OPTIMIZACIJA BITNIH PARAMETARA U FAZI PROJEKTOVANJA SLOŽENIH SISTEMA

Dušan Regodić
Unviverzitet Singidunum
Danijelova 3, Beograd
dregodic@singidunum.ac.rs

Ljubiša Tančić
Vojna akademija
Pavla Jurišića Šturma 33, Beograd
ljubisa.tancic@va.mod.gov.rs

Damir Jerković
Vojna akademija
Pavla Jurišića Šturma 33, Beograd
damir.jerkovic@va.mod.gov.rs

Sažetak: *Rad prezentuje optimalno rešenje zadatka balističkog projektovanja sistema konkretnog kalibra. Optimalno rešenje ogleda se u izboru najpogodnijih fizičko–hemijskih i balističkih karakteristika baruta, mase baruta, zapremine barutne komore i drugih parametara sa kojima se izvodi unutrašnje balistički proračun na računaru. Dobijeno rešenje se upoređuje sa konkretnim sistemom i izvode se određeni zaključci.*

Ključne reči: *projektovanje sistema, optimizacija*

Abstract: The paper presents solution of task interior ballistic projection weapons for concrete caliber small arms weapons. Optimal solution is looked in selection the best physical–chemical and ballistic characteristics powder, mass powder, powder chamber and other characteristics with him is execution interior ballistics calculation on the computer. Solution is compared with existence solutions and conclusions are given.

Key words: projection small arms weapons, optimization

1. UVOD

Proces opaljenja u cevi sistema je gasodinamički proces koji je u prostoru između nepokretnog dna cevi i pokretnog projektila okarakterisan strujanjem dve faze: čvrste – sagorevajuća barutna zrna i gasovite – barutnih gasova kao produkata sagorevanja. Balističko projektovanje podrazumeva određivanje optimalnih osnovnih konstruktivnih karakteristika cevi, uslova punjenja i energetskih karakteristika opaljenja na osnovu propisa o kvalitetu proizvoda koji se postavljaju pred sistema.

Ovaj zadatak se rešava kao i klasični, s tim što su neki parametri unapred zadani i ne treba ih analizirati. Ovaj zadatak obuhvata i problem modifikacije nekog dela postojećeg sistema na bazi promene balističkih parametara.

Osnovni elementi unutrašnje i spoljnobalističkog projektovanja su cev, metak i projektil. Današnja teorija sistema predviđa što veći domet i preciznost sistema, pa je tendencija razvoja da se modifikuju postojeći ili konstruišu novi sistemi sa što boljim performansama.

Cilj ovog rada je da se na osnovu definisanih željenih podataka kao što su: početna brzina projektila i maksimalni pritisak barutnih gasova – odrede samo neki optimalni aerodinamički

i balistički parametri: najpogodniji model i tip baruta, masa baruta i zapremina barutne komore na osnovu jasno definisanih kriterijuma u fazi projektovanja složenih sistema.

2. MATEMATIČKI MODEL DVOFAZNOG STRUJANJA I REZULTATI PRORAČUNA

Na osnovu zakona o održanju mase, o količini kretanja i o energiji primenom transformacije Gaus-Ostrogradskog razvija se matematički model za proizvoljan momenat vremena u toku sagorevanja baruta. Proces opaljenja se posmatra od momenta kada se sagorevanjem baruta iza projektila stvori dovoljan pritisak pri kojem će se košuljica projektila urezati u žljebove cevi i doći do pokretanja projektila. Pretpostavlja se da su u tom momentu poznati svi početni i granični uslovi. Nakon završetka sagorevanja baruta, dvofazno strujanje prelazi u jednofazno t.j. u strujanje samo barutnih gasova. Postavljeni matematički model tada prelazi u klasičan gasodinamički model. Sistem jednačina izvodi se u Ojlerovim koordinatama t (vreme) i x (proizvoljan položaj u cevi od čela zatvarača do dna projektila), a zatim se transformiše u sistem sa Lagranžovim koordinatama t i s (smeša baruta i barutnih gasova u pojedinim tačkama iza projektila). Polazne pretpostaavke i celokupno izvođenje dato je u [1], a ovde se daje samo konačan oblik jednačina:

