

MODEL OPTIMIZACIJE RAKETNOG POGONSKOG PUNJENJA TIPA ZVIJEZDA

MODEL OF OPTIMIZATION FOR THE ROCKET STAR GRAIN

Jasmin Terzić, Berko Zečević, Sabina Serdarević-Kadić
Mašinski fakultet u Sarajevu, Odjeljenje za odbrambene tehnologije

Ključne riječi: zvijezda punjenje, raketni motor, balistička optimizacija, stepen ispune, sliver, neutralnost površine sagorijevanja

SAŽETAK:

Raketno pogonsko punjenje tipa zvijezda se široko primjenjuje kod savremenih raketnih motora na čvrsto gorivo. Proces dizajna pogonskog punjenja tipa zvijezda je uvjetovan često kontradiktornim zahtjevima kao što su minimalni relativni gubitak goriva, maksimalni stepen ispune, kvazi neutralna promjena perimetra gorenja i dr., te ih je često nemoguće u potpunosti ostvariti.

Razvijen je kompjuterski program OPTIM koji omogućava da se varijacijom sedam nezavisnih geometrijskih varijabli punjenja za prethodno usvojene intervale stepena ispune, relativnog ostatka nesagorijelog goriva (sliver) i stepena neutralnosti površine sagorijevanja punjenja izabere optimalna geometrija zvijezde.

Izvršena je uporedna analiza rezultata dobijeni kompjuterskim programom OPTIM sa rezultatima referentnog kompjuterskog programa SPP (Solid Performance Program) i ostvarena su veoma dobra slaganja podataka.

Key words: star grain, rocket motor, ballistic optimization, volumetric loading, sliver, neutrality burning area

ABSTRACT:

Star grain has wide use at modern rocket motors with solid propellant. Design process of propellant is often caused contradictory requirements as minimum relative losses of propellant, maximum degree of loading, neutrality burning area etc., so that impossible to be realized complete.

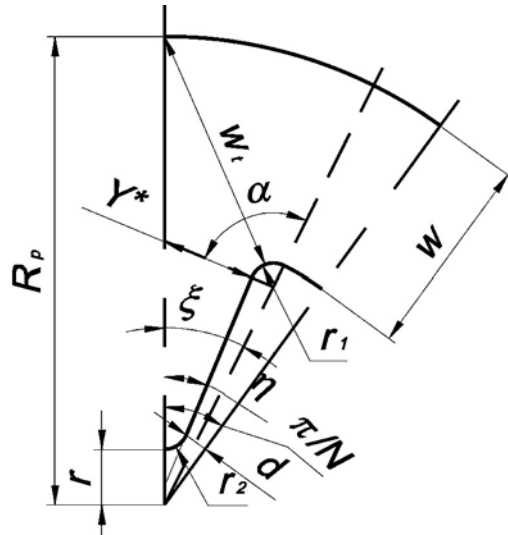
The computer program OPTIM, which insure to choose optimal geometry of star by variation seven independent geometric variables of propellant with assumptive intervals of volumetric loading, relative rest of propellant which is not burned (sliver) and degree of neutrality burning area of propellant, has been developed.

Comparative analyses of results from OPTIM computer code with referring code SPP (Solid Performance Program) have been carried out and very good agreement has obtained.

1. POGONSKO PUNJENJE U OBLIKU ZVIJEZDE

Pogonsko punjenje u obliku zvijezde je najčešće primijenjen tip pogonskog punjenja u savremenim raketnim motorima sa čvrstim gorivom. Zvijezda punjenje sagorijeva radijalno, a karakter promjene površine sagorijevanja u funkciji izgorjelog svoda punjenja bitno zavisi od njenih geometrijskih osobina. Zvijezda punjenje karakteriše sedam nezavisnih geometrijskih promjenljivih (slika 1) [1,2,3,5,6]:

N - broj krakova zvijezde
 w - debljina svoda
 η - ugao polukraka zvijezde
 ξ - ugao
 r_1 - radijus korijena kraka zvijezde
 r_2 - radijus vrha kraka zvijezde
 R_p - poluprečnik punjenja



Slika 1. Geometrijska definicija zvijezde [1,2,3,5,6]

Glavne prednosti ovog punjenja su:

- Zaštita stijenki motora od dejstva vrelih gasova,
- Ostvarena je relativno konstantna promjena površine sagorijevanja sa debljinom izgorjelog svoda,
- Mala vitkost motora.

