



КРИТЕРИЈУМ ЕФИКАСНОСТИ И ОПТИМИЗАЦИЈА МАСЕ ФРАГМЕНТА ПРОЈЕКТИЛА ПАРЧАДНОГ ДЕЈСТВА

EFFICIENCY CRITERION AND FRAGMENT MASS OPTIMIZATION OF FRAGMENTATING PROJECTILE

Мр Предраг Елек
Др Слободан Јарамаз

Машински факултет у Београду, Катедра за војно машинство
27. марта 80, 11120 Београд 35
pelek@mas.bg.ac.yu, sjaramaz@mas.bg.ac.yu

Резиме: У раду се разматра проблем оптимизације масе парчади која настају фрагментацијом пројектила парчадног дејства. Показано је да оптимална маса парчета првенствено зависи од његових кинетичких карактеристика на циљу, као и од усвојеног критеријума ефикасности. Прорачуни показују да су постојећи критеријуми, минимална захтевана кинетичка енергија фрагмента, односно минимална кинетичка енергија по јединици нападне површине, несагласни – односно да дају битно различите вредности оптималне масе. Закључено је да критеријум специфичне енергије парчета подразумева мању масу оптималног парчета и указује на значај парчади веома мале масе са становишта ефикасности. Јасно је да овако одређена оптимална маса ефикасног парчета представља веома важан параметар пројектила парчадног дејства, при чему је неопходна експериментална верификација добијених теоријских резултата.

КЉУЧНЕ РЕЧИ: РАЗОРНИ ПРОЈЕКТИЛИ, ФРАГМЕНТАЦИЈА, БРЗИНА РАЗЛЕТАЊА ПАРЧАДИ, ЕФИКАСНА ДАЉИНА ПАРЧАДИ, ЕКСПЕРИМЕНТАЛНО ИСПИТИВАЊЕ, ОПТИМИЗАЦИЈА

Abstract: In the paper it has been considered the problem of optimization of HE projectile fragments' mass. It is shown that optimum fragment's mass is a function of its kinetic characteristics at the target and 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 optimal mass. It is concluded that criterion of specific kinetic energy corresponds to lower optimum fragment mass, which indicates the importance of fragments of low masses from the aspect of efficiency. Theoretically determined optimum fragment mass represents very significant parameter for design optimization of fragmentating projectile, but experimental verification of obtained results is essentially important.

KEYWORDS: HE PROJECTILES, FRAGMENTATION, FRAGMENT EXPLODING VELOCITY, EFFECTIVE FRAGMENT LENGTH, EXPERIMENTAL TESTING, OPTIMIZATION

1. УВОД

Проучавање парчадног дејства од великог је значаја с обзиром на заступљеност и улогу пројектила парчадног дејства у савременим системима наоружања, односно муниције. У раду је уведен концепт парчета (фрагмента) оптималне масе као параметра који омогућава оптимизацију конструкције пројектила парчадног дејства, као и поређење различитих варијанти пројектила. Овај концепт применљив је на анализу како “природне”, тако и дириговане фрагментације кошуљице пројектила.

Анализирана је оптимална маса фрагмента у подручју брзина разлетања парчади и ефикасне даљине парчади које је од практичног интереса. При томе је коришћен једноставан једнодимензионални модел балистике парчади, уз усвајање уобичајених претпоставки и ограничења. Посебна пажња посвећена је анализи утицаја изабраног критеријума ефикасности на оптималну масу фрагмента. Циљ рада је, дакле, одређивање оптималне масе фрагмента и утврђивање зависности ове масе од утицајних параметара, а нарочито од усвојеног критеријума ефикасности парчета.

2. УСЛОВИ ЕФИКАСНОСТИ ПАРЧЕТА

Претпоставимо да се процес фрагментације кошуљице пројектила парчадног дејства окончава формирањем извесног броја парчади која имају исту коначну (максималну) брзину V_0 . Ова брзина се означава као брзина разлетања парчади, а тренутак њеног достизања усваја се за почетни тренутак у анализи кретања парчади.

