



Predviđanje sile otpora pri nultom napadnom uglu za osnosimetričnu brzorotirajuću konfiguraciju projektila

Sabina Serdarević-Kadić:

***PREDVIĐANJE SILE OTPORA PRI
NULTOM NAPADNOM UGLU ZA
OSNOSIMETRIČNU BRZOROTIRAJUĆU
KONFIGURACIJU PROJEKTILA***

magistarski rad

Sarajevo, 22.09.2007 god.

UVOD

Predviđanje sile otpora pri nultom napadnom uglu za osnosimetričnu brzorotirajuću konfiguraciju projektila

- ◆ U realnim uslovima, na projektil u letu pored težine djeluje i sila kojom se vazduh suprostavlja kretanju projektila nazvana otpor.



- ◆ Sila otpora ima pravac brzine kretanja projektila, ali je suprotnog smjera.
- ◆ Označava se sa D (drag).
- ◆ Pod uslovom da je projektil stabilan tokom leta, dominantna sila pri predviđanju dometa je sila otpora.



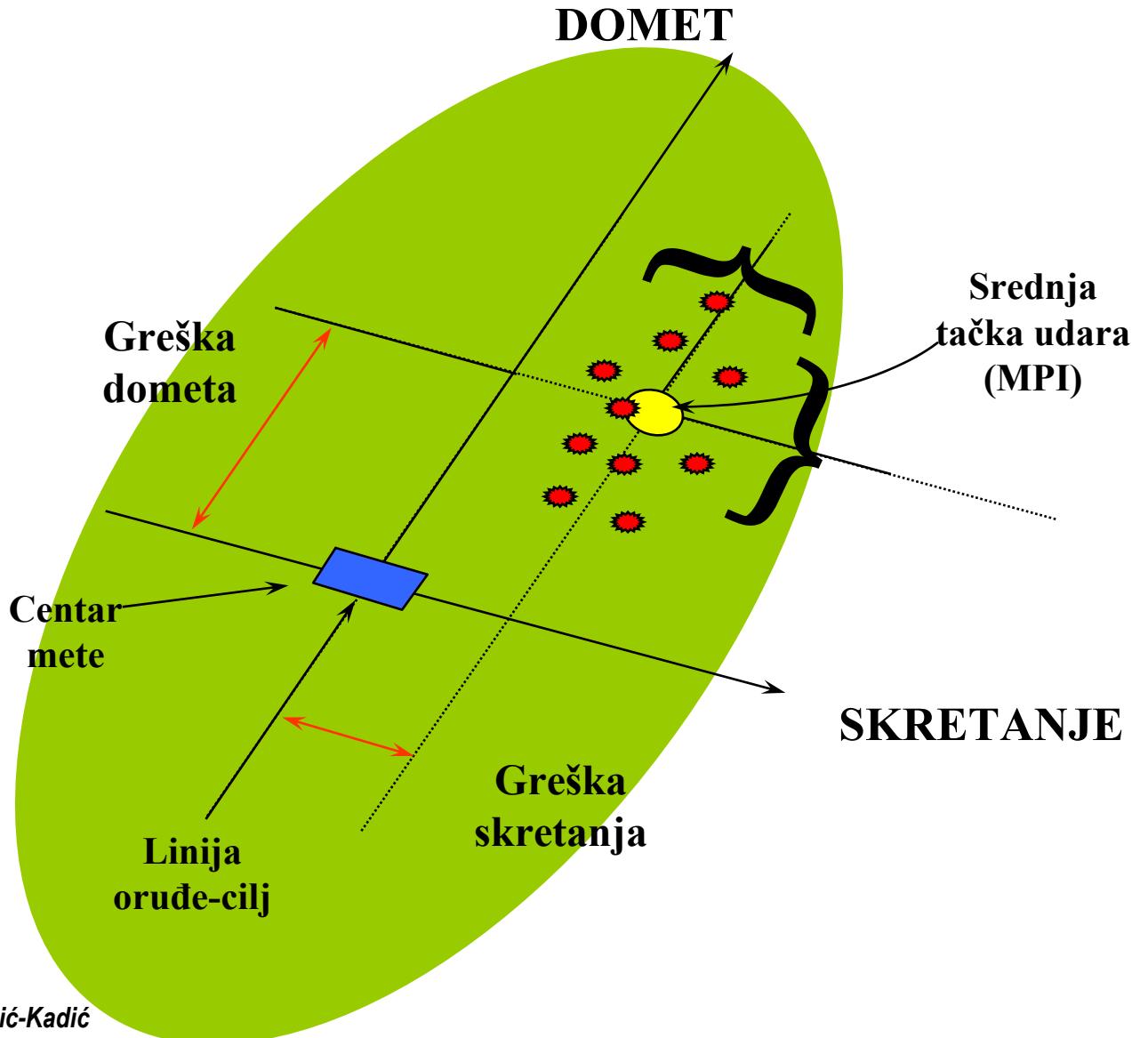
RASTURANJE PUTANJE

Predviđanje sile otpora pri nultom napadnom uglu za osnosimetričnu brzorotirajuću konfiguraciju projektila



RASTURANJE PUTANJE

Predviđanje sile otpora pri nultom napadnom uglu za osnosimetričnu brzorotirajuću konfiguraciju projektila



CILJ I SVRHA RADA

Predviđanje sile otpora pri nultom napadnom uglu za osnosimetričnu brzorotirajuću konfiguraciju projektila

◆ Cilj rada je:

- Postavljanje modela koji omogućava tačnije predviđanje aerodinamičkog koeficijenta otpora pri opstrujavanju pod nultim napadnim uglom za brzorotirajući projektil osnosimetrične konfiguracije na osnovu novijih teoretskih i eksperimentalnih istraživanja ponašanja projektila u atmosferi.
- Formiranje baza podataka za pojedine komponente aerodinamičkog koeficijenta otpora pri nultom napadnom uglu iz dostupnih eksperimentalnih rezultata.

◆ Svrha rada je:

- Odgovor na zahtjeve predviđanja dometa i rasturanja putanje, jer je razvoj novih artiljerijskih projektila usmjeren ka povećanju dometa, preciznosti i efikasnosti.

OTPOR

Predviđanje sile otpora pri nultom napadnom uglu za osnosimetričnu brzorotirajuću konfiguraciju projektila

- ◆ Osnosimetrični projektil je projektil čija je vanjska površina osnosimetričnog oblika, odnosno svaka ravan kroz osu simetrije je istovremeno ravan simetrije vanjske površine
- ◆ Otpor nastaje uslijed:
 - pritiska vazduha na projektil
 - trenja vazduha o površinu projektila
- ◆ Sila otpora (eksperimentalno) u analitičkom obliku:

$$D = \frac{1}{2} \rho \cdot V^2 \cdot S \cdot C_D$$

ρ - gustina vazduha

V - brzina

C_D - aerodinamički koeficijent otpora

S - referentna površina



AERODINAMIČKI KOEFICIJENT OTPORA

Predviđanje sile otpora pri nultom napadnom uglu za osnosimetričnu brzorotirajuću konfiguraciju projektila

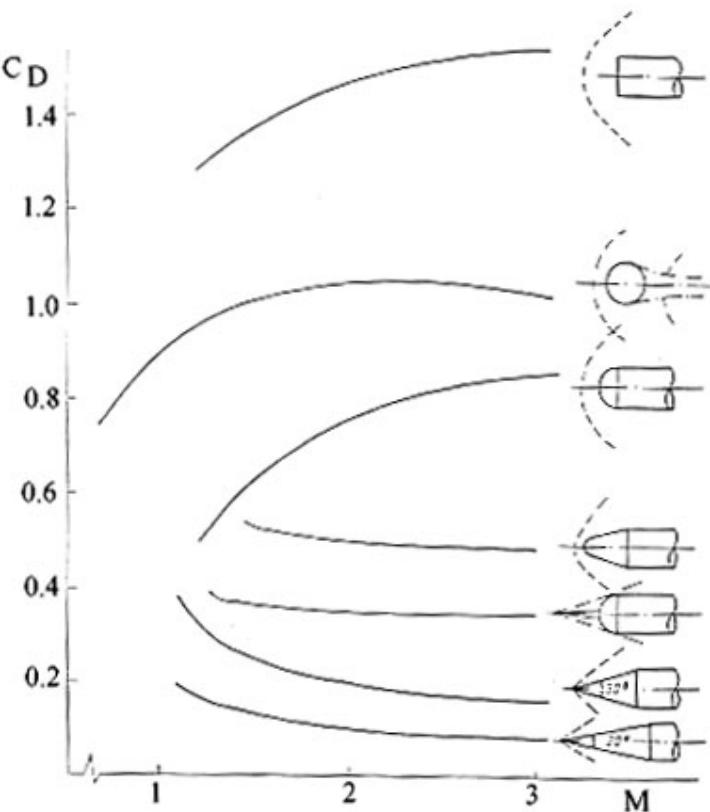
- ◆ Aerodinamički koeficijent otpora zavisi od:

- Oblika projektila
- Mach-ovog broja
- Rezultujućeg napadnog ugla
- Reynolds-ovog broja

$$C_D = C_{D0} + C_{D\sigma^2} \sigma^2$$

C_{D0} - aerodinamički koeficijent otpora pri nultom napadnom uglu (osnosimetrično opstrujavanje)

$C_{D\sigma^2}$ - aerodinamički koeficijent indukovanih otpora



Koeficijent otpora za razne oblike tijela

KOEFIČIJENT OTPORA PRI NULTOM NAPADNOM UGLU

Predviđanje sile otpora pri nultom napadnom uglu za osnosimetričnu brzorotirajuću konfiguraciju projektila

Pri osnosimetričnom opstrujavanju, aerodinamički koeficijent otpora pri nultom napadnom uglu jednak je aerodinamičkom koeficijentu aksijalne sile

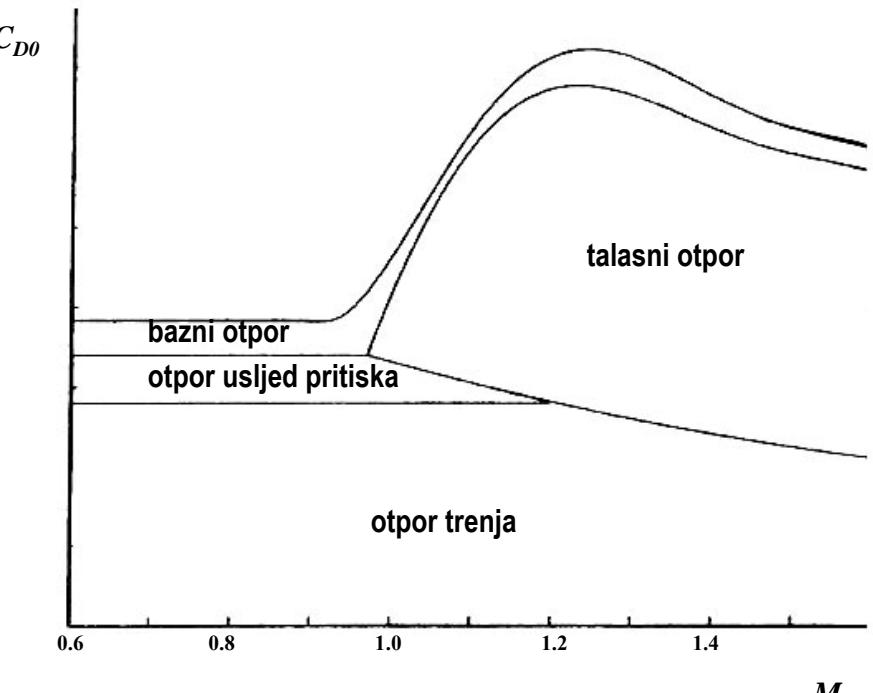
$$C_{D0} = C_{Dp} + C_{Df} + C_{Db} = C_A$$

C_{D0} - aerodinamički koeficijent otpora
pri nultom napadnom uglu (C_A)

C_{Dp} - aerodinamički koeficijent otpora
uslijed pritiska (C_{Ap})

C_{Df} - aerodinamički koeficijent otpora
uslijed trenja (C_{Af})

C_{Db} - aerodinamički koeficijent otpora
dna projektila (C_{Ab})

