

Pregled korišćenih oznaka

Program za personalni računar sačinjen je prema datim jednačinama, a korišćene su oznake za osnovne i izvedene geometrijske veličine. Na slici 4 date su osnovne geometrijske veličine projektila, koje se javljaju u ulaznoj datoteci:

$d = D$ - kalibar projektila (m),

$l_t = L_B$ - dužina projektila (m),

$l_1 = LN + LNP + LN0$ - dužina prednjeg dela projektila (m),

$l_{NK} = LNK$ - dužina konusa (m)

$l_{NP} = LNP$ - dužina oživala (m),

$l_0 = LN0$ - dužina prednjeg zatupljenja (m),

$\epsilon = EPS$ - ugao između tangente oživala i cilindričnog dela ($^{\circ}$),

$R = R0$ - radijus oživala (m),

$d_B = DB$ - prečnik baze (m),

$l_3 = LA$ - dužina zadnjeg konusa (m),

$x_G = XV$ - rastojanje težišta od vrha projektila (m),

$\sigma = SGMS$ - napadni ugao ($^{\circ}$).

Izvedene geometrijske veličine:

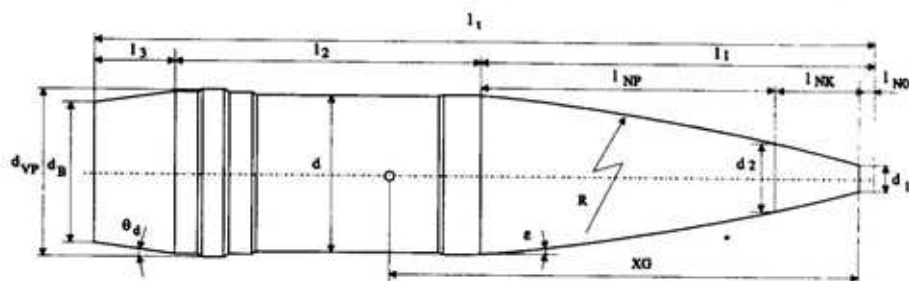
$XV/D = XVE$ - bezdimenzionalno rastojanje centra mase,

$\lambda_1 = LN/D$ - vitkost prednjeg dela,

$D0/D = D0E$ - bezdimenzionalni prednji deo,

$L0/D = F0$ - vitkost cilindričnog vrha,

$LB/D = FB$ - vitkost ukupne dužine tela,



Sl. 4 - Dimenzije projektila korišćene u programskom rešenju

$(\pi d^2)/4 = S = SR$ – referentna površina (m^2),

$l_2/d = (LB - LN - LA)/FC$ – vitkost cilindričnog tela,

$\lambda_2/\lambda_1 = FCFN$ – odnos vitkosti cilindričnog i prednjeg dela projektila,

$\lambda_3 = FA$ – vitkost zadnjeg dela projektila,

$tg\theta_d = FAP$ – tangens ugla zadnjeg konusa,

$d_B/d = DBE$ – bezdimenzionalni prečnik baze projektila,

$SBE = DBE^2$ – kvadrat bezdimenzionalnog prečnika,

$S_d = SB$ – površina baze (m^2),

$x_G/l_t = XVC$ – bezdimenzionalni odnos rastojanja centra mase i ukupne dužine projektila,

$X_{TP} = XTP$ – koordinata centra mase za premine (m),

$P/S = PE$ – odnos ukupne i referentne površine,

$S_d/S = \bar{S}_d$ – referentna površina dna,

$tg\theta_d/\bar{S}_d$ – parametar zadnjeg konusa,

$\Delta X_{Cl} = \Delta X_{CN}$ – korekcija rastojanja napadne tačke (m),

$VV_1 = WN$ – zapremina vrha projektila (m^3),

$X_{cl} = XCL$ – napadna tačka normalne sile (m).

Fizičke veličine:

$\frac{V}{a} = \frac{V}{A} = M = BM$ – Mahov broj,

$V_\infty = V$ – brzina neporemećene struje vazduha u beskonačnosti (m/s),

$a = A$ – lokalna brzina zvuka (m/s),

$p = P$ – pritisak u atmosferi (bar),

$\tau = TM$ – apsolutna temperatura (K),

$T_p = TP$ – ravnotežna temperatura (K),

$T_{cp} = TCP$ – prosečna temperatura (K),

$\mu = EFMI$ – dinamička viskoznost (Pas),

$\nu = NI$ – kinematska viskoznost (m^2/c),

$\frac{V \cdot l_t}{\nu} = Re = RE$ – Rejnoldsov broj,

$C_f = \frac{3,91}{\log Re^{2,58} \left(1 + \frac{M^2}{15}\right)^{0,85}}$ – koeficijent površinskog trenja.

