Sletanje na Mars

DUŠAN M. MARČETA, Univerzitet u Beogradu,
Matematički fakultet, Beograd

BOŠKO P. RAŠUO, Univerzitet u Beogradu,
Mašinski fakultet, Beograd

Originalni naučni rad
UDC: 523.43-852:629.7
DOI: 10.5937/tehnika1902225M

Više od 40 godina nakon prvog uspešnog sletanja na Mars, istraživanje njegove površine pomoću kosmičkih letelica i dalje predstavlja ogroman naučni i tehnološki izazov. Ovo se pre svega odnosi na Marsove južne visoravni, koje se protežu na velikom delu njegove južne hemisfere, na koje do sada nije izvršeno nijedno uspešno sletanje. Sa druge strane, na severne nizije, koje se prostiru na velikom delu severne hemisfere, do sada je izvršeno 7 uspešnih sletanja. Ova razlika je posledica specifične topografije Marsove površine usled takozvane globalne ili hemisferične dihotomije Marsa, koja predstavlja jedinstvenu karakteristiku u Sunčevom sistemu. Usled razlike u elevacijama površine, letelice koje sleću na južne visoravni imaju na raspolaganju tanji sloj atmosfere koji mogu da iskoriste za disipaciju kinetičke energije. Budući da letelice sa interplanetarnih putanja ulaze u atmosferu Marsa hiperboličkim brzinama, njihova kinetička energija je veoma velika i mogućnost da se ona smanji kroz interakciju sa atmosferom je od ključnog značaja za sletanje na lokacije sa velikom elevacijom. Procenjuje se da su južne visoravni nekoliko milijardi godina starije nego severne nizije, koje su u relativno bliskoj prošlosti bile izložene snažnoj vulkanskoj aktivnosti. Ovako velika razlika u starosti predstavlja motivaciju za istraživanje celokupne površine Marsa u cilju razumevanja njegove složene geološke evolucije. Osim toga, veliki broj otvorenih basena koji su otkriveni na južnim visoravnima ukazuju na to da su ove regije u prošlosti mogle biti prekrivene tečnom vodom, što predstavlja najznačajniji razlog za istraživanje ovih lokacija. Analiza sezonskih i dnevnih varijacija gustine Marsove atmosfere pokazuje da je i sa sadašnjom tehnologijom moguće ostvariti sletanje na ove visoke lokacije, uz neophodnost optimizacije parametara ulaska letelice u atmosferu, kako bi se ove specifičnosti Marsa na najbolji način iskoristile.

Ključne reči: Mars, sletanje, atmosfera, dihotomija

1. UVOD

Kroz čitavu istoriju, astronomi su pratili kretanje Marsa po nebeskoj sferi, a njegova narandžasto-crvena boja ih je inspirisala da ga nazivaju po ratu ili bogovima rata. Na osnovu stanja naučne teorije i prakse, kao i dostignutog tehnološkog nivoa, istraživanje Marsa može se podeliti u tri faze: preteleskopsku eru, teleskopsku eru i kosmičku eru.

Najznačajniji naučni rezultat koji je proistekao iz posmatranja Marsa, pre pronalaska teleskopa, su čuveni Keplerovi zakoni o kretanju planeta, za koje se sa pravom može reći da su promenili istorijski tok naučne

misli. Ovi zakoni se nisu odnosili samo na Mars, već na čitav Sunčev sistem, a kroz naučna dostignuća koja su iz njih direktno sledila, presudno su uticali i na sveukupno čovekovo poimanje kosmosa.

Počevši od 1609. godine i upotrebe teleskopa u astronomskim posmatranjima, saznanja o Marsu su značajno obogaćena. Prva poznata teleskopska posmatranja Marsa je izvršio Galileo Galilej 1610. godine, dok je prvu mapu njegove površine napravio Kristijan Hajgens 1659. godine. Razvoj posmatračke tehnologije omogućio je dobijanje sve više saznanja o površini Marsa, njegovoj rotaciji, atmosferskim strukturama, smeni godišnjih doba i sl.

Iako je arhitektura Sunčevog sistema takva da od svih planeta Venera prilazi na najmanje rastojanje od Zemlje, sa dinamičkog aspekta Mars predstavlja nama najbližu planetu. Ova činjenica praktično znači da je za objekat koji se nalazi na Zemljinoj heliocentričnoj orbiti potrebno manje energije da se postavi na orbitu Marsa

Adresa autora: Dušan Marčeta, Univerzitet u Beogradu, Matematički fakultet, Beograd, Studentski trg 16
e-mail: dmarceta@matf.bg.ac.rs
Rad primljen: 21.01.2019.
Rad prihvaćen: 04.03.2019.

nego na orbitu bilo koje druge planete. Uzimajući ovu činjenicu u obzir, a takođe i zbog naučnog značaja istraživanja Marsa, koji je u prethodnim decenijama imao veoma izražen astrobiološki aspekt, usled veoma čvrstih dokaza da je na površini Marsa u prošlosti postojala voda u tečnom stanju, upravo je Mars bio najčešće posećivano telo Sunčevog sistema kosmičkim letelicama od početka kosmičke ere. Počevši od 10. oktobra 1960. godine kada je lansiran Marsnik 1, pokušano je izvođenje 53 misije na Mars različitog tipa, od kojih su 23 bile uspešne. Među njima, od 16 misija koje su bile predviđene za sletanje na površinu Marsa, samo 7 je uspešno izvršilo sletanje i nastavi predviđeni program. Iako je veliki broj misija na Mars doživeo neuspeh, rezultati koje su postigle uspešne misije su od neprocenjivog naučnog značaja. Među najznačajnija dostignuća svakako spadaju precizno određivanje karakteristika Marsove atmosfere i klime, kao i mapiranje Marsove površine i gravitacionog polja sa izuzetno visokom rezolucijom.

