog stanja je fiktivni napon, koji kod složenog naponskog stanja ima ulogu graničnog, dozvoljenog napona. Prema hipotezi najvećeg rada utrošenog na promjenu oblika u svim tačkama tijela mora biti zadovoljen uslov [35]:

$$\sigma_i \leq \sigma_{doz}$$

U slučaju numeričke simulacije naprezanja komponenti projektila 105mm M1, maksimalni efektivni napon iznosio je σ_i = 515,3 MPa, za trenutak t_2 = 0,0044s (sl. 5.7.2.15.d).

Dobijeni efektivni napon ne premašuje granicu razvlačenja materijala košuljice koja iznosi 560 MPa, pa je sigurnosni aspekt u cijevi zadovoljen. U cijevi oružja (haubice) neće doći do plastične deformacije tijela projektila 105mm M1.

Sa sl. 5.7.2.15 može se zaključiti da efektivni napon prati trend porasta i smanjenja pritiska u cijevi.

Za t_1 = 0,0025s kada pritisak u cijevi iznosi P_1 = 80 MPa, efektivni napon ima maksimalnu vrijednost od 154,6 MPa.

Rečeno je da u trenutku najvećeg pritiska u cijevi, za t_2 = 0,0044s (P_2 = 230 MPa) maksimalni efektivni napon iznosi 515,3 MPa.

U trenutku t_3 = 0,0065s, efektivni napon ima vrijednost od 478,8 MPa, dok je u zadnjem trenutku, za t_4 = 0,0098s, maksimalni efektivni napon jednak 320,2 MPa.

Na sl. 5.7.2.15 prikazane su i lokacije na projektilu gdje su se pojavili maksimalni efektivni naponi na tijelu projektila.

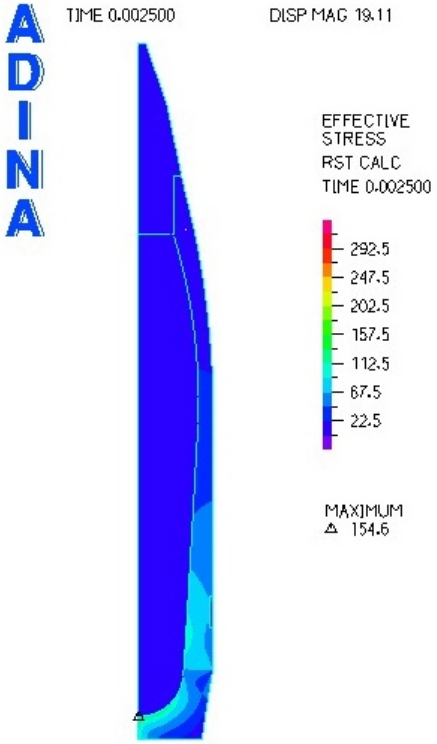
U trenutku t_1 najveći efektivni napon iznosi 154,6 MPa, i pojavio se u tački na donjem dijelu tijela projektila koja je u kontaktu sa eksplozivnim punjenjem.

U trenutku t_2 efektivni napon ima maksimalnu vrijednost (515,3 MPa), i to za tačku na dnu tijela projektila.

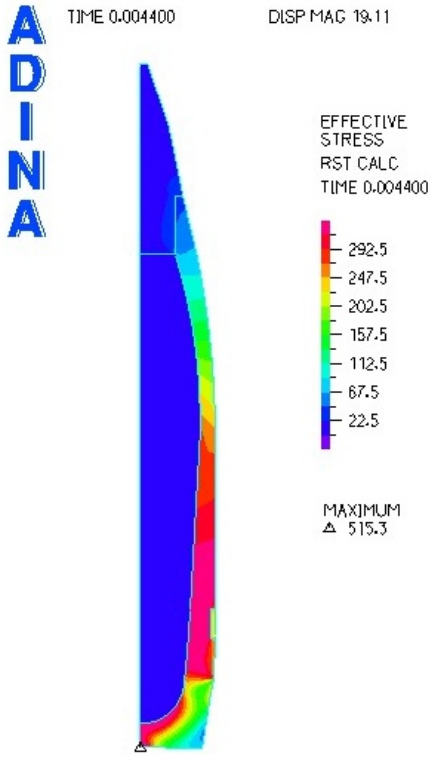
Za trenutak t_3 efektivni napon ima nešto manju maksimalnu vrijednost (478,8 MPa), i pojavljuje se na centralnom dijelu tijela projektila.