Oznake za aerodinamičke koeficijente:

$C_{X0} = CX0 + C_{X\sigma^2} \cdot \sigma^2 = CA1 + CA3 + CAF + CAB$ – aerodinamički koeficijent aksijalne sile,

$CX0 = CA0$ – aerodinamički koeficijent aksijalne sile pri $\sigma = 0^\circ$,

$C_{X\sigma} = CX\sigma$ – derivativ aerodinamičkog koeficijenta aksijalne sile za napadni ugao σ ,

$C_{X1} = CX1 = CA1$ – aerodinamički koeficijent talasnog otpora vrha projektila,

$C_{X3} = CX3 = CA3$ – aerodinamički koeficijent talasnog otpora dna projektila,

$C_{Xf} = CXF = CAF$ – aerodinamički koeficijent otpora trenja,

$C_{Xd} = CXB = CAB$ – aerodinamički koeficijent otpora baze projektila,

$C_y = CY = CYP\sigma \cdot p^* \cdot \sigma$ – aerodinamički koeficijent bočne sile,

$C_{YP\sigma} = CYP\sigma$ – derivativ aerodinamičkog koeficijenta bočne sile,

$C_Z = CZ = C_{Z\sigma} \cdot \sigma + C_{Z\sigma^2} \cdot \sigma^2 -$ aerodinamički koeficijent normalne sile za napadni ugao σ ,

$C_{Z\sigma} = CZS$ – derivativ aerodinamičkog koeficijenta normalne sile,

$C_l = CL = C_{lp} \cdot p^*$ – aerodinamički koeficijent momenta valjanja,

$C_{lp} = CLP$ – derivativ aerodinamičkog koeficijenta momenta valjanja

$C_m = CM = CMS + CMST + CMQ$ – aerodinamički koeficijent momenta propinjanja,

$C_{m\sigma} \cdot \sigma = CMS$ – statički deo derivativa aerodinamičkog koeficijenta momenta propinjanja,

$C_{m\sigma} \cdot \sigma^2 = CMST$ – dinamički deo derivativa aerodinamičkog koeficijenta momenta propinjanja zbog promene napadnog ugla,

$C_{mq} \cdot q^* = CMQ$ – dinamički deo derivativa aerodinamičkog koeficijenta momenta propinjanja zbog promene ugaone brzine,

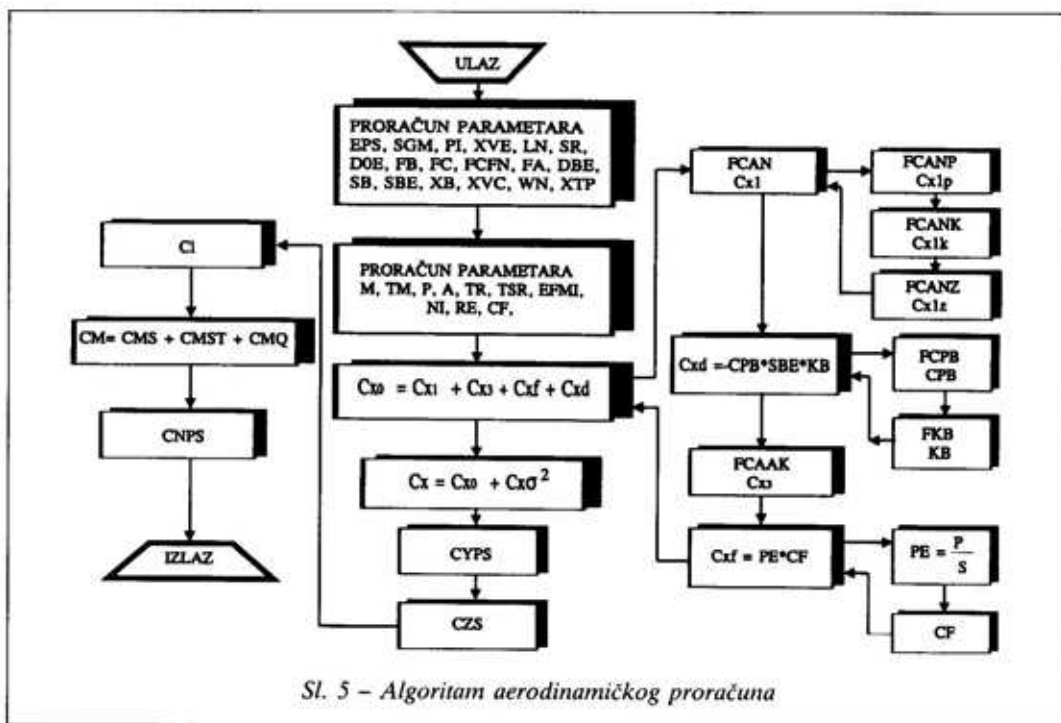
$C_n = C_{np\sigma} \cdot p^* \cdot \sigma = CN$ – aerodinamički koeficijent momenta skretanja,