Mane su:

- Umanjen je stepen korisnosti hemijske energije goriva u završnom dijelu procesa sagorijevanja (4 do 10 % ukupnog vremena sagorijevanja) zbog značajno nižeg pritiska sagorijevanja,
- Nije moguće postići velike relativne debljine svoda za sagorijevanje w_i
- Tehnološki proces proizvodnje ovih punjenja je složen.

2. ZONE SAGORIJEVANJA ZVIJEZDA PUNJENJA

Zvijezda punjenje karakterišu četiri zone gorenja (slika 2), koje su funkcija geometrijskih parametara punjenja. Površina sagorijevanja zvijezda punjenja je funkcija dijela izgorjelog svoda. Neutralnost sagorijevanja je ostvarena samo u drugoj fazi i posljedica je interakcije degresivnog sagorijevanja kraka zvijezde i progresivnog sagorijevanja cilindra.

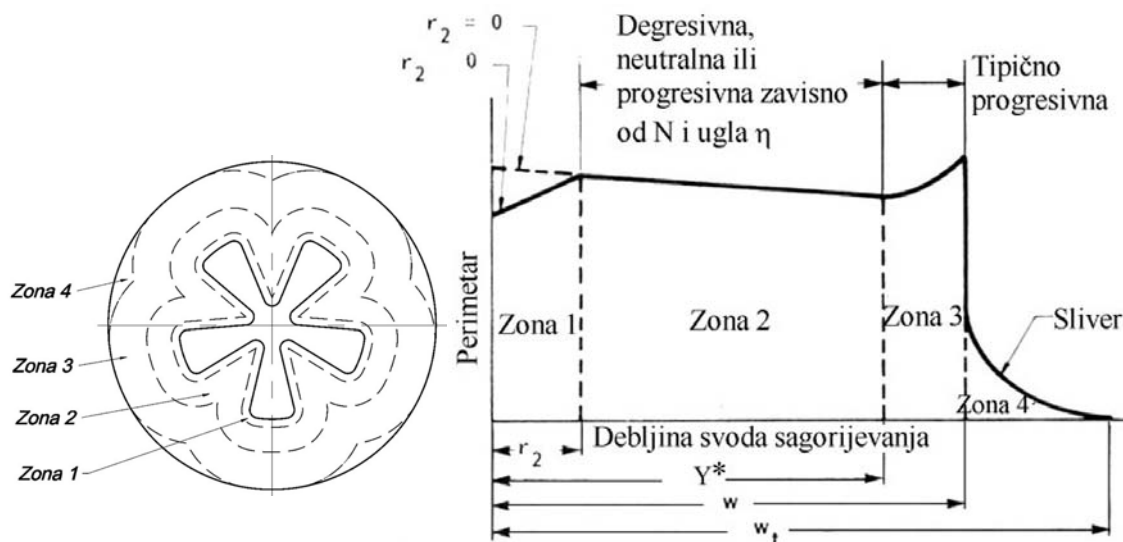
Optimizacija dizajna zvijezda punjenja podrazumijeva poznavanje:

- Površine sagorijevanja pogonskog punjenja

$$A_{bi} = S_i \cdot L \quad (1)$$

gdje su: S_i - perimetar sagorijevanja (unutrašnji obim poprečnog presjeka punjenja) u funkciju debljine izgorjelog svoda w_i (slika 2); L - dužina goriva.

- Slobodne površine poprečnog presjeka za prolaz gasova A_{pi} .



Slika 2. Zone sagorijevanja i perimetar u funkciji dijela izgorjelog svoda [2]

Prva zona sagorijevanja definisana je u granicama:

$$0 \leq w_i \leq r_2.$$

Perimetar sagorijevanja u funkciji izgorjelog svoda dat je izrazom [8,6]:

$$\frac{S_1}{2N} = (R_p - w + w_i) \left(\frac{\pi}{N} - \xi \right) + (r_1 + w_i) \alpha + (R_p - w - r_1) \frac{\sin \xi}{\sin \eta} - (r_1 + r_2) \tan \left(\frac{\pi}{2} - \eta \right) + (r_2 - w_i) \tan \left(\frac{\pi}{2} - \eta \right) \quad (2)$$

gdje je $\alpha = \frac{\pi}{2} - \eta + \xi$.

