Mr Predrag Elek,
dipl. inž.
Profesor dr
Slobodan Jaramaz,
dipl. inž.
Mašinski fakultet,
Beograd

KRITERIJUM EFIKASNOSTI I OPTIMIZACIJA MASE FRAGMENTA PROJEKTILA PARČADNOG DEJSTVA*

UDC: 623.4.083.1 : 662.215.2

Rezime:

U radu se razmatra problem optimizacije mase parčadi koja nastaju fragmentacijom projektila parčadnog dejstva. Pokazano je da optimalna masa parčeta prvenstveno zavisi od njegovih kinetičkih karakteristika na cilju, kao i od usvojenog kriterijuma efikasnosti. Proračuni pokazuju da su postojeći kriterijumi, minimalna zahtevana kinetička energija fragmenta, odnosno minimalna kinetička energija po jedinici napadne površine, nesaglasni – odnosno da daju bitno različite vrednosti optimalne mase. Zaključeno je da kriterijum specifične energije parčeta podrazumeva manju masu optimalnog parčeta i ukazuje na značaj parčadi veoma male mase sa stanovišta efikasnosti. Jasno je da ovako određena optimalna masa efikasnog parčeta predstavlja veoma važan parametar projektila parčadnog dejstva, pa je neophodna eksperimentalna verifikacija dobijenih teorijskih rezultata.

Ključne reči: razorni projektili, fragmentacija, brzina razletanja parčadi, efikasna daljina parčadi, eksperimentalno ispitivanje, optimizacija.

EFFICIENCY CRITERION AND OPTIMIZATION OF FRAGMENT MASS IN FRAGMENTATION PROJECTILES

Summary:

This paper considers the problem of optimizing the mass of HE projectile fragments. It is shown that the optimum fragment mass is a function of its kinetic characteristics at the target and an adopted efficiency criterion. Computations show that the most prominent criteria, minimum required kinetic energy and minimum kinetic energy per unit of cross-sectional area, are incompatible – i. e. they provide significantly different values of the optimum mass. It is concluded that the criterion of specific kinetic energy corresponds to a lower optimum fragment mass, which indicates the importance of fragments of low masses from the aspect of efficiency. The theoretically determined optimum fragment mass represents a very significant parameter for design optimization of fragmentation projectiles, but experimental verification of obtained results is essentially important as well.

Key words: HE projectiles, fragmentation, fragment exploding velocity, effective fragment range, experimental testing, optimization.

Uvod

Proučavanje parčadnog dejstva od velikog je značaja s obzirom na zastupljenost i ulogu projektila parčadnog dejstva u savremenim sistemima naoružanja, odnosno municije. U radu je uveden koncept parčeta (fragmenta) optimalne mase kao parametra koji omogućava optimizaciju konstrukcije projektila parčadnog dejstva,

* Rad je saopšten na stručnom skupu TOC KoV „Ispitivanje kvaliteta sredstava NVO", 18. novembra 2003. u Beogradu.

kao i poređenje različitih varijanti projektila. Ovaj koncept primenljiv je na analizu kako „prirodne“, tako i dirigovane fragmentacije košuljice projektila.

Analizirana je optimalna masa fragmenta u području brzina razletanja parčadi i efikasne daljine parčadi koje je od praktičnog interesa. Pri tome je korišćen jednostavan jednodimenzionalni model balistike parčadi, uz usvajanje uobičajenih pretpostavki i ograničenja. Posebna pažnja posvećena je analizi uticaja izabranog kriterijuma efikasnosti na optimalnu masu fragmenta.

Cilj rada je određivanje optimalne mase fragmenta i utvrđivanje zavisnosti ove mase od uticajnih parametara, a naročito od usvojenog kriterijuma efikasnosti parčeta.

Uslovi efikasnosti parčadi

Pretpostavka je da se proces fragmentacije košuljice projektila parčadnog dejstva okončava formiranjem izvesnog broja parčadi koja imaju istu konačnu (maksimalnu) brzinu V_0. Ova brzina se označava kao brzina razletanja parčadi, a trenutak njenog dostizanja usvaja se za početni trenutak u analizi kretanja parčadi.

