

PROGRAMSKO REŠENJE KRETANJA TRODIMENZIONALNOG TELA

Dušan Regodić

Univerzitet Sinergija, Fakultet za poslovnu informatiku, Bijeljina

dregodic@sinergija.edu.ba

Ljubiša Tančić

Vrtlarska 33, Zemun

ljtancic@gmail.com

Marija Samardžić

Vojnotehnički institut, Ratka Resanovića 1, Beograd

E-mail majasam@ptt.rs

Damir Jerković

Vojna akademija

damir.jerkovic@va.mod.gov.rs

Sažetak: U radu su prikazani rezultati istraživanja uticaja vrednosti aerodinamičkih koeficijenata i derivativa aerodinamičkih koeficijenata na elemente putanje i parametre stabilnosti kretanja klasičnog osnosimetričnog tela. Date su zavisnosti aerodinamičkih koeficijenata od aerodinamičkih parametara i oblika aerodinamičke konfiguracije. Predstavljeni su elementi putanje modela klasičnog osnosimetričnog tela i analiza promene u odnosu na vrednosti aerodinamičkih koeficijenata.

Ključne reči: klasično osnosimetrično telo, aerodinamički koeficijenti, derivativi aerodinamičkih koeficijenata, elementi putanje, parametri stabilnosti, napadni ugao.

Summary: The article deals with the results of the research on the influence of aerodynamic coefficient values on the trajectory elements and the stability parameters of classic axisymmetric body. It presents the characteristic functions of aerodynamic coefficients with regard to aerodynamic parameters and the projectile body shape. Trajectory elements of the model of classic axisymmetric body and the analyses of their changes were presented with respect to the aerodynamic coefficient values.

Key words: classic axis-symmetrical body, aerodynamic coefficients, derivatives of the aerodynamic coefficients, path elements, stability parameters, angle of attack.

1.Uvod

Klasično rotaciono kruto telo definisanih geometrijskih i dinamičkih karakteristika, bez dodatnih aerodinamičkih površina, nema dodatni energetski resurs tokom kretanja u vidu reaktivne sile (raketnog motora) i svoju stabilnost tokom leta obezbeđuje ugaonom brzinom oko glavne uzdužne ose (dinamičkom i žiroskopskom stabilnošću). Oblik klasičnog osnosimetričnog tela je tokom godina evoluirao u skladu sa tehničko-tehnološkim razvojem društva i razvojem naučno-tehničkih i vojno-tehničkih disciplina.

Klasično rotaciono kruto telo ostvaruju kretanje u atmosferi samo na osnovu polaznog energetskog resursa u vidu početne brzine, tako da je pored dejstva sila Zemljine teže, najznačajniji uticaj na kretanje otpor vazduha, odnosno aerodinamička sila i njen moment. Bezdimeziono predstavljene komponente ukupne aerodinamičke sile i momenta,

aerodinamički koeficijenti, zavise od brzine kretanja tela, odnosno brzine strujanja, karaktera strujanja, uslovljenog oblikom i položajem tela u struji, kao i od ugaonih brzina tela. Funkcionalna zavisnost aerodinamičkih koeficijenata od pojedinih uticajnih parametara, odnosno njihov izvod, kao što su napadni ugao, komponente ugaonih brzina tela, predstavlja se derivativima aerodinamičkih koeficijenata [1,2,3].

Poznavanje vrednosti aerodinamičkih koeficijenata, odnosno njihovih funkcionalnih delova, predstavlja potpuno određenje aerodinamičkog opterećenja (sile i momenta), koje deluje na klasično rotaciono kruto telo. Poznavanje aerodinamičke sile i momenta, uz poznato dejstvo gravitacione i Koriolisove sile, u pretpostavljenim atmosferskim uslovima, omogućuje rešenje modela kretanja osnosimetričnog projektila. Rešenje modela treba da da potpunu sliku kretanja (položaj, brzina, vreme) i stabilnosti tokom leta (orijentacija i uglovni položaj tela). Model kretanja projektila, koji omogućava potpunije sagledavanje kretanja tela sa analizom njegove stabilnosti je model leta sa šest stepeni slobode kretanja [1,2,3]. Ovaj model omogućava izučavanje prostornog složenog kretanja klasičnog osnosimetričnog tela. Rešenjem postavljenog modela kretanja, za poznate aerodinamičke karakteristike, određuju se elementi putanje tela.