2. DOSADAŠNJA SLETANJA NA MARS

Razlozi zbog kojih sletanje na Mars i nakon 16 pokušaja predstavlja toliko veliki tehnološki izazov su pre svega posledica činjenice da je Marsova atmosfera dovoljno gusta i debela da uzrokuje značajno zagrevanje letelice koja u nju ulazi hiperboličkom brzinom (brzina na hiperboličkoj orbiti oko nebeskog tela), a sa druge strane nije dovoljno gusta i debela da letelicu uspori dovoljno da se izvrši bezbedno sletanje. Njena gustina pri površini je oko 100 puta manja nego gustina atmosfere pri površini Zemlje. Rezultat ove činjenice je da letelice koje ulaze u atmosferu Marsa počinju značajnije da usporavaju, usled otpora atmosfere, na mnogo manjim visinama nego što je to slučaj prilikom sletanja na Zemlju. Zbog ovoga je visina atmosferskog sloja kroz koji letelica prolazi od ključnog značaja za uspešno sletanje i glavni razlog zbog kojeg je svih sedam uspešnih sletanja do sada izvršeno u niskim oblastima na severnoj hemisferi i u ekvatorskoj oblasti. Sa druge strane, oblasti na južnoj hemisferi koja je, usled jedinstvene karakteristike Marsa koja se naziva globalna dihotomija, prekrivena uglavnom visoravnima, ostale su van domašaja dosadašnjih misija.

Koliko veliki tehnološki i naučni izazov predstavlja sletanje na Mars, a pogotovo na lokacije sa velikim elevacijama, najbolje ilustruje činjenica da je 2016. godine Evropska svemirska agencija (ESA) u kooperaciji sa Ruskom federalnom svemirskom agencijom (Roscosmos) poslala na Mars misiju pod nazivom Entry, Descent and Landing Demonstrator Module (EDM) koja je imala za cilj da ispita i demonstrira ključne tehnologije za sletanje na površinu Marsa. Važno je napomenuti da se ne radi o kvalitativnom tehnološkom napretku u odnosu na prethodne misije na

Mars, već se misija u potpunosti oslanjala na tehnologiju koja je poznata pod nazivom „Vikingovo nasleđe“, dobijenom po letelicama Viking 1 i Viking 2 koje su 1976. godine izvršile prva uspešna sletanja na Mars. Ovo predstavlja naizgled apsurdnu situaciju, jer se četiri decenije nakon sletanja Vikinga i još pet uspešnih sletanja pomoću letelica koje su bile bazirane na istoj tehnologiji, na Mars šalje letelica mase 600 kg koja nema gotovo nikakve naučne ciljeve, već joj je jedini cilj da ispita i demonstrira već postojeće tehnologije. Ipak, ova situacija zapravo nije nimalo apsurdna i posledica je nedostatka egzaktnih znanja o procesima koji se dešavaju prilikom leta visokim nadzvučnim brzinama kroz atmosferu Marsa, usled nemogućnosti da se taj proces u punoj meri simulira u instalacijama na Zemlji. Ova znanja su neophodna, ne samo za unapređivanje tehnologija u cilju podizanja kapaciteta za istraživanje Marsa, već i za nastavak istraživanja baziranih na već postojećim tehnologijama. Nažalost, zbog problema koji su se javili kada je letelica počela nekontrolisano da se rotira nakon otvaranja padobrana, misija EDM nije uspešno sletela na Mars.

Prvo meko sletanje na Mars, koje je ujedno bilo i prvo meko sletanje na površinu neke druge planete, izvršeno je 2. decembra 1971. godine pomoću sovjetske letelice Mars 3. Nažalost, samo dvadesetak sekundi nakon sletanja, instrumenti su prestali da funkcionišu i kontakt sa letelicom je izgubljen. Razlog nikada nije utvrđen, a najverovatniji uzrok je snažna peščana oluja koja je bila aktivna na lokaciji sletanja, čije su koordinate bile 45°S, 202°E. Prvo potpuno uspešno sletanje na površinu Marsa, izvršeno je skoro 5 godina kasnije, 20. jula 1976. godine, pomoću letelice Viking 1. Od tada do danas, ukupno je izvršeno 7 uspešnih sletanja. Lokacije uspešnih sletanja na topografskom modelu Marsa [1] prikazane su na slici 1.

Slika 1 - Lokacije uspešnih sletanja

Sa slike 1 se može videti da su uspešna sletanja izvršena u niskim oblastima na severnoj hemisferi i u

ekvatorskoj oblasti. Ove lokacije sletanja nisu izabrane slučajno, niti je primarni parametar za njihovo određivanje bio potencijalni naučni benefit koje određene lokacije pružaju. Osnovni parametar na osnovu koga su određivane lokacije sletanja za sve prethodne misije je „nadmorska“ visina. Iako je današnji Mars potpuno suva planeta, na njemu kao i na drugim nebeskim telima, moguće je definisati referentnu površ, analognu nivou mora na Zemlji, u odnosu na koju se meri elevacija površine („nadmorska visina“).

Na Marsu je ova topografska referenca definisana kao ekvipotencijalna gravitaciona površ koja se naziva referentni areoid, na kojoj je gravitacioni potencijal jednak gravitacionom potencijalu na ekvatoru na srednjem ekvatorskom radijusu od 3396 km [1]. Kada bi na površini Marsa postojala voda u odgovarajućoj količini, ona bi zauzela oblik upravo ove površine.