Jednačina kretanja fragmenta mase m duž pravca definisanog vektorom rezultujuće brzine razletanja je oblika:

$$m\ddot{x} = -c_x A \frac{\rho_w \dot{x}^2}{2} \qquad (1)$$

gde je:
c_x aerodinamički koeficijent otpora vazduha,
ρ_w – gustina vazduha,
A – projekcija površine parčeta na ravan normalnu na pravac kretanja.

Jednačina (1) važi: ako se fragment smatra materijalnom tačkom, tj. ako se zanemari njegovo kretanje oko centra mase i ako se delovanje gravitacionog ubrzanja zanemari, odnosno ako se za rastojanja koja su važna za analizu putanja aproksimira pravolinijskom.

Osim toga, potrebno je imati u vidu da je zbog nepravilnog oblika parčeta njegovo kretanje nestabilno – duž putanje fragment vrši složeno rotaciono kretanje, pa se i površina A neprekidno menja. S obzirom da su, praktično, svi položaji fragmenta u toku leta jednako verovatni, merodavnom vrednošću površine A može se smatrati srednja vrednost (matematičko očekivanje) projekcije površine fragmenta na proizvoljno odabranu ravan. Lako se pokazuje da u slučaju fragmenta omeđenog nekonkavnom površinom važi:

$$A = \frac{1}{4} S \qquad (2)$$

pri čemu je S površina fragmenta.

Ako se gustina vazduha ρ_w smatra konstantnom, u jednačini (1) se pojavljuje još samo parametar c_x koji je promenljiv i zavisi prvenstveno od brzine (odnosno Mahovog broja) i oblika fragmenta. S obzirom da fragmenti mogu imati najrazličitije oblike, i samim tim različite vrednosti c_x, za opšte razmatranje potrebno je usvojiti srednju vrednost. Imajući u vidu da su prvenstveno značajne nadzvučne vrednosti brzine fragmenta za koje je c_x stabilno, i aerodinamički koeficijent otpora c_x može se, takođe, smatrati približno konstantnim.

Imajući u vidu prethodnu analizu i početni uslov:

$$x=0,\quad \dot{x}=V_0 \text{ za } t=0 \tag{3}$$

rešenje diferencijalne jednačine (1) može se napisati u obliku:

$$V=V_0 \exp\left(-\frac{c_x A \rho_w x}{2m}\right) \tag{4}$$

koji definiše promenu brzine parčeta V sa povećanjem rastojanja x.

Kako je jednačinom (4) potpuno definisana kinetika parčeta, potrebno je definisati kriterijum efikasnosti parčeta – analitički uslov koji određuje donju granicu vrednosti karakterističnih parametara parčeta potrebnih za efikasno dejstvo na cilju. S obzirom na to da efikasnost parčeta zavisi od velikog broja parametara, kriterijum efikasnosti se može definisati, u opštem obliku:

$$E(m,V,f_1,f_2,f_3,\ldots)\geq E_{\min} \tag{5}$$

gde su osim mase fragmenta i njegove brzine u trenutku susreta sa ciljem, značajni i parametri f_i koji definišu: geometriju parčeta, njegove fizičko-hemijske karakteristike, uslove susreta, vrstu cilja, njegov položaj, brzinu, itd. Za svaku kombinaciju projektil–cilj bilo bi neophodno definisati odgovarajuće kriterijume efikasnosti oblika (5). S obzirom da je osnovna mera efikasnosti dejstvo protiv žive sile, pri eksperimentalnom ispitivanju parčadnog dejstva (u oboru ili areni) kriterijum efikasnosti (5) operacionalizuje se zahtevom za probijanje prepreke utvrđenih karakteristika.[1]

[1] Zavisno od standarda, reč je o čamovim daskama debljine 20 mm (Švajcarska) ili 25 mm (Rusija, SAD, domaći standard), odnosno topolovim daskama debljine 41 mm (Francuska, SAD). Osim toga, razmatra se i mogućnost korišćenja drugih materijala (šper-ploča ili metali) za izradu prepreka zbog njihove znatnije uniformnosti i postojanosti u pogledu mehaničkih osobina.