Perimetar sagorijevanja u zoni 1 je uvijek progresivan, te se pri dizajnu teži da radijus r_2 bude minimalan.

Površina poprečnog presjeka za prolaz gasova u zoni 1 definisana je izrazom [8]

$$\frac{A_{p1}}{N} = (R_p - w + w_i)^2 \left(\frac{\pi}{N} - \xi \right) + (r_1 + w_i)^2 \alpha + (R_p - w - r_1)^2 \frac{\sin \xi}{\cos \eta} \cos(\eta - \xi) - \left[(R_p - w - r_1) \frac{\sin \xi}{\cos \eta} - (r_1 + w_i) \right]^2 \operatorname{tg} \left(\frac{\pi}{2} - \xi \right) + (r_2 - w_i)^2 \left[\operatorname{tg} \left(\frac{\pi}{2} - \xi \right) - \left(\frac{\pi}{2} - \xi \right) \right] \quad (3)$$

Druga zona sagorijevanja definisana je granicama

$$r_2 < w_i \leq Y^* = (R_p - w - r_1) \frac{\sin \xi}{\cos \eta} - r_1 \quad (4)$$

Perimetar sagorijevanja u drugoj zoni ima oblik,

$$\frac{S_2}{2N} = (R_p - w + w_i) \left(\frac{\pi}{N} - \xi \right) + (r_1 + w_i) \alpha + (R_p - w - r_1) \frac{\sin \xi}{\sin \eta} - (r_1 + w_i) \tan \left(\frac{\pi}{2} - \eta \right) \quad (5)$$

Stepen progresivnosti perimetra sagorijevanja u zoni 2 može se analitički odrediti preko izvoda funkcije S , po debljini izgorjelog svoda:

$$\frac{\partial S_2}{\partial w_i} = 2N \left[\frac{\pi}{2} - \eta + \frac{\pi}{N} - \tan \left(\frac{\pi}{2} - \eta \right) \right] \quad (6)$$

Na stepen progresivnost perimetra sagorijevanja u zoni 2 utiču ugao η i broj krakova zvijezde N . Obično se teži da se u zoni 2 obezbijedi kvazi neutralnost. Jednačina (6) omogućava određivanje stepena neutralnosti sagorijevanja kod zvijezde.

Kada je $\partial S_2 / \partial w_i = 0$, ugao η definisan je implicitno kao funkcija N :

$$\eta = \frac{\pi}{N} - \tan \left(\frac{\pi}{2} - \eta \right) + \frac{\pi}{2} \quad (7)$$

Rješenje ove jednačine daje jednu vrijednost ugla η , koji obezbjeđuje neutralnost zvijezde, u funkciji broja krakova zvijezde N (tabela 1.).

Tabela 1. Vrijednosti ugla η u funkciji broja krakova zvijezde N

N	3	4	5	6	7	8	9
η [°]	24.55	28.22	31.13	33.53	35.56	37.31	38.84
π/N [°]	60.00	45.00	36.00	30.00	25.71	22.50	20.00

Važno je naglasiti da za uslove uglova $\eta < \pi/N$ i $\xi < \pi/N$, može doći do preklapanja nasuprotnih krakova zvijezde, a što je fizički neizvodljivo. Generalno, ugao ξ je uvijek manji od π/N .

Površina za prolaz gasova definisana je izrazom,

$$\frac{A_{p_2}}{N} = (R_p - w + w_i)^2 \left(\frac{\pi}{N} - \xi \right) + (r_1 + w_i)^2 \alpha + (R_p - w - r_1)^2 \frac{\sin \xi}{\cos \eta} \cos(\eta - \xi) - \left[(R_p - w - r_1) \frac{\sin \xi}{\cos \eta} - (r_1 + w_i)^2 \right]^2 \operatorname{tg} \left(\frac{\pi}{2} - \xi \right) \quad (8)$$

Treća zona sagorijevanja definisana je granicama:

$$Y^* < w_i \leq w.$$

U ovoj zoni promjena perimetra sagorijevanja je uvijek progresivna, jer je sastavljen od dva luka koji se neprekidno povećavaju. Ugao α se smanjuje sa kretanjem fronta plamena.