1. Jednačina kontinuiteta za barut:

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} - \rho\varepsilon\left(u-u_b\right)\frac{\partial \varepsilon}{\partial s} - a_2\left(1-\varepsilon\right)\frac{\partial u_b}{\partial s} = b \tag{1}$$

uz oznake:

$$a_2 = \rho\varepsilon + \rho_b\left(1-\varepsilon\right)$$

$$b = \left(1-\varepsilon\right)\rho_b\frac{u_z S_z}{m_z}$$

2. Jednačina kontinuiteta za barutne gasove:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + a_1\frac{\partial \rho}{\partial s} + a_2\frac{\rho(u-u_b)}{\varepsilon}\frac{\partial \varepsilon}{\partial s} + \rho a_2\frac{\partial u}{\partial s} + \rho a_2\frac{(1-\varepsilon)}{\varepsilon}\frac{\partial u_b}{\partial s} = \frac{b(\rho_b-\rho)}{\varepsilon} \tag{2}$$

uz oznaku:

$$a_1 = \rho_b\left(1-\varepsilon\right)\left(u-u_b\right)$$

3. Jednačina kretanja barutnih gasova:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + a_1\frac{\partial u}{\partial s} + a_2\frac{(k-1)}{(1-\alpha\rho)}\frac{\partial e}{\partial s} + a_2\frac{e}{\rho}\frac{(k-1)}{(1-\alpha\rho)^2}\frac{\partial \rho}{\partial s} = f_1 \tag{3}$$

gde je:

$$f_1 = \frac{1}{\rho\varepsilon}\left[b\rho_b\left(u-u_b\right) - f\right]$$

4. Jednačina kretanja barutnih zrna:

$$\frac{\partial u_b}{\partial t} - a_1\frac{\rho}{\rho_b}\frac{\varepsilon}{(1-\varepsilon)}\frac{\partial u_b}{\partial s} + a_2\frac{\rho}{\rho_b}\frac{(k-1)}{(1-\alpha\rho)}\frac{\partial e}{\partial s} + a_2\frac{e}{\rho_b}\frac{(k-1)}{(1-\alpha\rho)^2}\frac{\partial \rho}{\partial s} = \frac{f}{\rho_b(1-\varepsilon)} \tag{4}$$

5. Jednačina energije:

$$\frac{\partial e}{\partial t} + a_1\frac{\partial e}{\partial s} + a_3\frac{\partial \varepsilon}{\partial s} + \frac{pa_2}{\rho}\frac{\partial u}{\partial s} + a_4\frac{\partial u_b}{\partial s} = f_3 - \frac{pb}{\varepsilon\rho} \tag{5}$$

Raje Baničića bb, Bijeljina, Tel. +387 55 21 31 32, 55 21 31 33
E-mail: univerzitet@sinergija.edu.ba
www.sinergija.edu.ba.

uz oznake:

$$a_3 = p\left(u - u_b\right) + \frac{pa_1}{\varepsilon\rho}$$

$$a_4 = a_2 \frac{p}{\rho}\frac{1-\varepsilon}{\varepsilon}$$

$$f_2 = b\rho_b\left(e_b + \frac{p}{\rho_b} + \frac{u_b^2}{2}\right) - fu_b - \frac{bq}{u_z}$$

$$f_3 = \frac{1}{\rho\varepsilon}\left[f_2 - f_1\rho\varepsilon u - b\rho_b\left(e + \frac{u^2}{2}\right)\right]$$

6. Iz definicije Lagranžove kordinate " s " dobija se:

$$\frac{\partial x}{\partial s} = \frac{1}{a_2} \tag{6}$$

gde su parametri strujanja: ε – poroznost, ρ – gustina barutnih gasova, u – brzina barutnih gasova, u_b – brzina barutnih zrna, p – pritisak barutnih gasova, q – jedinična toplota preneta sa barutnih gasova na barutno zrno, e – jedinična unutrašnja energija barutnih gasova i x – proizvoljan položaj u cevi od čela zatvarača do dna projektila.

Koeficijenti a_1 do a_4, b, f, f_1 i f_3 su funkcije parametara strujanja. Sistem jednačina (1) do (6) povezuje sve parametre strujanja osim pritiska barutnih gasova koji se definiše jednačinom stanja barutnih gasova.

$$p = \frac{e\rho\left(k-1\right)}{\left(1-\alpha\rho\right)}$$

Navedeni sistem jednačina važi dok traje sagorevanje barutnih zrna. Za slučaj, kada je završeno sagorevanje važe sledeći uslovi:

$$\varepsilon = 1,\ u_b = 0,\quad b = 0,\quad f_1 = f_2 = f_3 = 0,\ a_1 = 0,\ a_2 = \rho \quad i \quad q = 0$$

pa se sistem jednačina (1) do (6) transformiše u sistem koji važi do izletanja projektila iz cevi.