Isto vrijedi i za trenutak t_4, kada maksimalna vrijednost efektivnog napona iznosi 320,2 MPa, i također se pojavljuje u tački tijela projektila koja se nalazi na centralnom, cilindričnom dijelu tijela projektila 105mm M1.

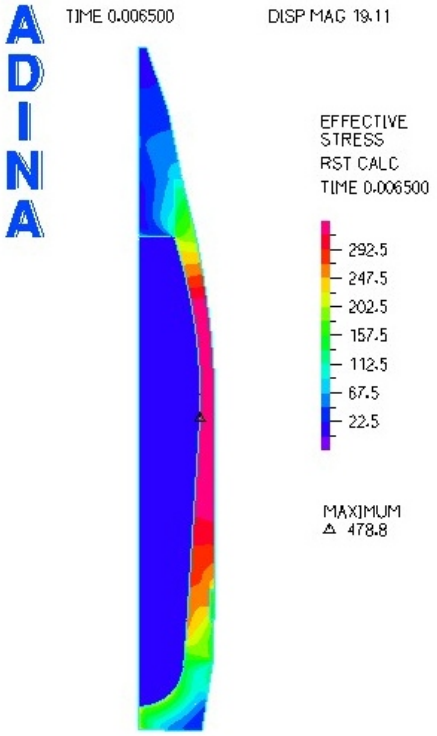
Ova analiza potvrđuje ranije zaključke koji se odnose na optimizaciju unutrašnje trase projektila. Moguće je izvršiti smanjenje debljine tijela projektila na većini segmenata tijela projektila, jer su maksimalni efektivni naponi dobijeni numeričkom simulacijom manji od dozvoljenog napona (granica razvlačenja materijala).



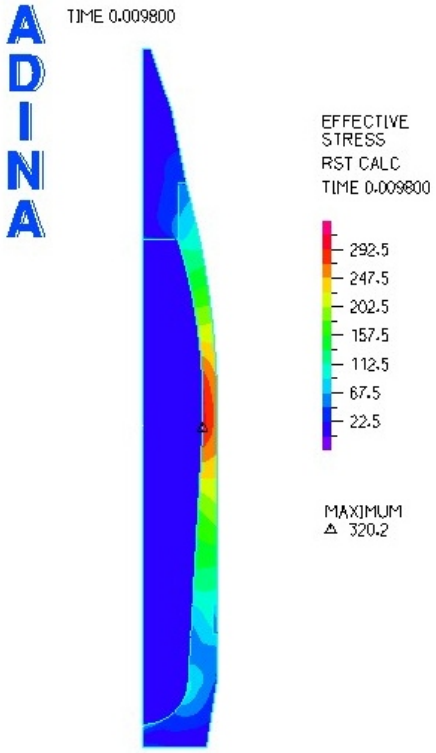
a. Efektivni napon, t = 0,0025 s



b. Efektivni napon, t = 0,0044 s



c. Efektivni napon, t = 0,0065 s



d. Efektivni napon, t = 0,0098 s

Sl. 5.7.2.15 Efektivni naponi, za različite vremenske korake

Konzistentnost rješenja

Za numerički metod kaže se da je konzistentan ako numerički rezultat teži analitičkom rezultatu kada dimenzije konačnih elemenata teže nuli, to jest, numerički rezultat konvergira analitičkom rješenju sa smanjenjem dimenzije konačnih elemenata. Koliko brzo će numerički rezultat težiti analitičkom pri smanjivanju dimenzija diskretizacionog elementa zavisi od reda tačnosti metode. Općenito se teži povećanju gustine mreže konačnih elemenata sa ciljem dobijanja tačnijih rezultata, kao i procjene njihove tačnosti [35].