Perimetar sagorijevanja u ovoj zoni definisan je sljedećim izrazom:

$$\frac{S_3}{2N} = (R_p - w + w_i) \left(\frac{\pi}{N} - \xi \right) + (r_1 + w_i) \left[\xi + \arcsin \left(\frac{R_p - w - r_1}{r_1 + w_i} \sin \xi \right) \right] \quad (9)$$

Površina za prolaz gasova definisana je izrazom,

$$\frac{A_{p_3}}{N} = (R_p - w + w_i)^2 \left(\frac{\pi}{N} - \xi \right) + (r_1 + w_i)^2 \left[\xi + \arcsin \left(\frac{R_p - w - r_1}{r_1 + w_i} \sin \xi \right) \right] + (R_p - w - r_1)^2 \sin \xi \left[\cos \xi + \sqrt{\frac{(r_1 + w_i)^2}{(R_p - w - r_1)^2} - \sin^2 \xi} \right] \quad (10)$$

Četvrta zona sagorijevanja definisana je u granicama:

$$w < w_i \leq w_i$$

gdje je w_i maksimalni put fronta sagorijevanja i definisan je izrazom [7]:

$$w_i = \sqrt{\left[(R_p - w - r_1) \sin \xi \right]^2 + \left[R_p - (R_p - w - r_1) \cos \xi \right]^2} - r_1 \quad (11)$$

Površina sagorijevanja u zoni 4 je degresivna, jer se perimetar sagorijevanja neprekidno smanjuje.

Perimetar sagorijevanja u ovoj zoni definisan je primjenom kosinusne teoreme [7]:

$$\frac{S_4}{2N} = (r_1 + w_i) \left[\xi + \arcsin \left(\frac{R_p - w - r_1}{r_1 + w_i} \sin \xi \right) - \pi + \arccos \left(\frac{(r_1 + w_i)^2 + (R_p - w - r_1)^2 - R_p}{2(r_1 + w_i)(R_p - w - r_1)} \right) \right] \quad (12)$$

Površina za prolaz gasova u ovoj zoni određena je numerički, pomoću pravila centralnog pravougaonika, na osnovu izraza [7]:

$$A_{p_4}^{(i)} = \sum_{i=1}^{n_{p_4}} A_{p_4}^{(i-1)} + \frac{S_4^{(i)} + S_4^{(i-1)}}{2} \cdot \Delta w_i \quad (13)$$

gdje se za početnu vrijednost $A_{p_4}^{(i-1)}$ uzima vrijednost površine za prolaz gasova na kraju treće zone, a Δw_i - korak integracije.

3. OPTIMIZACIJA PUNJENJA U OBLIKU ZVIJEZDE

U procesu dizajna zvijezda punjenja moraju biti ispunjeni sljedeći zahtjevi:

- minimalni relativni gubitak goriva,
- maksimalni stepen ispune i
- kvazi neutralna promjena perimetra gorenja.

Međutim, ovi zahtjevi su međusobno kontradiktorni i nemoguće ih je u potpunosti ostvariti. Stoga balistička optimizacija zvijezda punjenja obuhvata analizu 7 nezavisnih varijabli koje opisuju geometriju zvijezda punjenja. Varijacijom ovih nezavisnih varijabli može se postići optimalna geometrija zvijezda punjenja za prethodno usvojeni stepena ispune¹, relativni gubitak goriva (sliver) i stepen neutralnosti sagorijevanja zvijezde.

Kao nezavisan parametar uzima se odnos maksimalnog i srednjeg perimetra gorenja koji je mnogo značajniji za dizajn punjenja nego ukupni stepen progresivnosti.

$$\Gamma = \frac{S_{\max}}{S_{av}} \quad (14)$$

Kvazi neutralno sagorijevanje se ostvaruje pri najmanjoj vrijednosti Γ_{min} , za datu geometriju zvijezda punjenja. Postoje dvije definicije srednjeg perimetra:

- Srednji perimetar, $S_{av_{ns}}$, kada nije uključen sliver i
- Srednji perimetar, S_{av_s} , kada je uključen sliver u razmatranje.