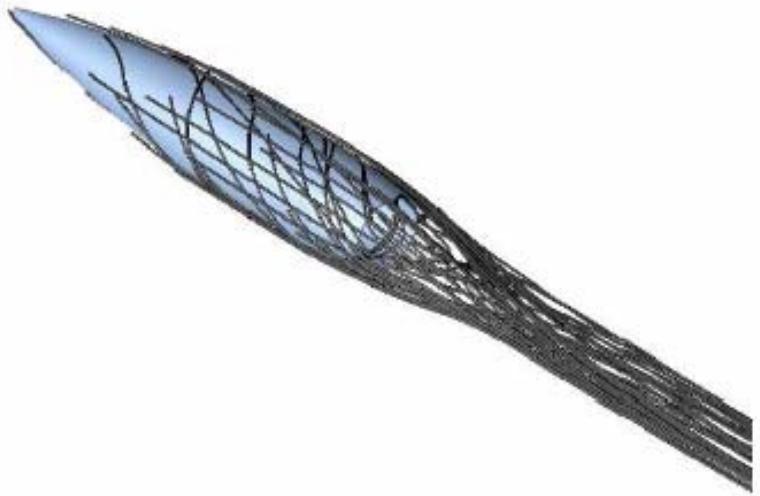


Udio pojedinih komponenata u koeficijentu otpora

SUBSONIČNO OPSTRUJAVANJE

Predviđanje sile otpora pri nultom napadnom uglu za osnosimetričnu brzorotirajuću konfiguraciju projektila

- ◆ Subsonično područje ($M < 0.8$)
(u svakoj tački $M < 1$, glatke strujnice)
 - Dominantna komponenta otpora trenja



Strujnice oko osnosimetričnog brzorotirajućeg projektila
pri subsoničnom opstrujavanju

Raspodjela pritiska oko brzorotirajućeg projektila
pri subsoničnom opstrujavanju

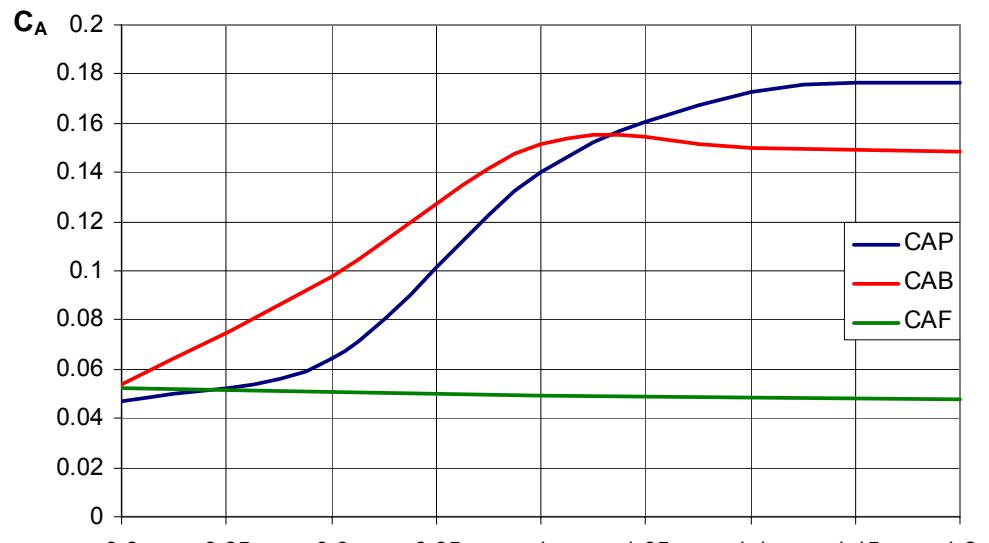
TRANSONIČNO OPSTRUJAVANJE

Predviđanje sile otpora pri nultom napadnom uglu za osnosimetričnu brzorotirajuću konfiguraciju projektila

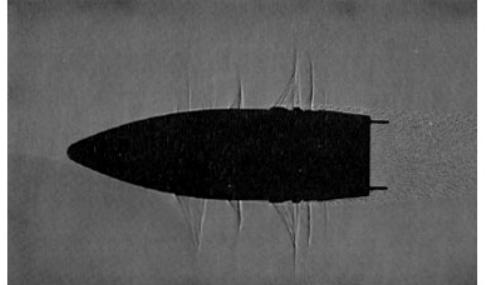
◆ Transonično područje ($0.8 < M < 1.2$)

(miješana subsonično-supersonična područja, udarni talasi)

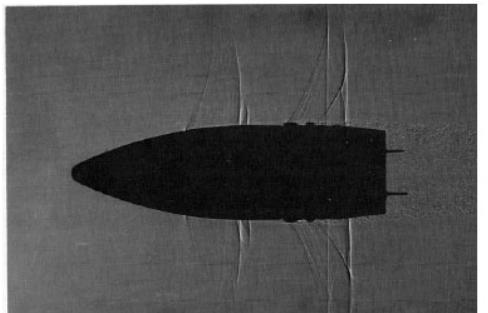
- Nagli porast komponente otpora nastale uslijed pritiska
- Nagli porast otpora dna u području niže transonike



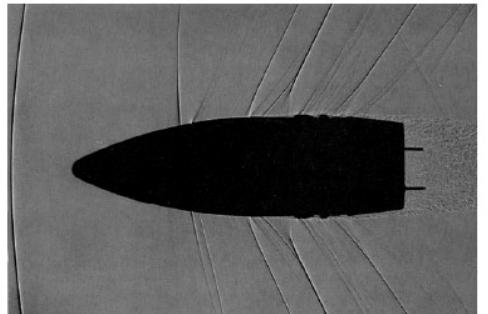
Komponente koeficijenta otpora pri transoničnim brzinama



$M = 0.89$



$M = 0.91$



$M = 1.06$

Transonično opstrujavanje

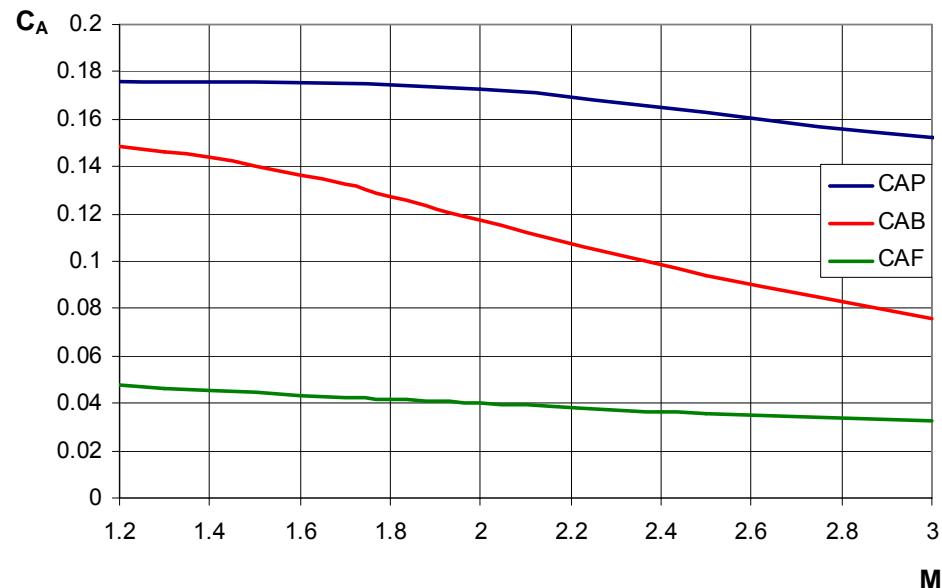
SUPPERSONIČNO OPSTRUJAVANJE

Predviđanje sile otpora pri nultom napadnom uglu za osnosimetričnu brzorotirajuću konfiguraciju projektila

◆ Supersonično područje

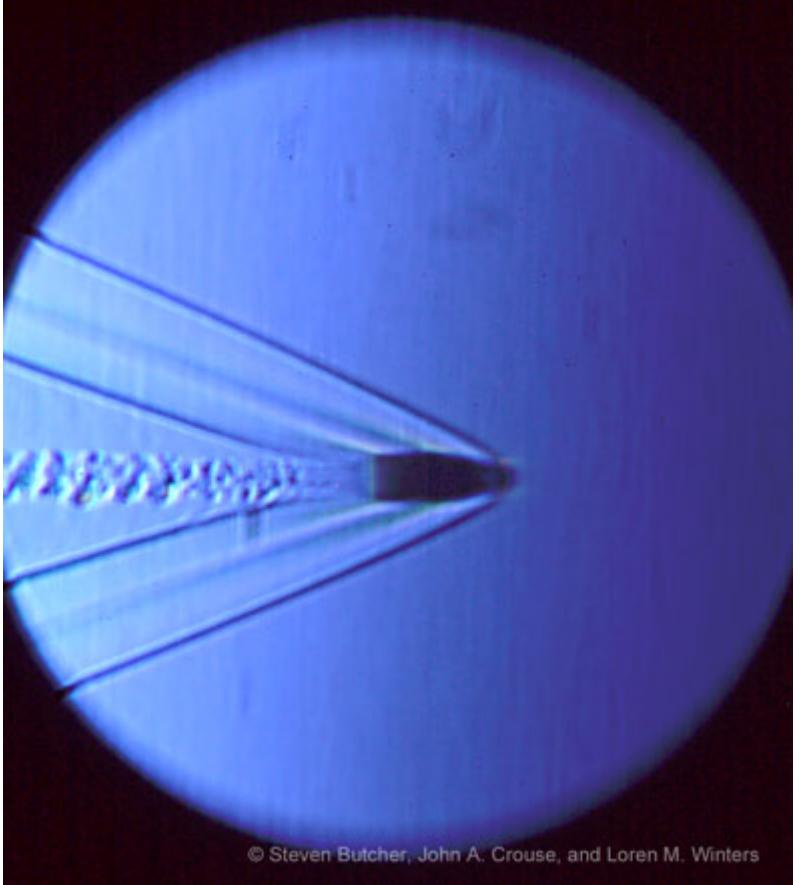
(u svakoj tački $M > 1$, svojstva strujanja i strujnica se mijanjaju skokovito)

- Postepeni pad vrijednosti svih komponenata



Komponente koeficijenta otpora pri supersoničnim brzinama

Sabina Serdarević-Kadić



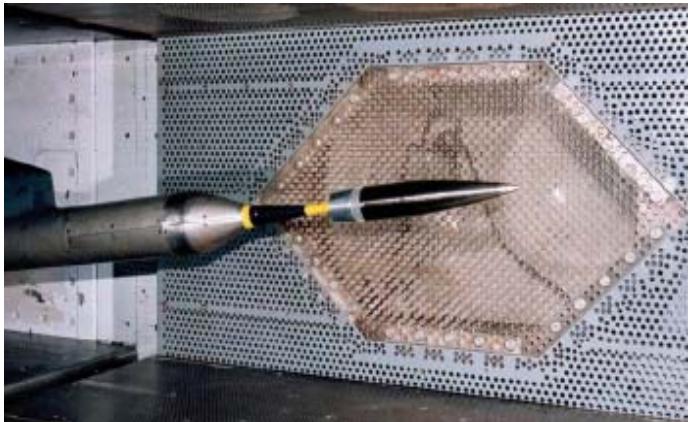
Supersonično opstrujavanje

METODE

Predviđanje sile otpora pri nultom napadnom uglu za osnosimetričnu brzorotirajuću konfiguraciju projektila

◆ Eksperimentalne metode

- Aero tunel
 - Skaliran model
 - Mjeri se sila



• Poligon

- Model u prirodnoj veličini
- Približno ravna putanja
- Mjere se brzina, ugaona brzina, skretanja itd. u više mjernih stanica duž putanje
- Modelom 6DOF ili MMPPM određuju se aerodinamički koeficijenti



METODE

Predviđanje sile otpora pri nultom napadnom uglu za osnosimetričnu brzorotirajuću konfiguraciju projektila

- ◆ Teoretske metode zasnivaju se na primjeni jednačina koje opisuju tok vazduha oko projektila:

$$\operatorname{div}(\rho \vec{V}) = 0$$

$$\rho \frac{d\vec{V}}{dt} = -\operatorname{grad} p$$

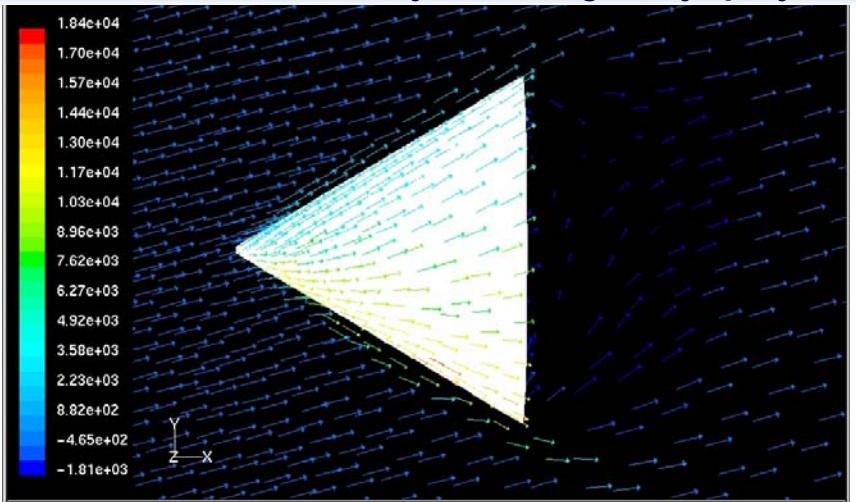
$$p\rho^{-\gamma} = \text{const.}$$

- ◆ Iz ovih jednačina dobivamo parcijalnu diferencijalnu jednačinu potencijala poremećene brzine.
- ◆ Zavisno od brzine opstrujavanja, koriste se različite metode za rješavanje parcijalne diferencijalne jednačine potencijala brzine u cilju određivanja komponenata lokalne brzine u svakoj tački na površini tijela.
- ◆ U teoretskim metodama neophodno je:
 - pojednostaviti geometriju
 - pojednostaviti jednačine