Problem kretanja tela svodi se i na definisanje parametara stabilnosti projektila i uslova pod kojima se stabilnost ostvaruje, izučavanje uticaja konstruktivnih karakteristika, početnih uslova kretanja i parametara atmosfere na kretanje projektila, kao i primena i razvoj eksperimentalnih metoda za određivanje veličina koje karakterišu putanju i uslove leta projektila. Posebno značajno je određivanje konkretnih konstruktivnih parametara projektila – geometrijskih, dinamičkih i energetske svojstva, na osnovu zahtevanih karakteristika leta i karaktera dejstva na cilju.

Određivanje vrednosti aerodinamičkih koeficijenata predstavlja posebnu oblast aerodinamičkog istraživanja, pomoću poluempirijskih metoda i proračuna [2], eksperimentalnih ispitivanja u aerotunelima [3], odnosno pomoću numeričkih metoda mehanike fluida, softverskih CFD (Computational Fluid Dynamic) alata.

Uparednom analizom rezultata aerodinamičkih koeficijenata dobijenih numeričkim metodama, poluempirijskim proračunima i eksperimentalnim ispitivanjima, dolazi se do preliminarne ocene kvaliteta vrednosti. Softverska simulacija kretanja klasičnog osnosimetričnog projektila, oblika definisanog vrednostima aerodinamičkih koeficijenata, obezbeđuje uporednu analizu elemenata putanje (vreme leta, domet, visina, derivacija, brzina) i parametara stabilnosti.

Značaj uticaja odstupanja vrednosti aerodinamičkih koeficijenata analizom leta klasičnog osnosimetričnog projektila ogleda se u kvantitativnoj i kvalitativnoj oceni odstupanja vrednosti elemenata putanje i pokazatelja stabilnosti.

2. Fizički model kretanja klasičnog osnosimetričnog tela

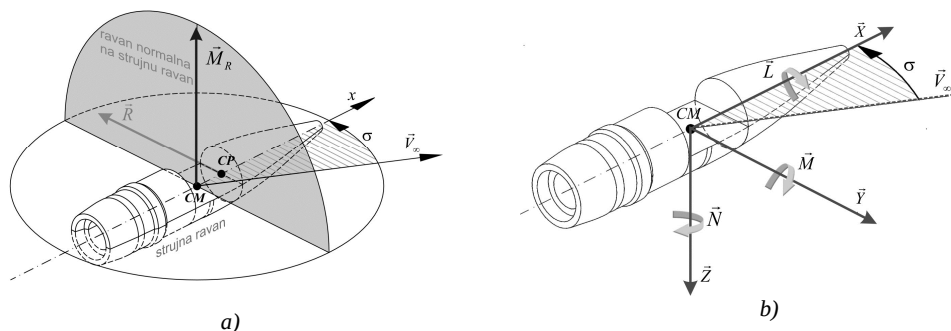
Na klasično osnosimetrično telo tokom kretanja deluju gravitaciona privlačna sila Zemlje, prenosna inercijalna sila Zemlje, Koriolisova sila usled rotacije Zemlje i aerodinamička sila interakcije tela sa vazduhom [1]. Dejstvo svih sila sem aerodinamičke je u centru mase tela. Posledica dejstva aerodinamičke sile na kraku od centra mase do njene napadne tačke je aerodinamički moment.

Kretanje osnosimetričnog tela – projektila u odnosu na Zemlju je relativno, a uticaj rotacije Zemlje ugaonom brzinom $\vec{\Omega}_E$ unosi telu prenosno kretanje. Brzina kretanja tela u odnosu na Zemlju $\vec{V}$ predstavlja relativnu brzinu, a izvodi njenih projekcija po vremenu na ose bilo kog koordinatnog sistema predstavljaju komponente relativnog ubrzanja [1,2,3]. Masa klasičnog

osnosimetričnog tela konstantna je tokom leta, jer nema promene mase letelice uslovljene radom raketnog motora.

Rezultantu spoljnih sila koje određuju kretanje centra mase osnosimetričnog tela čine:

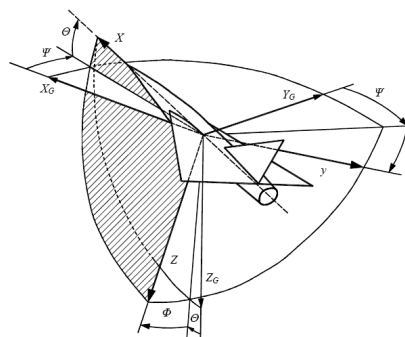
- aerodinamička sila $\vec{R}^A$,
- pogonska (reaktivna sila) $\vec{F}$,
- sila Zemljine teže $m\vec{g}$ (vektorski zbir privlačne sile Zemlje i prenosne inercijske sile) i
- Koriolisova inercijalna sila $-m\vec{a}_C$.



