



UNIVERZITET U NOVOM SADU
PRIRODNO-MATEMATIČKI
FAKULTET
DEPARTMAN ZA FIZIKU



Uticaj interplanetarnog putovanja na Mars na ljudsko telo

- master rad -

Mentor:

Prof. dr Tijana Prodanović

Kandidat:

Vlasto Petraš

Novi Sad, 2019.

SADRŽAJ

1.	UVOD	3
2.	ZNAČAJNI PROGRAMI	5
2.1	Apolo misije	5
2.2	Saljut i Skajlab svemirske stanice	5
2.3	Mir i Međunarodna svemirska stanica	6
2.4	Mars 500.....	6
3.	MARS KAO SLEDEĆA DESTINACIJA	7
4.	PREGLED MOGUĆIH MISIJA.....	7
5.	IZBOR TRAJEKTORIJE	8
6.	UTICAJI NA LJUDSKO TELO.....	9
7.	PSIHOLOŠKI EFEKTI	9
8.	FIZIOLOŠKE POSLEDICE	10
8.1	Uticaj na krvotok i tečnosti u telu	12
8.2	Promene na oku	13
8.3	Uticaj mikrogravitacije na koštano-mišićni sistem	14
8.4	Uticaj na kosti.....	15
8.5	Uticaj na mišiće	17
8.6	Formiranje kamena u bubregu.....	19
9.	ZRAČENJE U SVEMIRU.....	19
9.1	Čestice solarnog vетра	20
9.2	Čestice solarne erupcije (SPE)	20
9.3	Galaktičko kosmičko zračenje (GCR).....	22
10.	BIOLOŠKE POSLEDICE USLED ZRAČENJA	25
10.1	Dejstvo zračenja na ćeliju	25
10.2	Uticaj zračenja na organizam	26

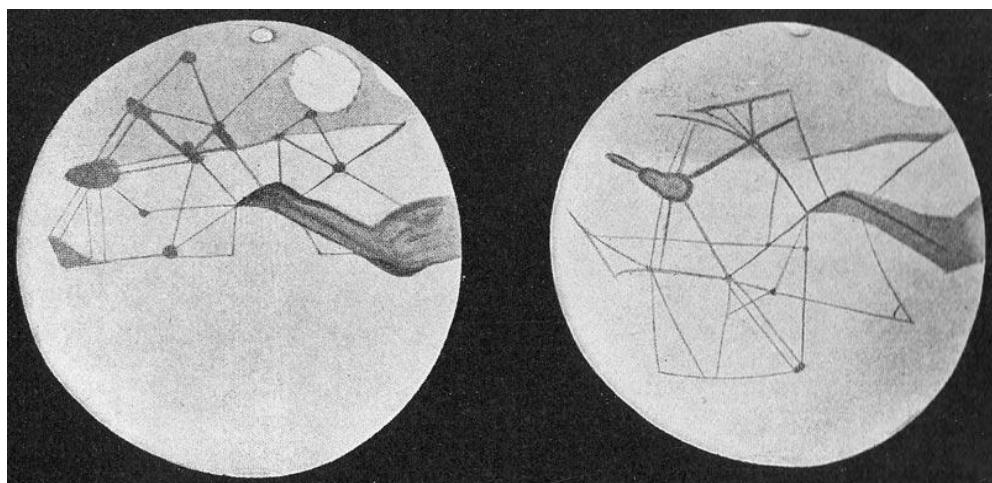
10.3	Akutni radijacioni sindrom.....	26
10.4	Uticaj na kardiovaskularni sistem	27
10.5	Razvoj katarakte	28
10.6	Uticaj na centralni nervni sistem.....	28
11.	DOZE ZRAČENJA	29
11.1	Apsorbovana doza D	30
11.2	Ekvivalentna doza H	30
11.3	Efektivna doza E	30
11.4	Uticaj zidova letelice na doze zračenja	31
11.5	Očekivane doze zračenja	32
12.	PROCENA DOZE ZRAČENJA PRILIKOM MISIJE NA MARS	33
13.	ZAKLJUČAK.....	37
14.	LITERATURA	38

1. UVOD

Četvrta planeta po udaljenosti od Sunca, oduvek je budila znatiželju noćnih posmatrača neba. U drevna vremena zbog svoje crvenkaste boje koja je podsećala na krv, u mnogim kulturama doživljavala se kao simbol rata. U rimskoj kulturi ova planeta je simbolizovala boga rata Marsa, po kome je i dobila ime.

Konstrukcijom teleskopa početkom 17. veka, značajno je povećano interesovanje za crvenom planetom. Sa povećanjem razdvojne moći teleskopa, čovek je bio u stanju da vidi više detalja na površini Marsa. U drugoj polovni 19. veka napravljene su prve skice reljefa površine. Tokom opozicije Marsa 1877. godine, astronom Đovani Skjapareli¹ na površini primeće formacije u obliku linija koje su ličile na kanale. Neki astronomi tog vremena poput Persivala Lovela², smatrali su da su kanali na Marsu zapravo veštački vodotokovi koje su napravila inteligentna bića, sa ciljem navodnjavanja zemljišta, otapanjem polarnih kapa na Marsu (slika 1). Daljim poboljšanjem razdvojne moći teleskopa početkom 20. veka ustanovljeno je da su te formacije u obliku kanala zapravo posledica erozije tla.

Iako je teorija o kanalima odbačena, uticaj nje i sličnih teorija na društvo bio je značajan, po pitanju formiranje svesti ljudi o mogućnosti postojanja izvanzemaljskog života na Marsu i drugim planetama u Sunčevom sistemu. Isto tako one su uticale na formiranje ideja o mogućnosti čoveka da poseti i živi na drugim nebeskim telima. Pod dejstvom ovih zamisli



Slika 1: Crtež kanala na Marsu koje je video Persival Louel putem teleskopa. Izvor: Vikipedija

nastaju knjige, filmovi i drugi mediji iz oblasti naučne fantastike koji eksploratišu ove ideje. Pod njihovim uticajem odrastaju mnogi ljudi koji će kao naučnici usmeriti svoj naučni rad ka ostvarivanju ove mogućnosti.

Pedesetih godina 20. veka, počinje era istraživanja svemira izvan Zemljine površine. Lansiranjem prvog zemljinog veštačkog satelita Sputnik 1, 1957. godine, otpočela je trka za osvajanjem svemira. U narednim decenijama čovek šalje veliki broj bespilotnih svemirskih letelica ka ostalim nebeskim objektima Sunčevog sistema. Boravak prvog čoveka u svemiru, Jurija Gagarina, 1961. godine, kao i uspešno sletanje čoveka na Mesec u misiji Apolo 11,

¹ Giovanni Schiaparelli, (14.3.1835. – 4.7.1910.)

² Percival Lawrence Lowell, (13.3.1855. – 12.11.1916.)

1969. godine i 70-tih godina prošlog veka, bili su dodatan vетар u leđa za planiranje slanja čoveka i na ostala nebeska tela u Sunčevom sistemu. Na krilima uspeha ovih i drugih misija, kao i relativno brzog tehnološkog napretka, prave se veoma optimistične procene da će čovek do kraja 80-tih godina 20. veka posetiti Mars.

Prve misije sa ljudskom posadom koje bi posetile Mars, a koje su počele da se osmišljavaju u drugoj polovini 20. veka, uglavnom su se odnosile na savladavanje tehničkih prepreka, poput trajanja putovanja ili veličinu i opremljenost letelica. Verner fon Braun³, nemačko-američki pionir astronautike, među prvima je još 50-tih godina 20. veka u svom delu *Project Mars*⁴, detaljno opisao misiju na Mars sa ljudskom posadom. Iako delo nije bilo naučni rad, nego roman naučne fantastike, u svom dodatku sadržalo je detaljne matematičke proračune i skice vezane za misiju na Mars. Misija bi bila sastavljena od 10 letelica ukupne mase 3630 tona koje bi bile sastavljene u Zemljinoj orbiti i 70 članova posade. Misija je bila zamišljena tako da bi posada po dolasku u Marsov orbitu najpre na njegovom ekvatoru odredila pogodno mesto za izgradnju baze. Zatim bi se jedan deo posade spustio glajderom na polarne kape Marsa i počeo svoje putovanje prema izabranom mestu na ekvatoru. Fon Braun je smatrao da su polarne kape najravniji teren na površini Marsa, pa su prema tome bile najpogodnije mesto za prvo spuštanje na njegovu površinu. Na ekvatoru bi izgradili pistu na koju bi se spustila ostala dva glajdera iz orbite. Na površini Marsa posada bi izgradila i habitat koji bi poslužio kao baza tokom boravka na površini u trajanju od 400 dana. Tokom misije, posada bi uzela uzorke „lokalne flore i faune“ i istražila misteriozne kanale, posle čega bi se vratili na Zemlju. Misija bi ukupno trajala oko 3 godine (Portree, 2001).