$C_{np\sigma} = CNPS$ – derivativ aerodinamičkog koeficijenta momenta skretanja.

Koncepcija programskog rešenja

Programsko rešenje AERO1 namenjeno je za aerodinamičke proračune pri simetričnom i nesimetričnom opstrujavanju. Sačinjeno je u programskom jeziku FORTRAN na personalnom računaru. Sastoji se od tri celine – datoteke a to su:

– program AERO1 – glavni program,



Sl. 5 – Algoritam aerodinamičkog proračuna

- datoteka TELO – ulazni podaci,
- datoteke: KOEFIC1, KOEFIC2, KOEFIC3, KOEFIC4,
- rezultati proračuna sa komentarom.

Program AERO1 organizovan je tako da se proračun izvodi po celinama za svaki aerodinamički koeficijent. Najpre se učitavaju ulazni podaci sa datoteke TELO, a zatim se računaju konstante, bezdimenzionalne veličine i izvedene veličine. Na osnovu polja Mahovih brojeva definiše se korak proračuna. Pomoću DO-petlje, redosledom iz izraza 1 do 16, računaju se aerodinamički koeficijenti i njihovi derivativi u funkciji Mahovog broja.

Na slici 5 prikazan je algoritam za aerodinamički proračun.

Datoteke KOEFIC1, KOEFIC2, KOEFIC3 i KOEFIC4 kreiraju se u toku

izvođenja programa. U njih se smeštaju rezultati aerodinamičkog proračuna. Strukturirani su tako da se na početku daju polazni podaci za koje se kasnije daju tabelarne vrednosti aerodinamičkih koeficijenata i njihovi derivativi.

Programsko rešenje je univerzalno i može se upotrebiti za sve aerodinamičke proračune klasičnih projektila bez krila, pri simetričnom i nesimetričnom opstrujavanju. Za aerodinamički proračun novog projektila neophodno je modifikovati datoteku TELO, ili kreirati novu sa polaznim podacima odabranog projektila.

Rezultati proračuna

Rezultati proračuna prikazuju se tabelarno i grafički.

Datoteka ulaznih podataka TELO.DAT

```

D = .122    LB = .616
LNK = .050  LNP = .261    LNO = .005    EPSS = 3.0    RO = 1.271
D0 = .010   L0 = .000
DB = .110   LA = .096
XV = .371   SGMS = 0°
17
0.5 0.6 0.7 0.8 0.9 1.0 1.1 1.2 1.3 1.4 1.5 1.6 1.7 1.8
2.0 2.5
3.0

```

Datoteka izlaznih podataka KOEFIC1.TAB

```

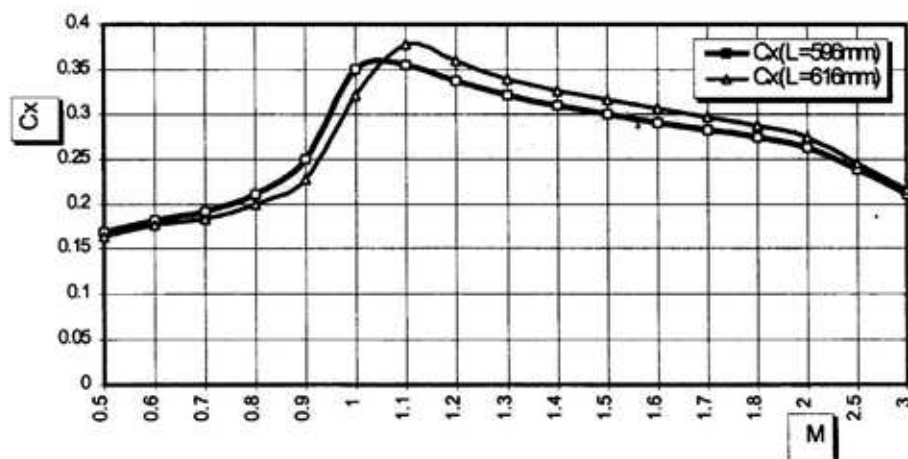
D = .122    LB = .616
LK = .050   LP = .261    LO = .005
ES = 3.0    RO = 1.271
D0 = .010   L0 = .000
DB = .110   LA = .096
XV = .371   σ = 0°
XVE = 3.041