Slika 1. Aerodinamička sila i moment sa komponentama

- veze između ugaonih brzina i izvoda uglova stava.

$$\vec{\Omega} = \vec{\Omega}_E + \vec{\lambda} + \vec{\phi} + \vec{\psi} + \vec{\theta} + \vec{\Phi}.$$



Slika 2. Uglovi stava u dinamičkom koordinatnom sistemu

Napadni ugao σ predstavlja osnovnu veličinu od koje zavise vrednosti komponenta aerodinamičke sile i momenta. Projekcije ukupne aerodinamičke sile se zbog prirode dejstva daju najčešće u aerobalističkom koordinatnom sistemu sa koordinatnim početkom vezanom za centar mase projektila, gde su prema slici 1 b): $\vec{X}$ - aksijalna sila, $\vec{Y}$ - bočna sila i $\vec{Z}$ - normalna sila.

Ukupni aerodinamički moment predstavljen je komponentama duž osa odabranog koordinatnog sistema ipoput aerodinamičke sile, najčešće je dat u aerobalističkom koordinatnom sistemu [1,2,3], prema slici 1 b): $\vec{L}$ - moment valjanja, $\vec{M}$ - moment propinjanja i $\vec{N}$ - moment skretanja.

Izvedene komponente aerodinamičke sile i momenta duž osa aerobalističkog koordinatnog sistema za projektil, prema predstavljanim izrazima, i u skladu sa komponentama napadnog ugla u aerobalističkom koordinatnom sistemu [1,2], date su izrazima:

$$R = \begin{bmatrix} X \\ \tilde{Y} \\ \tilde{Z} \end{bmatrix} = \frac{\rho V^2}{2} S \begin{bmatrix} C_{X0} + C_{X\sigma^2} \sigma^2 \\ C_{\tilde{Y}\sigma} \tilde{\alpha} + C_{\tilde{Z}\sigma} \tilde{\beta} \\ -C_{\tilde{Y}\sigma} \tilde{\beta} + C_{\tilde{Z}\sigma} \tilde{\alpha} \end{bmatrix},$$

$$M = \begin{bmatrix} L \\ \tilde{M} \\ \tilde{N} \end{bmatrix} = \frac{\rho V^2}{2} S d \begin{bmatrix} C_{L0} + C_{Lp} p^* \\ C_{\tilde{M}\sigma} \tilde{\alpha} + C_{\tilde{N}\sigma} \tilde{\beta} + C_{\tilde{M}\sigma} \dot{\tilde{\alpha}}^* + C_{\tilde{M}q} \tilde{q}^* \\ -C_{\tilde{M}\sigma} \tilde{\beta} + C_{\tilde{N}\sigma} \tilde{\alpha} - C_{\tilde{M}\sigma} \dot{\tilde{\beta}}^* + C_{\tilde{M}q} \tilde{r}^* \end{bmatrix}.$$

Za ovaj sistem jednačina pretpostavlja se da se ose inercije i simetrije poklapaju $x \equiv \bar{x}$. Svi derivativi su funkcije Mahovog broja, a derivativi predstavljaju funkcije i bezdimenzione ugaone brzine [1,2]. Preko dinamičkog pritiska ostvaren je neposredan uticaj gustine vazduha i aerodinamičke brzine na let projektila. Aerodinamička brzina kretanja projektila definisana je u odnosu na vazduh, a vetar predstavlja brzinu kretanja vazduha $\vec{V}_W$. Napadni ugao i ugao klizanja su definisani prema:

$$\tilde{\alpha} = \arctg \frac{\tilde{w}}{u},$$

$$\tilde{\beta} = \arcsin \frac{\tilde{v}}{v}.$$

3. Sistem diferencijalnih jednačina

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

- izvod vektora položaja projektila

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

- vektorska jednačina relativnog kretanja centra masa

$$m \frac{d_r \vec{V}_k}{dt} = \Sigma \vec{R} = \vec{R}^A + \vec{F} + m\vec{g} - m\vec{a}_C$$

- kretanje oko centra mase

$$\frac{d\vec{H}^g}{dt} = \Sigma \vec{M} = \vec{M}^A + \vec{M}^F,$$

Vektor stanja u aerobalističkom koordinatnom sistemu je:

$$x \ y \ z \ u \ \tilde{w} \ p_B \ \tilde{q} \ \tilde{r} \ \phi \ \theta \ \psi.$$

Sistem diferencijalnih jednačina leta u aerobalističkom koordinatnom sistemu čine:

- tri skalarne jednačine projekcije brzine leta na ose koordinatnog sistema,

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

- tri skalarne jednačine kretanja centra mase,

$$\dot{u}_k = -\tilde{q}\tilde{w}_k + \tilde{r}\tilde{v}_k + \frac{X + F_x}{m} - g \sin \theta - a_{Cx}$$

$$\dot{\tilde{v}}_k = p_B \tilde{w}_k - \tilde{r}u_k + \frac{\tilde{Y} + F_y}{m} - a_{Cy}$$

$$\dot{\tilde{w}}_k = -p_B \tilde{v}_k - \tilde{q}u_k + \frac{\tilde{Z} + F_z}{m} + g \cos \theta - a_{Cz}$$

- tri jednačine ugaonih ubrzanja duž tri ose,

$$\dot{p} = \frac{(L + L^F)}{I_x}$$

$$\dot{\tilde{q}} = p_B \tilde{r} + \frac{-I_x p \tilde{r} + \tilde{M} + \tilde{M}^F}{I_y}$$

$$\dot{r} = -p_B \tilde{q} + \frac{I_x p \tilde{q} + \tilde{N} + \tilde{N}^F}{I_y}$$

- tri jednačine izvoda uglova stava.

$$\dot{\phi} = p + \tilde{r} \tan \theta$$

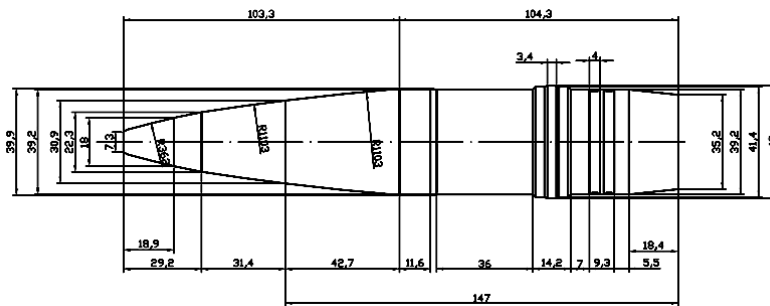
$$\dot{\theta} = \tilde{q}$$

$$\dot{\psi} = \frac{\tilde{r}}{\cos \theta}$$

4. Rezultati proračuna i eksperimenta aerodinamičkih koeficijenata i matematičkog modela sa šest stepeni slobode kretanja

U radu je analiziran model projektil zasnovan na standardnim konstrukcijskim parametrima delova postojećih projektila 40 mm, kao što su upaljač, centrirajući prsten, vodeći prsten, zadnji konus, eksplozivno punjenje, traser i sl., po ugledu na predstavljene tipove projektila [4,5,7,8].

Izvršena je analiza model projektila tipa M, čiji se oblik zasniva na geometrijskim karakteristikama prednjeg dela, tela i zadnjeg konusa projektila tipa K, i sa ravnim dnom u skladu sa projektilom tipa T [2,4,7], sa karakterističnim parametrima datim u tabeli 1, [2,3,4,7,8].



Slika 3. Model projektila tipa M

Karakteristični konstruktivni parametri za model projektil 40 mm tipa M [2], prema iskustvenim podacima sličnih projektila tipova T, K i drugih [2,3], dati su u tabeli 1.

Tabela 1. Parametri modela projektila tipa M /polazni podaci

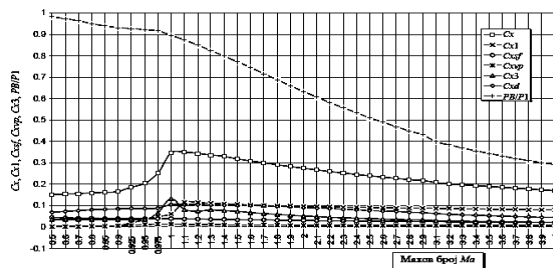
Parametar / parameter	Oznaka / Mark	Vrednost/Value
Masa / mass	m	0,960 kg
Balistički koeficijent / ballistic coefficient	C_{13}	0,68
Položaj centra mase od vrha / center of gravity from nose	x_{CM}	133 mm
Referentni prečnik / referent diameter	d	39,9 mm
Prečnik cilindričnog dela / diameter of cylindrical part	d_2	39,2 mm
Prečnik dna / base diameter	d_3	35,2 mm
Prečnik vrha / nose diameter	d_1	7,3 mm
Prečnik vodećeg prstena / rotating band diameter	d_4	42,0 mm
Ukupna dužina / total length	l	207,6 mm
Dužina prednjeg dela / nose length	l_1	103,3 mm
Dužina cilindričnog dela / cylindrical part length	l_2	85,9 mm
Dužina zadnjeg konusa / back cone length	l_3	18,4 mm
Poluprečnik prednjeg oživala / front ogive radius	R_{10}	1103 mm

Algoritam za proračun aerodinamičkih koeficijenata i rezultati proračuna su dati na slici 4. i tabeli 2.