Ova i slične misije na Mars sa ljudskom posadom nikad nisu realizovane iz nekoliko razloga. Pre svega, ovakve misije bi bile izuzetno skupe, a ekonomski razlog jedan je od bitnijih. Napretkom tehnologije, svemirske letelice i sonde postajale su sve pouzdanije i lakše za upravljanje, usled čega su postale jeftinija i efikasnija zamena za ljudsku posadu. Drugi, možda i najbitniji, razlog je pitanje bezbednosti. Upotrebom letelica i sondi u istraživačke svrhe odbačen je rizik od gubitka života posade usled nezgode ili greške koje su nezaobilazni deo istraživanja. Osim toga, pitanje bezbednosti bilo je upitno i iz razloga slabog poznavanja osobina svemira tj. zračenja koja ga ispunjavaju kao i uticaja dugog boravka u bestežinskom stanju na organizam. Nepoznavanje ili nepotpuno razumevanje njihovog uticaja na ljudsko telo tokom dugog putovanja i boravka na Marsu bio je jedan od velikih kamenih spoticanja mogućih misija. Posle uspešnog lansiranja satelita Explorer u Zemljiniu orbitu došlo se do saznanja o postojanju oblasti zračenja oko Zemlje - Van Alenovih pojaseva koje potencijalno može štetno da utiče na ljudsko telo. I sam fon Braun je u svojoj gore pomenutoj knjizi razmatrao mogući negativni uticaj ranije otkrivenih kosmičkih zraka na ljudsko telo. Jedan od najbitnijih razloga zašto su misije Apolo na Mesecu trajale kratko (posada misije Apolo 17 na površini Meseca je provela 75 sati dok je cela misija ukupno trajala 12 dana) je upravo zbog izloženosti zračenju iz svemira odnosno nepredvidivosti Solarnih oluja.

Međutim, uprkos svim opstipacijama koje su se postavile na putu do Marsa, čovečanstvo nije napustilo ideju da ipak jednog dana i lično boravi na ovoj planeti. U tu svrhu počelo se sa razvojem različitih programa, od strane NASA-e, Sovjetskog svemirskog programa, ESA-a,

³ Wernher von Braun, (23.3.1912. – 16.6.1977.)

⁴ Originalni naziv dela štampan je na nemačkom jeziku 1952. godine pod nazivom *Das Marsprojekt*.

SpaceX-a i mnogih drugih agencija, kao i njihovom kolaboracijom čiji je cilj ispitivanje posledica putovanja na ljudsko telo, razvijanje sredstava za putovanje i osmišljavanje plana za slanje čoveka na Mars, ali i druga tela u svemiru.

Cilj ovog master rada je da ispita na koje načine će putovanje ljudi do Marsa uticati na ljudsko telo, odnosno da ispita posledice po zdravlje čoveka i da da procenu najoptimalnijih parametara za misije koje bi mogle da se realizuju u budućnosti.

2. ZNAČAJNI PROGRAMI

Otkad su se ljudi spustili na Mesec došlo se do značajnog napretka na polju astronautike. Savladano je lansiranje, orbitalna mehanika, spuštanje na drugo nebesko telo, boravak i kretanje po drugim nebeskim telima itd. Međutim, jedna od najbitnijih stvari koje nisu savladane su boravak i život čoveka u svemiru tokom dužeg vremenskog perioda. Pošto je Mesec u blizini Zemlje, putovanje do njega traje samo 3-4 dana, za razliku od putovanja do Marsa gde, po najpovoljnijim uslovima, putovanje traje pola godine. Plus, ako se doda da ne postoje povoljni uslovi za povratak na Zemlju, misija može trajati i skoro 3 godine. To bi značilo da bi posada dugotrajno bila izložena nesvakidašnjim uticajima svemira i boravka u ograničenom prostoru. Ove činjenice bile su povod za razvoj istraživačkih programa tokom 70-tih godina 20. veka čiji je zadatak bio da ispituju na koje sve načine može svemir uticati na čoveka, kao i kakve posledice po čovekovo zdravlje ovakve misije mogu imati. Među njima najznačajniji su programi svemirskih stanica, kao i pojedinačne misije sprovedene na Zemlji.

2.1 Apolo misije

Sedam Apolo misija sprovedenih od 1969. godine do 1972. godine, pored toga što su po prvi put dovele čoveka na Mesec, imale su značaj i u tome što su članovi posada tih misija bili izvan uticaja magnetosfere Zemlje i na taj način bili prvi put direktno izloženi dejstvu nanelektrisanih čestica visoke energije iz svemira i sa Sunca. Osim toga, put do Meseca dao je prve predstave o tome kako bi se putovanje ljudi na druga tela Sunčevog sistema odvijalo, iako je put do Meseca trajao svega nekoliko dana.

2.2 Saljut i Skajlab svemirske stanice

Saljut svemirske stanice bile su prve svemirske stanice postavljene u Zemljinu orbitu. Sovjetski savez je u periodu od 1971. do 1982. godine postavio ukupno 7 svemirskih stanica. Poslednja od njih Saljut 7 imala je ljudsku posadu 861 dan.

Skajlab, prva svemirska stanica SAD-a, postavljena je u Zemljinu orbitu 1973. godine u kojoj je ostala do 1979. godine. Ona je zamišljena kao laboratorija u orbiti u kojoj ljudi mogu da žive i rade tokom dužeg vremenskog perioda. Do 1979. godine na njoj su sprovedene 3 misije sa ljudskom posadom u trajanju od 28, 59 i 84 dana tokom kojih je sprovedeno skoro 300 naučnih i tehničkih istraživanja.

Sadržaji eksperimenata sprovedenih na ovim stanicama bili su raznoliki. Među njima značajni su eksperimenti u kojima su vršena prva ispitivanja uticaja mikrogravitacije na ljudsko telo, ispitivane su vrste i merene su doze zračenja kojima je posada izložena, na osnovu kojih su razvijani razni vidovi pomagala putem kojih bi se njihovi negativni uticaji na

ljudsko telo smanjili, osmišljavani su načini kako olakšati život posade na svemirskim stanicama.

2.3 Mir i Međunarodna svemirska stanica

Posle delimično uspešnih Saljut svemirskih stаница, 1986. godine Sovjetski Savez u orbitu postavlja svemirsku stanicu Mir. Za razliku od prethodnih stаница, imala je više delova – modula, ukupno sedam, koji su tokom godina postepeno postavljeni u orbitu. Na njoj je zabeležen najduži pojedinačni boravak ljudi izvan Zemlje u trajanju od 437 dana. Trajala je 15 godina.

Kooperacija NASA-e i Roskosmosa na svemirskoj stanci Mir bila je početak saradnje između nekoliko svemirskih agencija iz preko deset država sveta čiji rezultat je bio nastanak Međunarodne svemirske stanice (ISS⁵). Po uzoru na Mir svemirsku stanicu i ona je sastavljena od modula. Njen prvi deo postavljen je u orbitu 1998. godine a do juna 2011. godine imala je 15 modula pod pritiskom za boravak ljudi. Od 2000. godine neprestano ima ljudsku posadu od tri do šest članova.

Značaj ovih stаница je u tome što su implementirale saznanja iz prethodnih misija o boravku ljudi u svemiru kojima je olakšan život posade na stanci i kojima je omogućeno da se putem bavljenja raznim fizičkim aktivnostima spremniji vrate na Zemlju. Zahvaljujući značajnom povećanju vremena boravka posade u orbiti, ispitivanja uticaja dugotrajnog boravka u svemiru su proširena i produbljena. Jedan od takvih je eksperiment „Matroška“ putem kojeg je ispitana dubina prodiranja zračenja kosmičkih zraka i čestica sa Sunca u ljudsko telo. U te svrhe upotrebljena je lutka koja svojim izgledom i unutrašnjošću simulira ljudsko telo a ispunjena je detektorima zračenja. Eksperiment je sproveden četiri puta od 2004. godine do 2011. godine na ISS-u.