```

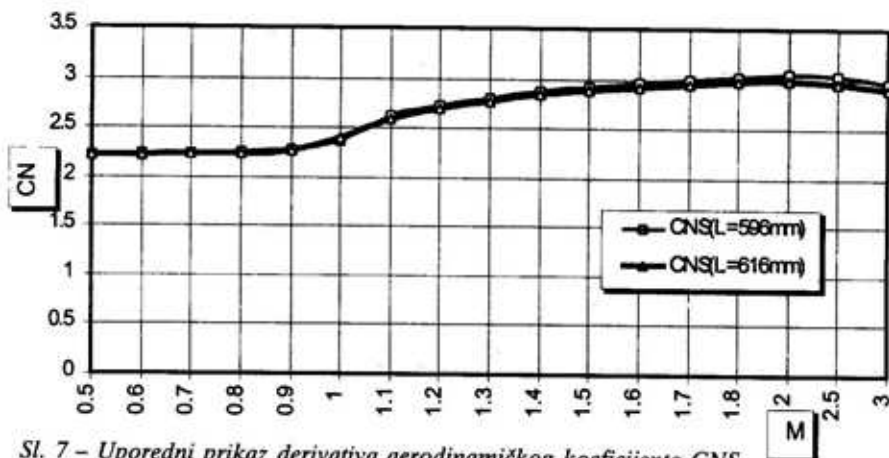
MACH	CAO	CNS	XCE	CMS	CLP	CMST + + CMQ	CYPS	XKE	CNPS
.500	.168	1.980	2.453	1.164	-.038	-3.987	-.465	2.892	-.069
.600	.181	1.986	2.434	1.206	-.038	-4.486	-.505	2.906	-.068
.700	.188	1.994	2.401	1.276	-.038	-5.119	-.546	2.918	-.067
.800	.205	2.002	2.353	1.378	-.038	-5.908	-.587	2.929	-.066
.900	.232	2.027	2.269	1.565	-.038	-6.880	-.616	2.942	-.061
1.000	.326	2.154	2.082	2.065	-.038	-8.066	-.650	2.786	-.166
1.100	.383	2.361	2.091	2.242	-.038	-11.685	-.675	2.766	-.186
1.200	.363	2.461	2.173	2.135	-.038	-11.685	-.700	2.748	-.205
1.300	.344	2.539	2.262	1.978	-.038	-11.685	-.725	2.731	-.225
1.400	.330	2.606	2.359	1.778	-.038	-11.685	-.750	2.715	-.244
1.500	.321	2.651	2.455	1.552	-.038	-11.685	-.775	2.700	-.264
1.600	.311	2.681	2.551	1.313	-.038	-11.685	-.772	2.603	-.338
1.700	.300	2.709	2.632	1.108	-.038	-11.685	-.770	2.506	-.412
1.800	.291	2.737	2.704	.921	-.038	-11.685	-.767	2.407	-.486
2.000	.279	2.750	2.827	.588	-.038	-11.685	-.762	2.209	-.634
2.500	.250	2.727	2.933	.293	-.038	-11.685	-.700	2.212	-.581
3.000	.221	2.664	2.939	.273	-.038	-11.685	-.700	2.212	-.581

Na slikama od 6 do 12 grafički su prikazani rezultati proračuna za projektil kalibra $d = 122$ mm, dužine $l = 596$ mm i $l = 616$ mm.