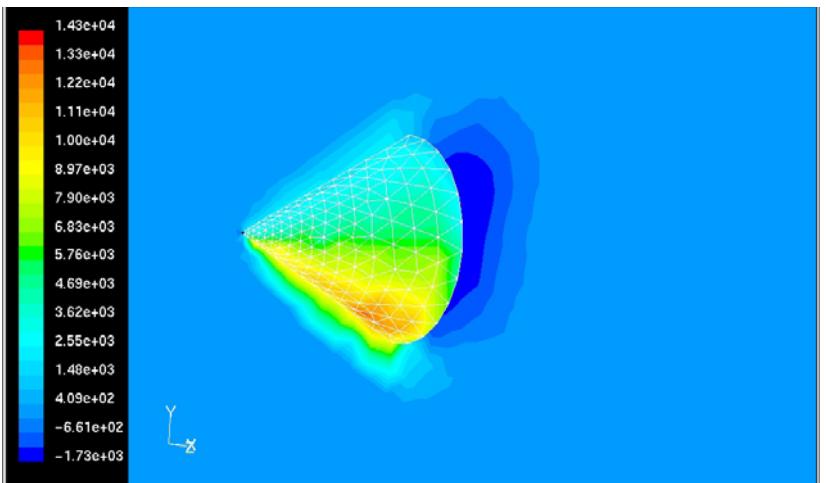
METODE

Predviđanje sile otpora pri nultom napadnom uglu za osnosimetričnu brzorotirajuću konfiguraciju projektila

- ◆ Numeričke metode (CFD)
 - numerički rješavaju Navier-Stokes-ove jednačine
 - prikazuju kompletno polje toka oko objekta za specifične uslove leta
 - nema pojednostavljenja geometrije



Polje brzina toka oko konusa pri $M = 3$ i napadnom uglu 15°



Raspored pritiska na konusu pri $M = 3$ i napadnom uglu 15°

METODE

Predviđanje sile otpora pri nultom napadnom uglu za osnosimetričnu brzorotirajuću konfiguraciju projektila

- ◆ Kombinovane metode predstavljaju kompilaciju empirijskih podataka i podataka iz tunela kombinovanih sa kompjuterskim modelima teorijskih jednačina
 - Programski paketi zasnovani na kombinovanim metodama:
 - Prodas
 - Missile DATCOM
 - Aeroprediction Code
 - Body
 - MCDrag

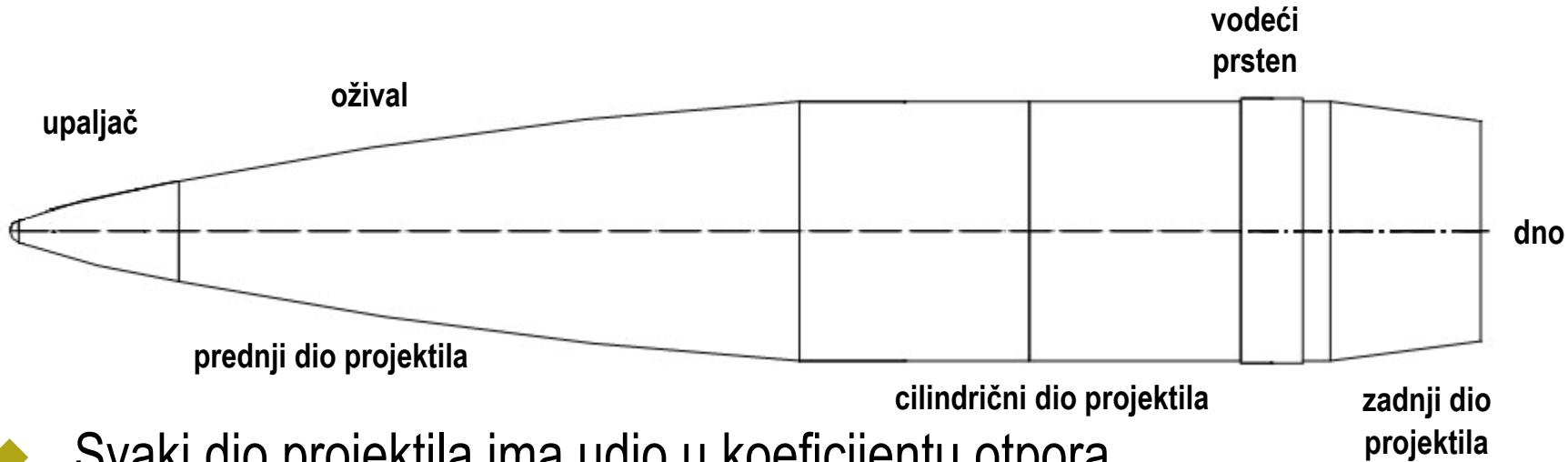
Koeficijent	Aero tunel	Poligon	Prodas
otpor	5 – 10%	0 - 2%	3 – 6%

Greška pri određivanju aerodinamičkog koeficijenta otpora za $M = 1.5$

POSTAVKA

Predviđanje sile otpora pri nultom napadnom uglu za osnosimetričnu brzorotirajuću konfiguraciju projektila

- ◆ Strujanje je osnosimetrično



- ◆ Svaki dio projektila ima udio u koeficijentu otpora

$$C_{D0} = C_{Dpn} + C_{Dpbt} + C_{Dprb} + C_{Df} + C_{Db}$$

C_{Dpn} - aerodinamički koeficijent otpora prednjeg dijela uslijed pritiska (C_{AN})

C_{Dpbt} - aerodinamički koeficijent otpora zadnjeg dijela uslijed pritiska (C_{AA})

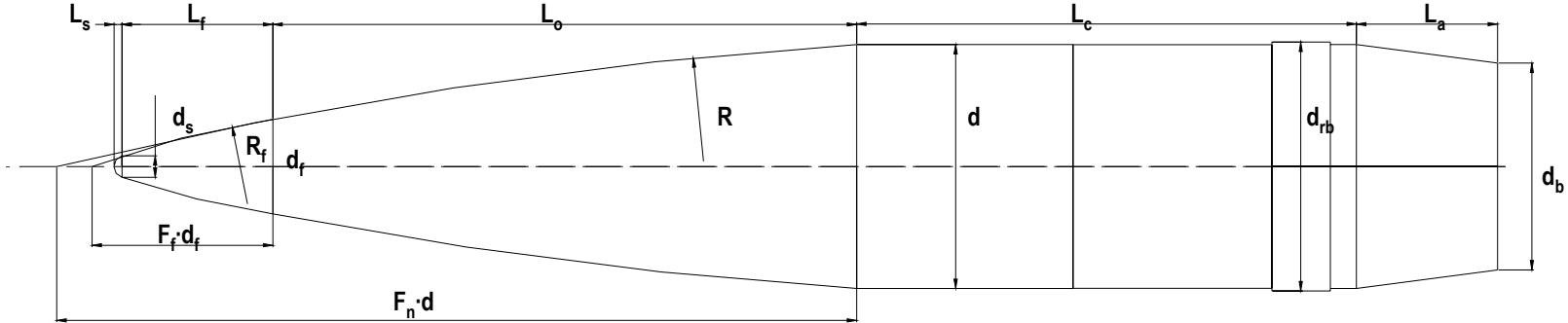
C_{Dprb} - aerodinamički koeficijent otpora vodećeg prstena uslijed pritiska (C_{ARB})

C_{Df} - aerodinamički koeficijent otpora trenja (C_{AF})

C_{Db} - aerodinamički koeficijent otpora dna (C_{AB})

NOMENKLATURA

Predviđanje sile otpora pri nultom napadnom uglu za osnosimetričnu brzorotirajuću konfiguraciju projektila



d – kalibar projektila

d_s – prečnik zaobljenja ili zatupljenja vrha

d_f – prečnik baze upaljača

d_{rb} – prečnik vodećeg prstena

d_b – prečnik dna projektila

d_p – prečnik fiktivnog cilindra koji tangira ožival

R_f – radijus oživala upaljača

R – radijus oživala prednjeg dijela

L – dužina projektila

L_s – dužina zaobljenja na vrhu

L_f – dužina upaljača

L_o – dužina oživala prednjeg dijela

L_c – dužina cilindričnog dijela

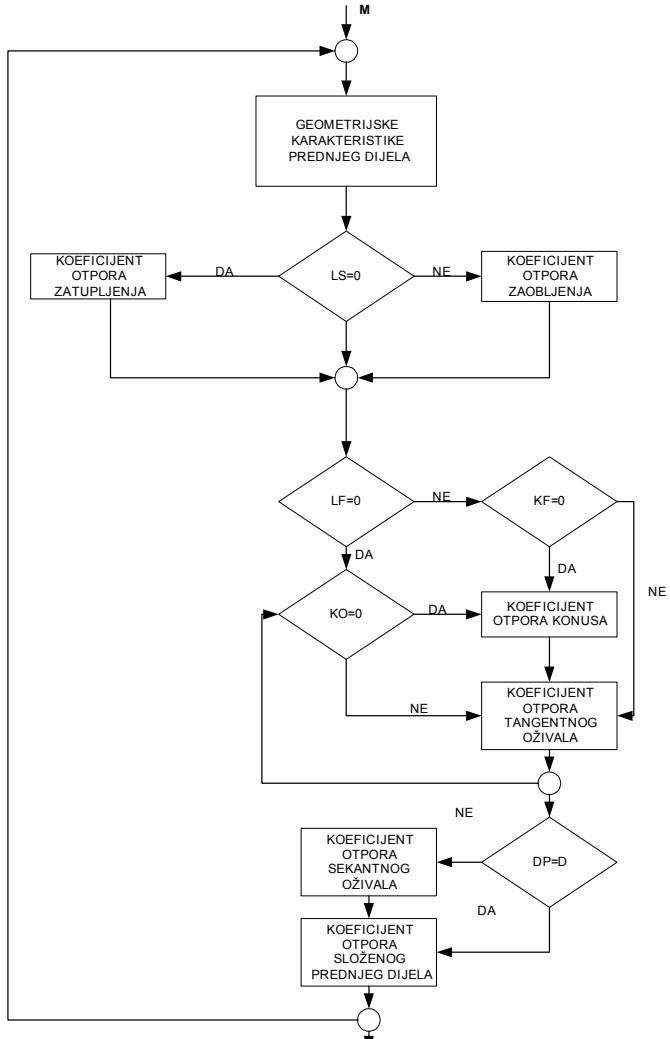
L_a – dužina zadnjeg dijela

F_f – vitkost upaljača

F_n – vitkost prednjeg oživala

PREDNJI DIO

Predviđanje sile otpora pri nultom napadnom uglu za osnosimetričnu brzorotirajuću konfiguraciju projektila



Blok dijagram modula za proračun otpora prednjeg dijela

- ◆ Prednji dio projektila:
 - upaljač
 - adapter
 - ožival ili konus



Razni oblici upaljača

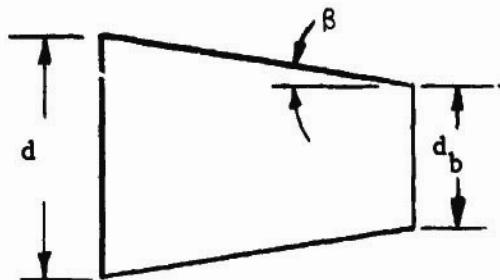
ZADNJI DIO PROJEKtilA

Predviđanje sile otpora pri nultom napadnom uglu za osnosimetričnu brzorotirajuću konfiguraciju projektila