Izvršena je komparacija rezultata numeričkog rješenja sa analitičkim rješenjem za dati model. Analitičko rješenje za pomjeranje i brzinu date bojeve glave (razmatranu kao kruto tijelo) može se predstaviti uz diferencijalne jednačine:

$$m \cdot \frac{d^2x}{dt^2} = P(t) \cdot S \tag{5.7.1.13}$$

$$\frac{d^2x}{dt^2} = \frac{P(t) \cdot S}{m} \tag{5.7.1.14}$$

$$\frac{dx}{dt} = v \tag{5.7.1.15}$$

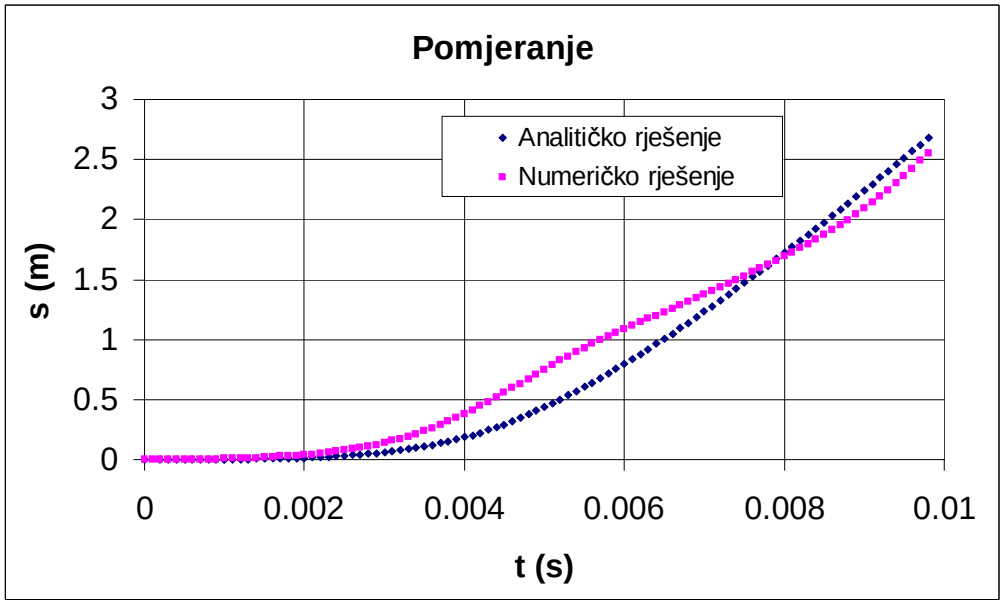
Ovdje je *S* površina poprečnog presjeka cijevi oružja, a *m* ukupna masa bojeve glave. Budući da je pritisak *P(t)* našem slučaju zadat u funkciji vremena kao uređen skup tačaka, ovaj sistem diferencijalnih jednačina može se riješiti samo numeričkim metodama. Upotrijebljena je Heunova metoda (Metoda Runge Kutta 2. reda):

$$x_{n+1} = x_n + v_{n+1} \cdot \delta t \tag{5.7.1.15}$$

$$v^0{}_{n+1} = v_n + f(t_n, v_n) \cdot \delta t \ \text{(Prediktor)} \tag{5.7.1.16}$$

$$v_{n+1} = v_n + \frac{f(t_n, v_i) + f(t_{n+1}, v^0{}_{n+1})}{2} \cdot \delta t \ \text{(Korektor)} \tag{5.7.1.17}$$