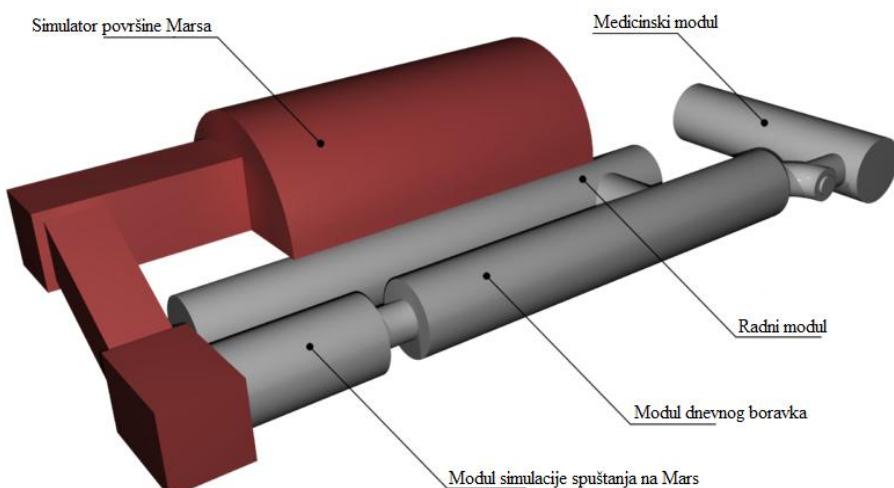
2.4 Mars 500

Misija Mars 500 trajala je u intervalu od 2007. do 2011. godine i sprovedena je u Rusiji uz učešće ESA i Kineske svemirske agencije. Uloga misije je bila da sakupi informacije, znanja i iskustvo povodom psiholoških i fizioloških efekata boravka ljudi u zatvorenom i ograničenom prostoru svemirske letelice tokom dugog vremenskog perioda kojem bi ljudi bili izloženi tokom stvarne misije na Mars. Sastojala se od tri simulacije u trajanju od 14, 105 i 520 dana, tokom kojih su tri grupe dobrovoljaca živele i radile u pet hermetički zatvorenih i međusobno povezanih habitabilnih modula (slika 2). Četiri modula su po funkcionalnosti nalikovala na stvarnu letelicu kojom bi posada putovala na Mars dok je peti modul simulirao površinu Marsa na kojoj je deo posade boravio od 244 do 272 dana misije. Uticaji zračenja i mikrogravitacije nisu proučavani u ovoj misiji.

⁵ Skraćenica od engleskog naziva International Space Station.

3. MARS KAO SLEDEĆA DESTINACIJA

Mars, posle Meseca, se najčešće navodi kao sledeće nebesko telo na koje će čovečanstvo u budućnosti da pošalje ljudsku posadu. Postoji nekoliko razloga za to. Pre svega, to je susedna planeta, pa je relativno brzo stići do nje, u najpovoljnijim uslovima za 6 meseci. Dalje, Mars se smatra najhabitabilnijom planetom u Sunčevom sistemu posle Zemlje. Pre svega zbog postojanja vode na njemu koja je jedan od najbitnijih činilaca za opstanak života onakvog kakvog ga poznajemo. Za razliku od Venere gde je temperatura na površini u proseku preko 400°C a pritisak oko sto puta veći nego na Zemlji, usled efekta staklene baštne, na Marsu je



Slika 2: Šematski prikaz povezanih modula u misiji Mars 500. Izvor: Wikipedija

voda uglavnom u čvrstom stanju na polarnim kapama i ispod površine i iskopavanjem bi bila lako dostupna. U proseku temperatura na Marsu iznosi -60°C, a tokom letnjeg perioda tokom obdanice na ekvatoru temperatura može dostići i 20°C. Dalje, Mars poseduje atmosferu, što doprinosi smanjenju štetnog zračenja iz svemira i Sunca, za razliku od Meseca gde recimo usled nepostojanja atmosfere, ne postoji takva zaštita. Gravitaciono ubrzanje na površini Marsa iznosi 38% od onog na Zemlji, pa telo može lakše da se privikne na promenu, nego recimo na Mesecu gde gravitaciono ubrzanje iznosi oko 17% od gravitacionog ubrzanja na Zemlji. Sem ovih razloga bitno je i napomenuti da trajanje jednog dana na Marsu iznosi 24 h i 39 min, što je približno trajanju dana na Zemlji od 23 h i 56 minuta.

Međutim, bez obzira na nabrojane sličnosti, život ljudi na Marsu bio bi daleko od onog na Zemlji. Boravak ljudi na otvorenom bio bi nezamisliv bez upotrebe specijalnih odela opremljenih za Mars, nalik na one koje koriste astronauti tokom boravka u otvorenom svemiru. Boravak ljudi na Marsu mogao bi se u neku ruku uporediti sa boravkom u istraživačkim stanicama na Antarktiku gde je boravak bez specijalne opreme nemoguć.

4. PREGLED MOGUĆIH MISIJA

Do danas još uvek ne postoje potpuno razvijeni programi puta čoveka na Mars, ali postoje projekti u razvoju. U tom razvoju najviše prednjače dve kompanije NASA i SpaceX.

NASA–ina raketa Space Launch System (SLS) i svemirska letelica Orion koje su u fazi razvoja, jedne su od mogućih prevoznih sredstava do Marsa. Put bi vodio preko Meseca

u čijoj bi orbiti bila postavljena svemirska stanica koja bi služila kao odskočna daska za putovanje. NASA očekuje da će putem ovog programa do sredine tridesetih godina 21. veka uspeti da dovede čoveka na površinu Marsa.

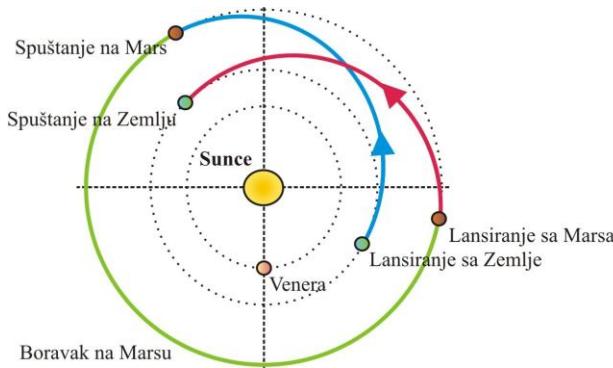
Okosnicu SpaceX-ovog programa za put na Mars predstavlja sistem pod nazivom Interplanetary Transport System (ITS) koji je sastavljen iz dva dela koji su takođe još u fazi razvoja: Interplanetarne letelice i rakete za višestruku upotrebu pod nazivom Big Falcon Rocket (BFR). SpaceX kompanija inicijalno je planirala da pošalje ljude na Mars do 2024. godine. Prvi probni letovi trebali su biti realizovani do 2018. godine, ali zbog zaostatka u razvoju letelice prvi probni letovi odloženi su za 2020. godinu.

Međutim, najrelevantniji podatak za određivanje misije je period u kome se može očekivati da će uticaj zračenja biti najmanji. Ovo se poklapa sa periodom u kome se očekuje da će Sunčeva aktivnost biti maksimalna. Na osnovu pojava maksimuma i minimuma u prethodnim solarnim ciklusima, naredni solarni maksimum očekuje se u periodu oko 2024. godine, te je u tom periodu najoptimalnije realizovati misiju.

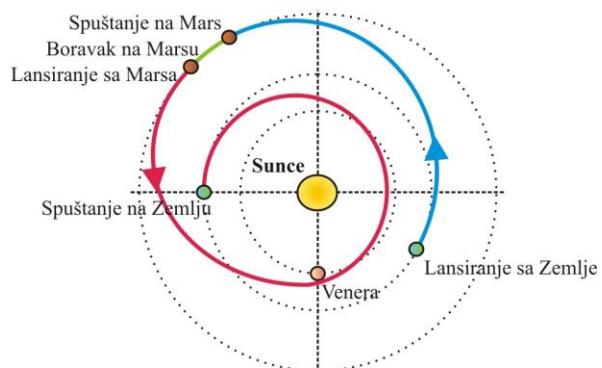
5. IZBOR TRAJEKTORIJE

Izbor trajektorije svemirske letelice za putovanje do Marsa i nazad do Zemlje zavisi od nekoliko faktora. Jedan od najbitnijih faktora predstavlja vreme provedeno u međuplanetarnom prostoru kojim se određuje trajanje uticaja zračenja i mikrogravitacije na ljudsko telo. Sledeći bitan faktor je količina energije koju je potrebno obezbediti za putovanje. Najčešće se spominju dve vrste trajektorija nazvane prema položaju Marsa, Zemlje i Sunca:

- opozicione ili kratkoboraveće i
- konjukcione ili dugoboraveće.



Konjukciona trajektorija



Opoziciona trajektorija

Slika 3: Grafički prikaz konjukcione i opozicione putanje do Marsa. Plave i crvene trajektorije predstavljaju putanje letelice od Zemlje do Marsa odnosno od Marsa do Zemlje. Žute trajektorije predstavljaju vreme za koje bi posada boravila na Marsu. Prilagođeno iz: marspedia.org

Misije na opozicionoj trajektoriji trajale bi otprilike 600 dana, od čega bi posada provela 30 dana na površini Marsa. S druge strane, misije na konjukcionoj trajektoriji bi trajale otprilike 900 dana sa otprilike 550 dana provedenih na Marsu (Landau, Longuski, 2006). Kod opozicionih trajektorija, posada bi više vremena provela u međuplanetarnom prostoru nego kod konjukcionih, što bi dovelo do dužeg dejstva mikrogravitacije i zračenja na posadu. Sem toga, opozicione trajektorije manje su ekonomične, pošto letelice u tom slučaju zahtevaju

veću potrošnju energije nego kod konjukcionih. To za rezultat ima povećanje mase letelice i potrebu za više prostora u njoj. Iz tih razloga za transport ljudi na Mars pogodnije su konjukcione trajektorije. Na slici 3 grafički su predstavljeni izgledi ovih mogućih trajektorija. Misija sa opozicionom trajektorijom mogla bi da započe 14. septembra 2023. godine. Posada bi se na Zemlju vratila 3. maja 2025. godine, pri čemu bi 30 dana provela na Marsu a ostalih 560 dana u međuplanetarnom prostoru (Foster, Daniels, 2010).