Једначина кретања фрагмента масе m дуж правца дефинисаног вектором резултујуће брзине разлетања има облик

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

где је c_x аеродинамички коефицијент отпора ваздуха, ρ_w – густина ваздуха, A – пројекција површине парчета на раван нормалну на правац кретања.

Једначина (1) важи: (а) ако се фрагмент сматра материјалном тачком, тј. ако се занемари његово кретање око центра масе и (б) ако се деловање гравитационог убрзања занемари, односно ако се за растојања која су од интереса за анализу путања апроксимира праволинијском.

Осим тога, потребно је имати у виду да је због неправилног облика парчета његово кретање нестабилно – дуж путање фрагмент врши сложено ротационо кретање, па се и површина A непрекидно мења. С обзиром да су, практично, сви положаји фрагмента у току лета једнако вероватни, меродавном вредношћу површине A може се сматрати средња вредност (математичко очекивање) пројекције површине фрагмента на произвољно одабрану раван. Лако се показује да у случају фрагмента омеђеног неконкавном површином важи

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

при чему је S површина фрагмента.

Ако се густина ваздуха ρ_w сматра константном, у једначини (1) се појављује још само параметар c_x који је променљив и зависи првенствено од брзине (односно Маховог броја) и облика фрагмента. С обзиром да фрагменти могу имати најразличитије облике и самим тим различите вредности c_x , за опште разматрање потребно је усвојити средњу вредност. Имајући у виду да су првенствено од значаја надзвучне вредности брзине фрагмента за које је c_x стабилно, то се аеродинамички коефицијент отпора c_x може такође сматрати приближно константним.

Имајући у виду претходну анализу и почетни услов

$$x = 0, \quad \dot{x} = V_0 \quad \text{за } t = 0 \quad (3)$$

решење диференцијалне једначине (1) може се написати у облику

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

који дефинише промену брзине парчета V са повећањем растојања x .

Како је последњом једначином потпуно дефинисана кинетика парчета, потребно је дефинисати критеријум

ефикасности парчета – аналитички услов који одређује доњу границу вредности карактеристичних параметера парчета потребних за ефикасно дејство на циљу. С обзиром да ефикасност парчета зависи од великог броја параметара, критеријум ефикасности се може дефинисати у општем облику

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

где су осим масе фрагмента и његове брзине у тренутку сусрета са циљем, значајни и параметри f_i који дефинишу: геометрију парчета, његове физичко-хемијске карактеристике, услове сусрета, врсту циља, његов положај, брзину итд. За сваку комбинацију пројектил/циљ било би, дакле, неопходно дефинисати одговарајуће критеријуме ефикасности облика (5). С обзиром да је основна мера ефикасности дејство против живе силе, при експерименталном испитивању парчадног дејства (у обору или асени) критеријум ефикасности (5) операционализује се захтевом за пробијање препреке утврђених карактеристика¹.

У литератури се најчешће срећу два аналитичка критеријума ефикасности који, дакле, представљају услове за пробијање поменутих препрека, односно за ефикасно дејство фрагмента на циљу. Први критеријум односи се на минималну кинетичку енергију по јединици површине попречног пресека фрагмента (специфична кинетичка енергија) и најчешће гласи

$$\frac{mV^2}{2A} \geq E_{smin} = 150 \frac{\text{J}}{\text{cm}^2} \quad (6)$$

Други критеријум подразумева да кинетичка енергија парчета буде већа од захтеване минималне вредности²

$$\frac{mV^2}{2} \geq E_{kmin} = 100 \text{ J} \quad (7)$$

Ако је позната брзина разлетања парчади V_0 , потребно је одредити парче оптималне масе које ће бити ефикасно на задатој ефикасној даљини парчади x_{ef} ³. Јасно је да је оптимална маса фрагмента у ствари минимална маса која задовољава услов (6), односно (7), с обзиром да мања маса фрагмента значи већи број и већу густину ефикасних фрагмената, што је такође повољно са аспекта ефикасности.

Ако се једначина (4) уведе у неједнакости (6) и (7), добијају се услови

¹ Зависно од стандарда, реч је о чамовим даскама дебљине 20 mm (Швајцарска) или 25 mm (Русија, САД, домаћи стандард), односно топовим даскама дебљине 41 mm (Француска, САД). Осим тога, разматра се и могућност коришћења других материјала (шпер-плоча или метали) за израду препрека због њихове знатније униформности и постојаности у погледу механичких особина.