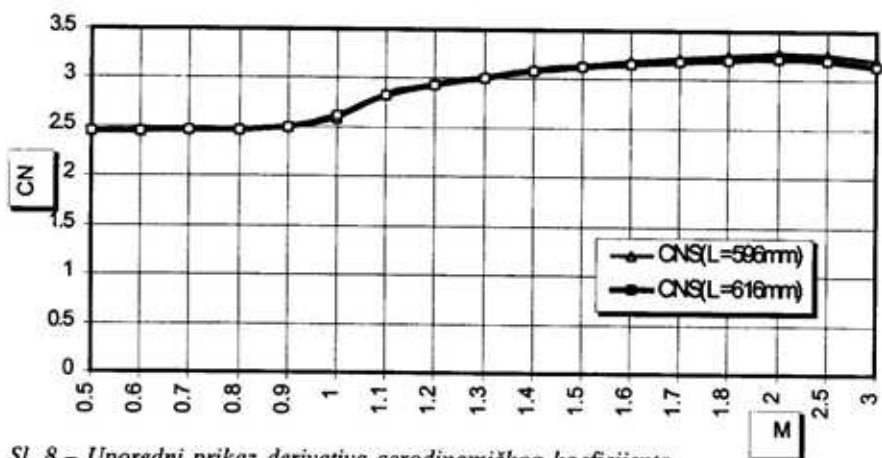
Na slici 13 dat je uporedni prikaz položaja napadne tačke Xc^* normalne sile Z za projektil kalibra $d = 122$ mm, dužine $l = 596$ mm i $l = 616$ mm pri vrednostima $M = 0,5-3,0$ i $\alpha = 1^\circ$.



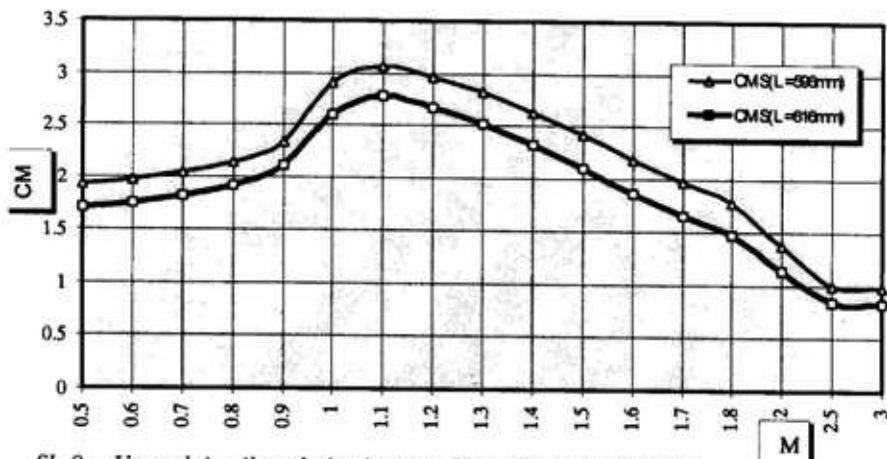
Sl. 6 - Uporedni prikaz aksijalnog aerodinamičkog koeficijenta C_x pri vrednostima $M = 0,5 - 3,0$



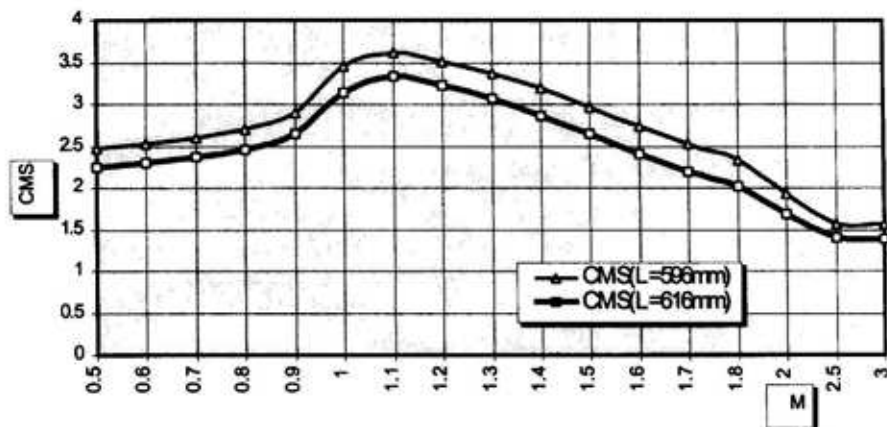
Sl. 7 – Uporedni prikaz derivativa aerodinamičkog koeficijenta CNS pri vrednostima $M = 0,5 - 3,0$ i $\alpha = 1^\circ$