Jedna od pogodnih misija sa konjukcionom trajektorijom mogla bi da počne 26. septembra 2022. godine. Putovanje do Marsa bi trajalo 180 dana a posada bi se na njegovoj površini zadržala 550 dana. Povratak na Zemlju bi trajao 180 dana a misija bi se završila 24. marta 2025. godine (Landau, Longuski, 2006).

6. UTICAJI NA LJUDSKO TELO

Uopšteno, uticaji na ljudsko telo tokom boravka u svemiru mogu se podeliti na nekoliko vrsta:

- Psihološki efekti, usled izolacije i dugog vremena provedenog u zatvorenom prostoru;
- Fiziološke posledice po organe ljudskog tela koje nastaju usled mikrogravitacije;
- Uticaji zračenja iz svemira koji dovode do akutnih i kasnijih rizika od razvoja raka i degenerativnih bolesti usled izlaganja jonizujućem zračenju.

U cilju sprečavanja ili smanjenja razvoja ovih efekata razvijaju sa specifične kontramere čija valjanost se proverava u eksperimentima koji se sprovode u istraživačkim stanicama i institutima.

7. PSIHOLOŠKI EFEKTI

Psihofizičko stanje posade tokom dugotrajnog puta na Mars izuzetno je značajno za tok misije, pošto može uticati na njen ishod. Prema NASA-i verovatnoća pojave promena u ponašanju i psihičkih poremećaja povećava se sa povećanjem dužine misije. Iako one ne moraju direktno uticati na uspešnost misije, takva stanja će negativno uticati na zdravlje, odnose i učinak pojedinca i cele posade i na taj način indirektno uticati na uspeh misije. Usled toga potrebno je pravilno i na vreme prognozirati psihičke promene koje bi nastale tokom dugotrajne misije, kako bi se na odgovarajući način moglo opremiti svemirsku letelicu kao i napraviti pravilan izbor članova posade. U tu svrhu sprovedena je misija Mars 500, kao što je rečeno u drugom poglavlju, tokom koje su članovi posade izloženi psihofizičkom testu u kome je njihovo stanje ocenjivano na osnovu određenih indeksa psihofizičkog stanja. Kada je u pitanju depresija, njen indeks je bio veći u drugom delu misije, ali uopšteno nije bilo naznaka pojave depresije kod članova posade, sem kod jednog člana. Ukupni indeks raspoloženja posade nije se značajno menjao tokom misije. Indikatori osećaja nezadovoljstva, fizičke i mentalne iscrpljenosti, umora, napetosti i osećaja bolesti kod većine članova posade ocenjeni su kao slabi. Članovi posade kod kojih su indeksi fizičke iscrpljenosti, stresa, zbumjenosti, umora i depresije imali najmanje vrednosti, imali su najveće vrednosti indeksa snage i aktivnosti, odnosno sa njima su ostali članovi posade najviše komunicirali. S druge strane, članovi posade kod kojih su indeksi fizičke iscrpljenosti, stresa, zbumjenosti, umora

i depresije imali najveće vrednosti, imali su najmanje vrednosti indeksa snage i aktivnosti i ovi članovi posade su najčešće ulazili u konflikte sa ostalim članovima posade i kontrolom misije. Jedan član posade je patio od nesanice, usled čega je u proseku spavao manje od sedam sati dnevno. Kao rezultat toga tokom misije je pravio najviše grešaka od svih članova posade, što bi moglo biti kobno u osetljivim momentima misije (Basner et al., 2014).

Većina psihologa i psihijatara današnjice smatra da najveći problem putovanja na Mars predstavlja autonomija članova posade u odnosu na komandu misije koja bi dovela do psihičkog odvajanja posade od komande usled dugačke izolacije. Ovo odvajanje manifestuje se:

- povećanjem fizičke autonomije i smanjenjem motivacije za izvršavanje zadataka sa povećanjem rastojanja od Zemlje;
- pojmom grupnog mišljenja, tj. pri rešavanju određenog zadataka ili donošenju odluke, savetima koji stižu od kontrole pridaje se manji značaj, a u prvi plan dolaze sopstvene ideje i prioriteti, sa preuveličavanjem sopstvenih mogućnosti;
- povećanom nostalgijom za kućom, rodbinom i prijateljima.

Ove pojave postupno bi dovele do konfrontacije članova posade i kontrole, pa je način vođenja misije promenjen sa klasičnog davanja naredbi i njihovog izvršavanja na način u kome komanda više postupa na osnovu zahteva koje dobija od posade (Ushakov et al., 2014).

Tokom misije Mars 500 navedene pretpostavke su potvrđene. Usled prestanka snabdevanja u 36 danu misije, posada je morala u cilju ishrane, rešavanja zadataka ili otklanjanju kvarova da se osloni na zalihe i sredstva iz sopstvenog skladišta u sklopu habitata. Sa „povećanjem rastojanja od Zemlje“ i usporenja komunikacije usled sve većeg kašnjenja signala, posada je sve manje tražila savete od komande a razmenjene informacije postajale su sve oskudnije po sadržaju, što je dovelo do nerazumevanja i stvaranja pretpostavki po pitanju daljeg načina postupanja. Usled toga se posada pri izvršavanju zadataka i rešavanju problema više oslanjala na sopstvena znanja i sposobnosti. U manjem broju slučajeva, posada je odlučila da ignoriše savete komande i donosila je jednostrane odluke (Ushakov et al., 2014). Između posade i kontrole je zabeleženo pet puta više konflikata nego među članovima posade (Basner et al., 2014). Isto tako povećavala se potreba za psihološkom pomoći i pažnjom bližnjih. E-mailovi i video zapisi, putem kojih su komunicirali sa bližnjima i psiholozima postajali su obimniji i učestaliji sa povećanjem dana misije (Ushakov et al., 2014).

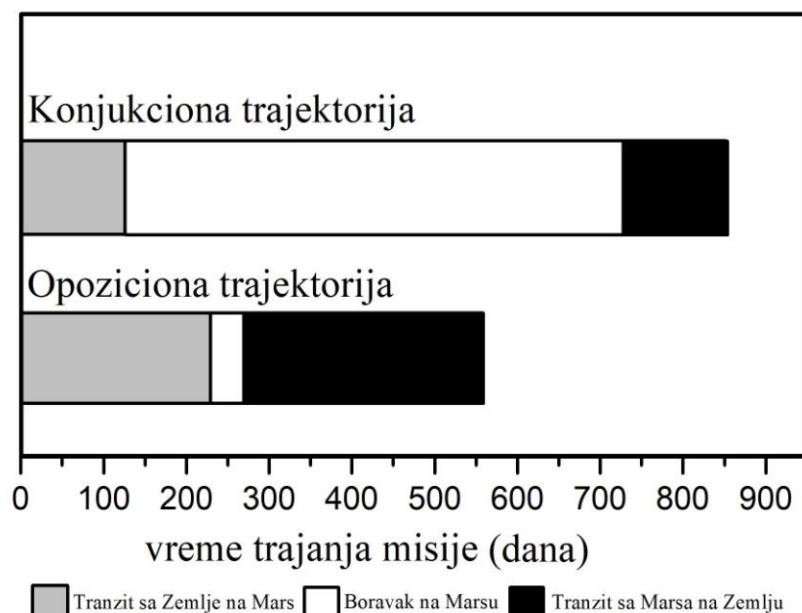
Pojava značajnih događaja tokom misije kao što je trenutak spuštanja na Mars, prenos nekog dela misije uživo na televiziji ili obavljanje nekih aktivnosti koje nisu u dovoljnoj meri uvežbane, postale su uzrok dodatnog stresa, nelagodnosti i poremećaja spavanja posade (Ushakov et al., 2014). Treba dodati da je upravo najviše konflikata sa kontrolom misije zabeleženo tokom tronedenljne simulacije spuštanja i boravka na Marsu (Basner et al., 2014).