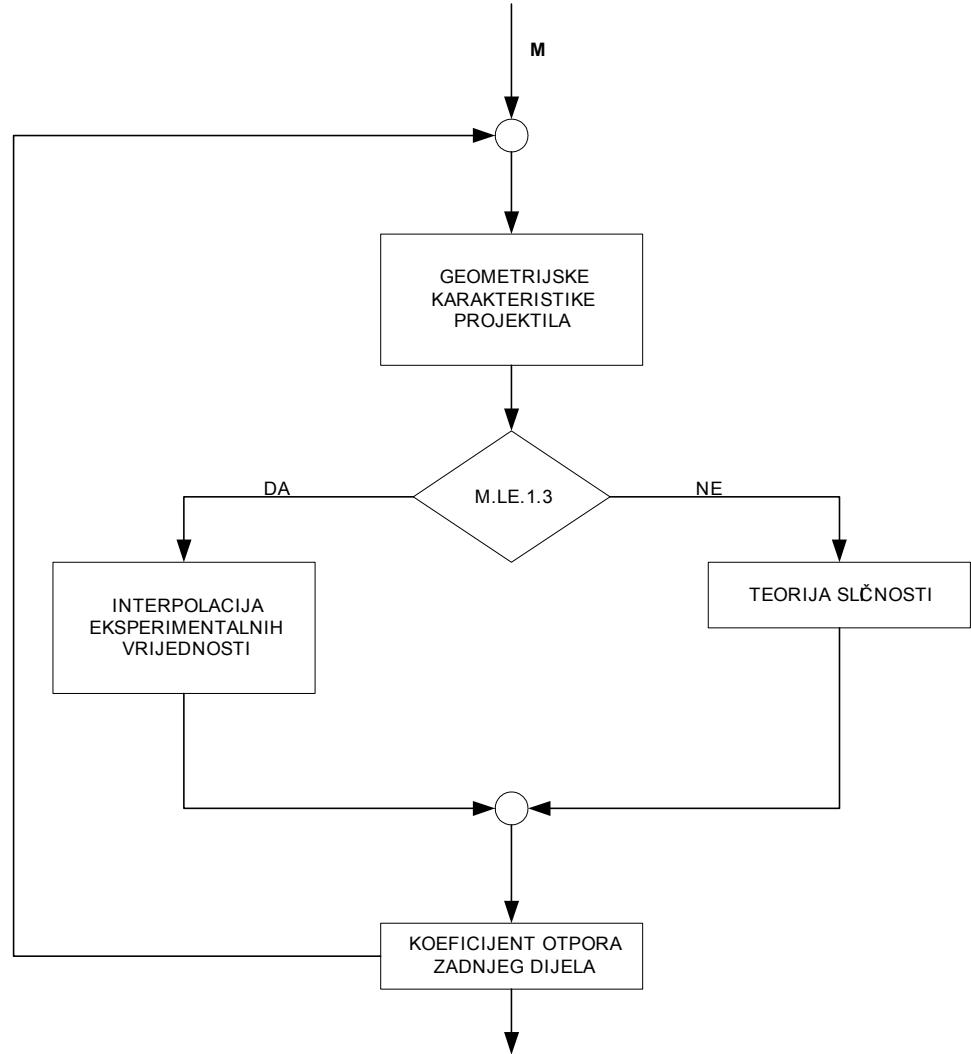
◆ Oblik zadnjeg dijela:

- Zarobljeni konus (najčešće)
- Zarobljeni ožival
- Divergentni konus

◆ Konusni zadnji dio je potpuno definisan sa uglom zadnjeg konusa β i odnosom d_b/d



Zadnji dio projektila konusnog oblika



Blok dijagram modula za proračun otpora zadnjeg dijela

VODEĆI PRSTEN

Predviđanje sile otpora pri nultom napadnom uglu za osnosimetričnu brzorotirajuću konfiguraciju projektila

Vodeći prsten:

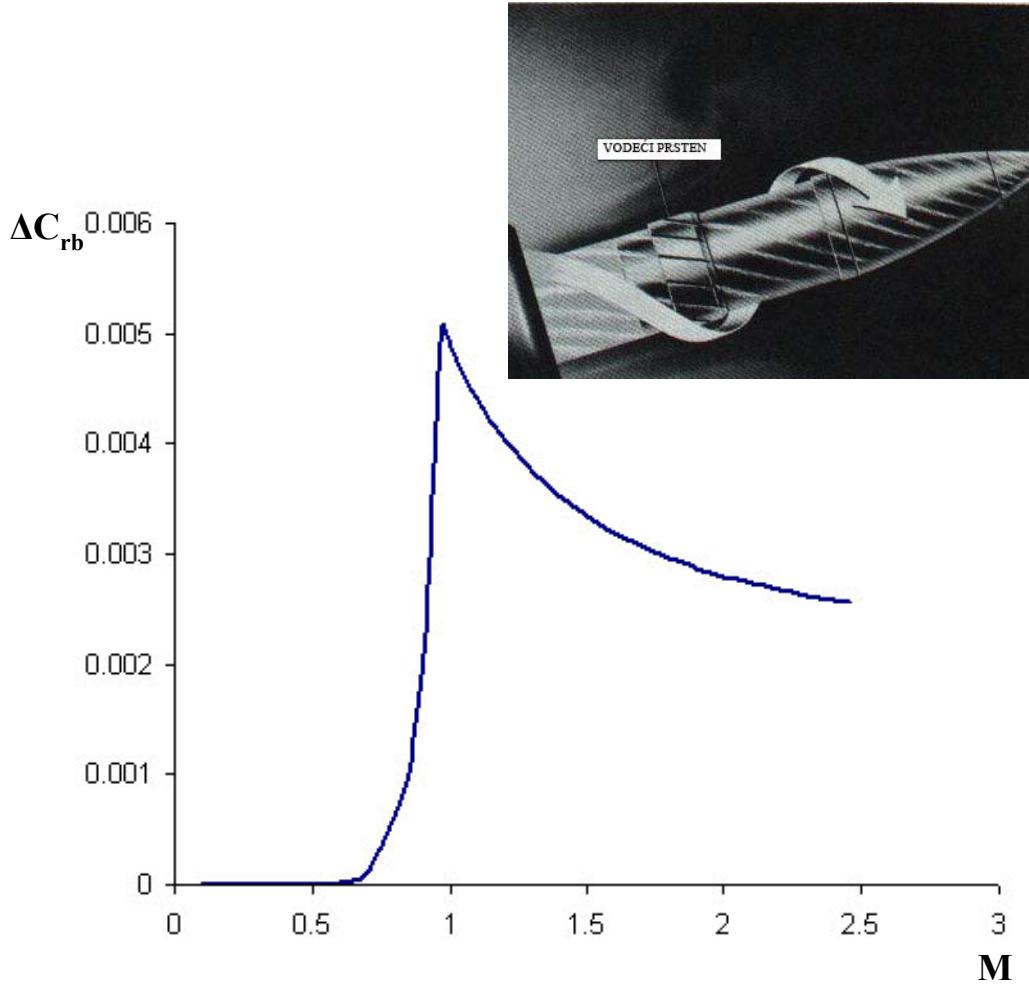
- je smješten pri kraju cilindričnog dijela, i
- urezuje se u zavojne žljebove cijevi oruđa

Namjena vodećeg prstena:

- obezbjediti dovoljnu početnu ugaonu brzinu neophodnu za stabilan let projektila

Aerodinamički koeficijent vodećeg prstena određuje se pomoću izraza:

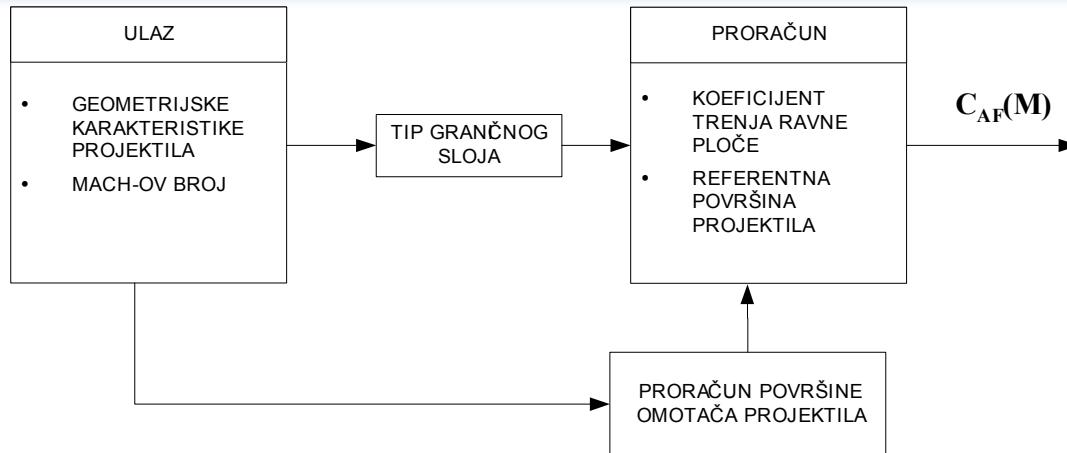
$$C_{ARB} = \Delta C_{rb} \cdot \frac{d_{RB} - d}{0.02}$$



Priraštaj aksijalne sile za visinu vodećeg prstena od 0.01 kalibar

TRENJE

Predviđanje sile otpora pri nultom napadnom uglu za osnosimetričnu brzorotirajuću konfiguraciju projektila



Blok dijagram modula za proračun otpora trenja

- ◆ Koeficijent aksijalne sile uslijed trenja se određuje pomoću relacije:

$$C_{ASF} = c_{Af} \cdot \frac{S_{wet}}{S_{ref}}$$

pri čemu je:

C_{ASF} - koeficijent otpora trenja projektila

c_{Af} - koeficijent otpora trenja za glatku ravnu ploču

S_{wet} - površina omotača projektila

S_{ref} - referentna površina (površina kruga prečnika kalibra)

TRENJE

Predviđanje sile otpora pri nultom napadnom uglu za osnosimetričnu brzorotirajuću konfiguraciju projektila

◆ Laminarni granični sloj

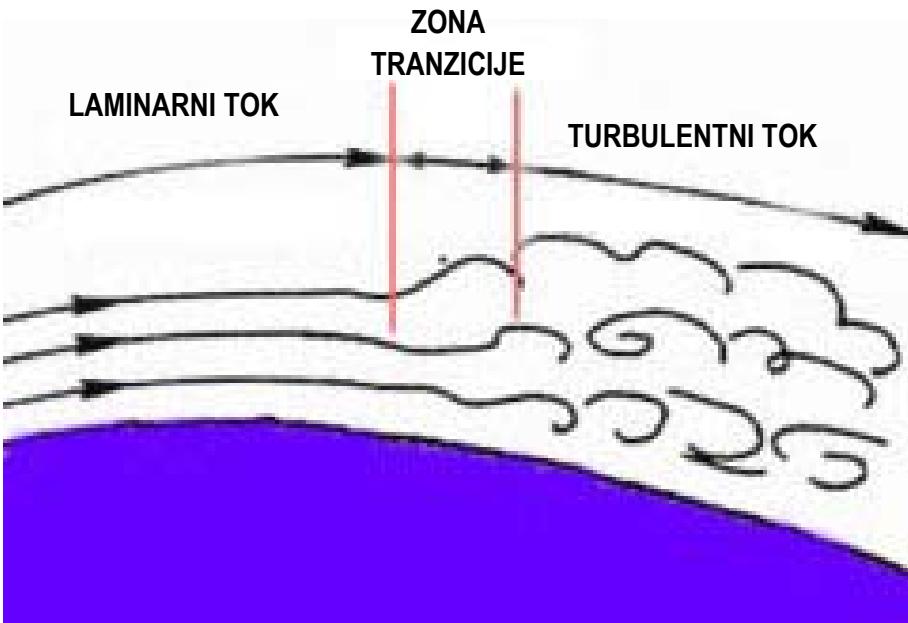
$$c_{AfL} = \frac{1.328}{\sqrt{\text{Re}_l}} (1 + 0.12 \cdot M^2)^{-0.12}$$

◆ Turbulentni granični sloj

$$c_{AfT} = \frac{0.455}{(\log_{10} \text{Re}_l)^{2.58}} (1 + 0.21 \cdot M^2)^{-0.32}$$