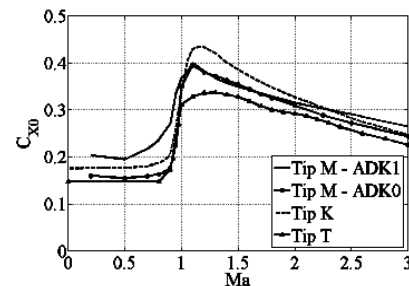
Tabela 2. Rezultati proračuna aksijalnih aerodinamičkih koeficijenata C_x

Махов број	Коefицијент пројектила тип М прорачуном АДК1	Коefицијент пројектила тип М прорачуном АДК0	Разлика коefицијената типа М за АДК1 и АДК0	Коefицијент пројектила тип К	Разлика коefицијената АДК1 типа М и тип К	Коefицијент пројектила тип Т	Разлика коefицијената АДК1 типа М и тип Т
Ma	C_{x0}^{ADK1}	C_{x0}^{ADK0}	(%)	C_{x0}^K	(%)	C_{x0}^T	(%)
1	2	3	4	5	6	7	8
0.20	0.203785	0.160	21.49	0.176	13.63	0.147	27.87
0.50	0.195117	0.155	20.56	0.177	9.29	0.147	24.66
0.70	0.216837	0.159	26.67	0.180	16.99	0.147	32.21
0.80	0.235909	0.164	30.48	0.187	20.73	0.147	37.69
0.90	0.270150	0.177	34.48	0.205	24.12	0.172	36.33
0.95	0.334013	0.225	32.64	0.262	21.56	-	-
1.00	0.365936	0.349	4.63	0.339	7.36	0.311	15.01
1.10	0.399010	0.395	1.00	0.429	-7.52	0.328	17.80
1.20	0.382162	0.379	0.83	0.433	-13.30	0.336	12.08
1.30	0.367277	0.372	-1.29	0.420	-14.36	0.337	8.24
1.40	0.356872	0.363	-1.72	0.400	-12.09	0.333	6.69
1.50	0.348613	0.354	-1.55	0.385	-10.44	0.327	6.20
2.00	0.314908	0.309	1.88	0.327	-3.84	0.292	7.27
2.25	0.302795	0.289	4.56	0.297	1.91	0.276	8.85
2.50	0.290683	0.272	6.43	0.282	2.99	0.257	11.59
3.00	0.264175	0.243	8.02	0.246	6.88	0.226	14.45
Просечно одступање			11.8		4.3		19.1
Одступање у субсоничном режиму			24.8		15.2		30.6
Одступање у трансоничном режиму			10.1		0.8		16.0
Одступање у суперсоничном режиму			3.9		-0.5		9.7

Slika 4. Algoritam za proračun aerodinamičkih koeficijenata

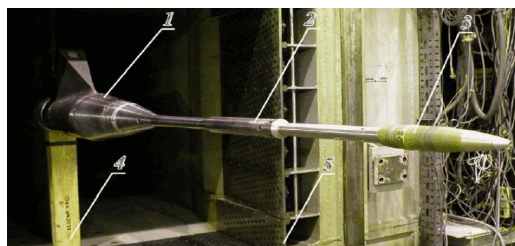


Slika 5. Rezultati proračuna aerodinamičkog koeficijenata C_x



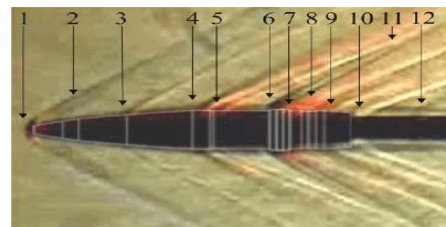
Slika 6. Rezultati proračuna aerodinamičkog koeficijenata C_x za različite konfiguracije

Eksperiment [3] realizovan u aerodinamičkom tunelu T-38 prikazan je na slici 7.