8. FIZIOLOŠKE POSLEDICE

Ljudsko telo, kao i mnoge funkcije njegovih organa, nastale su kao rezultat dugotrajne evolucije koja se odvijala na Zemlji pod dejstvom zemljine teže. Organi ili njihove funkcije, različito su se prilagođavali uticaju ove sile. Dok se čovek nalazi na površini Zemlje, njegovo

telo je u ravnoteži sa okolinom, međutim, odlazak i boravak u svemiru dovodi do niza promena na telu koje su posledica privikavanja na drugačije uslove okoline. Kao najbitnija promena u kontrolisanim uslovima boravka u svemiru je pojava mikrogravitacije tj. stanja u kome se tela nalaze u bestežinskom stanju. Ovo stanje se može opisati kao nepostojanje merljive sile privlačenja između tela (Thornton, Bonato, 2017), odnosno vrednosti relativnog gravitacionog ubrzanja nekog tela u odnosu na letelicu i ostala tela u njoj su zanemarljiva. U slučaju ISS-a bestežinsko stanje nastaje usled neprestanog slobodnog padanja ISS stанице oko planete Zemlje po kružnoj putanji. U uslovima mikrogravitacije nalaziće se i članovi posade na putu do Marsa. Organi ljudskog tela različito reaguju na uslove mikrogravitacije. Kosti, mišići, nervni i krvni sistem mnogo su osjetljiviji na uticaj mikrogravitacije u odnosu na, recimo, probavni i respiratorni sistem i rad srca (Thornton, Bonato, 2017). Usled individualnih i fizičkih razlika među jedinkama koje su posledice genetskih raznolikosti, javljaju se i značajne fiziološke razlike na uticaj mikrogravitacije. Razlikuju se dve vrste fizioloških promena usled dejstva mikrogravitacije. Jedna vrsta promena su adaptacije tokom kojih dolazi do fizičkih promena na određenim delovima tela, kao što su promena izgleda, veličine i slično. Ova promena uglavnom je privremena. Druga vrsta promene su akomodacije tokom kojih dolazi do promene načina funkcionisanja određenog organa.

Fiziološke posledice usled dejstva mikrogravitacije, intenzivno se proučavaju na svemirskim stanicama u niskoj zemljinoj orbiti (LEO⁶) na ISS, odnosno ranije na stanci Mir, na Zero-g



Slika 4: Poređenje trajanja određenih delova misija do Marsa na konjukcionoj i opozicionoj trajektoriji.
Izvor: NASA

vazduhoplovima ili na osnovu podataka dobijenih dugotrajnim ležanjem u krevetu. Pogotovo dugotrajane misije su bitne pošto mogu da simuliraju uticaje mikrogravitacije tokom dugog vremena na putu do Marsa i natrag. Pošto uticaji mikrogravitacije u nekim slučajevima brzo pokažu svoje efekte, kao što je recimo slabljenje mišića, od značaja je da put do Marsa traje što je moguće kraće.

⁶ Skraćenica od engleskog naziva Low Earth Orbit

Kao što se na slici 4 vidi, uticaj mikrogravitacije bio bi najveći na opozicionoj trajektoriji. Zato su za putovanje ljudi do Marsa i nazad, po pitanju vremena trajanja dejstva mikrogravitacije najpogodnije konjukcione trajektorije, pošto je tada njen uticaj najkraći. U nastavku su predstavljene promene koje nastaju na telu kao posledica uticaja mikrogravitacije.

8.1 Uticaj na krvotok i tečnosti u telu

U normalnim okolnostima tokom boravka na Zemlji krv i ostale tečnosti u organizmu pod dejstvom zemljine teže pokušavaju da zauzmu položaj u kome bi imale najnižu potencijalnu energiju. U uspravnom položaju koji je najdominantniji položaj u svakodnevnom životu, krv ima tendenciju da odlazi u donje ekstremite u kome bi zadovoljila taj uslov, što srce izlaže naporu kako bi savladalo dejstvo zemljine teže pri pomeranju krvi iz donjih delova tela prema centralnim delovima. Jednosmerni ventili u venama i kontrakcije mišića tokom kretanja, usmeravaju kretanje krvi u jednom smeru (Moore et al., 2010). Krvni pritisak poseduje tri komponente:

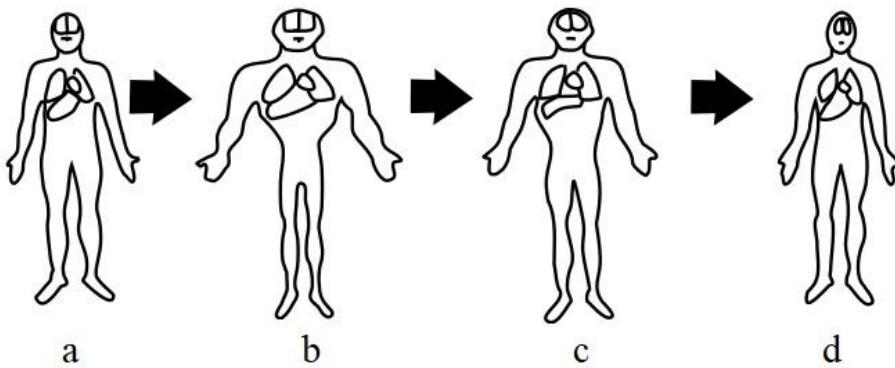
- statičku - koja nastaje usled spoljašnjih sila (sem gravitacione), od strane okolnog tkiva poput mišića i težine ostalih delova tela;
- hidrodinamičku - koja nastaje usled kretanja krvnih ćelija određenom brzinom i
- hidrostatičku - koja nastaje usled dejstva težine krvnih ćelija.

Hidrostatički pritisak u krvi upravo je posledica dejstva zemljine teže na telo koji se ogleda u formiranju hidrostatičkog gradijenta (Moore et al., 2010). Pošto hidrostatički pritisak zavisi od visine stuba tečnosti, odnosno u ovom slučaju visine čoveka, krvni pritisak se povećava prema donjim delovima tela, pa u stopalu ima najveću vrednost. Težina tela, ima najveći intenzitet u donjim ekstremitetima tokom stajanja, usled čega na tim mestima proizvodi najveći pritisak na krvne sudove. Usled svih uticaja srednje vrednosti ukupnog arterijskog pritiska u glavi tokom uspravnog stajanja iznose 70 mmHg, 100 mmHg u srcu i 200 mmHg u stopalima (Moore et al., 2010). Srednja vrednost ukupnog venskog pritiska u uspravnom položaju u stopalu je približno tri puta manja od arterijskog dok u nivou srca ima vrednost 0 mmHg, što omogućava krvi da bez pritiska kreće iz glave prema srcu (Thornton, Bonato, 2017).

U uslovima mikrogravitacije, dolazi do nestajanja hidrostatičkog gradijenta, pošto prestaje zadržavanje tečnosti u donjim ekstremitetima usled čega oko 0,4 l krvi iz vena i do 4 l ostalih tečnosti u telu počinju da se kreću prema gornjim delovima tela (Thornton, Bonato, 2017).

Odsustvo težine tela takođe potpomaže kretanje tečnosti prema gornjim delovima tela. Značajno je recimo odsustvo dejstva sile težine trupa na donju šuplju venu koja na taj način slabije zadržava krv u donjim ekstremitetima (Thornton, Bonato, 2017).

Posledice ovih pojava su nakupljanje krvi i drugih tečnosti u centralnim i gornjim delovima tela - trupu i glavi. Usled nedostatka tečnosti u nogama dolazi do smanjenja njihovog obima. Pojava je poznata pod nazivom „ptičje“ ili „svemirske noge“. Sa druge strane, zbog povećanja količine tečnosti u glavi, dolazi do promene izgleda lica koje izgleda kao nateklo (slika 5). Posle nekoliko dana boravka u svemiru dolazi do prilagođavanja organizma odnosno smanjenja intenziteta nastalih promena. Nastale promene klasificuju se kao reverzibilne somatske adaptacije na novu sredinu (Thornton, Bonato, 2017).



Slika 5: Promene na telu usled promene položaja tečnosti: a) izgled tela pre odlaska u svemir; b) izgled tela neposredno posle dolaska u uslove mikrogravitacije; c) izgled tela posle adaptacije na uslove mikrogravitacije; d) izgled tela posle povratka na Zemlju. Izvor: Vikipedija.

Sem ovih pojava, javljaju se i glavobolja, promena percepcije ukusa i mirisa (Thornton, Bonato, 2017). Usled promene položaja tečnosti u telu dolazi i do smanjenja koncentracije krvne plazme i mase crvenih krvnih zrnaca za koje se smatra da su po povratku na Zemlju odgovorne za nastanak ortostatske intoleracije – poremećaja kretanja krvi u mozgu tokom uspravnog položaja koji može dovesti do onesvećivanja, malaksalosti i smanjenog pritiska (Moore et al. 2010).

Po povratku iz svemira, uglavnom posle nedelju dana, dolazi do povratka krvotoka i pritiska u normalno stanje. Većina istraživanja uticaja mikrogravitacije na organizam bazirana su na kratkotrajnom boravku od nekoliko nedelja do nekoliko meseci. Dugotrajna istraživanja mikrogravitacije na krvotok u trajanju od 3 do 6 meseci su malobrojna i tek treba da se sprovedu. (Thornton, Bonato, 2017). U tabeli 1 poređene su vrednosti venskog i arterijskog pritiska na različitim delovima tela tokom boravka na Zemlji, u uslovima mikrogravitacije i na Marsu.