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{e(k-1)}{(1-\alpha\rho)^2}\frac{\partial \rho}{\partial s} + \frac{\rho(k-1)}{(1-\alpha\rho)}\frac{\partial e}{\partial s} = 0 \tag{7}$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho^2\frac{\partial u}{\partial s} = 0 \tag{8}$$

$$\frac{\partial e}{\partial t} + p\frac{\partial u}{\partial s} = 0 \tag{9}$$

$$\frac{\partial x}{\partial s} = \frac{1}{\rho} \tag{10}$$

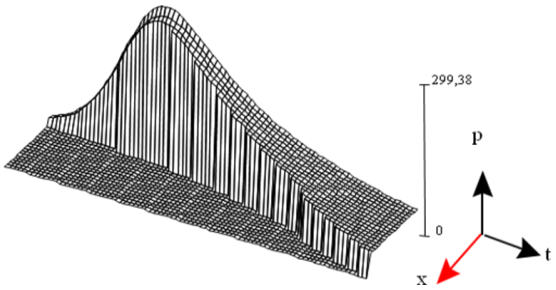
Za numeričko rešavanje datog sistema jednačina koristi se teorija konačnih razlika. Izvode se uslovi stabilnosti i konvergencije numeričke šeme [2,3], i izrađuje, program za personalni računar koji se koristi za analizu osetljivosti modela na ulazne parametre.

Za odabrano oružje, a na osnovu analiza sprovedenih u literaturi [2,3] usvaja se barut NC–08 sa svim fizičko–hemijskim i balističkim karakteristikama za unutrašnje balistički proračun.

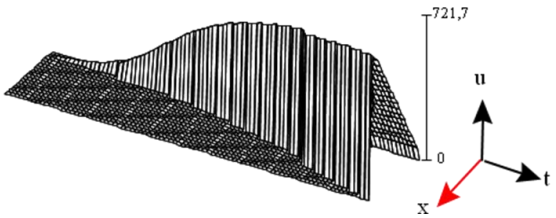
Od svih strujnih karakteristika u ovom radu se prikazuju i analiziraju samo pritisak barutnih gasova i brzina projektila u cevi oružja sa srednjim polaznim podacima (Slika 1. i 2.).

Srednji ulazni podaci prema datoteci *ULAP762.SRD* su: $u_{z0} = 7,9 \cdot 10^{-10}$ m/sPa, $m_{b0} = 0,00162$ kg, $m = 0,0079$ kg, $S_C = 4,127 \cdot 10^{-7}$ m^2, $\alpha = 0,00091$ kg/m^3, $p_0 = 1,25 \cdot 10^7$ Pa.

Srednji izlazni podaci prema datoteci *IZLAP762.SRD* su: $p_m = 311 \cdot 10^6$ Pa i $v_0 = 720,8$ m/s.