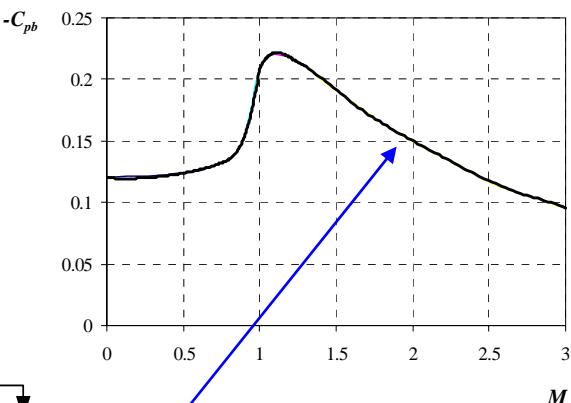
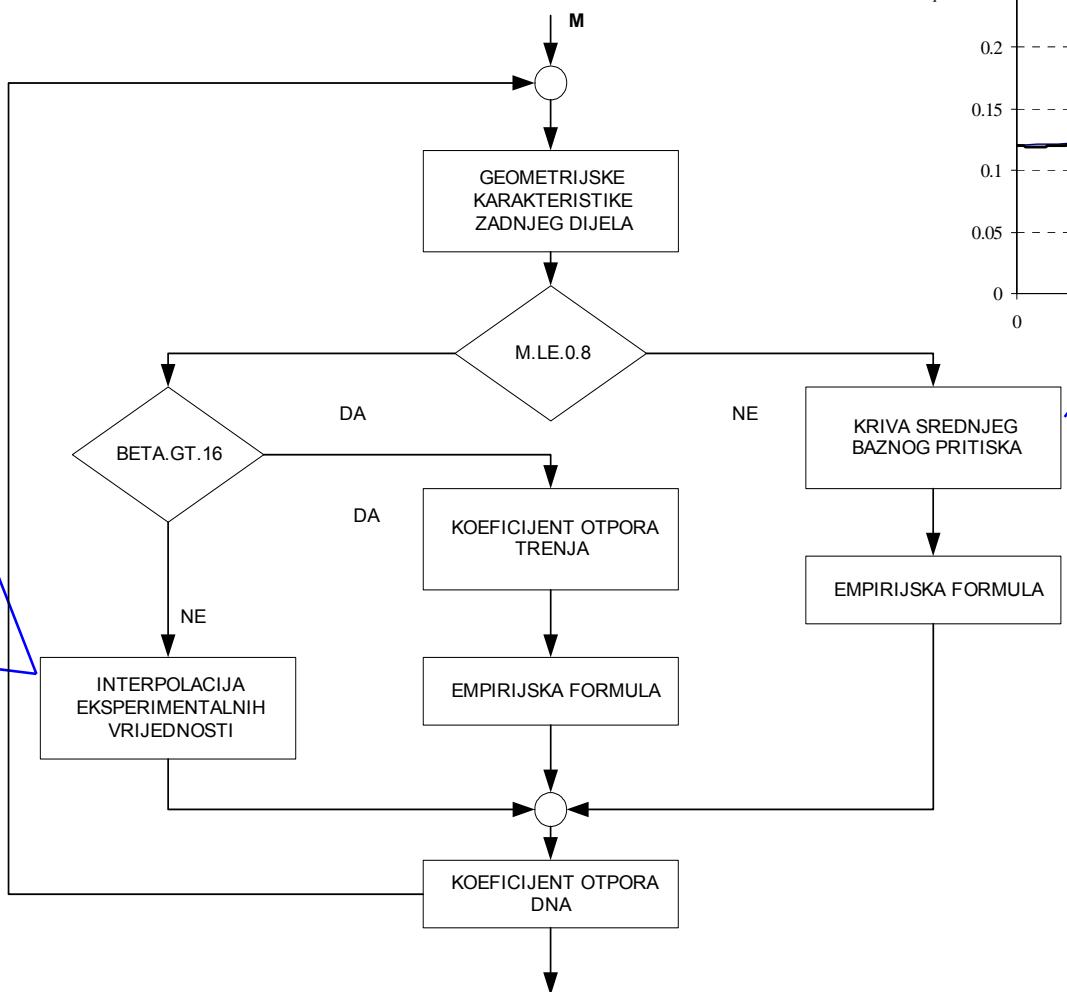
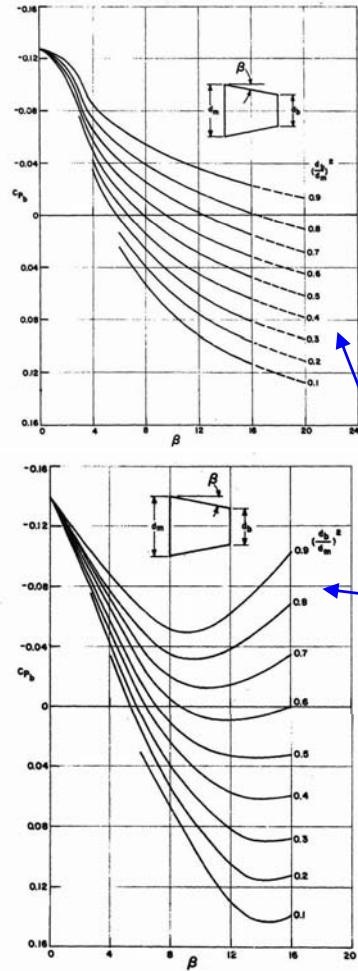
◆ Položaj tačke prelaza zavisi od:

- Reynolds-ovog broja
- Mach-ovog broja
- raspodjele pritiska
- hrapavosti površine itd.



DNO

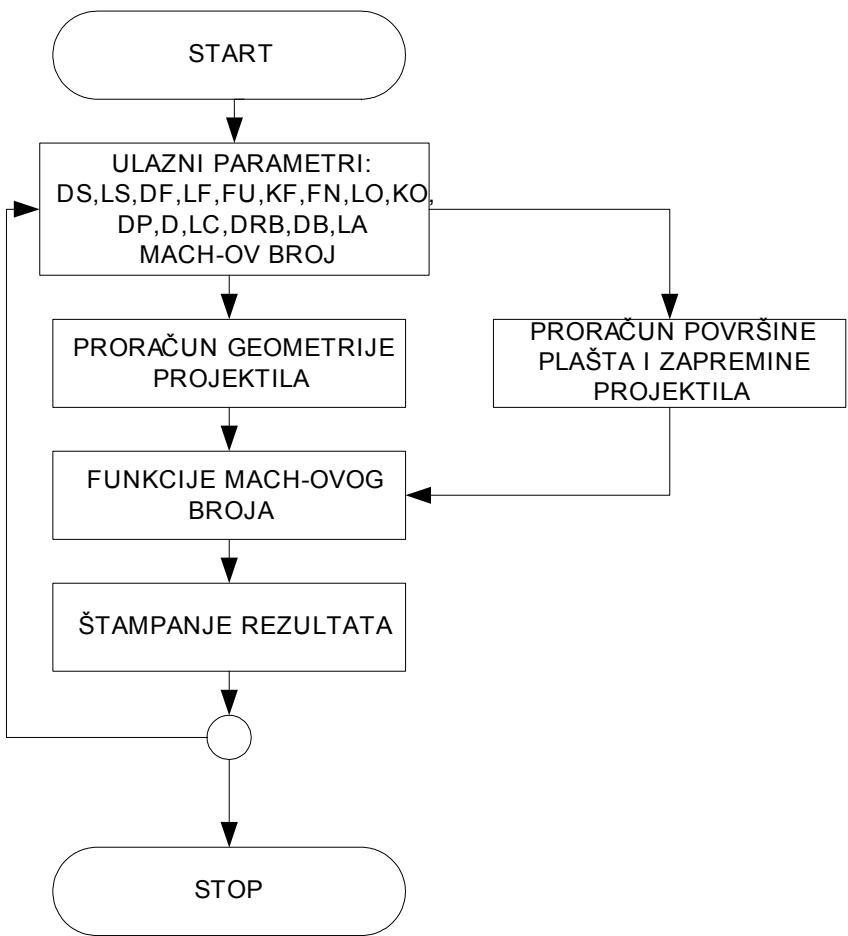
Predviđanje sile otpora pri nultom napadnom uglu za osnosimetričnu brzorotirajuću konfiguraciju projektila



Blok dijagram modula za proračun otpora dna

MODEL OTPOR

Predviđanje sile otpora pri nultom napadnom uglu za osnosimetričnu brzorotirajuću konfiguraciju projektila



◆ Model OTPOR

- Modul za proračun aerodinamičkog koeficijenta otpora prednjeg dijela
- Modul za proračun aerodinamičkog koeficijenta otpora zadnjeg dijela
- Modul za proračun aerodinamičkog koeficijenta otpora vodećeg prstena
- Modul za proračun aerodinamičkog koeficijenta otpora dna
- Modul za proračun aerodinamičkog koeficijenta otpora trenja

Blok dijagram modela OTPOR

TESTIRANJE

Predviđanje sile otpora pri nultom napadnom uglu za osnosimetričnu brzorotirajuću konfiguraciju projektila

- ◆ Testirano je pet osnosimetričnih projektila koji se razlikuju po kalibru i obliku.
- ◆ Za potrebe testiranja napravljen je fortranski program koji se zasniva na modelu OTPOR.
- ◆ U ulaznu datoteku upisuju se geometrijske karakteristike projektila i vrijednost Mach-ovih brojeva za koje se vrši proračun.
- ◆ U izlaznoj datoteci su pregledno ispisane vrijednosti koeficijenta otpora i njegovih komponenti u zavisnosti od Mach-ovog broja.

```

Impaq Visual Fortran - [CONFIG.dat]
Build Tools Window Help
File Project Solution XPC
1
0.0076232 DRB
0.001524.0. DS, LS
0.001524.0. DF, LF, KE, FU
2.0816, 0.0140716, 13.1234, 0.00908 FN, LO, KO, DP
0.0076232, 0.009677 D, LC
0.00643, 0.004394 DB, LA
0.547 XV
19
0.4, 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, 2.2, 2.5, 3.0
7.62mm M80

```

Primjer ulazne datoteke CONFIG.DAT za projektil 7.62mm M789

```

Impaq Visual Fortran - [AERO.TAB]
Build Tools Window Help
File Project Solution XPC
OTPOR

DS=0.002  LS=0.000
DF=0.002  LF=0.000  1/RF=0.000  FU=0.000
FN=2.082  LO=0.014  1/RO= 13.1234
D =0.008  LC=0.010
DRB =0.008
DB=0.006  LA=0.004
LE=0.028

PE=12.19

MA      CA0      CAN      CAA      CAF      CAB      CARB
0.400   0.180   0.0323   0.0389   0.0697   0.0396   0.0000
0.500   0.178   0.0322   0.0389   0.0663   0.0406   0.0000
0.600   0.186   0.0417   0.0389   0.0636   0.0414   0.0000
0.700   0.191   0.0487   0.0385   0.0614   0.0421   0.0000
0.800   0.204   0.0597   0.0417   0.0595   0.0428   0.0000
0.900   0.290   0.1042   0.0550   0.0577   0.0734   0.0000
1.000   0.456   0.1942   0.0919   0.0561   0.1140   0.0000
1.100   0.496   0.2451   0.0833   0.0547   0.1132   0.0000
1.200   0.491   0.2492   0.0765   0.0533   0.1120   0.0000
1.300   0.480   0.2453   0.0722   0.0520   0.1104   0.0000
1.400   0.456   0.2309   0.0663   0.0508   0.1083   0.0000
1.500   0.443   0.2264   0.0614   0.0496   0.1057   0.0000

```

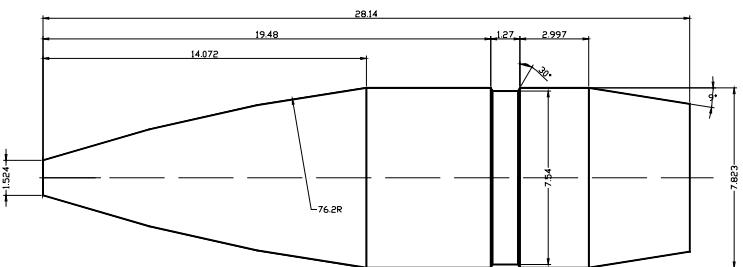
Primjer izlazne datoteke AERO.TAB za projektil 7.62mm M789

REZULTATI

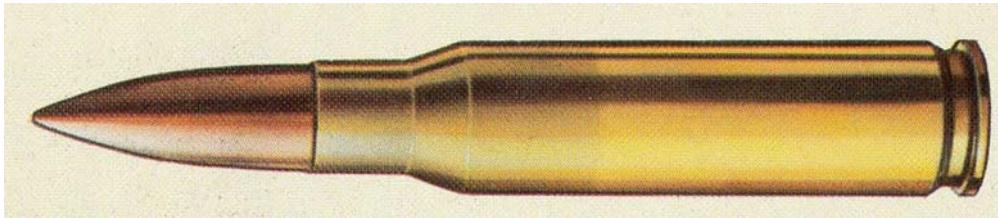
Predviđanje sile otpora pri nultom napadnom ugлу za osnosimetričnu brzorotirajuću konfiguraciju projektila