U predelu	Venski pritisak (cmH ₂ O)			Arterijski pritisak (mmHg)		
	Zemlja	Mikrogravitacija	Mars	Zemlja	Mikrogravitacija	Mars
srca	0	4	0	90	90	90
kuka	30	4	10	120	90	100
kolena	60	5	20	150	90	110
stopala	90	6	30	180	90	120

Tabela 1: Poređenje srednjih vrednosti venskog i arterijskog pritiska na četiri mesta na telu tokom boravka na Zemlji, u uslovima mikrogravitacije i na Marsu. Vrednosti za Zemlju su prosečne vrednosti dok su ostale vrednosti procene. Izvor: Thornton, Bonato, 2017.

8.2 Promene na oku

Vid verovatno predstavlja najbitnije čulo čoveka, putem kojeg prikuplja informacije o svetu oko sebe. Oko kao osnovni organ ovog čula nezaobilazni je instrument za uspešno obavljanje letova u svemiru sa ljudskom posadom. Njegovo oštećenje ili bolest mogu dovesti do ugrožavanja uspešnosti ovakvih misija.

Tokom kratkotrajnog boravka u svemiru (do tri meseca) posle povratka na Zemlju kod nekih astronauta, tokom pregleda dijagnostikovane su promene na oku poput dalekovidosti. Međutim, ovim promenama nije se davalno na značaju, pošto su manje ili više bile zastupljene kod astronauta posle povrtna na Zemlju. Imale su reverzibilni karakter i kao takve su posle kratkog vremena nestajale. Međutim, sa produženjem boravka u svemiru, dužim od 6 meseci, nastale promene na oku nisu nestajale i posle nekoliko godina a u nekim slučajevima postale su trajne deformacije. Ove promene obično nose naziv Mikrogravitacioni očni sindrom⁷ (MOS). Kao što samo ime govori, smatra se da je on direktna posledica dugotrajnog dejstva mikrogravitacije na ljudsko telo.

MOS predstavlja značajne funkcionalne i anatomske promene na oku. Prve se ogledaju u pojavi dalekovidosti. Anatomske promene uključuju smanjenje zakrivljenosti očne jabučice sa zadnje strane, promene na mrežnjači, otok optičkog diska itd.

Tačni uslovi koji dovode do ovih promena još uvek nisu sa sigurnošću utvrđeni. Jedan od mogućih uzroka nastalih promena na oku može biti povećanje pritiska cerebrospinalne tečnosti (CSP). CSP okružuje mozak, kičmenu moždinu i neke živce. Očni živac kao produžetak mozga potopljen je u ovu tečnost. Cerebrospinalna tečnost se rasprostire celom dužinom očnog živca, od mozga do oka. Povećanje CSP dovodi do oticanja mesta na kom očni živac ulazi u oko, usled njenog nakupljanja na tom mestu. Nastali otok proizvodi silu kojom deluje na očnu jabučicu. Na taj način primenjena sila dovodi do ispravljanja zakrivljenosti očne jabučice. Usled toga zadnji deo oka u kome se nalazi žuta mrlja pomera se napred, prema sočivu. U žutoj mrlji očno sočivo formira lik posmatranog predmeta. Pošto je ona pomerena napred, lik predmeta se sada formira iza nje. Usled toga oko više nije u stanju da jasno vidi bliske predmete tj. nastaje dalekovidost. Dugotrajno dejstvo nastale sile usled povećanja pritiska CSP na kraju dovodi do trajne deformacije očne jabučice.

Kao uzrok povećanja CSP najčešće se navodi povećanje pritiska u venama glave kao posledica pomeranja tečnosti u telu prema centralnim delovima tela i glavi kao što je navedeno u prethodnom poglavljju ili povećanje pritiska u vratnoj veni koja biva pritisnuta okolnim mišićima koji se u uslovima mikrogravitacije pomeraju prema gore (Thornton, Bonato, 2017). Iako su do sada ovi poremećaji primećeni kod malog broja astronauta, njihova učestalost i intenzitet mogu dovesti do zabrane obavljanja dužih svemirskih letova. Ovo je pogotovo zabrinjavajući podatak kada je reč o putu na Mars, s obzirom na dugotrajnost misije.

8.3 Uticaj mikrogravitacije na koštano-mišićni sistem

Mišići i kosti čine osnovu sistema za kretanje ljudi. Ovi organi u telu su postavljeni tako da efikasno prizvode sile, odnosno da savladaju sile kojima je telo izloženo. Mišići koji funkcionišu u sprezi sa kostima često se posmatraju kao jedna funkcionalna jedinica – koštano-mišićni sistem, pošto promene na jednom od njih pa pravilu utiču na onog drugog. Na primer, kada dođe do preloma kosti, mišići koji pokreću tu kost atrofiraju u određenom procentu a sve u zavisnosti od vremena potrebnog za saniranje preloma. Isto tako, kada dođe do oštećenja ili neupotrebe određene grupe mišića, dolazi do slabljenja čvrstine kostiju. Jak mišić stvara kost otporniju na lom i obratno.

⁷ Microgravity Ocular Syndrome

Već u prvim eksperimentima u svemiru primećeni su uticaji mikrogravitacije na ovaj sistem, što je iniciralo razvoj različitih protivmera kako bi se ove promene otklonile ili smanjile.

8.4 Uticaj na kosti

Kosti u ljudskom telu imaju ulogu da pridržavaju i održavaju stabilnost telesnih struktura, odnosno da prenose sile koje deluju na telo. Čine od 12% do 15 % ukupne mase tela. Sastavljene su od kolagena 12%, kalcijuma i fosfora 70-80% i u malom procentu od vode. Kod odraslih osoba oko 1% koštane materije je u fazi obnavljanja (Thornton, Bonato, 2017). Za razliku od posledica boravka u svemiru, kao što je bolest svemirske šetnje čiji simptomi relativno kratko traju i uglavnom nestaju za nekoliko dana ili nedelja po povratku na Zemlju, bez obzira da li se u svemiru boravi nekoliko dana ili meseci, otklanjanje odnosno nestajanje posledica koje nastaju na kostima usled dugotrajnog dejstva mikrogravitacije može trajati mnogo duže od samog boravka u uslovima mikrogravitacije (Moore et al., 2010). Isto tako, promene na kostima nisu direktna posledica mikrogravitacije, već su nastale usled nemogućnosti bavljenja fizičkim aktivnostima poput hodanja ili trčanja u uslovima mikrogravitacije.

Ljudsko telo se neprestano menja i obnavlja. Ćelije različitih tkiva neprestano se obnavljaju različitim brzinama. Stare i odumrele ćelije menjaju se novim, čime se funkcija tkiva održava. Odnos brzina otklanjanja starih i brzina postavljanja novih ćelija utiče na povećanje ili smanjenje dimenzija i funkcionalnosti tkiva.

Kada su u pitanju kosti, njih grade ćelije pod nazivom osteoblasti dok ih razgrađuju ćelije osteoklasti. Brzine rada ovih ćelija zavise od fizičkog opterećenja tela. U normalnim uslovima njihove brzine rada su jednake, te se karakteristike kosti ne menjaju. Međutim, u uslovima mikrogravitacije, fizičko opterećenje kostiju se značajno smanjuje. Tada brzina razgradnje postaje veća od brzine gradnje, što dovodi do demineralizacije kostiju, tj. smanjenja njihove gustine i ukupnog smanjenja njihove mase i snage (Moore et al., 2010).

Količina smanjenja tkiva tokom vremena zavisi od ukupne mase tkiva. Što je masa tkiva manja i smanjenje će biti manje. Preostala masa kostiju posle određenog vremena se može predstaviti prostim eksponencijalnim zakonom

$$X = X_0 \cdot e^{-at} \quad (1)$$

gde X predstavlja preostalu masu kostiju posle vremena t od početka dejstva mikrogravitacije, X_0 je masa kostiju na početku dejstva mikrogravitacije dok je a konstanta koja predstavlja brzinu gubitka mase (Thornton, Bonato, 2017). Posle određenog vremena provednog u mikrogravitaciji, prema ovoj formuli čovek bi trebalo da ostane bez kostiju, što se u realnosti ne dešava, tj. postoji dodatni mehanizam koji ne dopušta da kosti u potpunosti nestanu. On održava minimalnu masu kostiju. Ovo je dobro poznata pojava kod ljudi koji su pretrpeli prekid kičmene moždine, kod kojih određeni mišići i nisu u funkciji usled čega je došlo do smanjenja mase kostiju do neke minimale vrednosti, a ne do kompletног nestanka ovih organa. Usled toga prethodna jednačina treba da se dopuni sa konstantom C koja predstavlja minimalnu vrednost mase kostiju

$$X = X_0 \cdot e^{-at} + C. \quad (2)$$

Na kostima nogu, kičmenog stuba i karlice koji trpe najveće opterećenje tokom hodanja, u uslovima mikrogravitacije za očekivati je najveće gubitke. Kao parametar za praćenje slabljenja kostiju obično se navode mineralna gustina kosti i njena snaga.