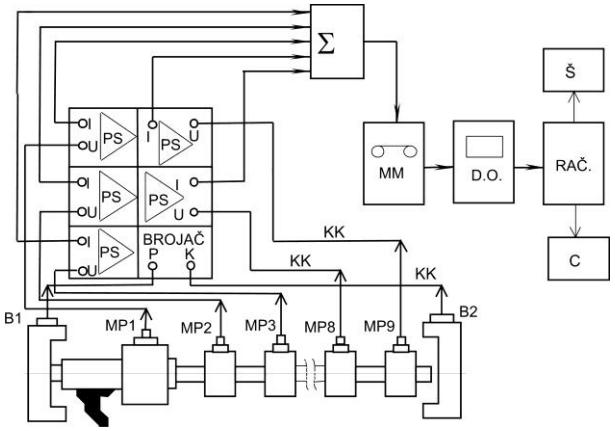


Slika 1. Pritisak barutnih gasova

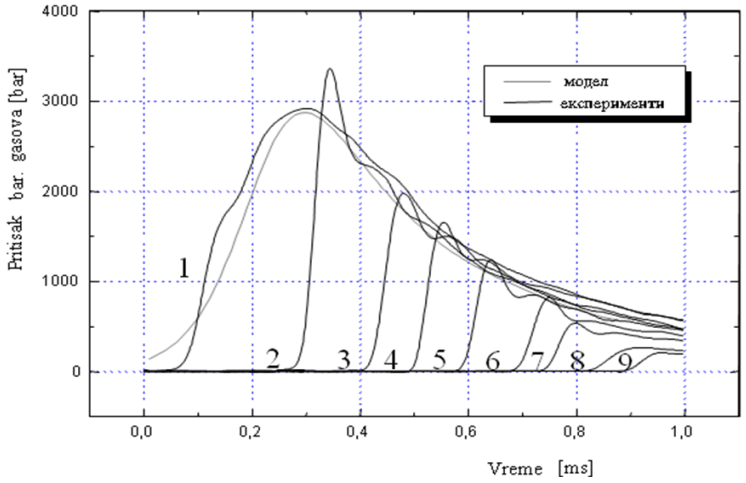


Slika 2. Brzina strujanja barutnih gasova

Za odabrano oružje realizuju se i eksperimentalna istraživanja[2] prema blok šemi mernog sistema (Slika 3.).



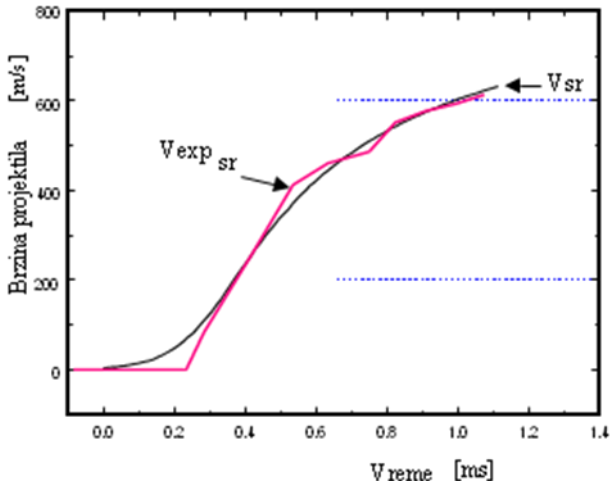
Slika 3. Blok šema mernog sistema za registrovanje pritiska barutnih gasova i brzine projektila u cevi
MP – merni pretvarač pritiska, KK – koaksijalni kabl, PS – pojačavač naelektrisanja (pojačalo signala), MM – registrator signala (merni magnetofon), DO – digitalni osciloskop, RAČ – računar, C – crtač (ploter), Š – štampač



Slika 4. Dijagrami $p(t)$ modela i srednjih vrednosti eksperimenata za sva merna mesta na AP 7,62 mm

Na slici 4 prikazane su krive pritisaka svih mernih mesta i kriva modela na mernom mestu 1. Merno mesto 1 registruje pritisak u čahuri metka tj. počinje da registruje pritisak odmah od opaljenja kapsle. *S obzirom da u eksperimentalnoj cevi vladaju drugačiji uslovi opaljenja od bojeve cevi, izvršena je korekcija matematičkog modela i programa prema uslovima za eksperimentalnu cev i sa takvim programom su izvršeni proračuni* [2,3].

Srednja eksperimentalna vrednost maksimalnog pritiska barutnih gasova (294,77 *MPa*) praktično je poklopljena sa modelom (295,1 *MPa*) za 20 elemenata po promenljivoj s, a i ceo tok eksperimentalne i proračunske krive se dosta dobro poklapaju čime se potvrđuje ispravnost postavljene teorije. Rezultati eksperimenta potvrđuju karakter razvoja pritiska u cevi oružja kao funkcije vremena i položaja u cevi. Izuzetak su krive na mernom mestu 2, 8 i 9 koje su posledica reagovanja mernog lanca i ne mogu se uzeti u obzir kao tačno izmereni podatak.



Slika 5. Dijagrami $V(t)$ modela srednjih polaznih podataka i srednjih vrednosti eksperimenata za sva merna mesta na AP 7,62 mm

Srednja eksperimentalna brzina projektila u cevi određuje se na osnovu udaljenosti mernih mesta i vremena dolaska talasa pritiska na merno mesto. Karakter promene brzine projektila u cevi logično prati priliv barutnih gasova tj. zakon razvoja pritiska barutnih gasova u cevi.

Pošto merna mesta predstavljaju diskretne tačke u procesu, da bi se bolje uočile tačke eksperimentalnih rezultata nije vršena interpolacija niti polaganje polinoma kroz tačke.