² Важно је напоменути да се у савременим истраживањима из више разлога (повезаних са могућношћу онеспособљавања циља без леталних последица) наведене минималне вредности даље смањују. Тако се доња граница према првом (америчком) критеријуму спушта на 120 или 100 J/cm², док се као минимална кинетичка енергија према другом (руском) критеријуму користи и вредност од 80 J.

³ Ефикасна даљина парчади x_{ef} дефинише се као растојање од центра експлозије на коме је остварена просечна густина од једног ефикасног парчета по 1 m² површине циља.

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

односно

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

из којих је потребно одредити минималну масу фрагмента m . Неједначине (8) и (9), међутим, није могуће решити у општем случају, јер геометрија парчета утиче на површину A , односно параметар A/m . Због тога ће бити размотрена четири карактеристична облика парчади и за сваки од њих биће решене неједначине (8) и (9). У Табели 1 дате су основне карактеристике за парчад у облику пљоснатог паралелопипеда, издуженог паралелопипеда, сфере (куглице) и ротационог елипсоида (сфероида). Најзначајнији геометријски параметар је поменути однос

$$\frac{A}{m} = \frac{1}{\rho_m a} k \quad (10)$$

где је ρ_m – густина материјала кошуљице, a – карактеристична димензија парчета, док је k – параметер облика дат у Табели 1.

Табела 1. Димензије фрагмента, параметар облика k и параметар p у једначини (12) за различите геометрије фрагмента

Облик	Димензије	k	p
Пљоснати паралелопипед	$(2a) \times (2a) \times a$	1	$\frac{1}{2}$
Издужени паралелопипед	$(2a) \times a \times a$	5/4	1
Сфера (куглица)	пречник a	3/2	$12/\pi$
Ротациони елипсоид	полуосе $(2a):a:a$	$(3\sqrt{3} + 4\pi) / 16\sqrt{3}$	$3/4\pi$

Сада се услов ефикасности (8) може трансформисати у облик

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

при чему сваком од размотрених облика одговара кореспондентна вредност параметра k .

Други услов ефикасности (9) прелази у облик

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

где су за сваку од размотраних геометрија парчади параметри k и p дати у Табели 1.

Анализом неједначина (11) и (12) уочава се да је природа њихових решења таква да минималне вредности карактеристичне димензије парчета a (која одговара минималној, односно оптималној маси парчета) одговарају решењима једначина које се добијају када изрази (11) и (12) постану једнакости. Ове трансцендентне једначине се једноставно нумерички решавају и коначно се добија вредност оптималне масе фрагмента.