Razvijeni kompjuterski program *OPTIM* omogućava da za skup geometrija zvijezda (zadani intervali relativne debljine svoda², relativnog gubitka goriva, ugla širenja kraka η , koeficijenta ugla ξ , radijusa korijena kraka r_1 i radijusa vrha kraka r_2) i izabrani stepen ispune postiže se skup vrijednosti perimetara gorenja iz kojeg je moguće izdvojiti onu geometriju zvijezda punjenja koja daje minimalnu vrijednost odnosa maksimalnog i srednjeg perimetra, Γ_{min} . Postupak se ponavlja za novu vrijednost stepena ispune i izdvaja se onaj set podataka koja daje minimalnu vrijednost odnosa maksimalnog i srednjeg perimetra, Γ_{min} . Iz skupa novih podataka formira se niz funkcionalnih zavisnosti minimalnog odnosa maksimalnog i srednjeg perimetra Γ_{min} u funkciji relativnog gubitka goriva (sliver-a).

Srednji perimetar se računa za cjelokupni interval debljine svoda, tj. u procesu optimizacije zvijezda punjenja posmatramo promjenu perimetra sagorijevanja u prve tri zone.

Kvazi neutralan karakter promjene potiska sa vremenom postiže se minimalnim odnosom maksimalnog S_{\max} i srednjeg perimetra sagorijevanja $S_{av_{ns}}$ za usvojenu debljine svoda w . Npr. za zvijezdu sa $V_l = 0.85$, $N = 5$ i $r_1/R_p = r_2/R_p = 0.05$ optimalni dizajn zvijezde je postignut za $w_f = 0,33$ sa velikom vrijednošću slivera od 16,6 % (tabela 2).

U slučaju kada je u razmatranje uključen sliver, tada se upotrebljava minimalni odnos maksimalnog S_{\max} i srednjeg perimetra sagorijevanja S_{av_s} , čime se postiže veća efikasnost korištenja pogonske materije (vrijednost slivera je 6,4%) i nešto veće odstupanje kvazi neutralnog karaktera promjene potiska ($\Gamma_{min} = 1,257$).

Tabela 2 Neutralnost kao funkcija w_f za $V_l = 0.85$, $N = 5$ i $r_1/R_p = r_2/R_p = 0.05$

w_f	Γ_{min} (za w)	Γ_{min} (za w_t)	Sliver [%]	ξ [°]	η [°]
0,31	1,0414	1,413	15,8893	30,13	26,75
0,33	1,0042	1,329	16,5951	31,64	31,05
0,43	1,0838	1,257	6,4062	26,50	22,60
0,45	1,1129	1,259	4,8961	24,84	19,60

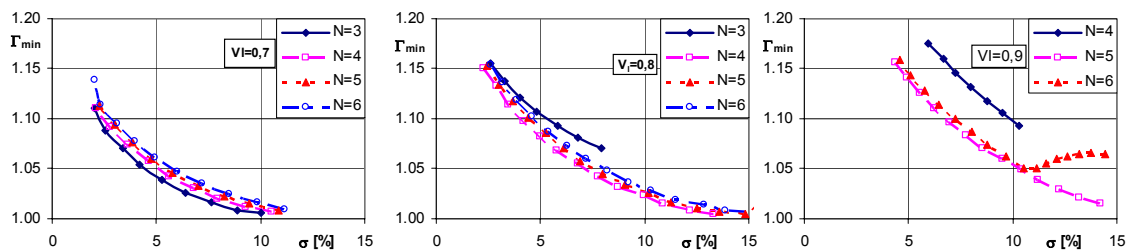
3.1. Uticaj broja krakova zvijezde i stepena ispune na optimizaciju

Pri balističkoj optimizaciji zvijezda punjenja veoma je važno posmatrati uzajamnu vezu između veličine slivera i stepena neutralnosti površine sagorijevanja. Pred dizajnera punjenja postavljani su zahtjevi za stepen ispune V_l , stepen neutralnosti površine sagorijevanja i veličinu slivera. Na ova tri parametra (sliver, V_l i stepen neutralnosti) utiču tri varijable zvijezda punjenja: w_f , ξ i η [2].

¹ $V_l = 0,7 - 0,9$

² $w_f = 0,3 - 0,6$

Promjena vrijednosti odnosa maksimalnog i srednjeg perimetra sagorijevanja u funkciji od vrijednosti slivera σ bitno zavisi od broja krakova zvijezde N i stepena ispune. Za usvojene vrijednosti stepena ispune (npr. $V_l = 0,7$, $V_l = 0,8$ i $V_l = 0,9$) i za razmatrane brojeve krakova zvijezde (npr. $N = 3 - 6$) u intervalu relativne debljine svoda $w_f = 0,3 - 0,6$, funkcija promjene Γ_{min} od vrijednosti slivera data je na slici 3.