Na slici 5 prikazane su krive modela dobijene sa srednjim ulaznim podacima i eksperimentalna kriva usrednjenih vrednosti. Karakteri promena srednje brzine u modelu i eksperimentu su slični a red veličina brzina u potpunosti je identičan jedino što postoji vremenski pomak za tzv. vreme predopaljenja. Ovde je izvršen pomak eksperimentalne krive unapred za tzv. vreme predopaljenja i ako se izvrši polaganje polinoma kroz tačke eksperimentalnih brzina dobilo bi se skoro potpuno poklapanje funkcija eksperimenata i modela. Prosečna srednja eksperimentalna vrednost početne brzine projektila iznosi 723,6 *m/s* a proračunska iznosi 721,7 *m/s*. Ovo odstupanje je neznatno i ukazuje na vrlo dobru saglasnost srednje eksperimentalne brzine i proračunske brzine projektila u cevi oružja.

Rezultati eksperimentalne metode realno oslikavaju fizičku sliku procesa opaljenja. Analizom se došlo do saznanja da srednji uslovi proračuna daju optimalne ulazno-izlazne parametre i prihvatljive rezultate proračuna za konkretno oružje.

Komparativnom analizom su obuhvaćeni pritisak i brzina u cevi oružja u funkciji vremena. Rezultati eksperimenata i modela potvrđuju karaktere promena pritiska i brzine i osnovnu pretpostavku matematičkog modela da su pritisak i brzina funkcije vremena i puta. Upoređenjem eksperimentalnih i proračunskih rezultata uočava se njihova dobra međusobna usaglašenost što potvrđuje korektnost matematičkog modela. Teorijsko-numerički model može da se koristi kao simulator opaljenja.

Nakon ove faze projektovanja sledi projektovanje unutrašnje trase cevi sa svim detaljima kao što su: olučenje, prelazni konus, barutna komora itd.

3. MATEMATIČKI MODEL SA ŠEST STEPENI SLOBODE KRETANJA I REZULTATI PRORAČUNA

Model kretanja sistema sa šest stepeni slobode čine četiri vektorske jednačine:

- izvod vektora položaja sistema

$$\frac{d_r\vec{r}}{dt} = \vec{V}_k \tag{11}$$

- vektorska jednačina relativnog kretanja centra masa

$$m\frac{d_r\vec{V}_k}{dt} = \sum \vec{R} \tag{12}$$

- kretanje oko centra mase

$$\frac{d\vec{H}}{dt} = \vec{M}_R \tag{13}$$

- veze između ugaonih brzina i izvoda uglova

$$\vec{\Omega} = \vec{\Omega}_E + \dot{\vec{\lambda}} + \dot{\vec{\varphi}} + \dot{\vec{\psi}} + \dot{\vec{\theta}} + \dot{\vec{\phi}} \tag{14}$$

Kretanje sistema u odnosu na Zemlju je relativno, a uticaj rotacije Zemlje ugaonom brzinom Ω_E unosi sistemu prenosno kretanje. Brzina kretanja sistema u odnosu na Zemlju V_k predstavlja relativnu brzinu, a izvodi njenih komponenata po vremenu predstavljaju komponente relativnog ubrzanja. Rezultantu spoljnih sila koje deluju na sistem čine: gravitaciona sila Zemlje, aerodinamička sila, prenosna inercijalna sila, reaktivna sila, i Koriolisova sila. U praksi, zbir gravitacione i prenosne inercijalne sile smatramo silom Zemljine teže ubrzanja. Kinetički moment i rezultujući moment spoljnih sila računa se za

centar mase sistema. Rezultujući moment čini zbir aerodinamičkog momenta i momenta reaktivne sile u odnosu na centar mase.

Projektovanjem ovih vektorskih jednačina leta na aerobalistički koordinatni sistem uz pretpostavku da je tenzor inercije redukovan (I_{yy}=I_{zz}) dobija se:

- izvod vektora položaja

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \end{bmatrix} = L_{LB} \begin{bmatrix} u_k \\ \tilde{v}_k \\ \tilde{w}_k \end{bmatrix} \tag{15}$$

- tri jednačine izvoda uglova stava

$$\dot{\phi} = p + \tilde{r} tg\theta$$
$$\dot{\theta} = \tilde{q} \tag{16}$$
$$\dot{\psi} = \frac{\tilde{r}}{\cos\theta}$$