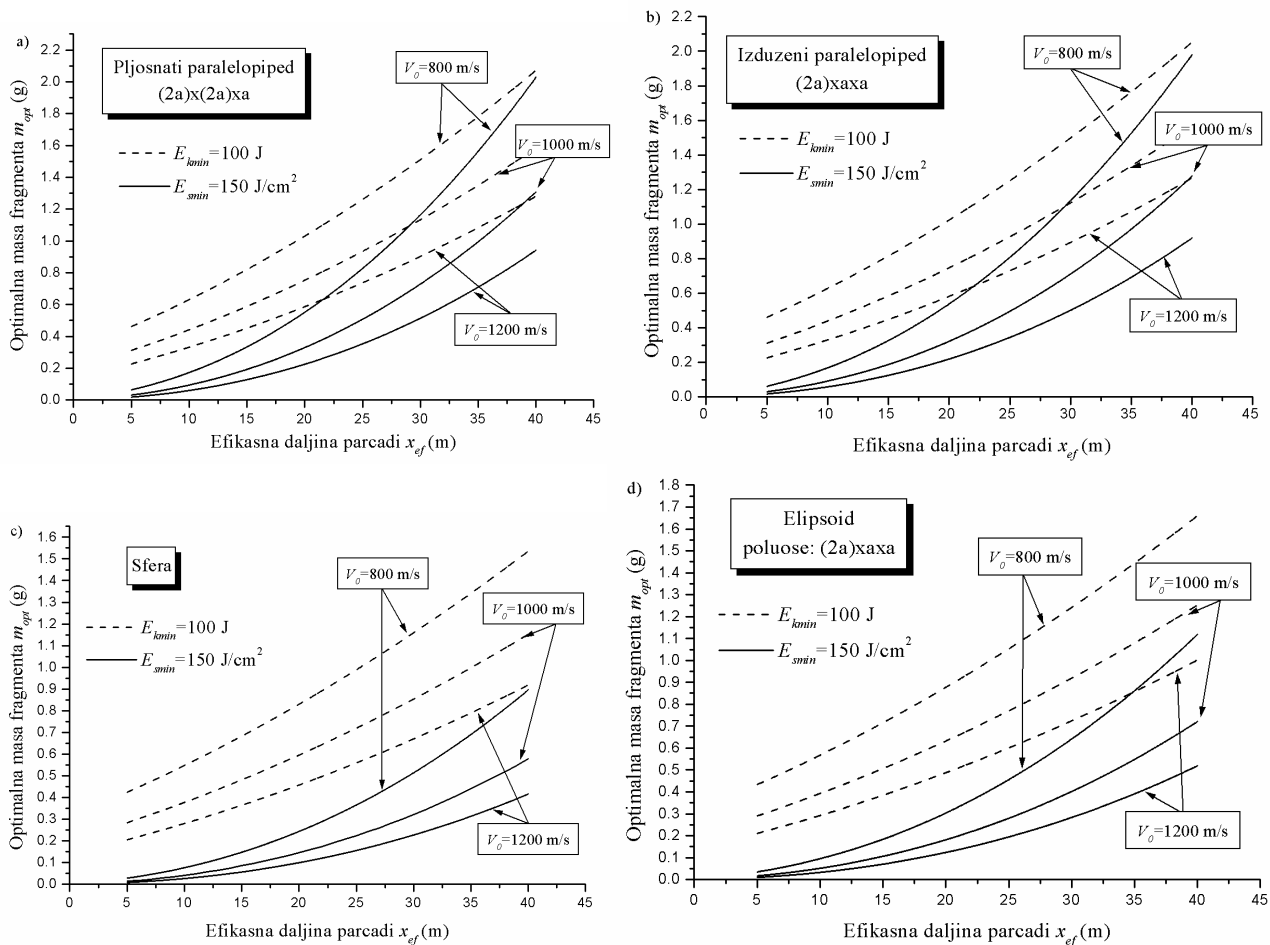
3. АНАЛИЗА РЕЗУЛТАТА

На основу неједнакости (11) и (12) може се закључити да су основни параметри који одређују оптималну масу парчади (m_{opt}) ефикасна даљина парчади x_{ef} и брзина разлетања парчади V_0 ; за преостале параметре у нумеричкој анализи усвојене су вредности: $\rho_m = 7850 \text{ kg/m}^3$, $\rho_w = 1.2 \text{ kg/m}^3$, $c_x = 1.25$.

Најпре су, према оба размотрена критеријума ефикасности, одређене зависности оптималне масе фрагмента m_{opt} од ефикасне даљине парчади x_{ef} за различите вредности брзине разлетања парчади ($V_0 = 800, 1000, 1200 \text{ m/s}$, сл. 1). За сва четири анализирана облика фрагмента добијени су квалитативно исти резултати: са повећањем домета (ефикасне даљине) расте и оптимална маса парчета; на истој ефикасној даљини оптимална маса фрагмента расте са опадањем брзине разлетања.

На сл. 2 дате су зависности оптималне масе парчета у функцији брзине разлетања парчади за различите вредности ефикасне даљине парчади ($x_{ef} = 15, 20, 25 \text{ m}$). И са ових дијаграма, формираних за оба критеријума ефикасности и за четири разматране геометрије фрагмента, уочава се опадање оптималне масе са растом брзине разлетања, односно пораст ове масе са растом ефикасне даљине парчади.