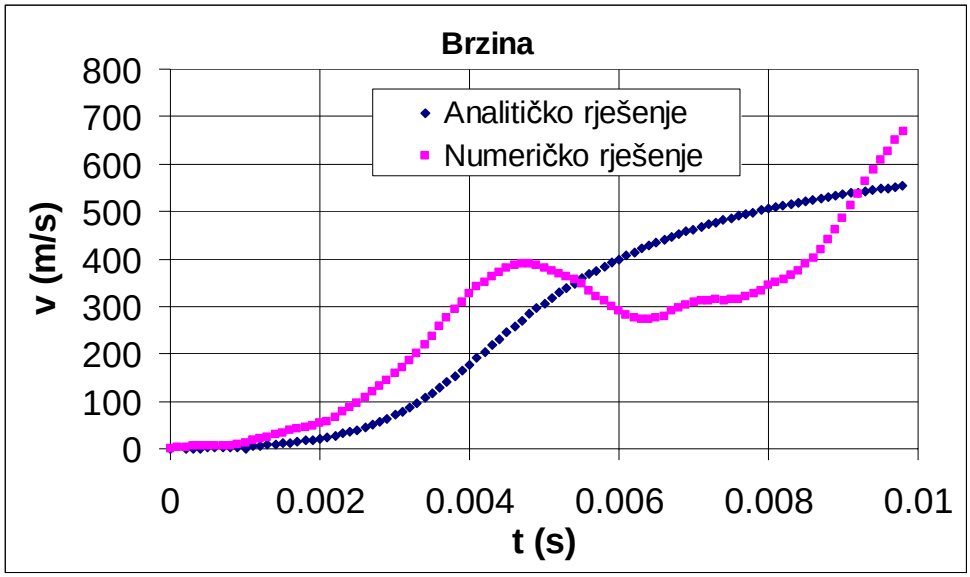
gdje je δt vremenski inkrement jednak 0,5 ms, uzet zbog veličine koraka vremena u funkciji *P(t)*.



Sl. 5.7.2.16 Komparacija rezultata dobijenih za pomjeranje kod analitičkog rješenja i numeričke simulacije

Na slici 5.7.2.16 prikazana je komparacija analitičkog (model krutog tijela) i numeričkog rješenja (model čvrstog tijela) za pređeni put bojeve glave.

Na sl. 5.7.2.17 prikazana je usporedba analitičkog rješenja (model krutog tijela) i numeričkog rješenja (model čvrstog tijela) za brzinu bojeve glave 105mm M1, dobijenog simulacijom u ADINA© softveru.



Sl. 5.7.2.17 Komparacija rezultata dobijenih za brzinu kod analitičkog rješenja i numeričke simulacije

Zaključuje se da numeričko rješenje konvergira analitičkom.

6. ZAKLJUČAK

U radu su naznačene teoretske osnove koje se baziraju na dosadašnjim istraživanjima prirodne fragmentacije HE bojevih glava, kao i opis metoda istraživanja koje se koriste prilikom analize efikasnosti HE bojevih glava.

Definisan je model za predviđanje smrtonosne zone HE bojevih glava, čije osnove se baziraju na trenutno važećem američkom modelu, a koji se sastoji od tri modula: Modul za određivanje vjerovatnoće pogađanja, Modul za predviđanje krivih izogustina i Interface za CAD modeliranje smrtonosnih zona.

Modul za određivanje vjerovatnoće pogađanja može se koristiti za predviđanje koeficijenta efikasnosti, u zavisnosti od površinske gustine vojnika na terenu. U zapadnoj vojnoj doktrini obično se u ovim proračunima usvaja rastresit raspored boraca, sa neuniformnom gustinom boraca na bojištu. Sa druge strane, koncept istočnih zemalja uzima u obzir uniformnu i konstantnu gustinu vojnika (visoka gustina vojnika, jurišni sistem), te su zbog toga i procjene vjerovatnoće onesposobljavanja boraca nešto drugačije.

Modul za predviđanje krivih izogustina omogućava predviđanje rasporeda gustine efikasnih fragmenata u prostoru oko bojeve glave, u funkciji od polarnog ugla, procjenu rasporeda gustine efikasnih fragmenata u funkciji od polarne zone za konstantne vrijednosti udaljenosti od centra detonacije, predviđanje 3D modela gustine efikasnih fragmenata u prostoru, predviđanje gustine efikasnih fragmenata za različite vrijednosti udaljenosti od centra detonacije u funkciji od polarne zone i definisanje krivih izogustina na osnovu koji se određuju 2D smrtonosne zone HE bojevih glava. Ovaj modul koristi se i za predviđanje ukupnog broja efikasnih fragmenata u prostoru, te procjenu radijuse efikasnog dejstva HE bojevih glava.