U literaturi se najčešće sreću dva analitička kriterijuma efikasnosti koji predstavljaju uslove za probijanje pomenutih prepreka, odnosno za efikasno dejstvo fragmenata na cilju.

Prvi kriterijum odnosi se na minimalnu kinetičku energiju po jedinici površine poprečnog preseka fragmenta (specifična kinetička energija) i najčešće glasi:

$$\frac{mV^2}{2A}\geq E_{s\min}=150\ \frac{\text{J}}{\text{cm}^2} \tag{6}$$

Drugi kriterijum podrazumeva da kinetička energija parčeta bude veća od zahtevane minimalne vrednosti:[2]

$$\frac{mV^2}{2}\geq E_{k\min}=100\ \text{J} \tag{7}$$

Ako je poznata brzina razletanja parčadi V_0, potrebno je odrediti parče optimalne mase koje će biti efikasno na zadatoj efikasnoj daljini parčadi x_{ef}.[3] Jasno je da je optimalna masa fragmenta u stvari minimalna masa koja zadovoljava uslov (6), odnosno (7), s obzirom da manja masa fragmenta znači veći broj i veću gustinu efikasnih fragmenata, što je takođe povoljno sa aspekta efikasnosti.

Ako se jednačina (4) uvede u nejednakosti (6) i (7), dobijaju se uslovi:

$$2E_{s\min}\frac{A}{m}\leq V_0^2 \exp\left(-c_x\rho_w x_{ef}\frac{A}{m}\right) \tag{8}$$

[2] Važno je napomenuti da se u savremenim istraživanjima iz više razloga (povezanih sa mogućnošću onesposobljavanja cilja bez letalnih posledica) navedene minimalne vrednosti dalje smanjuju. Tako se donja granica prema prvom (američkom) kriterijumu spušta na 120 ili 100 J/cm², dok se kao minimalna kinetička energija prema drugom (ruskom) kriterijumu koristi i vrednost od 80 J.

[3] Efikasna daljina parčadi x_{ef} definiše se kao rastojanje od centra eksplozije na kome je ostvarena prosečna gustina od jednog efikasnog parčeta po 1 m² površine cilja.

odnosno:

$$\frac{2E_{k\min}}{m} \le V_0^2 \exp\left(-c_x \rho_w x_{ef} \frac{A}{m}\right) \tag{9}$$

iz kojih je potrebno odrediti minimalnu masu fragmenta m. Nejednačine (8) i (9) nije moguće rešiti u opštem slučaju, jer geometrija parčeta utiče na površinu A, odnosno parametar A/m. Zbog toga će biti razmotrena četiri karakteristična oblika parčadi i za svaki od njih biće rešene nejednačine (8) i (9). U tabeli su date osnovne karakteristike za parčad u obliku pljosnatog paralelopipeda, izduženog paralelopipeda, sfere (kuglice) i rotacionog elipsoida (sferoida). Najznačajniji geometrijski parametar je odnos:

$$\frac{A}{m} = \frac{1}{\rho_m a} k \tag{10}$$

gde je:

ρ_m – gustina materijala košuljice,

a – karakteristična dimenzija parčeta,

k – parameter oblika dat u tabeli.

Dimenzije fragmenta, parametar oblika k i parametar p u jednačini (12) za različite geometrije fragmenta

Oblik	Dimenzije	k	p
Pljosnati paralelopiped	$(2a) \times (2a) \times a$	1	½
Izduženi paralelopiped	$(2a) \times a \times a$	5/4	1
Sfera (kuglica)	prečnik a	3/2	$12/\pi$
Rotacioni elipsoid	poluose $(2a):a:a$	$(3\sqrt{3}+4\pi)/16\sqrt{3}$	$3/4\pi$

Sada se uslov efikasnosti (8) može transformisati u oblik:

$$a \ge 2k \frac{E_{s\min}}{\rho_m V_0^2} \exp\left(kc_x \frac{\rho_w}{\rho_m} \frac{x_{ef}}{a}\right) \tag{11}$$

pri čemu svakom od razmotrenih oblika odgovara korespondentna vrednost parametra k.