Na osnovu 18 kosmonauta koji su u 12 misija u periodu od 1990. godine do 1995. godine boravili na stanici Mir, načinjena su merenja smanjenja gustine minerala u kostima. Za većinu članova posade misija je trajala između 126 i 197 dana dok su dvoje proveli znatno duže 311 i 438 dana. U tabeli 2 navedeni su rezultati tog merenja smanjenja gustine minerala u različitim kostima tela.

Kost	Smanjenje gustine kosti (%/mesecu)
Kičmeni stub	1,06
Vrat butne kosti	1,15
Trohanter butne kosti	1,56
Karlica	1,35
Ruke	0,04
Noge	0,34
Zajedno	0,35

Tabela 2: Srednje vrednosti smanjenje gustine minerala u različitim kostima tela merena tokom dugotrajnog boravka u svemirskoj stanicu Mir. Vrednosti smanjenja gustine minerala izražene su u procentima po mesecu boravka na stanicu. Izvor: LeBlanc et al, 2000.

Srednje vrednosti smanjenja gustine minerala izražene su u procentima u toku jednog meseca (LeBlanc et al, 2000). Kod dvoje kosmonauta koji su proveli znatno duže vreme na stanicu (311 i 438 dana), gubici na kičmenom stubu su približno dva puta manji (0,68 i 0,51%/mesecu) od srednjih vrednosti. Gubici su primetni iako su članovi posade svakodnevno primenjivali opsežne vežbe kao sredstvo kontramere.

Vrednosti smanjenja gustine kostiju iz tabele 2 određene su u sličnom vremenskom intervalu kao i predloženo trajanje puta na Mars, pa se može očekivti da će slične gubitke gustine kostiju pretrpeti i članovi posade.

Merenja snage butne kosti sprovedena na članovima posade ISS koji su na stanicu proveli od 4 do 6 meseci, pokazala su da se snaga kosti smanjivala 2,6% mesečno (Keyak et al, 2008).

U tabeli 3 dat je pregled gubitka mase kostiju izražen u procentima, tokom boravka u svemiru u trajanju od 180 dana (Thornton, Bonato, 2017).

Pošto put do Marsa putem gore pomenutog trajektorija traje 180 dana, gubici mase kostiju tokom putovanja od Zemlje do Marsa mogu biti uporedive sa vrednostima u tabeli 3.

Smanjenje čvrstine kostiju može značajno uticati na funkcionalnost i zdravlje posade. Oslabljene kosti podložne su oštećenjima i pojavi preloma, što može biti posebno opasno tokom boravka i kretanja po površini Marsa.

Kost	Gubitak mase kostiju (%)
Kičmeni stub	4,9
Karlica	7,7
Vrat butne kosti	6,8
Trohanter butne kosti	7,8
Kost pete	2,9

Tabela 3: Vrednosti gubitka mase kostiju tela tokom boravka u svemiru u tajanju od 180 dana. Izvor: Thornton, Bonato, 2017

8.5 Uticaj na mišiće

Mišići kao i kosti takođe se adaptiraju na različiti stepen fizičke aktivnosti. Smanjena mišićna aktivnost u uslovima mikrogravitacije dovodi do atrofije mišića, smanjenja mišićne snage, čvrstine i promene fiziologije mišića (Fitts et al., 2000).

Mišićna vlakna su osnovna radna jedinica u mišićima čijom kontrakcijom se proizvodi sila. Postoje dve vrste vlakana bitnih za kontrakciju. Vlakna tipa I ili sporokontrahujuća vlakna troše energiju koja im se neprestano doprema krvotokom, zbog čega mogu dugotrajno da vrše kontrakcije. Vlakna tipa II ili brzokontrahujuća vlakna troše glikogen koji je uskladišten u celijama vlakna. Ove zalihe mogu da se potroše u roku od nekoliko minuta, usled čega ova vlakna mogu biti kratko u funkciji. Vlakna tipa I odgovorna su za održavanje posture i izdržljivosti mišića dok su vlakna tipa II odgovorna za brze kontrakcije mišića i njihovu snagu (Carpenter et al., 2010; Thornton, Bonato, 2017). U toku atrofije dolazi do promene strukture mišićnih vlakana a ne do smanjenja njihovog broja (Williams et al., 2009). Usled slabe opterećenosti mišića u uslovima mikrogravitacije, dolazi do transformacije vlakana tipa I i vlakana tipa II (Trappe et al., 2009), usled čega su mišići brži, ali se više zamaraju. U mišićima dolazi do umanjenja proizvodnje proteina odgovornih za stvaranje veza tokom kontrakcije mišića, pre svega u vlaknima tipa II (Williams et al., 2009). Dodatni faktor koji dovodi do pojave atrofije mišića sem neadekvatne fizičke aktivnosti su neadekvatna ishrana i uticaj stresa (Williams et al., 2009). Razumevanje razlika između ove dve vrste mišićnih vlakana i njihovog funkcionisanja u uslovima mikrogravitacije prvi je korak za razvoj odgovarajućih kontramera – vežbi i mašina za vežbanje kojima bi se umanjili gubici mišića tokom puta na Mars.

Mišić	Smanjenje zapremine (%)
Planarni fleksori stopala	Lisni mišić
	Dvoglavi lisni mišić
Dorzalni fleksori stopala	10
Ekstensori kolena	6
Fleksori kolena	7
Adduktori buta	4
Fleksori podlaktice	-0,4
Ekstensor podlaktice	0,8

Tabela 4: Ukupno prosečno smanjenje zapremina mišića tokom boravka na ISS-u. Izvor: Gopalakrishnan et al., 2010).

Gubici mišića obično se određuju na osnovu smanjenja njihove zapremine ili snage. Oni se takođe mogu predstaviti putem eksponencijalnog zakona u zavisnosti od vremena, slično jednačinama (1) i (2), pošto se i kod njih brzina gubljenja vremenom smanjuje (Thornton, Bonato, 2017).

U uslovima mikrogravitacije najviše su pogođeni mišići koji su odgovorni za održavanje posture tela i mišići odgovorni za hodanje tokom boravka na Zemlji (Williams et al., 2009). Od ovih mišićnih grupa promenama su najpodložniji, pre svega, mišići zadnje grupe potkolenice (Fitts et al., 2000) koji su odgovorni za podizanje pete od zemlje pri hodanju, trčanju ili sličnim fizičkim aktivnostima.

U eksperimentu u kome su učestvovala četiri astronauta koji su boravili na ISS-u u različitim intervalima od 161 do 194 dana, načinjena su merenja smanjenja zapremine, snage i izdržljivosti mišića u ljudskom telu. Najveći gubici zapremine nastali su na mišićima potkolenice: planarnim i dorzalnim fleksorima stopala. Na mišićima ruke gubici su bili najmanji ili nisu ni nastali, kao što je slučaj kod mišića fleksora podlaktice kojim se zapremina slabo povećala (Gopalakrishnan et al., 2010). Rezultati merenja smanjenja zapremine dati su u tabeli 4. Merenja izokinetičke i izometrijske snage mišića⁸ vršena su u istom eksperimentu čiji rezultati su dati u tabeli 5.

Mišić	Smanjenje snage (%)	
	Izokinetičko	Izometričko
Planarni fleksori stopala	22	20
Dorzalni fleksori stopala	8	4
Ekstenzori kolena	10	15
Fleksori kolena	24	20
Fleksori kuka	8	28
Ekstenzori kuka	-2	15
Fleksori podlaktice	17	8
Ekstenzor podlaktice	8	11

Tabela 5: Ukupno prosečno smanjenje snage mišića tokom boravka na ISS-u. Izvor: Gopalakrishnan et al., 2010).

Izokinetička snaga najviše je opala kod fleksora kolena i planarnih fleksora stopala dok je snaga ekstenzora kuka blago porasla. Izometrička snaga najviše je opala kod fleksora kuka (Gopalakrishnan et al., 2010). Navedeni gubici u zapremini i snazi mišića nastali su uprkos upotrebi i praktikovanju mašina i vežbi za suzbijanje dejstva mikrogravitacije.

Pošto bi putovanje od Zemlje do Marsa trajalo 180 dana, što je približno trajanju navedenog eksperimenta na ISS-u i što bi mišići tokom puta bili izloženi približno istom dejstvu mikrogravitacije, za očekivati je da bi na njima došlo do gubitka zapremine i snage u sličnim procentima.

Gubici na mišićima mogu predstavljati ozbiljan problem tokom misije na Mars. Pored toga što dovode do slabljenja kostiju usled smanjenja dejstva sila kojima mišići na njih deluju, samo slabljenje mišića može dovesti i do nemogućnosti upravljanja letelicom u ključnim momentima misije, recimo tokom spuštanja na Mars i u povratku na Zemlju, obavljanja popravki na letelici ili pri kretanju po površini Marsa.