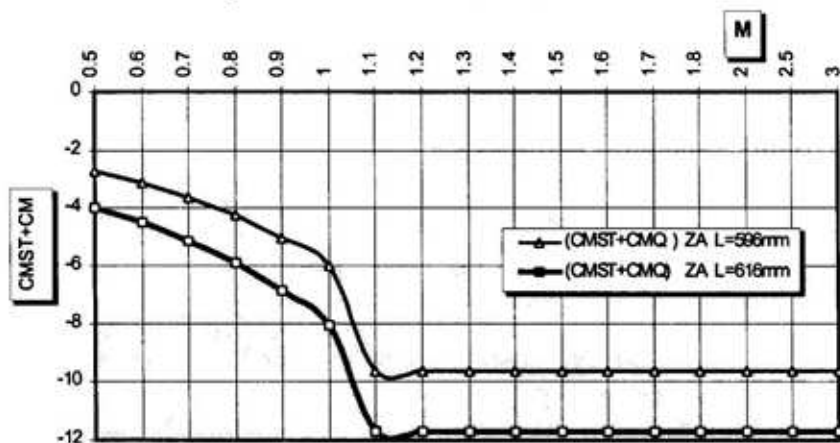
Sl. 8 – Uporedni prikaz derivativa aerodinamičkog koeficijenta CNS pri vrednostima $M = 0,5 - 3,0$ i $\alpha = 2^\circ$



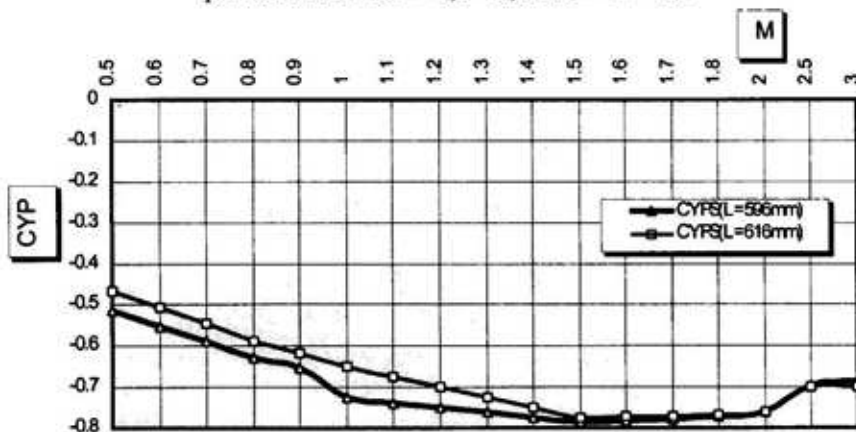
Sl. 9 – Uporedni prikaz derivativa aerodinamičkog koeficijenta CMS pri vrednostima $M = 0,5 - 3,0$ i $\alpha = 1^\circ$



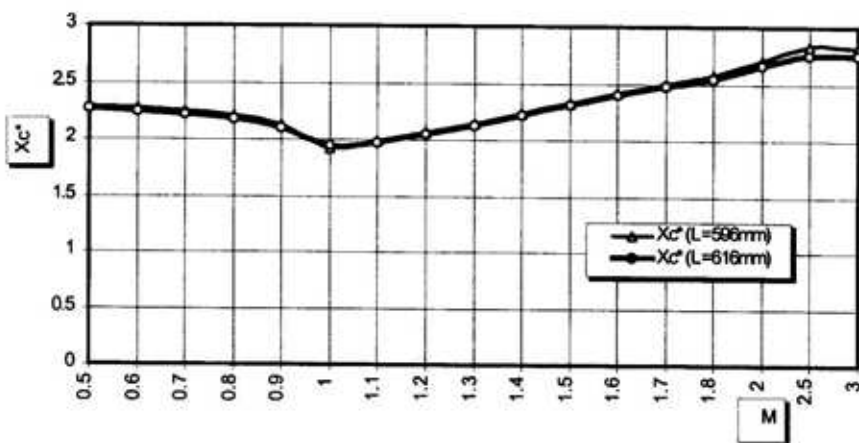
Sl. 10 – Uporedni prikaz derivativa aerodinamičkog koeficijenta CMS pri vrednostima $M = 0,5 - 3,0$ i $\alpha = 2^\circ$



Sl. 11 – Uporedni prikaz derivativa aerodinamičkog koeficijenta (CMST + CMQ) pri vrednostima $M = 0,5 - 3,0$ i $\alpha = -4^\circ - 10^\circ$



Sl. 12 – Uporedni prikaz derivativa aerodinamičkog koeficijenta CYP pri vrednostima $M = 0,5 - 3,0$ i $\alpha = -4^\circ - 10^\circ$