◆ 7.62 mm M80

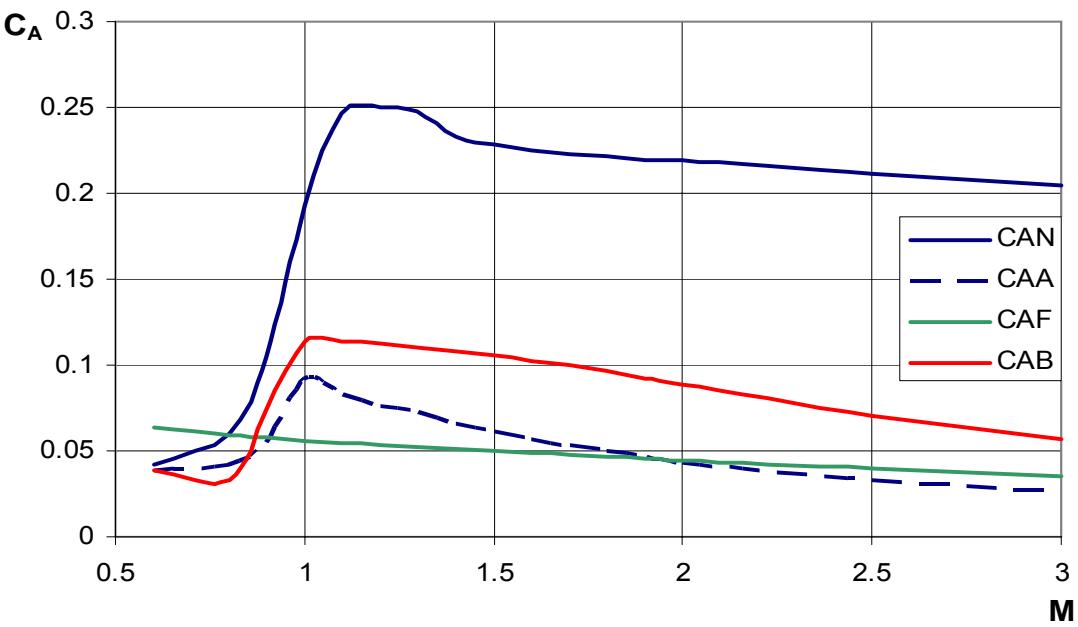
- Prednji dio kompaktan, oblika sekantnog oživala
- Nema vodećeg prstena
- Zadnji dio konusnog oblika



Geometrijske karakteristike projektila 7.62 mm M80



Municija 7.62 mm M80



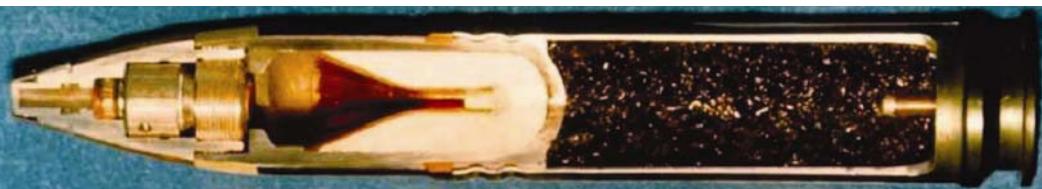
Komponente aerodinamičkog koeficijenta otpora za projektil 7.62 mm M80 određene modelom OTPOR

REZULTATI

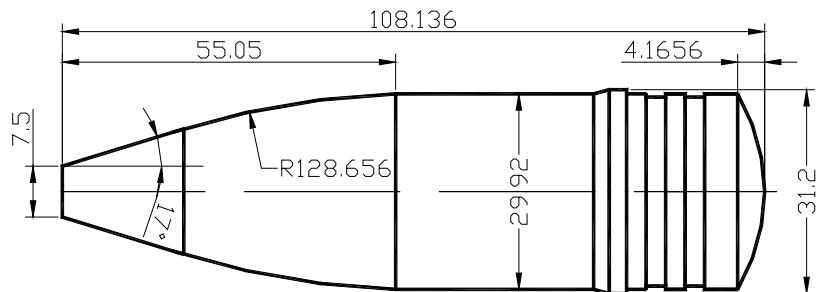
Predviđanje sile otpora pri nultom napadnom ugлу za osnosimetričnu brzorotirajuću konfiguraciju projektila

◆ 30 mm M789

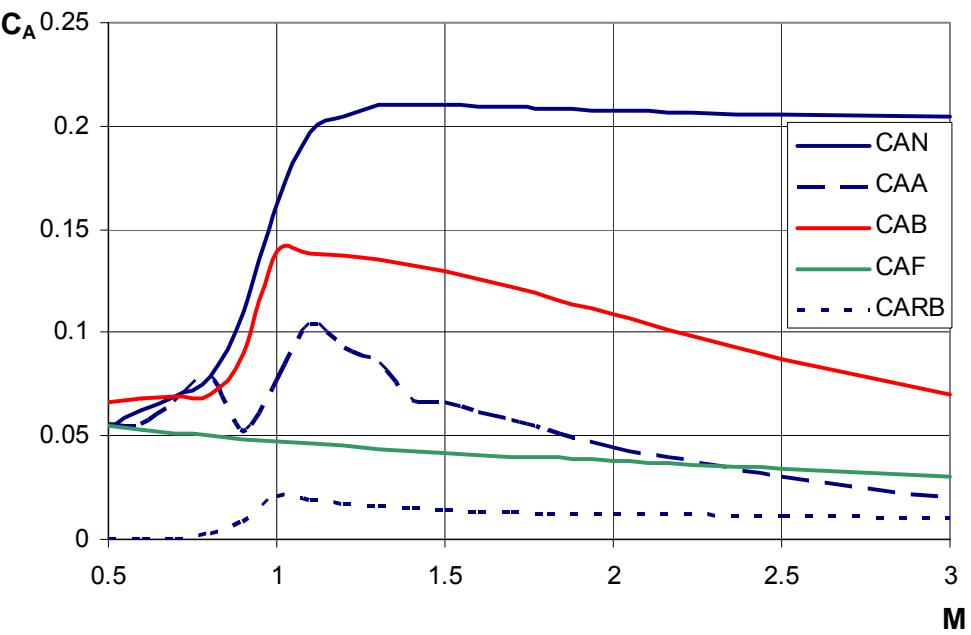
- Prednji dio složenog oblika
- Upaljač oblika zarubljenog konusa
- Nema zadnji dio



Municija 30mm M789



Geometrijske karakteristike projektila 30mm M789



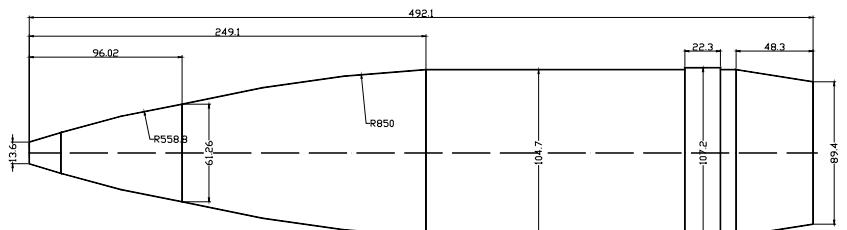
Komponente aerodinamičkog koeficijenta otpora za projektil
30 mm M789 određene modelom OTPOR

REZULTATI

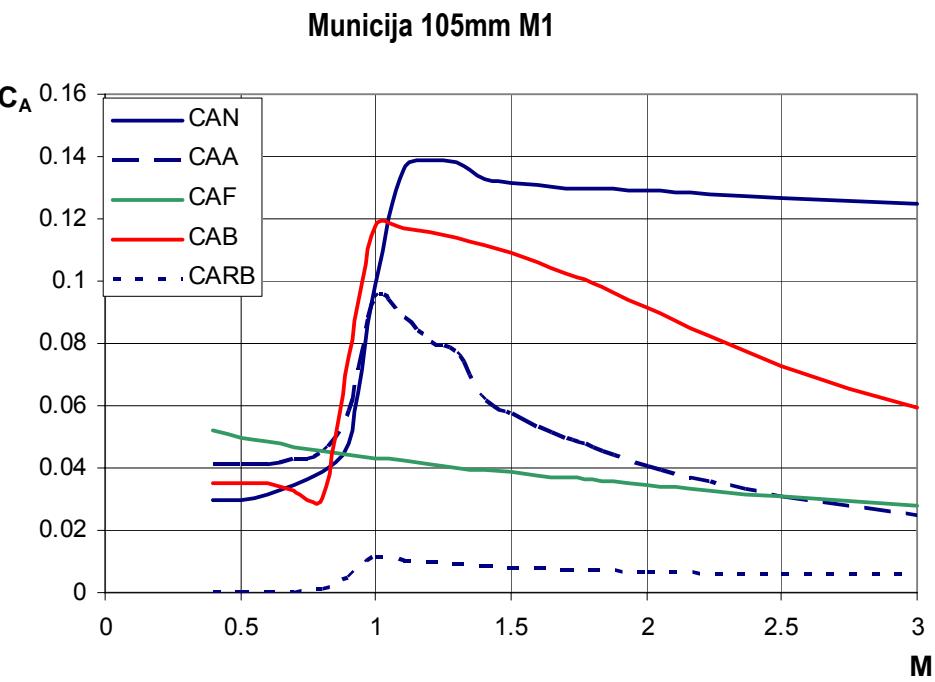
Predviđanje sile otpora pri nultom napadnom ugлу za osnosimetričnu brzorotirajuću konfiguraciju projektila

◆ 105 mm M1

- Prednji dio složenog oblika
- Upaljač oblika zarubljenog oživila
- Vodeći prsten
- Zadnji dio konusnog oblika



Geometrijske karakteristike projektila 105mm M1



Komponente aerodinamičkog koeficijenta otpora za projektil 105 mm M1 određene modelom OTPOR

REZULTATI

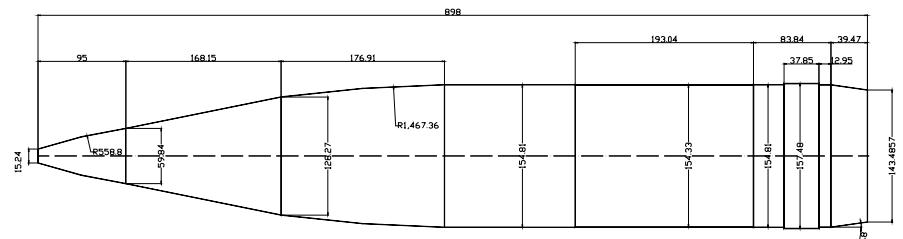
Predviđanje sile otpora pri nultom napadnom ugлу za osnosimetričnu brzorotirajuću konfiguraciju projektila

◆ 155 mm M483A1

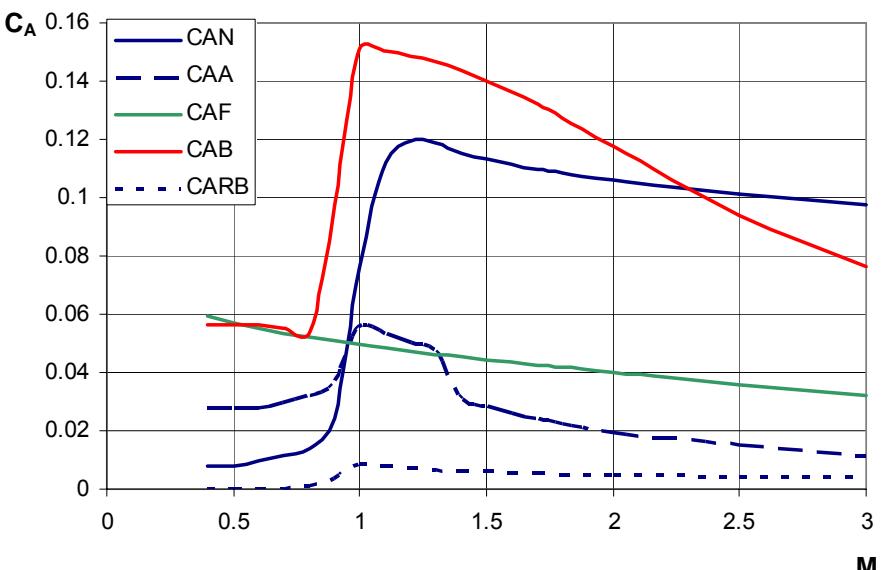
- Prednji dio složenog oblika
- Upaljač oblika zarubljenog oživila
- Adapter konusnog oblika
- Kraći zadnji dio oblika konusa



Projektil 155mm M483A1



Geometrijske karakteristike projektila 155mm M483A1

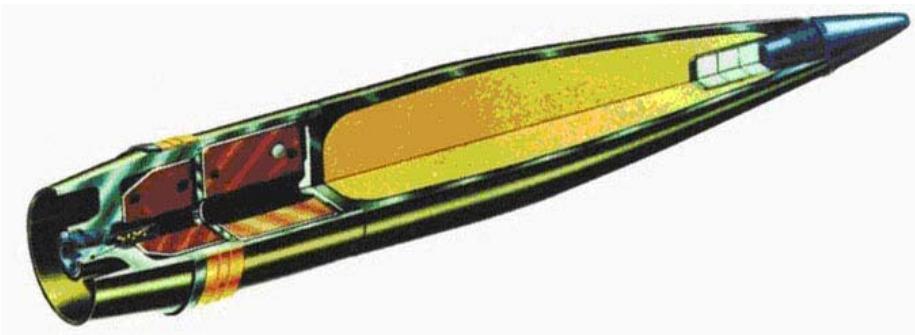


REZULTATI

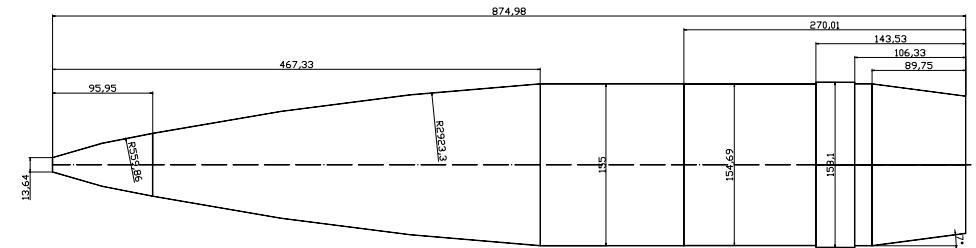
Predviđanje sile otpora pri nultom napadnom ugлу za osnosimetričnu brzorotirajuću konfiguraciju projektila