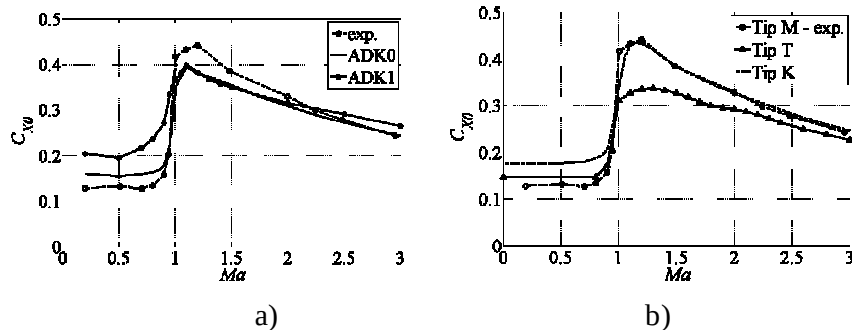


Slika 7. Model u trisoničnom radnom delu aerotunela (u otvorenom položaju)

1 – Pitch and Roll mehanizam, 2 – držač modela, 3 – model projektila, 4 – sigurnosna klocna, 5 – perforirani zid transončnog radnog dela aerotunela



Slika 8. Širenje slike strujanja oko projektila za $Ma=2,0$ pri $\alpha=0^\circ$



Slika 9. Uporedni prikaz aerodinamičkih koeficijenata C_x dobijenih proračunima i eksperimentom

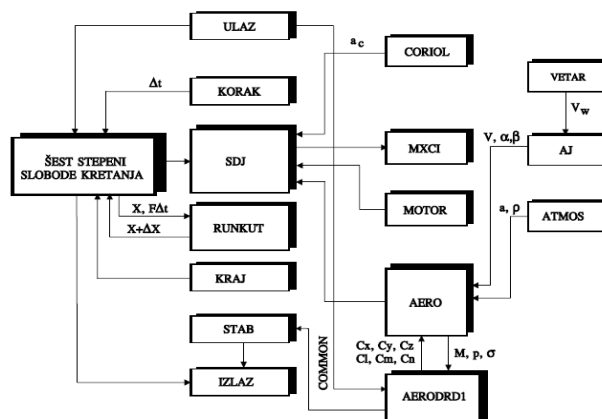
Polazne pretpostavke i celokupno izvođenje matematičkog modela sa 6 stepeni slobode kretanja dato je u [2,3]. Model kretanja sistema sa 6 stepeni slobode čini konačni sistem diferencijalnih jednačina koji se rešava simulacijom procesa na računaru.

T (s)	LMBDA1	LMBDA2	1/SG	SD (2-SD)	XM (m)	XC (m)
.100	-.00018	-.00006	.700	.930	.133	.073
.201	-.00018	-.00006	.685	.931	.133	.073
.301	-.00017	-.00007	.670	.932	.133	.073
.401	-.00017	-.00007	.656	.933	.133	.073
.501	-.00017	-.00007	.642	.933	.133	.073
.600	-.00017	-.00007	.629	.934	.133	.073
.700	-.00017	-.00007	.615	.935	.133	.073
.800	-.00017	-.00007	.600	.934	.133	.073
.900	-.00017	-.00007	.586	.934	.133	.073
1.000	-.00016	-.00007	.572	.933	.133	.072

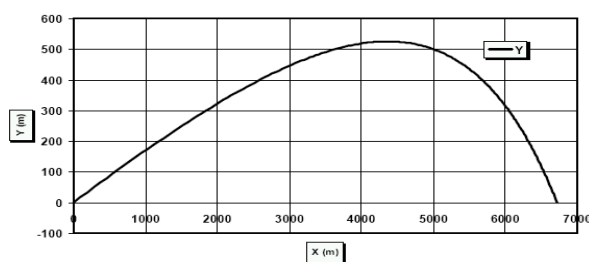
Резултати спољнобалистичког прорачуна „SB061.DAT“
PROJEKTIL 40 mm

T (s)	X (m)	Y (m)	Z (m)	V (m/s)	HI (°)	GAMA (°)	P (1/s)	ALFA (°)	BETA (°)
.000	.0	.00	.00	985.0	.0	10.0	6297.0	.0	.0
.100	95.9	16.06	-.02	963.1	.0	9.9	6227.8	-1.9	.5
.201	190.7	33.41	-.04	941.8	.0	9.9	6160.3	-1.1	-1.3
.301	282.5	49.35	-.05	921.4	.0	9.8	6095.7	.7	-.6
.401	372.3	64.05	-.06	903.8	.0	9.8	6033.2	.2	.3
.501	460.2	78.93	-.07	882.8	.0	9.7	5972.8	-1.1	.1
.600	545.5	94.46	-.08	864.7	.0	9.6	5914.9	-1.1	-.2
.700	629.9	108.74	-.08	846.9	.0	9.6	5858.2	.2	.1
.800	712.5	122.63	-.09	829.8	.0	9.5	5803.3	-1.1	-.1
.900	793.6	136.15	-.08	813.2	.0	9.4	5750.1	.0	.1
1.000	873.0	149.30	-.08	797.1	.0	9.4	5698.5	.1	-.1

Dao sadrži izlaznih datoteka proračuna programskog rešenja sa 6. stepeni slobode kretanja



Slika 10. Algoritam za proračun kretanja projektila sa 6. stepeni slobode kretanja



Slika 11. Rezultati proračuna $Y=f(x)$ i promene napadnih uglova u funkciji dometa

U tabeli 3. dat je uporedni prikaz vrednosti elemenata putanje za projektil tipa K prema tablicama gađanja i elemenata putanje za model projektil tipa M prema izvršenom proračunu sa šest stepeni slobode kretanja.