Drugi uslov efikasnosti (9) prelazi u oblik:

$$a^3 \ge p \frac{E_{k\min}}{\rho_m V_0^2} \exp\left(kc_x \frac{\rho_w}{\rho_m} \frac{x_{ef}}{a}\right) \tag{12}$$

gde su za svaku od razmatranih geometrija parčadi parametri k i p dati u tabeli.

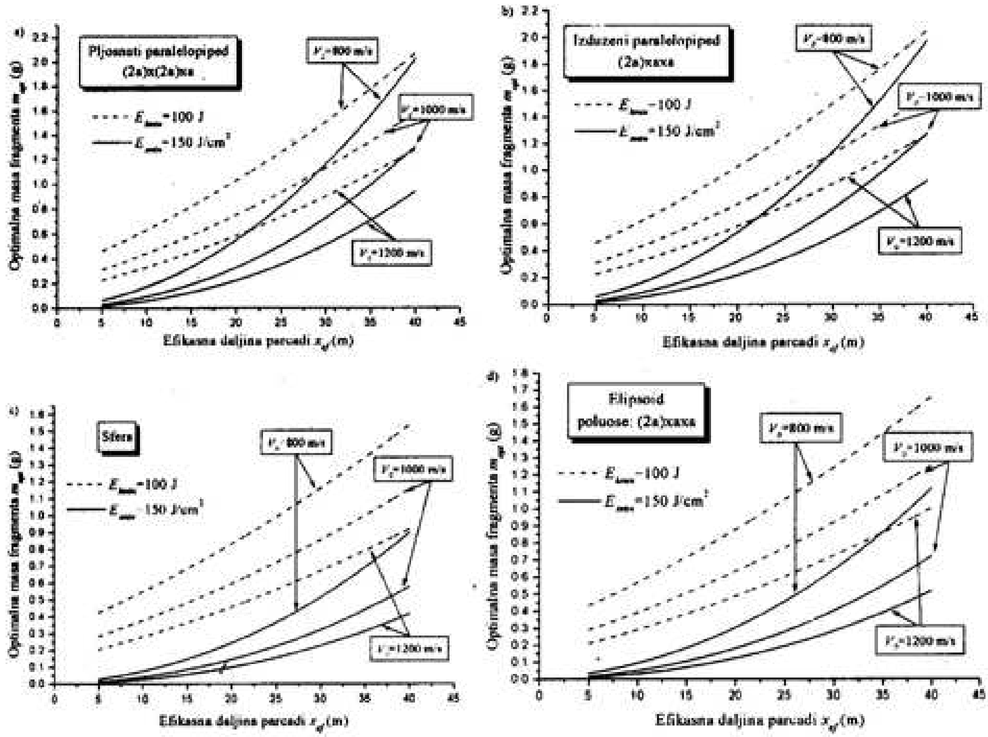
Analizom nejednačina (11) i (12) uočava se da je priroda njihovih rešenja takva da minimalne vrednosti karakteristične dimenzije parčeta a (koja odgovara minimalnoj, odnosno optimalnoj masi parčeta) odgovaraju rešenjima jednačina koje se dobijaju kada izrazi (11) i (12) postanu jednakosti. Ove trancendentne jednačine se jednostavno numerički rešavaju i konačno se dobija vrednost optimalne mase fragmenta.

Analiza rezultata

Na osnovu nejednakosti (11) i (12) može se zaključiti da su osnovni parametri koji određuju optimalnu masu parčadi (m_{opt}) efikasna daljina parčadi x_{ef} i brzina razletanja parčadi V_0; za preostale parametre u numeričkoj analizi usvojene su vrednosti:

ρ_m=7850 kg/m^3, ρ_w=1,2 kg/m^3, c_x=1,25

Najpre su, prema oba razmotrena kriterijuma efikasnosti, određene zavisnosti optimalne mase fragmenta m_{opt} od efikasne daljine parčadi x_{ef} za različite vrednosti brzine razletanja parčadi (V_0 = 800, 1000, 1200 m/s, sl. 1). Za sva četiri analizirana oblika fragmenta dobijeni su kvalitativno isti rezultati: sa pove-