- šest skalarnih jednačina

$$\dot{u}_k = -\tilde{q}\tilde{w}_k + \tilde{r}\tilde{v}_k + \frac{X + F_x}{m} - g\sin\theta - a_{Corx}$$
$$\dot{\tilde{v}}_k = p_B\tilde{w}_k - \tilde{r}u_k + \frac{\tilde{Y} + F_y}{m} - a_{Cor\tilde{y}}$$
$$\dot{\tilde{w}}_k = -p_B\tilde{v}_k - \tilde{q}u_k + \frac{\tilde{Z} + F_z}{m} + g\cos\theta - a_{Cor\tilde{z}}$$
$$\dot{p} = \frac{L + L^F}{I_{XX}}$$
$$\dot{\tilde{q}} = p_B\tilde{r} + \frac{-I_{XX}\,p\tilde{r} + \tilde{M} + \tilde{M}^F}{I_{YY}}$$
$$\dot{\tilde{r}} = -p_B\tilde{q} + \frac{I_{XX}\,p\tilde{q} + \tilde{N} + \tilde{N}^F}{I_{YY}} \tag{17}$$

pri čemu su:

$V_k = \begin{bmatrix} u_k & \tilde{v}_k & \tilde{w}_k \end{bmatrix}^T$, komponente relativne brzine sistema,

$\Omega^B = \begin{bmatrix} p & \tilde{q} & \tilde{r} \end{bmatrix}^T$, komponente ugaone brzine,

$\tilde{R} = \begin{bmatrix} X & \tilde{Y} & \tilde{Z} \end{bmatrix}^T$, komponente aerodinamičke sile,

$F = \begin{bmatrix} F_X & F_Y & F_Z \end{bmatrix}^T$, komponente reaktivne sile,

$\tilde{M}^A = \begin{bmatrix} L & \tilde{M} & \tilde{N} \end{bmatrix}^T$, komponente aerodinamičkog momenta,

$M^F = \begin{bmatrix} L^F & M^F & N^F \end{bmatrix}^T$, komponente reaktivnog momenta,

$H = \begin{bmatrix} I_{XX}\,p & I_{YY}\tilde{q} & I_{YY}\tilde{r} \end{bmatrix}^T$, komponente kinetičkog momenta.

Ovim diferencijalnim jednačinama neophodno je pridružiti algebarsku jednačinu

$$p_B = -\tilde{r}\ \mathrm{tg}\theta \tag{18}$$

Raje Baničića bb, Bijeljina, Tel. +387 55 21 31 32, 55 21 31 33
E-mail: univerzitet@sinergija.edu.ba
www.sinergija.edu.ba.

i komponente Koriolisovog ubrzanja u aerobalističkom koordinatnom sistemu

$$a_{Cor} = \begin{bmatrix} a_{xCor} \\ a_{yCor} \\ a_{zCor} \end{bmatrix} = 2\tilde{\Omega}_E^B V_k \tag{19}$$

Za rotirajući sistem malih dometa vektor stanja sadrži dvanaest komponenti:

$$\begin{bmatrix} x & y & z & u_k & \tilde{v}_k & \tilde{w}_k & p & \tilde{q} & \tilde{r} & \phi & \theta & \psi \end{bmatrix}$$

Programsko rešenje **sb6** [5] omogućuje proračun leta po modelu šest stepeni slobode kretanja i sastoji se od četiri celine:

1. Ulazne datoteke o polaznim i graničnim podacima za proračun (sb6u.dat),
2. Glavnog programa sa modelom atmosfere, aerodinamičkim i dinamičkim karakteristikama letelice (sb6.for),
3. Izlazne datoteke o izračunatim elementima putanje (sb61.dat).
4. Izlazne datoteke o izračunatim parametrima stabilnosti leta (sb62.dat).

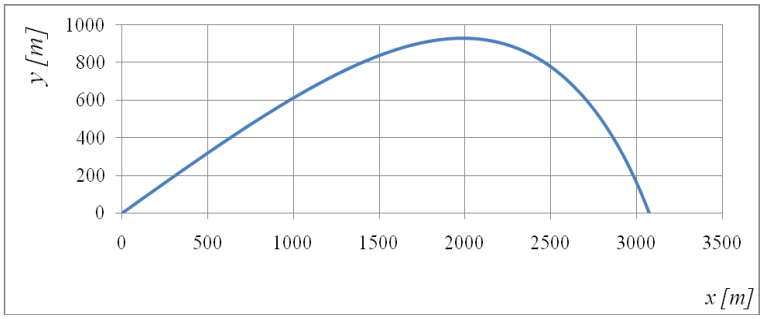
Program **sb6** namenjen je za detaljan proračun i simulaciju kretanja sistema. Prema jednoj opciji program proračunava karakteristične parametre stabilnosti leta sistema. Integracija diferencijalnih jednačina vrši se metodom Runge-Kuta sa četiri približenja.