Tabela 3. Uporedni prikaz elemenata putanje za projektele tipa K i tipa M

Pol. ugao $\theta_0(^{\circ})$	Daljina		Vreme leta		Padna brzina		Visina temena		Derivacija	
	$x_c(m)$		$t_c(s)$		$V_c(m/s)$		$y_s(m)$		$z_c(m)$	
	tip/type K	tip/type M	tip/type K	tip/type M	tip/type K	tip/type M	tip/type K	tip/type M	tip/type K	tip/type M
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
0,77	2000	1999,8	2,5	2,48	645	660,7	7,4	7,3	0,7	0,6
0,98	2400	2408,6	3,16	3,13	586	602,5	11,9	11,6	1,1	0,8
1,23	2800	2833,2	3,88	3,87	530	545,0	18,1	17,9	1,6	1,9
1,53	3200	3273,2	4,67	4,72	479	489,2	26,5	26,8	2,3	3,4
1,87	3600	3700,8	5,55	5,64	430	438,2	37,6	38,5	3,2	5,1
2,25	4000	4109,5	6,54	6,63	387	392,0	52,3	53,4	4,2	7,2
2,70	4400	4521,7	7,63	7,75	350	349,1	71,6	73,2	5,6	9,7
3,22	4800	4925,1	8,82	8,97	322	316,3	96,5	98,6	7,3	12,7
3,83	5200	5328,7	10,1	10,30	304	294,0	128	131,5	9,4	16,5
4,55	5600	5739,2	11,5	11,76	291	275,8	170	174,0	12	21,4
5,40	6000	6085,7	13	13,06	279	262,9	223	218,1	15	26,5
6,37	6400	6584,0	14,6	15,06	267	247,7	286	296,1	19	36,0
7,43	6800	6995,0	16,2	16,83	256	237,8	359	375,2	24	45,8
8,58	7200	7395,2	18	18,64	247	230,0	445	466,4	29	57,6
9,82	7600	7786,0	19,8	20,50	239	224,1	544	570,3	36	71,3
11,17	8000	8173,2	21,6	22,44	233	219,8	656	689,4	43	87,6
14,23	8800	8938,3	25,8	26,60	224	214,9	934	979,6	60	128,7
16,00	9200	9324,9	28	28,88	221	214,2	1098	1159,1	71	155,0
17,97	9600	9715,6	30,5	31,35	219	214,6	1294	1367,7	84	186,1
20,12	10000	10100	33,2	33,95	219	216,0	1530	1605,5	99	222,3

Na osnovu prikazanih vrednosti elemenata putanje, za iste polazne uslove kretanja, primećuje se velika sličnost putanja ova dva tipa projektila. Sličnost putanja je očekivana, s obzirom na geometrijsku sličnost ovih projektila.

Prosečna razlika vrednosti dobijenih elemenata putanje u karakterističnim tačkama projektila tipa M u odnosu na projektil tipa K, u odnosu na interval ispitivanih polaznih uglova od $0,33^{\circ}$ do $20,12^{\circ}$ iznose:

- domet je veći za 1,33 %,
- vreme leta je veće za 1,31 %,
- padna brzina je manja za 1,97 %,
- visina temena putanje je veća za 1,45 %,
- derivacija je veća za 68,35 % ili 25,75 m.

4. Zaključak

Potreba za kvalitetnom deskripcijom aerodinamičkih koeficijenata, u fizičkom i matematičkom smislu, uslovljava njihov adekvatan i pouzdan proračun. Funkcionalna zavisnost koeficijenata komponenti aerodinamičke sile i momenta u odnosu na uticajne parametre (Mahov broj, napadni ugao, Reynoldsov broj i ugaone brzine projektila)

omogućuje potpunu analizu njihovih vrednosti u odnosu na uslove kretanja projektila definisane geometrijske strukture.