Interface za CAD modeliranje smrtonosne zone omogućava 2D i 3D vizuelizaciju zone smrtonosnog dejstva, izračunavanje površine zone smrtonosnog dejstva za različite nivoe bojišta, te predviđanje zone smrtonosnog dejstva za različite padne uglove bojeve glave.

Na osnovu brojnih eksperimenata (izvršeno je oko 130 testova, sa šest vrsta artiljerijskih projektila, 3 tipa minobacačkih projektila, i bojevim glavama dva tipa raketnih projektila) i dobijenih eksperimentalnih podataka, ispitivanjem fragmentacije nekoliko tipova bojevih glava u polukružnoj areni, izvršena je analiza koeficijenta efikasnosti za različite izložene površine vojnika, nulti padni ugao bojeve glave i detonaciju na tlu.

Izvršeno je predviđanje 3D modela gustine efikasnih fragmenata, procjena ukupnog broja efikasnih fragmenata u prostoru, određivanje krivih izogustina i 2D smrtonosne zone.

Izvršena je analiza 2D smrtonosnih zona CAD metodom, predviđanje 3D smrtonosne zone, procjena površine projekcije 3D smrtonosne zone za dva različita nivoa terena, i za različite padne uglove bojeve glave, određena je promjena površine projekcije smrtonosne zone kao dvostepena funkcija, te analiziran uticaj izložene površine vojnika na terenu za dobijene smrtonosne zone.

Ispitivanjem fragmentacije u Pit uređaju izvršena je analiza masene distribucije fragmenata, regresiona analiza geometrije fragmenata nastalih fragmenatcijom HE bojevih glava, te analiza dinamike leta fragmenata u toku njihovog kretanja kroz atmosferu prema cilju.

Eksperimentalnim ispitivanjem fragmentacije u četvrtkružnoj areni izvršeno je predviđanje radijusa efikasnog dejstva HE bojevih glava. Za aproksimiranje i interpolaciju dobijenih podataka korišten je softverski paket MatLab©.

Stvorene su pretpostavke za stvaranje veoma opsežne baze podataka iz oblasti prirodne fragmentacije HE bojevih glava.

Korištenjem stvorenih baza podataka o velikom broju projektila i bojevih glava raketnih projektila izvršena je analiza početnih brzina fragmenata i ugla vektora brzina fragmenata (Taylor-ov ugao).

Izvršena je numerička simulacija naponskog stanja i deformacije komponenata projektila u toku njegovog kretanja kroz cijev oružja, korištenjem softvera ADINA, sa ciljem provjere sigurnosti u toku kretanja municije kroz cijev oružja i moguće optimizacije unutrašnje trase projektila sa ciljem povećanja smrtonosne zone HE bojevih glava.

Preporuke za dalji rad:

- Potrebno je konstantno proširivati stvorenu bazu podataka (dodavanjem korištenih materijala tijela bojeve glave, vrste eksplozivnog punjenja, eksperimentalnih podataka iz Pit i Arena testova, itd.).
- Potrebno je izvršiti modifikaciju Modula za određivanje vjerovatnoće pogađanja, kako bi se definisao model kojim se predviđa koeficijent efikasnosti za različite padne uglove i različite visine detonacije HE bojeve glave.
- Izvršiti nadogradnju modela za predviđanje masene distribucije fragmenata (veza između odnosa kumulativnog broja fragmenata prema ukupnom broju fragmenata i kumulativne mase fragmenata prema ukupnoj masi fragmenata) koji je razvila Katedra za Odbrambene tehnologije.
- Potrebno je izvršiti dalja istraživanja usmjerena na preciznije određivanje aerodinamičkog koeficijenta otpora realnog fragmenta u toku leta fragmenta kroz atmosferu prema cilju.
- Slijedeći korak u numeričkoj analizi procesa HE bojevih glava je numerička simulacija napuhivanja tijela bojeve glave, a potom i simulacija početka procesa fragmentacije metalnog tijela bojeve glave.
- Jedan od najvažnijih koraka koje je potrebno napraviti u budućnosti svakako je unificiranje postavljenih modela i integracija u jedan softver, koji bi omogućavao, korištenjem grafičkog interfejsa i unosom neophodnim podataka, predviđanje masene distribucije fragmenata, koeficijenta efikasnosti, te površine smrtonosne zone na bojištu.