Sl. 13 – Uporedni prikaz položaja napadne tačke X_{c^*} normalne sile Z pri vrednostima $M = 0,5 - 3,0$ i $\alpha = 1^\circ$

Zaključak

Analizom proračunatih vrednosti aerodinamičkih koeficijenata i njihovih derivativa za realne uslove leta, pri Mahovim brojevima $M = 0,5$ do 3 i napadnim uglovima $\alpha = -4^\circ$ do $+10^\circ$ može se zaključiti:

1. Vrednosti aerodinamičkog koeficijenta C_x aksijalne aerodinamičke sile, prikazane na slici 6 neznatno se menjaju sa promenom napadnih uglova u posmatranom području $\alpha = -4^\circ$ do $+10^\circ$. Promenom brzine leta projektila izražene su promene aksijalnog aerodinamičkog koeficijenta. Područje $M = 0,5$ do $0,8$ karakteriše spori rast, da bi prelaskom u visoko subsonično područje pri $M = 0,94$ vrednost aksijalnog aerodinamičkog koeficijenta počela brže da raste. Maksimalna vrednost C_x za projektil 122 mm sa dužim zadnjim konusom iznosi $C_x = 0,375$, a za projektil sa kraćim zadnjim konusom $C_x = 0,355$ (5,3% manje od projektila sa dužim zadnjim konusom) pri $M = 1,1$. Područje iza $M = 1,2$ karakteriše lagani pad i smirivanje promene C_x .

2. Vrednosti derivativa aerodinamičkog koeficijenta momenta propinjanja $C_{m\sigma}$ (statički deo) vrlo je bitna za kontrolu žiroskopske stabilnosti rotacionih projektila. Visoke pozitivne vrednosti $C_{m\sigma} > 0$ dovode projektil u kritično područje, smanjujući mu koeficijent žiroskopske stabilnosti S_g koji je inverzno proporcionalan sa $C_{m\sigma}$. Porastom napadnih uglova pri letu projektila raste i vrednost $C_{m\sigma}$ smanjujući mu na taj način žiroskopsku stabilnost. Maksimalne vrednosti $C_{m\sigma} = 14,529$ za projektil 122 mm sa dužim zadnjim konusom, i $C_{m\sigma} = 14,928$ za projektil sa kraćim zadnjim konusom (veća za 2,7% od projektila sa dužim zadnjim konusom) dobijene su pri $\alpha = 10^\circ$ i pri $M = 3$. Za manje napadne uglove ($\alpha = -1^\circ, -2^\circ, 1^\circ, 2^\circ$), koji su dominantni u toku leta projektila, vrednost $C_{m\sigma}$ se lagano menja da bi u području $M = 0,94$ počela brže da raste, a u području $M = 1,1$ dostiže maksimalnu vrednost za projektil sa dužim i kraćim zadnjim konusom. Vrednosti $C_{m\sigma}$ uglavnom su pozitivne, osim za negativne napadne uglove za određene brzine leta.

Projektil sa kraćim zadnjim konusom pri promeni napadnih uglova pokazuje veću žiroskopsku stabilnost l/Sg u toku leta smirujući napadne uglove.

3. Numerička vrednost derivativa aerodinamičkih koeficijenata Magnusovog momenta $C_{NP\sigma}$ grafički je prikazana u izlaznim datotekama za Mahove brojeve $M = 0,5$ do 3 i napadne uglove $\alpha = -4^\circ$ do $+10^\circ$ za projektil 122 mm sa dužim i kraćim zadnjim konusom. Na osnovu uporedne analize ovih vrednosti može se zaključiti:

– $C_{NP\sigma}$ ne zavisi od vrednosti napadnog ugla;

– vrednost $C_{NP\sigma}$ je negativna za sve vrednosti M u području od $C_{NP\sigma} = -0,069$ do $-0,634$ za projektil sa dužim zadnjim konusom, i $C_{NP\sigma} = -0,198$ do $-0,734$ za projektil sa kraćim zadnjim konusom;

– za područje $M = 0,9$ do 1 i prelaaskom u visoko subsonično područje $M = 0,94$ evidentno je lagano umirenje i prelazak u mirnije područje $C_{NP\sigma}$.

Kombinacijom negativnih vrednosti $C_{NP\sigma}$ i $C_{mq} + C_{m\sigma}$ dobija se laganorotirajući i frekventni ciklus kod projektila.