Sa stanovišta upotrebe ovakvih vrsta projektila koji se kreću velikom početnom brzinom oko $Ma=3$, područje supersoničnih brzina je i najznačajnije za istraživanje uticaja aerodinamičkog oblika tela na elemente putanje. Aerodinamički koeficijent aksijalne sile predstavlja jedan od najznačajnijih koeficijenata koji definišu aerodinamičku silu i time u velikoj meri utiče na elemente putanje projektila (domet, brzinu i vreme leta).

Eksperimentalno merenje derivativa aerodinamičkih koeficijenata vrlo je složeno i skupo, jer podrazumeva postavljanje posebnih aerovaga za svaki derivativ ponaosob. To znači da je potrebno izvršiti onoliki broj opstrujavanja projektila i merenja koliko različitih derivativa je potrebno odrediti pri određenom Mahovom broju. Zbog toga proračunsko određivanje derivativa aerodinamičkih koeficijenata uz pomoć programskih rešenja ima velik značaj.

Tačnost u određivanju vrednosti aerodinamičkih koeficijenata predstavlja jedan od ključnih faktora za ocenu leta „brzorotirajućeg“ osnosimetričnog projektila. Značaj unapređenja postojećih proračuna i razvoja novih numeričkih rešenja, ogleda se prvenstveno u smanjenju troškova eksperimentalnih ispitivanja, a posebno u brzini razvoja novih projektila.

Promene položaja napadne tačke normalne aerodinamičke sile pokazuju da se napadna tačka u svim režimima strujanja nalazi ispred centra mase u odnosu na vrh projektila. Karakter promene položaja napadne tačke je gotovo podudaran prema eksperimentalnim i proračunskim rezultatima. Proračunski položaj nalazi se delimično bliže centru mase u odnosu na eksperimentalni položaj.

Simulacijom kretanja u programskom rešenju sa šest stepeni slobode kretanja u širokom opsegu polaznih uglova, elementi putanje model projektila za proračunske i eksperimentalno određene aerodinamičke koeficijente pokazuju veliku usklađenost. Kriva zavisnosti ordinate y u odnosu na horizontalnu daljinu x (putanja leta u vertikalnoj ravni), ima identičan karakter promene. Postoje vrlo mala odstupanja na padnom delu putanje.

Parametri stabilnosti kretanja osnosimetričnog projektila zavise od vrednosti derivativa aerodinamičkih koeficijenata. Karakter promene napadnog ugla α i ugla klizanja β za vrednosti proračunskih i eksperimentalnih derivativa razlikuju se po frekvenciji prigušenja i amplitudi oscilovanja, posebno na prvom delu putanje. To se vidi i iz vrednosti izračunatih koeficijenata prigušenja oscilacija λ_1 i λ_2 , čija je razlika na početnom delu putanje veća. Amplitude promene napadnih uglova smanjuju se tokom leta, što dokazuje stabilnost kretanja projektila i za proračunske i iz eksperimentalnih rezultata izračunate derivative. Vrednosti koeficijenata prigušenja su negativne u oba slučaja, što predstavlja potreban, ali ne i dovoljan uslov stabilnosti. Da bi projektil tokom kretanja bio stabilan potrebno je da se ispuni uslov odnosa faktora žiroskopske i dinamičke stabilnosti. Ovi faktori su zadovoljili uslov tokom kretanja model projektila, za proračunske vrednosti i eksperimentalne vrednosti aerodinamičkih koeficijenata.

LITERATURA:

- [1] Regodić, D.: *Spoljna balistika*, Vojna akademija, Beograd, 2006.
- [2] Regodić, D.: *Zbirka zadataka iz spoljne balistike*, Vojna akademija, Beograd 2003.
- [3] Jerković, D., *Uticaj aerodinamičkih koeficijenata na kretanje osnosimetričnog tela*, magistarska teza, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, 2009.
- [4] McCoy, R.L.: *Modern exterior ballistics*, Schiffer Military History, Atglen PA, 1999.
- [5] Lebedev, A.A., Cernobrovkin L.S.: *Dinamika poleta*, Mashinostroenie, Moskva, 1973.

- [6] Regodić D., Tančić LJ.: Optimizacija tehničkih sistema u fazi projektovanja, 1. Naučni skup Sinergija 2009.
- [7] Range tables for 40 mm Automatic Gun L-70, AB Bofors, Sweden
- [8] Regodić, D., *Reverzibilni proračun putanje projektila primenom modela sa šest stepeni slobode kretanja*, Vojnotehnički glasnik, Br. 5/1998, Beograd, 1998., pp. 527-538
- [9] *ProEngineer Wildfire M090*, Parametric Technology Corporation, 140 Kendrick Street, Needham, MA 02494 USA.