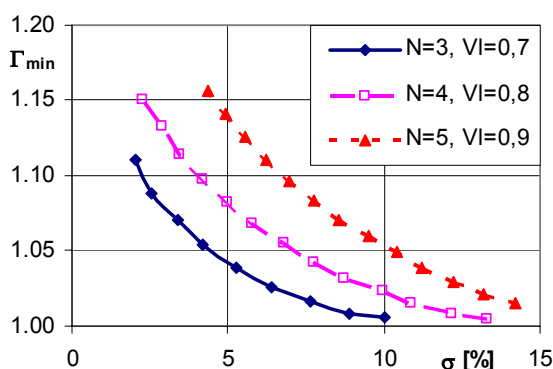


Slika 3. Neutralnost u funkciji slivera za zvijezdu sa N krakova za $V_l = 0,7, 0,8$ i $0,9$ ($r_1/R_p = r_2/R_p = 0,05$)

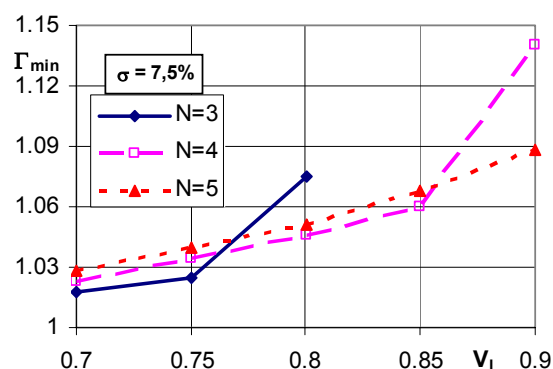
Funkcija promjene minimalne vrijednosti odnosa maksimalnog i srednjeg perimetra sagorijevanja u funkciji slivera je postignuta za (slika 4):

- Stepenu ispunje $V_l = 0,7$ kod zvijezde sa tri kraka,
- Stepenu ispunje $V_l = 0,8$ kod zvijezde sa četiri kraka,
- Stepenu ispunje $V_l = 0,9$ kod zvijezde sa pet krakova.

Za datu vrijednost slivera sa porastom stepena ispunje i broja krakova zvijezde povećava se minimalni odnos maksimalnog i srednjeg perimetra sagorijevanja. Ta promjena nije linearna. Presjekom krivulja datih na slici 3 (posmatramo optimalne brojeve krakova $N = 3, N = 4$ i $N = 5$) za određenu vrijednost slivera (u ovom slučaju $\sigma = 7,5\%$), uspostavlja se funkcionalna veza između Γ_{min} i stepena ispunje (slika 5). Tačnost krive funkcionalne veze između Γ_{min} i stepena ispunje zavisit će od posmatranog broja vrijednosti stepena ispunje (ovdje su razmatrane pet vrijednosti stepena ispunje). Za neku drugu usvojenu vrijednost slivera dobit će se druga funkcionalna zavisnost.



Slika 4. Uticaj stepena ispunje na sliver i neutralnost



Slika 5. Neutralnost u funkciji V_l za zvijezdu sa N krakova i $\sigma = 7,5\%$

Iz slike 5 vidljivo je da:

- u intervalu V_l , od 70 do 76 %, optimalnu geometriju postiže zvijezda sa tri kraka,
- u intervalu V_l , od 76 do 86 %, optimalnu geometriju postiže zvijezda sa četiri kraka.
- u intervalu V_l , od 86 do 90 %, optimalnu geometriju postiže zvijezda sa pet krakova.

3.2. Uticaj radijusa r_1 i r_2 na optimizaciju

Pri balističkoj optimizaciji zvijezda punjenja, teži se da radijusi korijena kraka zvijezde i vrh kraka zvijezde budu što manji, jer oni utiču na stepen neutralnost površine sagorijevanja i veličinu slivera, pri ispunjenju uslova minimalne vrijednosti odnosa maksimalnog i srednjeg perimetra sagorijevanja. Međutim, male vrijednosti ovih radijusa nisu pogodni sa tehnološkog

stanovišta izrade punjenja, a posebno tokom procesa pripaljivanja i pri sagorijevanju pri nižim temperaturama upotrebe može doći do pojave pukotina (u slučajevima kada je radijus r_1 jako mali).