◆ 155 mm M549

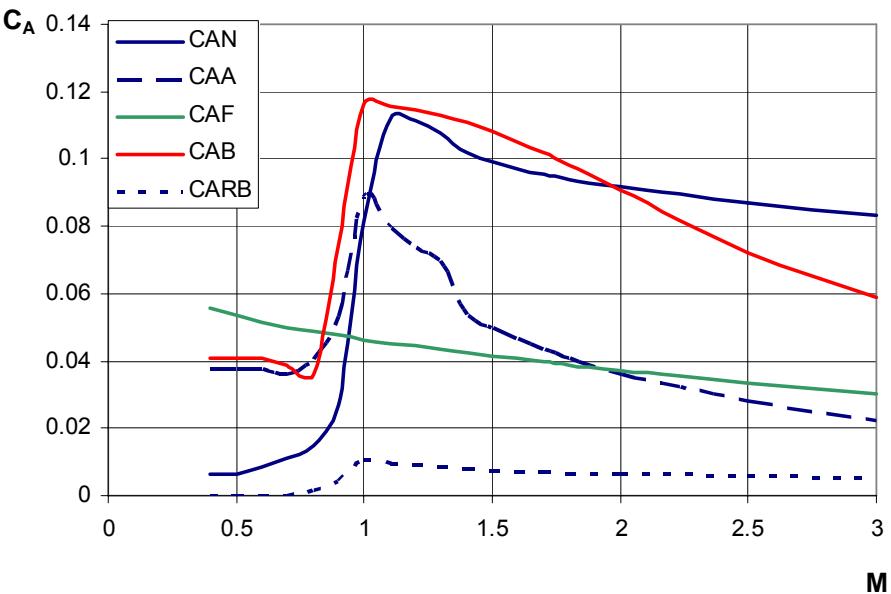
- Prednji dio složenog oblika
- Veća vitkost prednjeg dijela
- Upaljač oblika zarubljenog oživala
- Zadnji dio konusnog oblika



Projektil 155mm M549



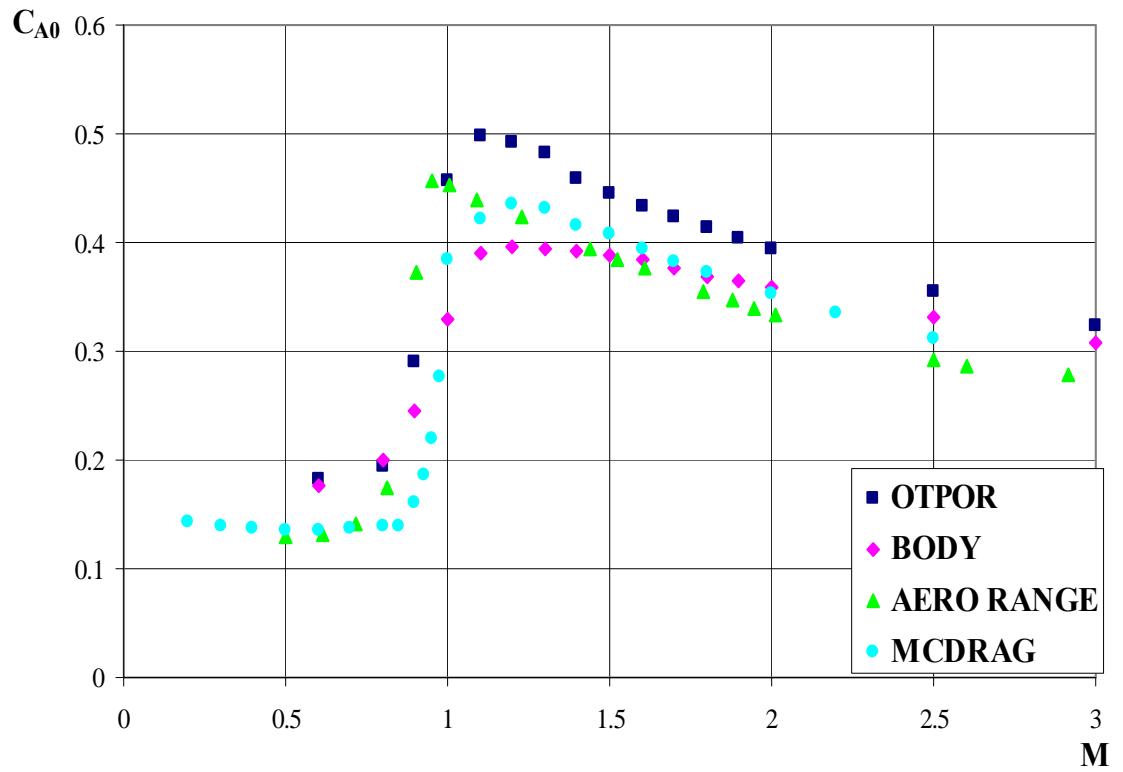
Geometrijske karakteristike projektila 155mm M549



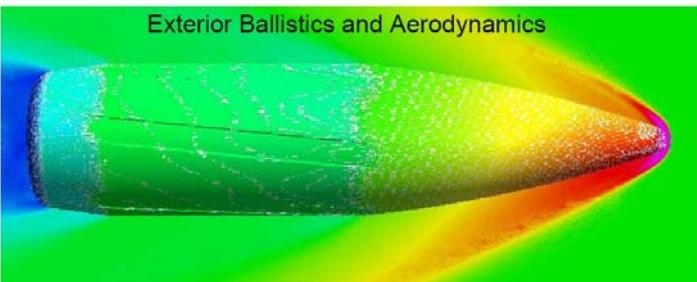
Komponente aerodinamičkog koeficijenta otpora za projektil 155 mm M549 određene modelom OTPOR

POREĐENJE

Predviđanje sile otpora pri nultom napadnom uglu za osnosimetričnu brzorotirajuću konfiguraciju projektila



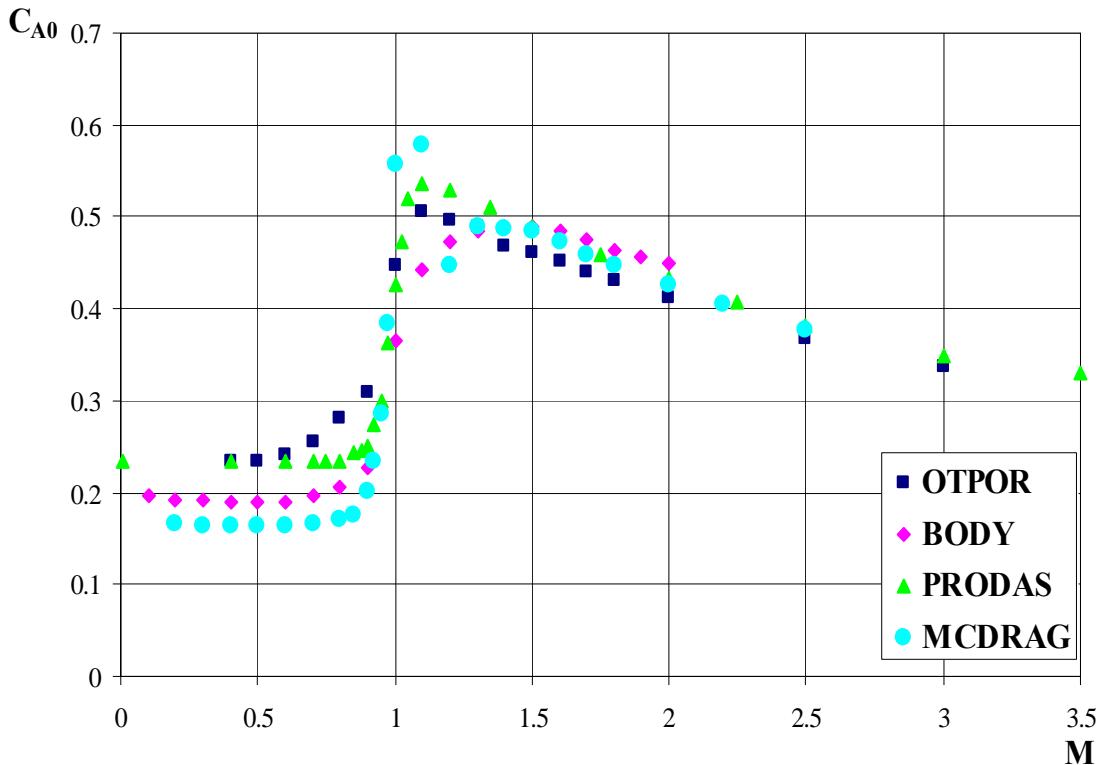
Koeficijent otpora pri nultom napadnom uglu za projektil 7.62mm M80



- ◆ Dobro slaganje u području niže transonike
- ◆ Pri subsoničnim i supersoničnim Mach-ovim brojevima dobivene veće vrijednosti
- ◆ Model primjenjiv za preliminarnu analizu projektila malog kalibra

POREĐENJE

Predviđanje sile otpora pri nultom napadnom ugлу za osnosimetričnu brzorotirajuću konfiguraciju projektila

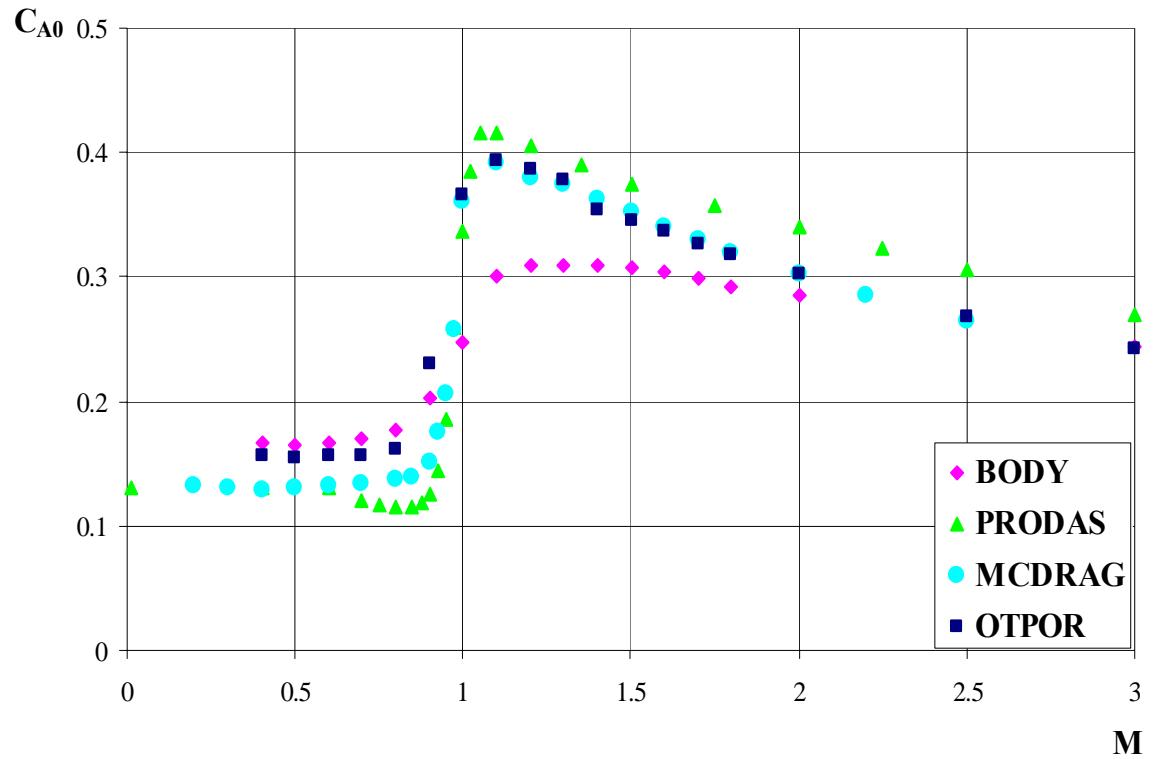


- ◆ Dobro slaganje sa rezultatima PRODAS-a
- ◆ Odstupanja u granicama očekivanog

Koeficijent otpora pri nultom napadnom ugлу za projektil 30mm M789

POREĐENJE

Predviđanje sile otpora pri nultom napadnom uglu za osnosimetričnu brzorotirajuću konfiguraciju projektila