3. GLOBALNA DIHOTOMIJA

Kao što se može videti na slici 1, zbog nedovoljne visine atmosferskog sloja koji bi služio za usporavanje letelice, nijedno uspešno sletanje na Mars nije ostvareno u oblasti južnih Marsovih visoravni koje se protežu duž čitave Marsove južne hemisfere, a mestimično zalaze i na severnu hemisferu kojom dominiraju severne nizije. Ovako značajna distinkcija između Marsovih hemisfera je posledica jedinstvene karakteristike Marsa koja se naziva globalna ili hemisferična dihotomija. Ovo je najuočljivija struktura na površini Marsa, jedina koja ima globalni karakter i verovatno najstarija [2, 3, 4].

Globalnom dihotomijom Mars je praktično podeljen na dve veoma različite hemisfere, južnu koja ima pozitivnu elevaciju, debelu koru i veoma veliki broj udarnih kratera, i severnu koja ima negativnu elevaciju, tanku koru i veoma mali broj udarnih kratera. Ogromna razlika u broju udarnih kratera ukazuje na veliku razliku u starosti između ova dva dela Marsove površine jer je severna hemisfera u relativno bliskoj geološkoj prošlosti bila izložena snažnoj vulkanskoj aktivnosti čime su stariji udarni krateri prekriveni.

Usled globalne dihotomije topografski opseg na Marsu iznosi oko 30 km, što je za oko 50% više u odnosu na Zemlju, iako Mars ima skoro duplo manji prečnik. Ovo je posledica pre svega velikih topografskih struktura kao što su oblast Tarsis koja dominira čitavom zapadnom hemisferom i udarni krater Helas, koji se svojom dubinom od oko 9 km izdvaja od okolnih visoravni na južnoj hemisferi.

Sa aspekta istraživanja Marsa kosmičkim letelicama, globalna dihotomija predstavlja ključnu strukturu koja je praktično onemogućila istraživanje kompletne južne hemisfere usled velike elevacije površine na njoj.

Letelice koje bi sletale na južne visoravni, na raspolaganju bi imale tanji sloj atmosfere koji bi mogle da iskoriste za disipaciju svoje kinetičke energije koja je veoma velika, jer letelice u atmosferu uleću hiperboličkim brzinama sa međuplanetarnih putanja.

Sa druge strane, postoji veliki naučni interes za istraživanje ovih lokacija jer osim što predstavljaju najstariji deo Marsove površine, u ovim oblastima postoji veliki broj otvorenih basena [5], te postoje čvrsti dokazi da je na ovim, kao i na drugim lokacijama, postojala voda u tečnom stanju u određenim fazama Marsove evolucije [6].

4. GRAVITACIONO POLJE MARS

Prilikom pasivnog (balističkog) ulaska letelice u atmosferu planete i sletanja na površinu, njena putanja zavisi samo od dve sile, sile gravitacije i aerodinamičke sile usled interakcije letelice i planetske atmosfere. Iako zbog veoma velikih brzina aerodinamička sila višestruko nadmašuje gravitacionu silu, koja se u preliminarnim proračunima i zanemaruje, za precizno određivanje putanje letelice neophodno je u obzir uzeti i uticaj gravitacionog polja.

Zbog oblika Marsa i rasporeda mase unutar njegove zapremine, njegovo gravitaciono polje nije sferno simetrično. Takođe, prilikom sletanja na Mars letelica se nalazi veoma blizu njegove površine, te se ne može govoriti o sistemu materijalnih tačaka. Iz ovih razloga gravitaciona interakcija između letelice i Marsa ne može se sa dovoljnom tačnošću predstaviti izvornim oblikom Njutnovog zakona gravitacije, koji podrazumeva da sila deluje između materijalnih tačaka ili tela sa sfernom raspodelom mase. U ovakvim slučajevima, dejstvo gravitacione sile se predstavlja razvojem gravitacionog potencijala u red sfernih harmonika u obliku [7]:

$$U = \frac{GM}{r} \left[1 + \sum_{l=2}^{\infty} \left(\frac{r_0}{r} \right)^l \sum_{m=0}^l P_{lm}(\sin \delta) (C_{lm} \cos m\lambda + S_{lm} \sin m\lambda) \right]$$

gde je M masa planete, G gravitaciona konstanta, r_0 referentni radijus, r radijus na kojem se računa gravitacioni potencijal, P_{lm} Ležandrovi polinomi, C_{lm} i S_{lm} odgovarajući koeficijenti sfernih harmonika i δ i λ planetocentrična latituda i longituda.

Uzimajući u obzir da je topografski opseg na Marsu veoma veliki u poređenju sa Zemljom, očekivano je da su varijacije površinske gravitacije na Marsu relativno velike. Na slici 2 je prikazano površinsko gravitaciono ubrzanje prema modelu Marsovog gravitacionog polja MRO110 [8].

Na slici 2 se može uočiti da veličina površinskog ubrzanja očekivano prati topografske strukture, kao i da se po površini Marsa menja za više od 1%, što je višestruko više nego na Zemlji.

Slika 2 - Gravitaciono ubrzanje na površini Marsa

5. ATMOSFERA MARSA

Kao što je već rečeno, atmosfera Marsa predstavlja najveću prepreku za sletanje kosmičkih letelica na njegovu površinu. Osim same strukture atmosfere, zbog veoma velike osetljivosti na količinu energije koju prima od Sunca i specifične konfiguracije Marsove orbite i ose rotacije, varijacije atmosferskih parametara na dnevnom i godišnjem nivou su ekstremno velike, pogotovo na južnoj hemisferi. Takođe, na Marsu su veoma uobičajene veoma snažne peščane oluje, koje mogu biti lokalne, regionalne, a veoma često i globalne.