Uticaj radijusa korijena kraka na neutralnost i sliver, za fiksne vrijednosti N , w_f , r_2 i V_l i različite vrijednosti uglova ξ i η , određen programom *OPTIM*, dat je u tabeli 3.

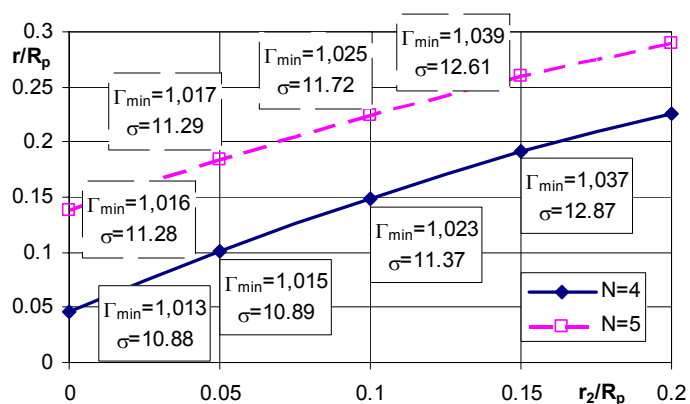
Tabela 3. Uticaj r_1 na veličinu slivera i neutralnost ($N=4$, $V_l=0.8$, $w_f=0.35$ i $r_2/R_p=0.05$)

r_1/R_p	η [°]	ξ [°]	σ [%]	Γ_{\min}
0,00	27,87	25,86	9,0	1,007
0,05	26,98	30,01	11,0	1,014
0,10	25,44	34,61	13,3	1,026
0,15	22,94	39,83	16,2	1,044

Iz tabele se vidi da sa povećanjem radijusa korijena kraka povećava se vrijednost slivera (oko 7%), a narušava se kvazi neutralnost površine sagorijevanja.

Povećanjem r_2 (bez mijenjanja ostalih dimenzija) smanjuje se stepen ispune. Uopšte neutralnost površine sagorijevanja i veličina slivera značajno ne zavise od promjene radijusa r_2 kao što je to u slučaju promjene radijusa r_1 (slika 6).

Sa smanjenjem vrijednosti radijusa r_2 smanjuje se radijus kružnice koja tangira vrhove krakova zvijezde r . Minimalni radijus r te kružnice će biti kada je zadovoljen uslov $\eta < \pi/N$ (slika 1).

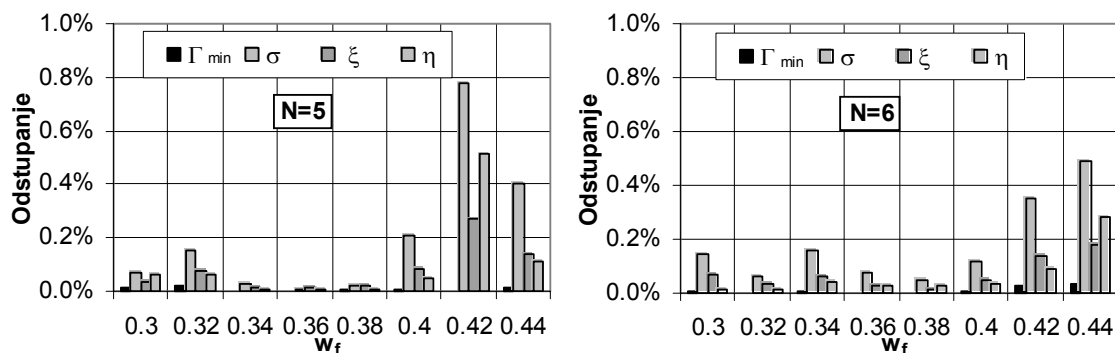


Slika 6. Uticaj radijusa vrha kraka r_2 na sliver i neutralnost za zvijezdu sa $w_f=0.35$, $V_l=0.80$, i $r_1/R_p=0.05$

4. VERIFIKACIJA MODELA ZA OPTIMIZACIJU POGONSKOG PUNJENJA TIPA ZVIJEZDA

Verifikacija kompjuterskog programa *OPTIM* izvršena je u odnosu na podatke sa rezultatima izložene u referenci [4] dobivene kompjuterskim programom *SPP* (*Solid Performance Program*).