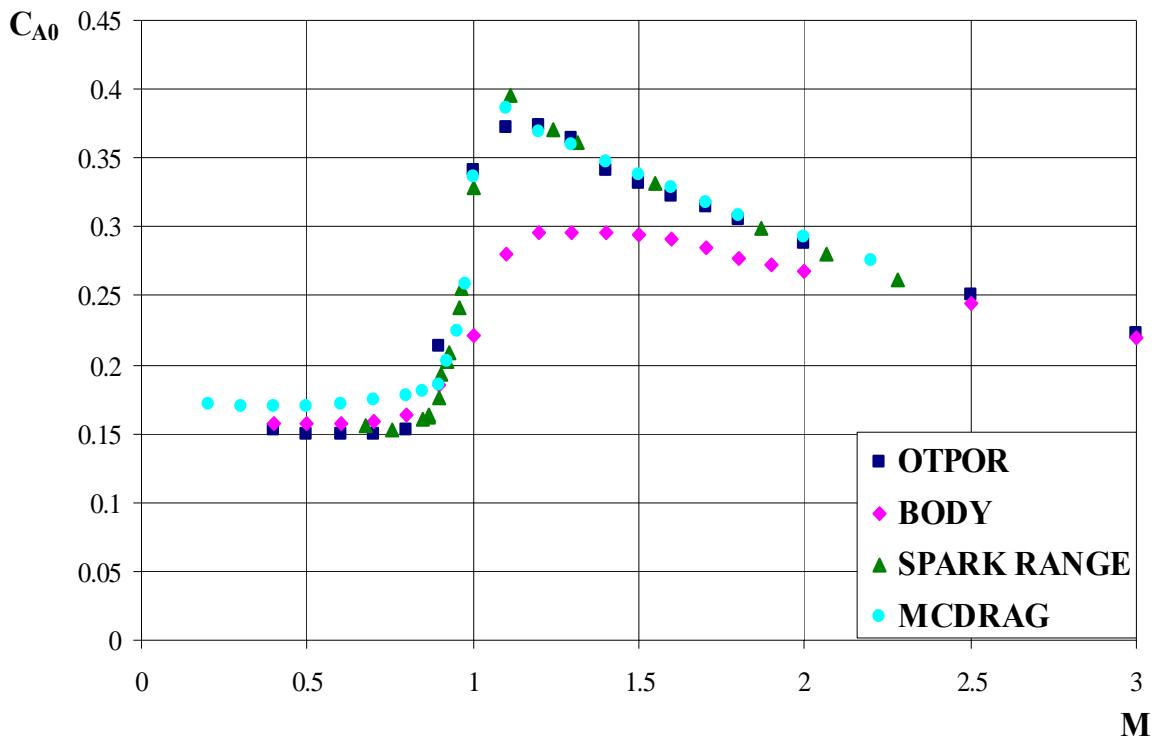


Koeficijent otpora pri nultom napadnom uglu za projektil 105mm M1

- ◆ Za $M \geq 1$ odlično slaganje MCDRAG-a i OTPOR-a
- ◆ U subsoničnom području više vrijednosti u odnosu na MCDRAG i PRODAS

POREĐENJE

Predviđanje sile otpora pri nultom napadnom ugлу za osnosimetričnu brzorotirajuću konfiguraciju projektila

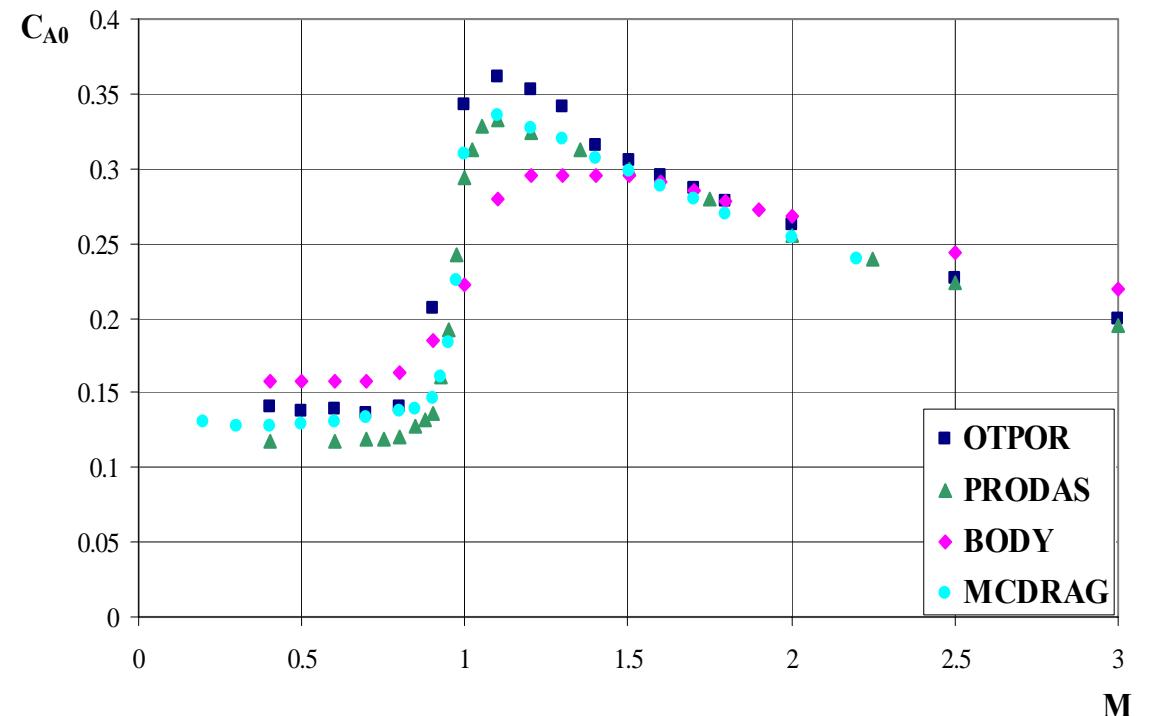


- ◆ Odlično slaganje sa vrijednostima sa poligona (SPARK RANGE)

Koeficijent otpora pri nultom napadnom ugлу za projektil 155mm M483A1

POREĐENJE

Predviđanje sile otpora pri nultom napadnom uglu za osnosimetričnu brzorotirajuću konfiguraciju projektila



Koeficijent otpora pri nultom napadnom uglu za projektil 155mm M549

- ◆ Odlično slaganje sa vrijednostima PRODAS-a i MCDRAG-a u supersoničnom području
- ◆ Odstupanja u transonici zbog prednjeg dijela
 - MCDRAG (prednji dio kompaktan)
 - BODY (uzima u obzir oblik vrha projektila)
 - OTPOR (uzima u obzir i oblik upaljača)

BAZE PODATAKA

Predviđanje sile otpora pri nultom napadnom uglu za osnosimetričnu brzorotirajuću konfiguraciju projektila

Za potrebe modela OTPOR formirane su sljedeće baze podataka:

- ◆ Baza podataka o koeficijentu otpora prednjeg dijela oblika konusa (za vitkost od 1.5 do 5 i Mach-ov broj od 0.6 do 5) i oblika tangentnog oživala (za vitkost od 2 do 5 i Mach-ov broj od 0.6 do 5)
- ◆ Baza podataka o koeficijentu otpora za razne eliptičke oblike prednjeg dijela – vrha projektila (za vitkost od 0 do 2 i Mach-ov broj od 0.4 do 3.5)
- ◆ Baza podataka o koeficijentu otpora zadnjeg dijela oblika konusa, za ugao nagiba konusa do 16° i kvadrata odnosa prečnika baze i kalibra projektila od 0 do 1, u subsoničnom području
- ◆ Baza podataka o koeficijentu otpora upuštenog dna u funkciji ugla nagiba zadnjeg konusa od 0° do 16° i kvadrata odnosa prečnika baze i kalibra projektila od 0.1 do 0.9 za subsonične i transonične Mach-ove brojeve
- ◆ Baza podataka o koeficijentu otpora vodećeg prstena

ZAKLJUČAK

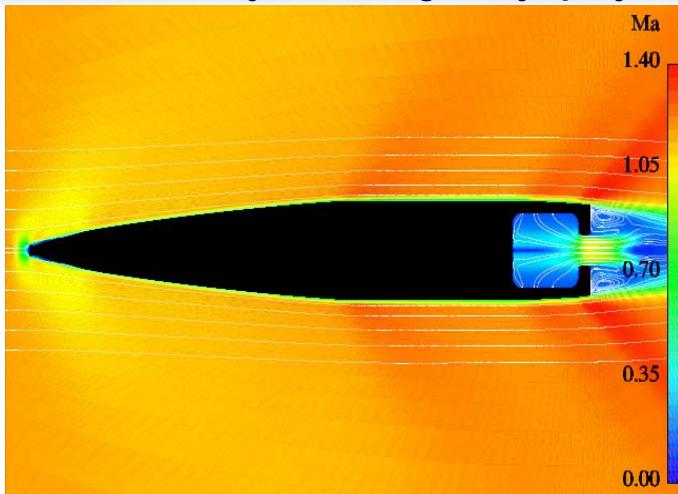
Predviđanje sile otpora pri nultom napadnom uglu za osnosimetričnu brzorotirajuću konfiguraciju projektila

- ◆ Razvijeni model OTPOR važi za subsonični, transonični i supersonični tok.
- ◆ Moguće je predvidjeti koeficijent otpora za većinu konfiguracija projektila sa tačnošću većom od 90% u poređenju sa eksperimentalnim rezultatima.
- ◆ Model OTPOR uzima u obzir realnu konfiguraciju upaljača
- ◆ Model OTPOR omogućava procjenu otpora dna i za projektile sa upuštenim dnom.
- ◆ Ugrađena je mogućnost računanja utjecaja prisustva vodećeg prstena na otpor projektila.
- ◆ U subsoničnom području otpor koji nastaje uslijed pritiska može se zanemariti kod projektila malog kalibra.

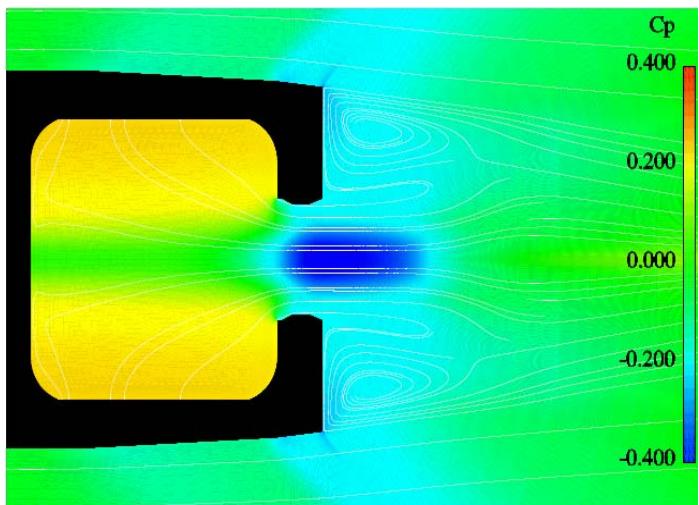
ŠTA DALJE?

Predviđanje sile otpora pri nultom napadnom uglu za osnosimetričnu brzorotirajuću konfiguraciju projektila

- ◆ Primjena numeričkih simulacija u razmatranju ponašanja projektila pri određenim napadnim uglovima i primjene base bleed-a ili raketnog motora u zadnjem dijelu osnosimetričnih projektila
- ◆ Na osnovu eksperimentalnih podataka formirati bazu za sekantni ožival
- ◆ Razmatrati kombinaciju tijelo – krilo (minobacački i raketni projektili)



Raspodjela Mach-ovog broja i strujnica oko rotirajućeg projektila sa aktivnim base bleed-om pri $M = 1.2$ i $Re = 1.4 \cdot 10^6$



Raspodjela pritiska oko rotirajućeg projektila sa aktivnim base bleed-om pri $M = 1.2$ i $Re = 1.4 \cdot 10^6$

LITERATURA

Predviđanje sile otpora pri nultom napadnom uglu za osnosimetričnu brzorotirajuću konfiguraciju projektila

- ◆ Janković, S.; Virag, Z.; Vrdoljak, M.: Aerodinamika I i II, FSB, Zavod za zrakoplovstvo i zavod mehanike fluida, Zagreb, 2007.
- ◆ Kesić, P.: Osnove aerodinamike, Fakultet strojarstva i brodogradnje u Zagrebu, Zagreb, 2003.
- ◆ Catalano, G. D.; Sturek, W. B.: Numerical Investigation of Subsonic and Supersonic Flow Around Axisymmetric Bodies, ARL-TR-2595, ARMY RESEARCH LAB ABERDEEN PROVING GROUND MARYLAND, 2001.
- ◆ Moore, F.G.: Approximate methods for weapon aerodynamics, Progress in astronautics and Aeronautics, Vol. 186, 2000.