7. LITERATURA

1. R. M. Lloyd: *Conventional Warhead Systems Physics and Engineering Design*, Volume 179, Progress in Astronautics and Aeronautics.
2. J. Carleone: *Tactical Missile Warheads*, Progress in Astronautics and Aeronautics, Volume 155, AIAA, 1993.
3. J. Carlone: *Introduction to Tactical warheads*, Progress in Astronautics and Aeronautics, Volume 155.
4. A. C. Victor: *Warheads performance calculations for threat hazard assessment*, Victor Technology, San Rafel, California.
5. N. Kršić: *Osnovi konstrukcije municije*, Tehnički školski centar KoV, Zagreb, 1973.
6. A. Stamatović: *Konstruisanje projektila*, Beograd, 1995.
7. J. Starkenberg, K. J. Benjamin, R. B. Frey: *Predicting fragmentation propagation probabilities for ammunition stacks*, Aberdeen Proving Ground, MD 21005-5066.
8. Ispitivanje efikasnosti bojevih glava AR mina 120mm, VTI Beograd, 1975.
9. R. Sutterlin: *Cours de munitions*, Ecole nationale superieure de l'armament, Paris, 1963-1966.
10. D. W. Leeming: *The Application of an Innovative Grenade Warhead to Defeat Combat Body Armour*, International Infantry & Small Arms Section Symposium, NDIA 1999.
11. AAAV 30mm HE lethality testing, Test procedures and casualty models, NAVSEA, Dahlgreen.
12. J. G. Powel, F. McCleskey, W. D. Smith: *Fragment hazard investigation program: natural communication detonation of 155mm projectile*s, Naval surface weapons center, Maryland, 1981.
13. Static testing of high explosive munitions for obtaining fragment spatial distribution, US Army Combat Systems, APG, Maryland, mart 1993.
14. D. Dimitrijević: *Ispitivanje efikasnosti parčadnih projektila*, Vojna Akademija kopnene vojske Zagreb, 1977.
15. B. Kraut: *Strojarski priručnik*, Zagreb, 1997.
16. M. Vukašinović: *Kriterijum ocjene efikasnosti projektila parčadno rušećeg dejstva*, VTI Beograd.
17. M. Vukašinović: *Primjena kubnih spline funkcija pri određivanju diferencijalnog i integralnog oblika prostornog rasporeda raspodjele gustine efikasne parčadi*, VTI, Beograd.
18. Fragment penetration test of armour, US Army test and evaluation command test operations procedure, US Army Aberdeen Proving Ground, Maryland, mart 1983.
19. B. Zecevic, J. Terzic, A. Catovic: *Influencing parameters on HE projectiles with natural fragmentation*, NTREM symposium, Pardubice 2006.
20. US Army Test and Evaluation Command Test Operations Procedure, *"Fragment Penetration Test of Armor"*, Report number TOP 2-2-722, ADA 125824, 1983.
21. B. Zecevic, D. Eror: *Terminal Ballistic of 128 mm M87 Rocket*, FTV-270, Sarajevo, 1986.
22. R. W. Gurney: *The initial velocities of fragments from bombs, shell, and grenades*, BRL Report No. 405, APG, Maryland, 1943.
23. W. P. Walters, J. A. Zukas: *Fundamentals of shaped charges*, Wiley-Interscience Publication, ISBN 0-471-62172-2, 1989.
24. TNO Report: *General description of the missile systems damage assessment code (MISDAC©)*, Prins Maurits Laboratorium TNO, septembar 1994.
25. M. M. Crull: *Prediction of Primary Fragmentation Characteristics of Cased Munition*, UXO/Countermine Forum 1998, The Joint UXO Coordination Office, 1998.