Usvojeni su isti ulazni podaci korišteni u referenci [4] ($V_l=0.85$ i $r_1/R_p=r_2/R_p=0.05$), a rezultati proračuna optimizacije zvijezda punjenja sa pet i šest krakova dati su na slici 7.



Slika 7. Usporedni rezultati programa *OPTIM* u odnosu na rezultate iz reference [4] za optimizaciju zvijezde sa 5 i 6 krakova

Postignuta su veoma dobra slaganja rezultata programa *OPTIM* u odnosu na rezultate dobivene kompjuterskim programom *SPP* [36]:

- Maksimalno odstupanje minimalne vrijednost odnosa maksimalnog i srednjeg perimetra je 0.04%,
- Maksimalno odstupanje veličine slivera je 0.8%,
- Maksimalna odstupanja ugla ξ i ugla širenja kraka zvijezde je 0.5%.

Moguće je ova odstupanja smanjiti, smanjenjem veličine inkrementa prirasta koeficijenta ugla ξ i ugla širenja kraka zvijezde η , tokom procesa optimizacije, ali se time znatno povećava vrijeme proračuna (za oko 5 puta).

5. ZAKLJUČAK

Razvijeni kompjuterski program *OPTIM* omogućava da se varijacijom sedam nezavisnih geometrijskih varijabli zvijezda punjenja za prethodno usvojene intervale stepena ispune, relativnog ostatka nesagorijelog goriva (sliver) i stepena neutralnosti površine sagorijevanja punjenja izabere optimalna geometrija zvijezde.

Proces odabira optimalne konfiguracije je poluautomatski. Dizajner pogonskog punjenja na osnovu rezultata dobivenih programom *OPTIM* i zahtjeva misije letjelice bira optimalnu geometriju punjenja.

Broj krakova zvijezde N za optimalnu neutralnost zavisi od stepena ispune V_l , pri čemu se veći broj krakova zvijezde primjenjuje za veće vrijednosti stepena ispune.

Kvazi neutralnost površine sagorijevanja za određenu vrijednost slivera narušava se sa porastom stepenom ispune.

Kvazi neutralnost površine sagorijevanja i male vrijednosti slivera postižu se manjim vrijednostima korijena kraka r_1 i radijusa vrha kraka r_2 zvijezde. Međutim, radi jednostavnosti tehnologije izrade punjenja i onemogućavanja pojave pukotina u pogonskom punjenju pri niskim temperaturama upotrebe, primjenjuju se veće vrijednosti ovih radijusa krakova zvijezde.

Ostvarena su veoma dobra slaganja rezultata dobivenih kompjuterskim programom *OPTIM* u odnosu na rezultate referentnog kompjuterskog programa *SPP* (Solid Performance Program).

6. LITERATURA

- [1] Anon: Solid Propellant Grain Design and Internal Ballistics, NASA Report SP 8076, March 1972
- [2] Brooks W.T.: Ballistic Optimization of the Star Grain Configuration, AIAA 80-1136R, AIAA/SAE/ASME 16th Joint Propulsion Conference, Hartford, 1980
- [3] Dunn S.S. and Coats D.E.: 3-D Grain Design and Ballistic Analysis, AIAA 97-3340, Software and Engineering Associates, Inc. Carson City, NV, 1997
- [4] Haymes W.G., Williamson J.E., McClendon S. E. and Brooks W.T: Solid Rocket Motor Design Automation Technology, AGARD-CP-259, Solid Rocket Motor Technology, Oslo, 2-5 April 1979
- [5] Lefebvre A.: Burning analysis of star configuration, <http://rocketworkbench.sourceforge.net/grain/doc/star.pdf>, October 2000
- [6] Scippa S.: Propellant grain design, AGARD-LS-150, Design Method in Solid Rocket Motors, Paris, 1988
- [7] Terzić J.: Predviđanje idealiziranih unutrašnje-balističkih parametara raketnog motora na dvobazna goriva, Magistarski rad, Mašinski fakultet u Sarajevu, Sarajevo 2002.
- [8] Zečević B: Pogonsko punjenje sa unutrašnjim sagorijevanjem, geometrije poprečnog presjeka kanala za prolaz gasova u obliku zvijezde sa N krakova, Pregled raketne tehnike broj 8, Astronautički i raketni savez Bosne i Hercegovine, Sarajevo, 1982