Tačnost proračuna zavisi od: koraka integracije, tačnosti i broja derivativa aerodinamičkih koeficijenata, definisane brzine vetra i reaktivne sile. U tabeli 1. dat je sadržaj i primer modela

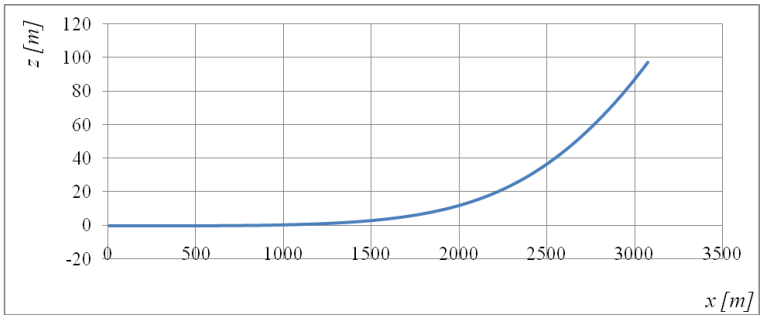
Tabela 1. Primer ulaznih datoteka SB6U.DAT

	Sadržaj ulazne datoteke	Primer ulazne datoteke
granični uslovi proračuna	T0, H, TK, XK, YK	0.0, 0.001, 2., 1500., 0.0
uslovi proračuna stabilnosti	T1, T2, NDT, NSTAB	0.0, 0.0, 100, 1
model vetra	VW0, DVW, AW0S, DAWS, FW, HI0S	0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0
početni uslovi položaja	X(1), X(2), X(3)	0.0, 0.0, 0.0
početni uslovi brzine	X(4), X(5), X(6)	760., 0.0, 0.0
početni uslovi ugaone brzine	X(7), X(8), X(9)	5158.4, 1.034811, 7.726234
početni uslovi uglovnog položaja	FI0S, THETA0S, PSI0S	235., 29.0, 0.005

Na slici 6. je prikazana promena ordinate kretanja za odgovarajuće daljine pri polaznom uglu $\theta_0=29^0$. Na slici 7. je prikazana promena pravca kretanja za odgovarajuće daljine pri polaznom uglu $\theta_0=29^0$.

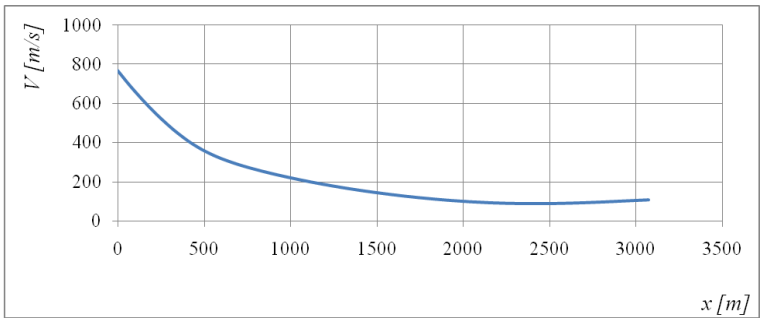


Slika 6. Promena ordinate kretanja sistema za polazni ugao $\theta_0=29^0$

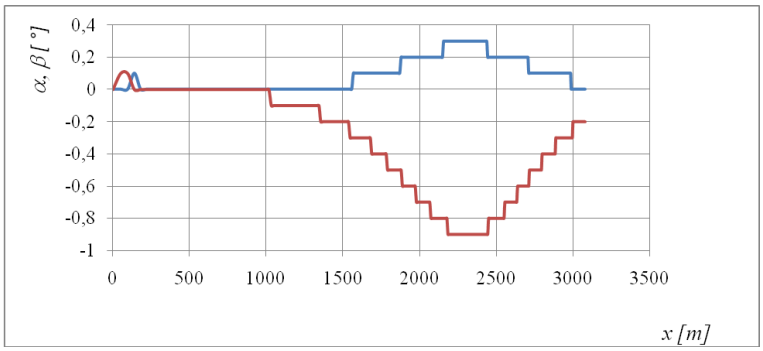


Slika 7. Promena pravca u toku kretanja z za odgovarajuće daljine pri polaznom uglu $\theta_0=29^0$

Na slici 8. prikazana je promena brzina **V** za odgovarajuće daljine *x* pri polaznom uglu $\theta_0=29^0$. Na slici 9. prikazana je promena napadnih uglova α i β za odgovarajuće daljine *x* pri polaznom uglu $\theta_0=29^0$.