Mars danas ima veoma retku atmosferu sačinjenu uglavnom od CO_2 uz male količine azota i argona. Pritisak na površini Marsa je manji od 1% pritiska na površini Zemlje. Izuzev u najnižim oblastima i u određenim periodima godine, pritisak je uvek ispod pritiska trojne tačke za vodu, što znači da i kada temperatura dostigne 0°C , led ne prelazi u tečno stanje već direktno sublimira u vodenu paru.

Velika varijacija ukupne mase Marsove atmosfere tokom godine, zbog kondenzacije i sublimacije atmosferskog CO_2 , glavni je uzrok velikih sezonskih varijacija pritiska, a posledično i ostalih parametara atmosfere. Do ovako snažnog CO_2 ciklusa dolazi zbog toga što je Marsova orbita veoma ekscentrična ($e \approx 0.1$) zbog čega je razlika u količini energije koju Mars prima od Sunca u perihelu (kada je najbliži Suncu) i afelu (kada je najdalji od Sunca) iznosi čak 45%, dok je kod Zemlje ova razlika oko 7%.

Osim toga, Marsova osa rotacije zauzima takav položaj u prostoru da se početak leta na južnoj hemisferi skoro podudara sa trenutkom kada je Mars u perihelu orbite, što dovodi do još većih razlika u insolaciji površine južne hemisfere. Usled ovako velike varijacije u insolaciji, veliki deo atmosferskog CO_2 se kondenzuje kada je Mars u okolini afela, a potom sublimira u atmosferu kada je Mars u okolini perihela.

Budući da na putanju letelice presudan uticaj ima gustina atmosfere, njoj je potrebno posvetiti posebnu pažnju. Na slici 3 prikazani su odnosi maksimalne i minimalne srednje dnevne gustine u toku godine za sve latituda i visine od 10 km do 80 km. Skalom boja je

prikazan položaj Marsa na orbiti kada je srednja dnevna gustina najveća.

Slika 3 - Sezonske varijacije gustine Marsove atmosfere (severna hemisfera – gore, južna hemisfera – dole)

Na prethodnim slikama je uočljivo da atmosferska gustina, kao ključni parametar koji utiče na putanju letelice, ima ogromne varijacije tokom Marsove godine. Idući ka polovima, pogotovo na južnoj hemisferi i na većim visinama, maksimalna gustina atmosfere u toku godine je i po nekoliko desetina puta veća od minimalne gustine.

Slika 4 - Dnevne varijacije gustine atmosfere

Osim sezonskih, takođe postoje i značajne dnevne promene atmosferskih parametara. Ove varijacije atmosferskih parametara, iako značajno manje po magnitudi od sezonskih, takođe mogu imati veliki uticaj na putanju letelice, pa im je potrebno posvetiti posebnu pažnju. Na slici 4 [9] prikazane su maksimalne dnevne varijacije gustine atmosfere na visini od 50 km u zavisnosti od planetografske širine (latitude) i sezone tj. planetocentrične longitude Sunca, koje su dobijene korišćenjem Mars-GRAM atmosferskog modela [10, 11].

Za razliku od sezonskih varijacija koje su najizraženije u polarnim oblastima, dnevne varijacije su najveće u ekvatorskoj oblasti. Dnevne promene su mnogo manje od sezonskih ali su ipak veoma značajne, jer tokom dana, zavisno od visine i latitude, gustina može da se menja i do 30%. Osim veličine promene atmosferskih parametara, dnevne varijacije su veoma značajne i zbog toga što mogu da dovedu do ovih promena za samo nekoliko časova.

Uzimajući u obzir da gustina atmosfere ima veoma velike sezonske, a i dnevne promene, vreme ulaska letelice u atmosferu je od ključnog značaja za ostvarivanje uspešnog sletanja, pogotovo na kritičnim lokacijama na južnoj hemisferi, gde je elevacija površine velika.

6. AERODINAMIČKO OKRUŽENJE PRILIKOM LETA KROZ MARSOVU ATMOSFERU

Prve letelice koje su velikim brzinama ulazile u atmosferu nisu bile kosmičke, već interkontinentalni balistički projektili, na čijem razvoju se intenzivno radilo nakon Drugog svetskog rata. Let kroz guste slojeve atmosfere hipersoničnim brzinama predstavljao je veliki tehnološki izazov zbog ogromnog zagrevanja letelice. Zbog ovog problema pojavio se i pojam „termalna barijera“ po analogiji sa zvučnom barijerom koja je predstavljala veliki izazov u nešto ranijoj fazi razvoja vazduhoplovstva i raketne tehnologije.

Prva istraživanja čiji je cilj bio određivanje adekvatnog oblika za balističke projekte su intuitivno bila fokusirana na dugačka i tanka tela igličastog oblika. Međutim, kada su tela ovakvih oblika testirana u aerodinamičkim tunelima, količina toplote koju su primala je bila ogromna i dovođila do njihovog topljenja i uništavanja.

Fokus istraživanja se promenio kada je Heri Džulijan Alen u saradnji sa Alfredom Egersom, 1952. godine došao do revolucionarnog otkrića poznatog kao Teorija tupog tela [12]. Ovom teorijom je dokazana naizgled paradoksalna činjenica da povećanje sile otpora dovodi do smanjivanja količine toplote koju telo apsorbira prilikom leta kroz atmosferu. Do ovog fenomena dolazi zbog formiranja lučnog udarnog

talasa ispred tela koji dovodi do toga da samo mali deo toplotne energije apsorbira letelica, dok se veći deo ove energije preda okolnoj atmosferi.