Sl. 1 – Zavisnost optimalne mase fragmenta od efikasne daljine parčadi za kriterijume efikasnosti koji odgovaraju specifičnoj kinetičkoj energiji (150 J/cm²) i kinetičkoj energiji parčeta (100 J). Dati su rezultati za različite brzine razletanja parčadi (800, 1000, 1200 m/s) i četiri oblika parčadi: (a) pljosnati paralelopiped, (b) izduženi paralelopiped, (c) sfera i (d) rotacioni elipsoid

ćanjem dometa (efikasne daljine) raste i optimalna masa parčeta; na istoj efikasnoj daljini optimalna masa fragmenta raste sa opadanjem brzine razletanja.

Na sl. 2 date su zavisnosti optimalne mase parčeta u funkciji brzine razletanja parčadi za različite vrednosti efikasne daljine parčadi (x_{ef} = 15, 20, 25 m). I sa ovih dijagrama, formiranih za oba kriterijuma efikasnosti i za četiri razmatrane geometrije fragmenta, uočava se opadanje optimalne mase sa rastom brzine razletanja, odnosno porast ove mase sa rastom efikasne daljine parčadi.

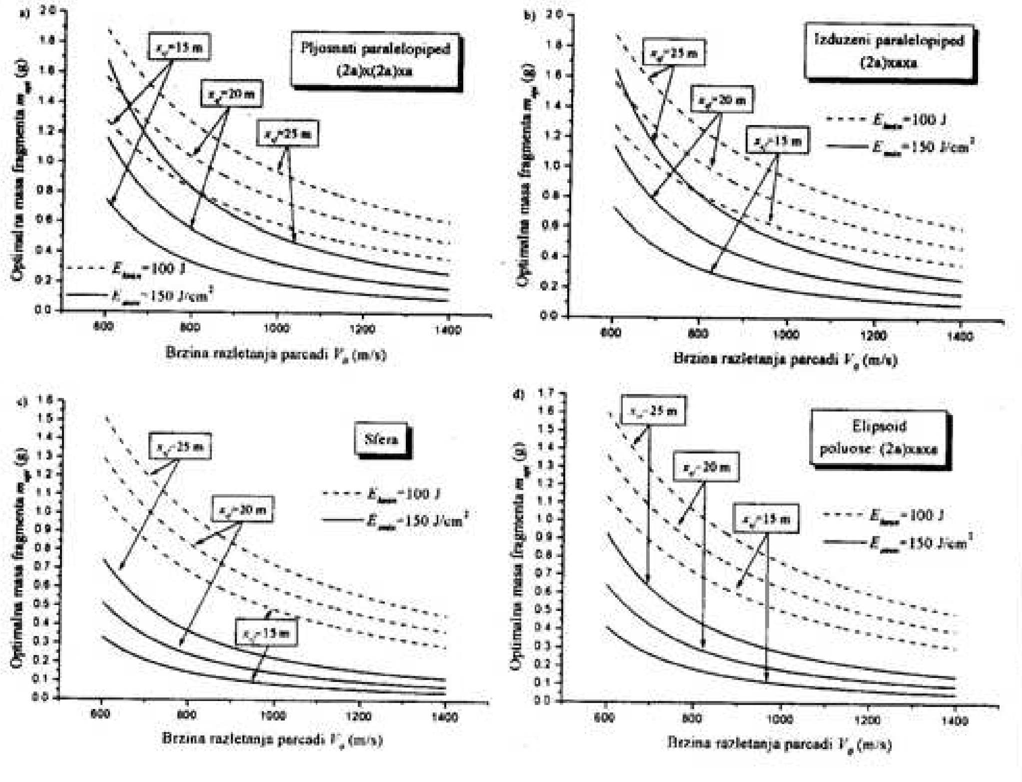
Ono što je, takođe, očigledno za oba prikaza rezultata, i zajedničko za sve analizirane oblike parčadi, je značajna *nesaglasnost* razmotrenih kriterijuma efikasnosti. Naime, u domenu efikasne daljine i početne brzine parčadi koji je od praktičnog interesa, kriterijum specifične kinetičke energije (E_{smin} = 150 J/cm²) daje znatno manje vrednosti optimalne mase nego kriterijum kinetičke energije

(E_{kmin} = 100 J).