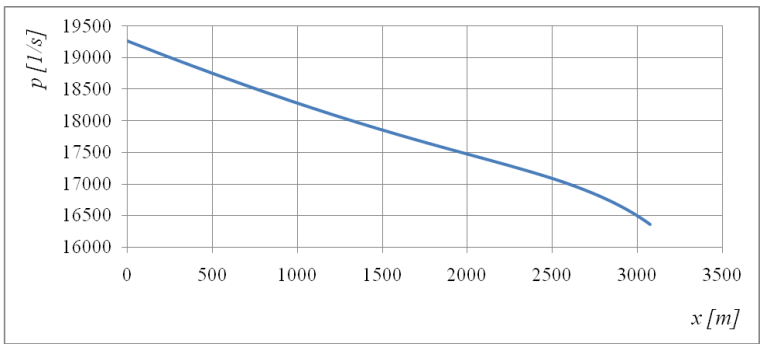


Slika 8. Promena vrednosti brzine V za odgovarajuće daljine x pri polaznom uglu $\theta_0=29^0$



Slika 9. Promena vrednosti napadnih uglova α i β za odgovarajuće domete x pri polaznom uglu $\theta_0=29^0$

Na slici 10. prikazana je promena ugaone brzine *p* za odgovarajuće daljine *x* pri polaznom uglu $\theta_0=29^0$.



Slika 10. Promena ugaone brzine za odgovarajuće daljine pri polaznom uglu $\theta_0=29^0$

4. ZAKLJUČAK

Tendencije usavršavanja postojećih i razvoj novih tehničkih sistema su povećanje dometa, tačnosti, preciznosti i brzine gađanja. Usavršava se i municija, a povećavaju se efekti dejstva projektila na cilju. Smanjuje se ukupna masa oružja, a time i masa cevi i ostvaruju se bolja svojstva taktičke i strategijske pokretljivosti.

Rad prikazuje unutrašnje i spoljno balističko projektovanje oružja/oruđa. Osnovni cilj rada, ogleda se u izboru optimalnih balističkih parametara: modela i tipa baruta, mase baruta i zapremine barutne komore, aerodinamičkog oblika i uslova leta letilice. Informacioni sistem omogućuje analizu svih uticajnih parametara na kretanje sistema. Tokom proračuna korišćeni si numerički programi u programskom jeziku Fortran. Tokom svih simulacija tehnički sistem se ponašao dinamički i žiroskopski stabilnim.

Posle projektovanja unutrašnje trase cevi sledi projektovanje spoljne trase cevi. Posle izbora optimalne aerodinamičke konfiguracije realizuje se proračun naprezanja i izbor materijala za letilicu. Analiza efekata na cilju je od posebnog značaja sa aspekta efikasnosti tehničkog sistema.

LITERATURA:

[1] Cvetković M.: *Primena nestacionarne gasodinamike na unutrašnje balistički problem oružja malih kalibara*, doktorska disertacija, VVTŠ KoV JNA, Zagreb, 1984.

[2] Tančić Lj.: *Numeričko rešenje nestacionarnog modela unutrašnje balistike oružja malih kalibara*, doktorska disertacija, VTA VJ, Beograd, 1997.

[3] Tančić Lj.: *Zbirka zadataka iz unutrašnje balistike*, Sektor za ŠONID - VTA, Beograd, 1999.

[4] Regodić, D.: *Spoljna balistika*, Vojna akademija, Beograd, 2006.

[5] Regodić, D.: *Zbirka zadataka iz spoljne balistike*, Vojna akademija, Beograd 2003.

[6] McCoy, R.L.: *Modern exterior ballistics*, Schiffer Military History, Atglen PA, 1999.

[7] Lebedev, A.A., Cernobrovkin L.S.: *Dinamika poleta*, Mashinostroenie, Moskva, 1973.