Оно што ја такође очигледно са оба приказа резултата и заједничко за све анализиране облике парчади је значајна *несагласност* размотрених критеријума ефикасности. Наиме, у домену ефикасне даљине и почетне брзине парчади који је од практичног интереса, критеријум специфичне кинетичке енергије ($E_{s\min} = 150 \text{ J/cm}^2$) даје знатно мање вредности оптималне масе него критеријум кинетичке енергије ($E_{k\min} = 100 \text{ J}$).



Слика 1. Зависност оптималне масе фрагмента од ефикасне даљине парчади за критеријуме ефикасности који одговарају специфичној кинетичкој енергији (150 J/cm^2) и кинетичкој енергији парчета (100 J). Дати су резултати за различите брзине разлетања парчади ($800, 1000, 1200 \text{ m/s}$) и четири облика парчади: (а) пљоснати паралелопипед, (б) издужени паралелопипед, (ц) сфера и (д) ротациони елипсоид

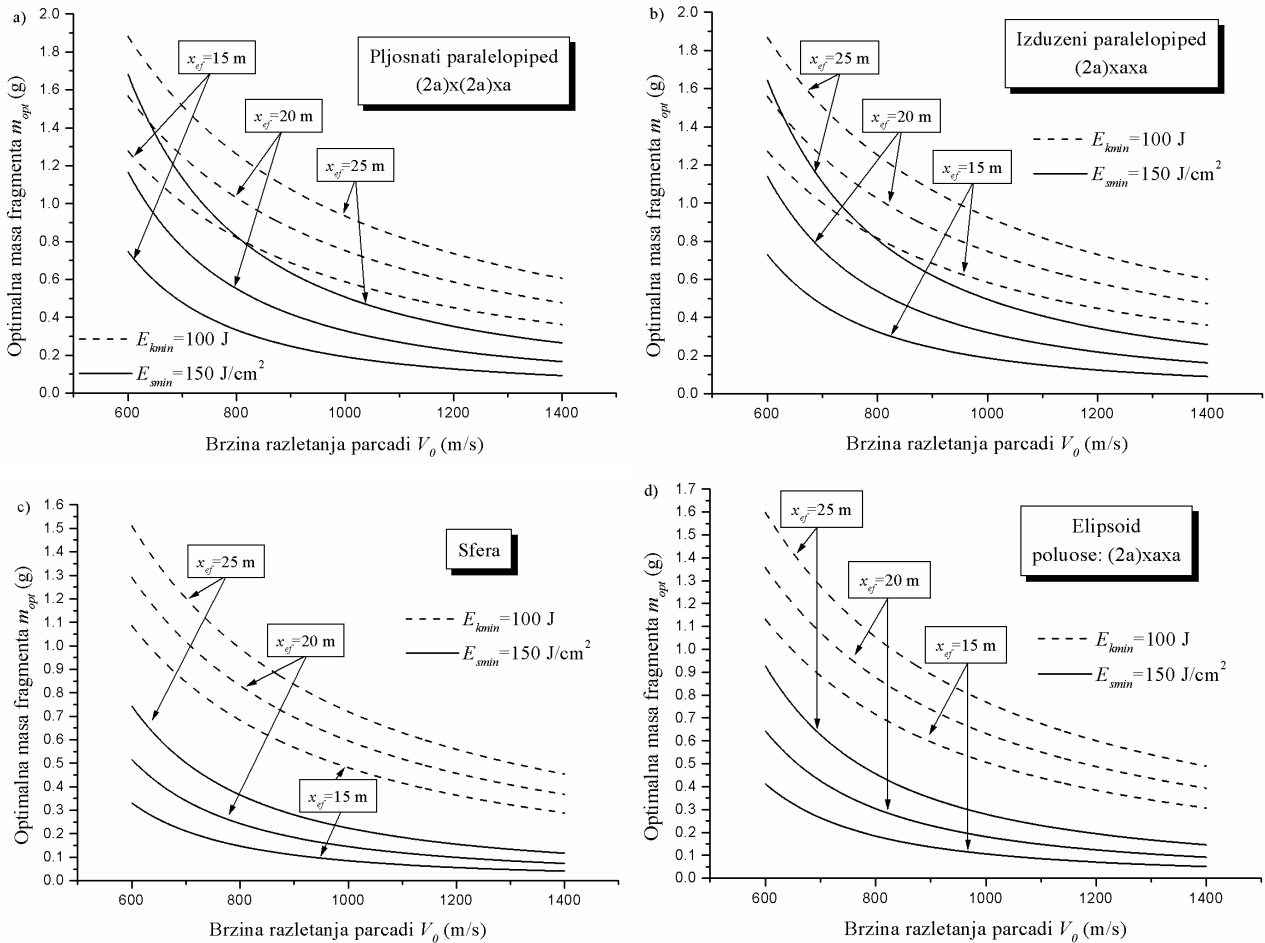
Тако нпр. за вредност ефикасне даљине парчади $x_{ef}=20 \text{ m}$, и брзине разлетања парчади $V_0=1000 \text{ m/s}$, први критеријум даје двоструко мању масу од другог, за случај парчади облика пљоснатог и издуженог паралелопипеда, док је у случају куглице, односно фрагмента облика ротационог елипсоида ова разлика још изразитија. Овај резултат указује на значај парчади мале масе ($<0.5 \text{ g}$) чији се утицај често занемарује. Експериментална верификација овог терејског резултата стога је значајна, јер ако би овај закључак о ефикасности парчади веома мале масе био потврђен, тада би промена састава материјала кошулице и начина производње (у случају “природне” фрагментације), односно коришћење ситније префрагментисане или “готове” парчади (у случају дириговане фрагментације) довели до повећање ефикасности пројектила парчадног дејства.