Određivanje aerotermodinamičkih karakteristika letelice koje ulaze u Marsovu atmosferu je izuzetno složeno usled nemogućnosti da se ovaj proces u potpunosti simulira u instalacijama na Zemlji. Određivanje aerodinamičkih koeficijenata u uslovima slobodno-molekularnog strujanja, termičke i hemijske neravnoteže, uzimajući u obzir hemijsku kinetiku Marsove atmosfere koja je, za razliku od Zemljine, dominantno sačinjena od troatomskeg gasa, predstavlja i dalje najveću nepoznanicu prilikom dizajniranja putanje letelice.

Upravo zbog ove činjenice, sve misije na Mars se i dalje izvode na krilima „Vikingovog nasleđa“, u kaspulama oblika zaobljenog konusa, sa poluuglom od 70°. Na slici 5 je prikazan model jedne ovakve kapsule koja je korišćena za misije MER-A (Spirit) i MER-B (Opportunity), koje su uspešno sletele na Mars u januaru 2004. godine.

Slika 5 - Model kapsule za misije MER-A i MER-B

Za potrebe određivanja aerodinamičkih koeficijenata u kompleksnom strujnom polju razvijeni su brojni numerički algoritmi. Za računanje koeficijenata u prelaznom režimu strujanja najčešće je korišćen DAC-66 algoritam [13], a u režimu slobodno-molekularnog strujanja DACFREE algoritam [14]. Za modelovanje viskoznog, hemijski reaktivnog, kontinualnog strujanja najčešće se koristi LAURA67 algoritam [15].

Koeficijenti otpora (C_x) dobijeni pomoću ovih algoritama za kapsule Mars Exploration Rover (MER), Mars Pathfinder (MPF) i Phoenix (PHX) prikazani su na Slici 6 [16, 17, 18, 19].

Slika 6 - Aerodinamički koeficijent otpora za kontinualni, prelazni i slobodno-molekularni režim strujanja u Marsovoj atmosferi

Na prethodnoj slici se može videti da se pri velikim Mahovim brojevima koeficijent otpora veoma malo menja sa Mahovim brojem. Takođe ova vrednost se prilično dobro slaže sa vrednošću od 1.784 koja se dobija iz Njutnove teorije.

Iako modelovanje aerodinamičkog okruženja letelice na ovako velikim Mahovim brojevima u atmosferi potpuno drugačijoj od Zemljine, predstavlja ogroman izazov, ipak najrizičniji proces prilikom sletanja na Mars predstavlja otvaranje padobrana pri supersoničnim uslovima leta. Budući da je padobran veoma deformabilna struktura, javlja se veoma složen kompleks udarnih i ekspanzionih talasa koji je nemoguće modelovati sa velikom pouzdanošću. Olakšavajuća okolnost je da se ovaj proces dešava pri relativno malim Mahovim brojevima ($M < 2$), te je ove uslove moguće simulirati u vazдушnim tunelima na Zemlji, mnogo bolje nego segment leta koji se odvija pri hipersoničnim uslovima [20, 21]. Na svih dosadašnjih 7 uspešnih sletanja korišćena je ista vrsta padobrana razvijena za misije Viking 1 i Viking 2. Na slici 7 je prikazan koeficijent otpora padobrana u funkciji Mahovog broja dobijen pomoću merenja u aerodinamičkim tunelima [22].

Slika 7 - Koeficijent otpora padobrana

Na prethodnoj slici se vidi da je koeficijent otpora konstantan u subsoničnoj oblasti, zatim ima nagli pad u transoničnoj oblasti, dok najveću vrednost dostiže oko Mahovog broja 1.6.

Prilikom sletanja letelice na Mars, okidač za otvaranje padobrana je dinamički pritisak koji mora biti dovoljno mali kako bi se izbegla prevelika mehanička opterećenja koja bi mogla biti kobna po osetljivu naučnu opremu koja se nalazi u letelici. Tipičan dijagram promene dinamičkog pritiska sa visinom prilikom sletanja na Mars prikazan je na slici 8.

Slika 8 - Promena dinamičkog pritiska na putanji

Visina otvaranja padobrana je kritični parametar za ostvarivanje bezbednog sletanja. Od ove visine zavisi da li će letelica imati dovoljno vremena da izvrši sve neophodne procese (odbacivanje termalnog štita, uključivanje radara za merenje visine, odvajanje lendera od kapsule, naduvavanje vazдушnih jastuka, itd.).

Slika 9 - Uslovi prilikom otvaranja padobrana za prethodne misije na Mars

Sa druge strane postoji tehnološko ograničenje usled opasnosti od preopterećenja strukture letelice kao i naučne opreme. Od vremena sletanja Vikinga, dinamički pritisak, Mahov broj, pa samim tim i visina prilikom otvaranja padobrana su značajno evoluirali, što se može videti na slici 9.

Inženjerima je već duže vreme jasno da su kapaciteti padobrana dostigli svoj maksimum i da je za povećanje kapaciteta sletanja (mase letelice i elevacije lokacije sletanje) neophodno raditi na zameni padobrana novim tehnologijama, poput supersoničnih retro propulzora. U sadašnjim uslovima neophodno je putanju optimizovati tako da se odgovarajući Mahov broj i dinamički pritisak dostignu na što je moguće većoj visini. Ovo je posebno važno za sletanje na lokacije sa velikom elevacijom.