4. Dinamički derivativi aerodinamičkog koeficijenta momenta propinjanja $C_{mq} + C_{m\sigma}$ nastaju zbog poprečne rotacije projektila ugaonom brzinom q i promenom napadnog ugla u jedinici vremena. Derivativi $C_{mq} + C_{m\sigma}$ bitno utiču na dinamičku stabilnost projektila koja se želi postići u svim uslovima leta projektila. Na osnovu numeričkih vrednosti, datih u izlaznim datotekama i grafičke interpretacije na slici 11 za projektil 122 mm za duži i kraći zadnji konus pri $M = 0,5$ do 3 i napadne uglove $\alpha = -4^\circ$ do $+10^\circ$ može se zaključiti:

– za obe dužine zadnjeg konusa zbir vrednosti $C_{mq} + C_{m\sigma}$ uvek je negativan, sa manjim apsolutnim vrednostima za

projektil sa kraćim zadnjim konusom, što je povoljnije za dinamičku stabilnost projektila;

– lagani porast vrednosti $C_{mq} + C_{m\sigma}$ u intervalu $M = 0,5$ do $0,9$;

– ulaskom u oblast visokih subsoničnih brojeva $M = 0,94$ javlja se skok vrednosti $C_{mq} + C_{m\sigma}$ da bi za $M = 1,1$ postigao svoju maksimalnu vrednost;

– za $M = 1,1$ do 3 i promene napadnih uglova, vrednosti $C_{mq} + C_{m\sigma}$ su lagano promenljive sa promenom brzine leta projektila;

– numeričke vrednosti $C_{mq} + C_{m\sigma}$ za projektil 122 mm sa dužim zadnjim konusom kreću se od $-0,987$ do $-11,695$, a za projektil sa kraćim zadnjim konusom od $-2,747$ do $-9,687$. Za oba posmatrana projektila $C_{mq} + C_{m\sigma}$ predstavljaju sporo promenljive funkcije od Mahovih brojeva sa povoljnijom žiroskopskom stabilnošću za projektil 122 mm sa kraćim zadnjim konusom.

5. Rotacijom projektila oko uzdužne ose brzina u nekoj tački na površini se povećava, a elementarna sila trenja deluje na površinu u pravcu suprotnom strujanju koje je zaokrenuto za ugao $pd/2 \cdot V$ u odnosu na pravac brzine translacije V . Suma momenata svih ovih elementarnih sila predstavlja moment koji se protivi rotaciji i naziva se aksijalni prigušni moment L . Koeficijent prigušnog momenta za idealno glatko osnosimetrično telo je $C_{lp} = -C_{ft}/4$. Na osnovu eksperimentalnih rezultata koeficijent prigušnog momenta je dvostruko veći odn. $C_{lp} = -C_{ft}/2$.

Programsko rešenje urađeno je u programskom jeziku FORTRAN na PC 586. Program AERO1 organizovan je tako da se proračun izvodi po celinama za svaki aerodinamički koeficijent. Pro-

gramsko rešenje je univerzalno i može se primenjivati za klasične nevodene projekte.

Literatura:

[1] Janković, S.: CAD OF THE UNGUIDED MISSILES, 11th International Symposium on Ballistics, Brussels, May 09-11, 1989, pp: 749-758.
[2] Regodić, D.: Prilog numeričkoj analizi dvodimenzionalnog strujanja oko osnosimetričnog tela, doktorski rad, VTA VJ Beograd, 1997.

[3] Regodić, D.: Analiza stabilnosti i tačnosti matematičkog modela dinamike projektila, Međunarodni naučno-stručni skup VAZDUHOPLOVSTVO '97, Sekcija Aerodinamika i projektovanje, str. 94-100, Beograd, 1997.
[4] Regodić, D.: Uticaj vrste strujanja na ukupni aerodinamički koeficijent, VTG-1, Beograd, 1995.
[5] Regodić, D.; Perme, B.: Određivanje aerodinamičkih karakteristika pri različitim napadnim uglovima, XXII Jugoslovenski kongres teorijske i primenjene mehanike, Vrnjačka Banja, 1997.
[6] ***: 11th INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON BALLISTICS, Zbornik radova, Brussels-Belgium, May 09-11, 1989.
[7] ***: 15th INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON BALLISTICS, Zbornik radova, Jerusalem-Israel, May 21-24, 1995.
[8] ***: INTERNATIONAL STANDARD ISO 1151 „TERMS AND SYMBOLS FOR FLIGHT DYNAMICS“ – part I-V.