Tako npr. za vrednost efikasne daljine parčadi x_{ef}=20 m, i brzine razletanja parčadi V_0=1000 m/s, prvi kriterijum daje dvostruko manju masu od drugog, za slučaj parčadi oblika pljosnatog i izduženog paralelopipeda, dok je u slučaju kuglice, odnosno fragmenta oblika rotacionog elipsoida ova razlika još izrazitija. Ovaj rezultat ukazuje na značaj parčadi male mase (<0,5 g) čiji se uticaj često zanemaruje. Eksperimentalna verifikacija ovog teorijskog rezultata je značajna, jer ako bi ovaj zaključak o efikasnosti parčadi veoma male mase bio potvrđen, tada bi promena sastava materijala košuljice i načina proizvodnje (u slučaju „prirodne“ fragmentacije), odnosno korišćenje sitnije prefragmentisane ili „gotove“ parčadi (u slučaju dirigovane fragmentacije) doveli do povećanja efikasnosti projektila parčadnog dejstva.

Zaključak

Na osnovu razmatranja problema optimizacije mase fragmenata projektila parčadnog dejstva analitičkim pristupom mogu se formulisati sledeći zaključci:



Sl. 2 – Optimalna masa fragmenta u funkciji brzine razletanja parčadi, za kriterijume efikasnosti koji se odnose na minimalnu specifičnu kinetičku energiju (150 J/cm²) i kinetičku energiju parčeta (100 J). Rezultati su dati za različite vrednosti efikasne daljine parčadi (15, 20, 25 m) i četiri karakteristična oblika parčadi: (a) pljosnati paralelopiped, (b) izduženi paralelopiped, (c) sfera i (d) rotacioni elipsoid

– formiran je analitički model koji omogućava određivanje optimalne mase parčeta ukoliko su poznati: geometrija parčeta, brzina razletanja parčadi, efikasna daljina parčadi i kriterijum efikasnog dejstva;

– analizirana su dva često korišćena kriterijuma efikasnosti (minimalna zahtevana specifična kinetička energija parčadi 150 J/cm^2, odnosno kinetička energija parčadi 100 J) i četiri karakteristična oblika parčeta (pljosnati paralelopiped, izduženi paralelopiped, sfera i rotacioni elipsoid) u domenu brzine razletanja i efikasne daljine parčadi koji je od praktičnog značaja;

– dobijeni rezultati ukazuju na očekivane kvalitativne zavisnosti: optimalna masa fragmenta (bilo kog od razmatranih oblika prema oba kriterijuma efikasnosti) raste sa povećanjem zahtevane efikasne daljine parčadi i sa smanjivanjem brzine razletanja parčadi;

– najčešće korišćeni kriterijumi efikasnosti su međusobno nesaglasni, tj. daju značajno različite vrednosti optimalne mase fragmenta;

– kriterijum specifične kinetičke energije, koji je nešto bliži realnoj prirodi procesa penetracije, daje znatno manje vrednosti optimalne mase i ukazuje na značaj parčadi veoma male mase sa stanovišta efikasnosti;

– eksprimentalna verifikacija teorijski dobijenih rezultata bila bi dragocena i mogla bi doprineti da se odgovarajućim konstrukcionim rešenjima poveća efikasnost projektila parčadnog dejstva, bilo da je reč o prirodnoj ili dirigovanoj fragmentaciji.

Literatura:

[1] Kneubuehl, B. P.: Measuring of Wounding Potential of Rifle and Handgun Bullets, International Workshop on Wound Ballistics, Thun, 1999.

[2] Stamatović, A.: Konstruisanje projektila, Ivexy, Beograd, 1995.

[3] Vukašinović, M.: Prilog teoriji i praksi eksperimentalnog ispitivanja parčadnog dejstva razornih projektila, doktorska disertacija, Vojnotehnička akademija VJ, 1999.

[4] Novaković, N.: Doprinos teoriji konstruisanja protivpešadijskih mina parčadnog dejstva, doktorska disertacija, Vojnotehnička akademija VJ, 1993.