7. ULAZNI KORIDOR

Pri određenoj brzini ulaska u atmosferu, koja je pre svega određena karakteristikama međuplanetarne putanje od Zemlje do Marsa, postoji određeni opseg uglova ulaska u atmosferu (ugao nagiba putanje) pri kojima letelica može bezbedno da se spusti na površinu Marsa. Ako letelica uđe pod previše malim uglom, na nju neće delovati dovoljno velika sila otpora atmosfere koja bi je sprečila da ponovo izleti iz atmosfere i vrati se na heliocentričnu orbitu.

Sa druge strane, ako letelica uđe pod prevelikim uglom, njena atmosferska putanja biće previše strma, što će rezultirati prevelikim mehaničkim i termičkim opterećenjima letelice. Između ove dve krajnosti nalazi se takozvani ulazni koridor. Na slici 10 prikazane su atmosferske putanje letelice, počevši od visine od 120 km, na kojoj počinje da se oseća uticaj atmosferskog otpora, za brzinu ulaska od 5.5 km/s i ugao nagiba putanje od -11.5° , koliko su iznosili za letelicu MER-B (Opportunity).

Slika 10 - Atmosferske putanje u zavisnosti od početnog ugla nagiba putanje

Na prethodnoj slici se vidi da je putanja letelice kroz atmosferu izuzetno osetljiva na početni ugao nagiba putanje i da razlika od dela lučnog stepena može dovesti do povratka letelice u međuplanetarni

prostor, umesto sletanja na površinu Marsa. Na sledećoj slici je prikazana zavisnost visine od vremena leta za graničnu putanju sa nagibom $\gamma = -8.2^\circ$.

Slika 11 - Zavisnost visine od vremena na graničnoj putanji

Kao što se može videti na prethodnoj slici, za granični ugao nagiba putanje, letelica se nakon spuštanja do visine od oko 60 km, usled dejstva centrifugalne sile zbog kretanja velikom brzinom po zakrivljenoj putanji, ponovo penje na početnu visinu od 120 km. Za manji ugao nagiba putanje, letelica bi izašla iz atmosfere i, u zavisnosti od energetskog bilansa, ponovo ušla u atmosferu ili se čak oslobodila gravitacionog dejstva Marsa i vratila na heliocentričnu orbitu. Optimalne putanje koje omogućuju bezbedno sletanje na površinu Marsa odgovaraju početnim uglovima putanje od oko -11° .

8. PRISTUPAČNE LOKACIJE NA POVRŠINI MARSA

Kao što je već rečeno, Marsova atmosfera je veoma tanka i retka u poređenju sa Zemljinom. Sa druge strane, usled globalne dihotomije skoro čitava južna hemisfera Marsa leži iznad topografske reference koja predstavlja analogiju nivou mora na našoj planeti. Zbog toga je praktično iznad cele južne hemisfere atmosfera Marsa za nekoliko kilometara tanja nego iznad severne hemisfere.

Ovo je razlog zbog kojeg su lokacije na južnim visoravnima veoma nepristupačne, dok sa druge strane postoji veliki naučni interes za njihovo istraživanje. Osim što je veoma tanka, atmosfera Marsa je i veoma dinamična. U njoj se mogu očekivati velike sezonske promene gustine, pogotovo na južnoj hemisferi (videti Sliku 3), kao i velike dnevne varijacije koje su najizraženije u okolini ekvatora (videti sliku 4). Zbog ovako velikih promena gustine atmosfere, mogućnost sletanja na određene lokacije na Marsu je veoma osetljiva na izbor vremena sletanja, kako u toku godine, tako i u toku dana.

Pošto su sezonske varijacije atmosferskih parametara izrazito velike, njihov uticaj na putanju letelice je toliko veliki, da su razlike u elevacijama lokacija na koje se može izvršiti sletanje u zavisnosti od doba

godine, uporedive sa srednjom razlikom u elevacijama između severne i južne hemisfere. Na slici 12 su prikazane zavisnosti brzine od visine, za simulirane putanje, za sletanje u Ptolomejev krater, sa koordinatama 46.2°S , 202.4°E , koji ima elevaciju od $+1657\text{ m}$, i u koji je 1971. godine pokušano sletanje letelice Mars 3. Putanje su simulirane za različite atmosferske uslove tokom jedne cele Marsove godine, u zavisnosti od planetocentrične longitudine Sunca L_s , koja koja u suštini predstavlja sezonu u toku godine. Na južnoj hemisferi $L_s=0^{\circ}$ označava početak jeseni, $L_s=90^{\circ}$ početak zime, $L_s=180^{\circ}$ početak proleća, a $L_s=270^{\circ}$ početak leta. Simulacija je urađena za početne vrednosti brzine od 5.5 km/s i ugla nagiba putanje -11.5° , kao što je bilo prilikom sletanja letelice MER-B (Opportunity).

Slika 12 - Zavisnost brzine od visine tokom godine

Na prethodnoj slici je deo putanje pre otvaranja padobrana prikazan zelenom bojom, a nakon otvaranja padobrana crvenom bojom, dok su plavom bojom prikazane površi konstantnog Mahovog broja. Uočljivo je da se visina otvaranja padobrana za sletanja na istu lokaciju i pri istim početnim uslovima, menja za nekoliko kilometara tokom Marsove godine, što je više od srednje razlike u elevacijama severne i južne hemisfere. U toku jeseni i zime ova visina je minimalna dok maksimum dostiže tokom leta i proleća na južnoj hemisferi.

Slika 13 - Varijacije u visini otvaranja padobrana tokom Marsove godine i dana

Osim sezonskih, postoje i veoma značajne dnevne varijacije atmosferskih parametara koje dovode do varijacija u visini otvaranja padobrana i na dnevnom

nivou. Na slici 13 su prikazane visine otvaranja padobrana u zavisnosti od sezone (L_s), kao i vremena tokom dana ($LPSV$ - lokalno pravo Sunčano vreme), za simulaciju sletanja letelice MER-B (Opportunity) u Ptolomejev krater.