26. ADINA System©, www.adina.com.
27. H. Bircher: *Explosive Substances and Their Applications: An Overview*, Chimia 58 (2004) 355-362, © Schweizerische Chemische Gesellschaft, ISSN 0009.4293.
28. H. Senf, H. Rothenhausler: *Statistical investigation on geometrical size and shape distributions of natural fragments*, 14th international Symposium on Ballistics, Quebec Canada, 26-29 septembar, 1993.
29. B. Zečević: *Bojeve glave raketnih projektila*, Mašinski fakultet u Sarajevu, Sarajevo, 1988.
30. J. Jussila: *Wound ballistic simulation: Assessment of the legitimacy of law enforcement firearms ammunition by means of wound ballistic simulation*, Academic dissertation, The Second Department of Surgery - University of Helsinki, and Police Technical Centre, Helsinki, 2005.
31. G. Arwidsson: *Soldier Lethality and Wound Ballistics Soldier Lethality and Wound Ballistics from a Swedish Perspective*, NDIA 51st Joint Services Small Arms Symposium, Atlantic City, 2005.
32. B. P. Kneubuehl: *Wound Ballistics, Ammunition and the LOAC*, International Committee of Military Medicine (ICMM) Course on the International Law of Armed Conflicts, Spiez, 22.08.2006.
33. C.G Brady: *An analysis of wound statistics in relation personal ballistics protection*, Australia 2003.
34. N. Kršić: *Osnovi konstrukcije municije, Zbirka rješenih zadataka*, Tehnički školski centar KoV, Zagreb, 1973.
35. V. Doleček, I. Karabegović, D. Martinović, M. Jurković, D. Blagojević, Š. Bogdan, I. Bijelonja: *Elastostatika II dio*, Tehnički fakultet Bihać, 2004.
36. D. J. Sandstorm: *Anti - Armor materials by design*, Los Alamos Science, summer 1989.
37. P. G. Baer, J. M. Frankle: *The simulation of interior ballistic performance of guns by digital computer program*, BRL, APG, Maryland, 1962.
38. P. Wanninger: *Bindersystems for HE charges*, Rheinmetall W&M GmbH, 2006.
39. U.S. Department of Defense Regulation, *Mandatory Procedures for Major Defense Acquisition Programs (MDAP) and Major Automated Information System (MAIS) Acquisition Programs (DOD 5000.2-R)*, Washington, DC, 11 May 1999.
40. *U.S. Department of the Army. Manpower and Personnel Integration (MANPRINT) in the System Acquisition Process*, AR 602-2, Washington, DC, 10 January 1995.
41. Principles of Naval Weapons Systems, Edited by CDR Joseph Hall, USN.
42. H. A. Westing: *The military impact on the human environment, Worls Armaments and Disarmaments*, SIPRI, London, 1978.
43. M. Lumsden: *Od dum-dum metka do napalma -Borba protiv nehumanog oružja*, Globus, 1985, Zagreb
44. WitnessMan©, The software tool to design, analyse and assess a witness pack with respect to military and medical effects on an (un)protected (dis)mounted soldier, TNO Defence, Security and Safety, Nederland.
45. M. Hall, E. Scheper, J. Sunderland, S. Gilman: *Enhanced lethality multi-purpose tank munition for FCS*, ARDEC, Picatinny Arsenal, NJ 07806-5000[45] M. Hall, E. Scheper, J. Sunderland, S. Gilman: *Enhanced lethality multi-purpose tank munition for FCS*, ARDEC, Picatinny Arsenal, NJ 07806-5000.
46. Terminal effectiveness of anti-personnel fragmenting projectiles, US Army Test and Evaluation Command, Test Operations Procedure, APG, Maryland, february, 1982.
47. D. Durkin: *Manufacturing Process Development For the OCSW Warhead*, AMSTA-AR-CCL-B, Tank-automotive & Armaments COM COMmand, 15 August 2001.
48. J. Dehn: *Terminal effectiveness, vulnerability methodology and fragmentation warhead optimization. A technical survey from an historical perspective*, BRL, APG Maryland, 1980.