4. ЗАКЉУЧАК

На основу разматрања проблема оптимизације масе фрагмената пројектила парчадног дејства

аналитичким приступом могу се формулисати следећи закључци:

- формиран је аналитички модел који омогућава одређивање оптималне масе парчета уколико су познати: геометрија парчета, брзина разлетања парчади, ефикасна даљина парчади и критеријум ефикасног дејства;
- анализирана су два често коришћена критеријума ефикасности (минимална захтевана специфична кинетичка енергија парчади 150 J/cm^2 , односно кинетичка енергија парчади 100 J) и четири карактеристична облика парчета (пљоснати паралелопипед, издужени паралелопипед, сфера и ротациони елипсоид) у домену брзине разлетања и ефикасне даљине парчади који је од практичног значаја;
- добијени резултати указују на очекиване квалитативне зависности: оптимална маса фрагмента (било ког од разматраних облика према оба критеријума ефикасности) расте са повећањем захтеване ефикасне даљине парчади и са смањивањем брзине разлетања парчади;



Слика 2. Оптимална маса фрагмента у функцији брзине разлетања парчади, за критеријуме ефикасности који се односе на минималну специфичну кинетичку енергију (150 J/cm^2) и кинетичку енергију парчета (100 J). Резултати се дати за различите вредности ефикасне даљине парчади (15, 20, 25 m) и четири карактеристична облика парчади: (а) пљоснати паралелопипед, (б) издужени паралелопипед, (ц) сфера и (д) ротациони елипсоид

- најчешће коришћени критеријуми ефикасности су међусобно несагласни, тј. дају значајно различите вредности оптималне масе фрагмента;
- критеријум специфичне кинетичке енергије, који је нешто ближи реалној природи процеса пенетрације, даје знатно мање вредности оптималне масе и указује на значај парчади веома мале масе са становишта ефикасности;
- експериментална верификација теоријски добијених резултата била би драгоцену и могла би допринети да се одговарајућим конструкционим решењима повећа ефикасност пројектила парчадног дејства, било да је реч о природној или диригованој фрагментацији.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Kneubuehl, B.P. *Measuring of Wounding Potential of Rifle and Handgun Bullets*, International Workshop on Wound Ballistics, Thun, 1999.
- [2] Стаматовић, А. *Конструисање пројектила*, Ivexu, Београд, 1995.
- [3] Вукашиновић, М. *Прилог теорији и пракси експерименталног испитивања парчадног дејства разорних пројектила*, докторска дисертација, Војнотехничка академија ВЈ, 1999.
- [4] Новаковић, Н. *Допринос теорији конструисања противпешадијских мина парчадног дејства*, докторска дисертација, Војнотехничка академија ВЈ, 1993.