Kao što se može videti sa slike 13, optimalna sezona sletanja na južnoj hemisferi je u okolini perihela ($L_s=251^{\circ}$). Uzimajući u obzir da na južnoj hemisferi leto počinje kada je $L_s=270^{\circ}$, jasno je da je najbolje vreme za sletanje tokom najtoplijeg perioda godine [23, 24]. Ako se posmatra na dnevnom nivou, sa slike 13 je uočljivo da je uticaj dnevnih varijacija atmosferskih parametara mnogo manji od sezonskih ali da nije zanemarljiv, kao i da je tokom cele godine optimalno vreme sletanja tokom obdanice [9].

Slika 14 - Pristupačne lokacije na južnoj hemisferi

Kao što je već pomenuto, vreme od trenutka otvaranja padobrana do sletanja, koje se naziva vreme spuštanja, ključno je za ostvarivanje uspešnog sletanja jer tokom ovog vremena letelica mora izvede veliki broj operacija za koje je neophodno određeno vreme. Ako se vreme spuštanja definiše kao ograničenje, moguće je odrediti pristupačne lokacije sletanja u zavisnosti od atmosferskih parametara za različite trenutke u toku Marsove godine. Na slici 14 su prikazane ove lokacije (osenčene oblasti) na delu južne hemisfere Marsa, za početnu brzinu, ugao nagiba putanje i minimalno vreme spuštanja od 57 sekundi, kao što je bilo za misiju MER-B (Opportunity).

Na slici 14 je uočljivo da se tokom letnjih meseci pristupačne lokacije pojavljuju u oblasti visoravni Sirenum (39.7°S, 210°E), Simeria (Cimmeria) (34.7°S, 145°E) i Noakis (Noachis) (45°S, 350°E). Dakle, tokom najtoplijeg perioda godine, moguće je i sa sadašnjom tehnologijom ostvariti sletanje u visokim oblastima na južnim visoravnima, za koje postoji veliki naučni interes.

9. ZAKLJUČAK

Na proces sletanja na površinu Marsa pomoću sadašnje tehnologije, koja između ostalog podrazumeva korišćenje supersoničnog padobrana, veliki uticaj imaju različiti astronomski fenomeni, pre svega globalna dihotomija i velike dnevne, a pogotovo sezonske varijacije atmosferskih parametara. Ovako velike varijacije, koje su neizmislive na Zemlji, posledica su CO₂ ciklusa u Marsovoj atmosferi, koji se javlja zbog velike ekscentričnosti Marsove orbite, kao i specifičnog položaja njegove ose rotacije. Na osnovu analize prikazane u prethodnim poglavljima, može se izvesti nekoliko zaključaka koji imaju najveći značaj za istraživanje mogućnosti i optimizaciju sletanja na površinu Marsa, pogotovo na njegove južne visoravni:

- Zbog sezonskih varijacija atmosferskih parametara pristupačne elevacije sletanja se menjaju za nekoliko kilometra u toku godine.
- Optimalna sezona za sletanje na južne visoravni je u okolni perihela orbite, od kasnog proleća do rane jeseni.
- Uticaj sezonskih varijacija atmosferskih parametara raste sa udaljavanjem od ekvatora.
- Pristupačne lokacije sletanja pojavljuju se kada je Mars u okolini perihela u relativno visokim oblastima, na visoravnima Sirenum, Simeria i Noakis.
- Uticaj dnevnih varijacija atmosferskih parametara je višestruko manji od sezonskih i, suprotno od njih, opada sa udaljavanjem od ekvatora.
- Optimalno vreme sletanja je tokom obdanice.

Budući da se zahtevi za količinom naučne opreme konstatno uvećavaju, kao i da postoje ozbiljni planovi

za slanje ljudske posade na Mars u narednim decenijama, u toku su diskusije o optimalnoj arhitekturi sistema koja bi bila u mogućnosti da odgovori ovim narastajućim zahtevima. Zajednička odlika svih razmatranih modela je izbacivanje supersoničnog padobrana, kao najrizičnije tačke sadašnje tehnologije, i njegova zamena supersoničnim retro propulzorima. Svakako da nema sumnje da će svako novo rešenje morati da uzme u obzir i globalnu dihotomiju Marsa, kao i CO₂ ciklus u njegovoj atmosferi, u cilju maksimalnog iskorišćenja svojih performansi.