49. J. Dehn: *Probability formulas for describing fragment size distributions*, BRL, APG Maryland, june 1981.
50. S. Jaramaz: *Warheads design and terminal ballistics*, MEF Belgrade, 2000.
51. J. T. Klopcic, H. L. Reed: *Historical Perspectives on Vulnerability/Lethality Analysis*, April, 1999.
52. B. Zečević: *Osnove municije*, decembar, 2003.
53. R. Pronk: *Body armour against artillery fragments, what protection can it give?*, Material Directorate of the Royal Netherlands Army, Hague, 1983.
54. P. V. Maksimović: *Eksplozivne materije*, Beograd, 1985.
55. L. Aronica: *Sound velocity and elastic moduli measurements on several TNT-based explosive compositions*, NAVORD Report 6087, U.S. Naval Ordnance Laboratory, Maryland, march. 1961.
56. P. Wanninger: *Insensitive Booster Charges*, Rheinmetall Waffe Munition
57. M. Sućeska: *Eksplozije i eksplozivi, njihova mirnodopska primjena*, Zagreb, 2001.
58. Manufacture od projectiles, projectile componnents, and cartridge cases for artillery, tank main armament, and mortars, Military Handbook, MIL-HDBK-756(AR), april, 1991.
59. C. C. MacCrindle, W. Sharpe: *High Fragmentation steel production process*, ARLCD-CR-81017, september, 1982.
60. Hirtenberger Defence Systems: *The 155mm family of shells for howitzers*, Austria
61. PRETIS©, Radionički crteži.
62. Stahlschlussel (Key to Steel), 1998.
63. V. Shikunov: *New life for projectile bodies*, Military Parade, september-october, 1997.
64. V. Odintsov: *Updating of high explosives projectiles*, Military Parade, november-december, 1997.
65. R. R. Karpp, W. W. Predebon: *Calculations of fragment velocities from naturaly fragmenting munitions*, BRL, Aberdeen Proving Ground, Maryland, july 1975.
66. F. McCleskey: *Drag coefficients for irregular fragments*, Naval surface warfare center, Maryland, 1988.
67. E. R. Fletcher, R. W. Albright, V. C. Goldizen, I. G . Bowen: *Determinations of aerodynamic drag parameters of small irregular objects by means of drop tests*, Lovelace foundation for Medical Education and Research, Albuquerque, New Mexico, 1960.
68. E. Stromse, K. O. Ingebritsen: *A modification of the Mott formula for prediction of the fragment size distribution*, Norwegian Defence Research Establishment, Kjeller - Norway, 1987.
69. P. Malbo, C. Bar: *New insensitive rifled 120-mm mortar ammunition with enhanced lethal performance*, TDA Armements Route d'Ardon, 45240 La Ferté Saint Aubin, France.
70. B. Gelfand, M. Silnikov: *Blast effects caused by explosions*, European research office of the U. S. Army, London, 2004.
71. R. Harney: *Combat systems, Volume 3. Engagement Elements - Parts I & II, Electromagnetic Weapons & Projectile Weapons*, Monterey, California, 2004.
72. N. Morris: *Lethality to Humans Due to Blast Effects from Buried Landmine*, U. S. Army, Project Manager Instrumentation, Targets and Threat Simulators (PM ITTS), 2002 Mines, Demolition and Non-Lethal Conference.
73. Mathworks MatLab© and Simulink©, www.mathworks.com
74. Golden Software Grapher©, www.goldensoftware.com
75. Autodesk AutoCAD©, www.autodesk.com
76. B. Zečević: *Primjena modifikovanih avionskih bombi tokom opsade Sarajeva 1994-1995*, DTD-01/05, International Criminal Tribunal for the Former Yugoslavia, 30.01.2007.god.
77. 105mm HE Shell type M1, Army Materiel Department, Stockholm, 1975.