LITERATURA

- [1] W W. B. Smith D. E, Williams R. M, Hynek B. M, Aharonson O, Hauck Li S. A, Ancient geodynamics and global-scale hydrology on Mars, *Science*, Volume 291, pp. 2587-2591, 2001.
- [2] McGill G. E, Squyres S. W, Origin of the martian crustal dichotomy: Evaluating hypotheses, *Icarus*, Volume 93, pp. 386-393, 1991.
- [3] Nimmo F, Tanaka K, Early crustal evolution of Mars, *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, Volume 33, pp. 133-161, 2005.
- [4] Carr M. H, *The Surface of Mars*, Cambridge University Press, UK, 2006.
- [5] Fassett C. I, Head III J. W, Valley network-fed, open-basin lakes on Mars: Distribution and implications for Noachian surface and subsurface hydrology, *Icarus*, Volume 198, pp. 37-56, 2008.
- [6] M. Ekmedžić B. Rašuo, Voda na Marsu, *Tehnika*, Volume 66, pp. 55-66, 2011.
- [7] Kaula W. M, *Theory of Satellite Geodesy*, Blaisdell, Waltham, MA, 1966.
- [8] Konopliv A. S, Asmar S. W, Folkner W. M, Karatekin O, Nunes D. C, Smrekar S. E, Yoder C. F, Zuber M.T, Mars high resolution gravity fields from MRO, Mars seasonal gravity, and other dynamical parameters, *Icarus*, Volume 211, pp. 401-428, 2011.
- [9] Marčeta D, The Effects of the Diurnal Atmospheric Variability on Entry, Descent and Landing on Mars, *Serbian Astronomical Journal*, Volume 189, pp. 69-77, 2014.
- [10] Justus C. G, James B. F, Johnson D. L, A Revised Thermosphere for the Mars Global Reference Atmospheric Model (Mars-GRAM Version 3.4), *Technical Report*, NASA Marshall Space Flight Center, USA, 1996.
- [11] Justus C. G, James B. F, Bougher S. W, Bridger A. F. C, Haberle R. M, Murphy J. R, Engel S, Mars-GRAM 2000: A Mars atmospheric model for

- engineering applications, *Advances in Space Research*, Volume 29, pp. 193-202, 2002.
- [12] Allen H. J, Eggers A. J, A study of the motion and aerodynamic heating of ballistic missiles entering the earth's atmosphere at high supersonic speeds, *NACA Technical Report 1381*, 1958.
- [13] Lebeau G, Application highlights of the DSMC Analysis Code (DAC) software for simulating rarefied flows, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Volume 191, pp. 595-609, 2001.
- [14] Wilmoth R. G, DACFREE - a free molecular/Newtonian code for hypersonic flow, a user guide, *NASA Langley Research Center*, 1999.
- [15] Cheatwood F. M, Gnoffo P. A, User's manual for the Langley Aerothermodynamic Upward Relaxation Algorithm (LAURA), *NASA TM-4674*, 1996.
- [16] Gnoffo P. A, Braun, R. D, Cruz, C. I, Weilmuenster, K. J, Influence of sonic-line location on Mars Pathfinder Probe aerothermodynamics, *Journal of Spacecraft and Rockets*, Volume 33, pp. 169-177, 1996.
- [17] Moss J. N, Blanchard, R. C, Wilmoth, R. G, Braun R. D, Mars Pathfinder Rarefied Aerodynamics: Computations and Measurements, *AIAA paper 98-0298*, 1998.
- [18] Edquist K. T, Desai, P N, Schoenenberger M, Aerodynamics for Mars Phoenix Entry Capsule, *Journal of Spacecraft and Rockets*, Volume 48, pp. 713-726, 2011.
- [19] Schoenenberger M, Cheatwood F. M, Static Aerodynamics of the Mars Exploration Rover Entry Capsule, *AIAA paper 2005-0056*, 2005.
- [20] Reichenau, D. E. A, Aerodynamic Characteristics of Disk-Gap-Band Parachutes in the Wake of Viking Entry Forebodies at Mach Numbers from 0.2 to 2.6, *AEDC-TR-72-78*, 1972.
- [21] Cruz J. R, Mineck R. E, Keller D. F, Bobskill, M. V, Wind Tunnel Testing of Various Disk-Gap-Band Parachutes, *AIAA paper 2003-2129*, 2003.
- [22] Prince J. L, Desai, P. N, Queen E. M, Grover M. R, Mars Phoenix Entry, Descent, and Landing Simulation Design and Modeling Analysis, *Journal of Spacecraft and Rockets*, Volume 48, pp. 756-764, 2011.
- [23] Marčeta D, *Possibilities and Optimization of Landing on the Southern Hemisphere of Mars*, PhD thesis, University of Belgrade, Faculty of Mathematics, Department of Astronomy, Belgrade, Serbia, 2015, (in Serbian).
- [24] Marčeta D, Šegan S, Rašuo B, Influence of seasonal cycles in Martian atmosphere on entry, descent and landing sequence, *Acta Astronautica*, Volume 98, pp. 163-168, 2014.

SUMMARY

LANDING ON MARS

More than 40 years after the first successful landing on Mars, in situ exploration of its surface continues to be a huge scientific and technological challenge. This primarily refers to Martian southern highlands, extending over a large part of its southern hemisphere, where no successful landing has been achieved so far. On the other hand, in the northern lowlands, which cover almost entire northern hemisphere, 7 successful landings have been completed. This difference is a consequence of the specific topography of the Martian surface due to the so-called global or hemispherical dichotomy of Mars, which represents a unique feature in the Solar system. Due to the difference in elevations of the surface, a spacecraft trying land on the southern highlands have a thinner atmosphere layer which can be used for dissipation of kinetic energy. Since the spacecraft from an interplanetary trajectory enter the atmosphere with hyperbolic velocities, their kinetic energy is extremely large and the ability to reduce it through interaction with the atmosphere is crucial for safe landing, especially at sites with high elevation. It is estimated that the southern highlands are billions of years older than the northern lowlands, which were exposed to strong volcanic activity in the relatively recent past. This huge difference in age is a motivation for exploration of the entire surface of Mars in order to understand its complex geological evolution. In addition, a large number of open basins, which were discovered on the southern lowlands, indicate that these regions in the past could have been covered with liquid water, which is one of the most important reasons for exploring these locations. The analysis of the seasonal and daily variations of the Martian atmosphere confirms that, it is possible to land on these high locations by using current technology, with the necessity of optimization of the conditions under which spacecraft enter the atmosphere, in order to maximize the benefits from these specificities of Mars.

Key words: Mars, landing, atmosphere, dichotomy