⁸ Snaga mišića tokom pokreta odnosno statička snaga mišića.

8.6 Formiranje kamena u bubregu

Nefrolitijaza je stanje u telu koja predstavlja formiranje kamena u bubrežima. U pitanju je vrsta kristala koji nastaju kao posledica prezasićenosti urina. Prezasićenost urina nastaje usled povećane koncentracije mineral kalcijuma poput kalcijum fosfata i kalcijum oksalata usled hiperkalciurije. U uslovima mikrogravitacije, hiperkalciurija nastaje kao posledica slabljenja kostiju u telu, kao što je opisano u prethodnom tekstu, usled smanjene opterećenosti kostiju tokom boravka u svemiru, pa se tada kosti brže razgrađuju. Ovo je primarni razlog nastanka kamena u bubrežima tokom boravka u svemiru. Drugi bitni faktor koji dovodi do formiranja kamena u bubregu je smanjena proizvodnja urina usled dehidratacije tela koja nastaje kao posledica pomeranja tečnosti u telu. Sem ova dva bitna razloga na formiranje kamena u bubregu doprinose i režim ishrane, genetika, smanjena koncentracija urinarnog citrata i uticaji sredine (Human Research Program, 2008).

Prisustvo kamena u bubregu može dovesti do pojave jakog bola u slabinskom delu tela usled začepljenja mokraćnih kanala i proširenja kanalnog sistema bubrega, prisustva krvi u mokraći i upale. Formiranje kamena tokom misije može biti izuzetno opasno tokom dugotrajnih misija kao što je misija na Mars, pošto bi dovelo do onesposobljavanja članova posade za obavljanje misije ili njihovog gubitka. Kratkoročna ispitivanja na Skajlab-u i dugoročna ispitivanja na stanicu Mir govore da početne faze misija (do 30 dana) generišu uslove u kojima je rizik za razvoj kamena u bubregu veći nego u ostalim fazama misije (Human Research Program, 2008).

Smanjenje rizika od formiranja kamena u bubregu može se postići farmakološkim agensima, kao što je kalijum citrat koji bi ublažili razgradnju kostiju, povećanim unosom tečnosti, formiranje adekvatnog načina ishrane itd. (Human Research Program, 2008).

9. ZRAČENJE U SVEMIRU

Možda najznačajniju prepreku za putovanje čoveka na Mars i druga tela sunčevog sistema predstavlja neznanje o biološkim promenama koje bi nastale pod dejstvom zračenja iz svemira na ljudsko telo. Odlaskom izvan zaštitnog dejstva zemljinog magnetnog polja i atmosfere, telo bi bilo izloženo zračenju visokih energija koje obično ne dopire do površine Zemlje, pošto biva zarobljeno u magnetnom polju Zemlje ili svoju energiju izgubi na ionizaciju tokom prolaska kroz atmosferu.

U uslovima na površini Zemlje kao i u LEO, ne mogu se realizovati eksperimenti u kojima bi se na identičan način reprodukovalo dejstvo zračenja na živi organizam kao u svemiru, usled određenih prepreka. Recimo jedan od problema je što se umesto kompleksnog zračenja po energiji i sastavu, koriste jednostavnije varijante monoenergetskog zračenja. Takođe, umesto ljudskog tela koriste se sredine u kojima se zračenje ponaša na sličan način kao pri prolasku kroz ljudsko telo, međutim, ipak ne održava složenu strukturu žive materije. Ovo dovodi do toga da procene dejstva zračenja na telo mogu da se razlikuju od eksperimentalno određenih u svemiru (Chancellor et al., 2018).

Promene u telu pod dejstvom zračenja nastaju usled transfera energije sa nanelektrisane čestice na okolinu kroz koju se ta čestica kreće. Koliko će brzo čestica gubiti energiju u interakciji sa materijom zavisi od njene mase, količine nanelektrisanja i njene energije. Količina predate

energije tkivu, sem od osobina upadne naelektrisane čestice, zavisi i od osobina samog tkiva kroz koje čestica prolazi, pre svega debljine delova tkiva kroz koje prolazi i njihove gustine. (Chancellor et al., 2018).

Zračenje u Sunčevom sistemu sastavljen je od različitih vrsta elektromagnetskog zračenja i čestica različitih energija, uglavnom poreklom sa Sunca ili Galaksije. Mogu se podeliti na nejonizujuća i ionizujuća zračenja.

Nejonizujuća zračenja imaju osobinu da reaguju sa atomima i molekulima materije, ali zbog manjih energija u odnosu na ionizujuća zračenja, uglavnom ne dovode do izbijanja elektrona iz tih čestica odnosno mogu dovesti najviše do njihove ekscitacije na više energetske nivoe. Od nejonizujućih zračenja najveću energiju ima ultraljubičasto zračenje, međutim, zbog malog fluksa i nedovoljno energije, ono ne predstavlja opasnost po posadu svemirske letelice, pošto biva uspešno apsorbovano u površnim slojevima oklopa letelice.

Kada je reč o značajnom ionizujućem zračenju u Sunčevom sistemu ono se može podeliti na:

- Čestice solarnog vетра;
- Čestice solarne erupcije (SPE⁹);
- Galaktičko kosmičko zračenje (GCR¹⁰).

Prisutne su i druge vrste ionizujućeg zračenja, ali njihova zastupljenost nije značajna. Ionizujuće zračenje u interakciji sa materijom predaje joj toliko energije da dolazi do izbijanja elektrona iz atoma ili molekula.

9.1 Čestice solarnog vетра

Poput ultraljubičastog zračenja i čestice solarnog vетra ne predstavljaju pretnju po putovanje po svemiru, pošto su to uglavnom protoni i elektroni veoma niske energije. Energije protona se kreću u intervalu od 100 eV do 3,5 keV, usled čega bi bile zaustavljene oklopom letelice. Brzine ovih čestica se kreću u intervalu $300\text{-}800 \text{ km s}^{-1}$, sa intenzitetima u rasponu $10^{10}\text{-}10^{12} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ sr}^{-1}$ (Durante, Cucinotta, 2011). Njihova najznačajnija uloga je modulacija GCR fluksa sa energijama ispod 1 GeV (objašnjenje u poglavljiju 9.3), tokom 11-godišnjeg solarnog ciklusa aktivnosti.

Najveća pretnja po zdravlje čoveka tokom puta na Mars dolazi od ionizujućeg zračenja visokih energija, pošto ovo zračenje ima dovoljno energije da prodre u svemirsku letelicu i ljudsko telo, usput izazivajući reakcije u kojima bi nastalo drugo opasno zračenje ili čestice sposobne za dalju ionizaciju, a to su SPE i GCR.

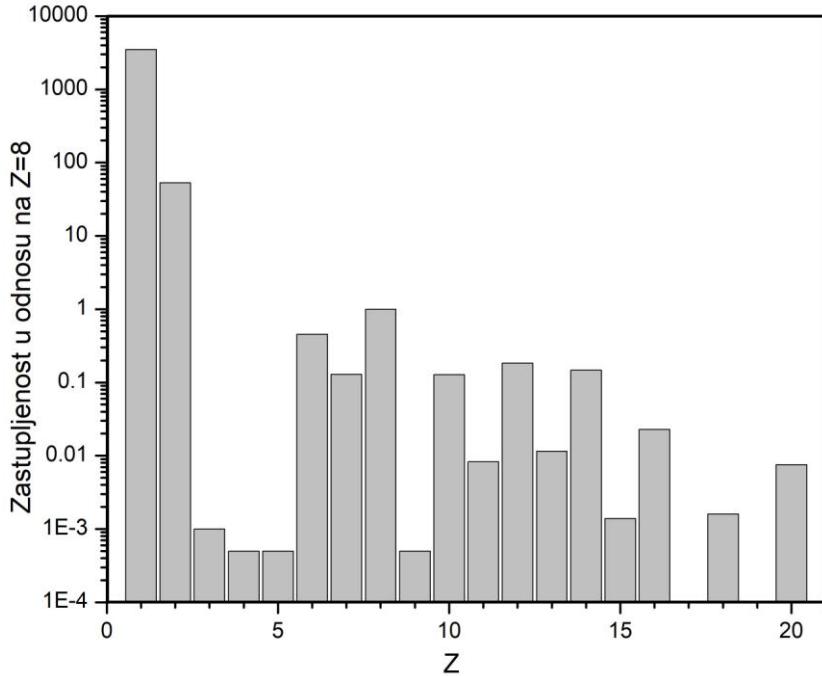
9.2 Čestice solarne erupcije (SPE)

Čestice solarne erupcije nastaju kada Sunce sa svoje površine izbacuje veliki broj čestica, sa energijama od nekoliko MeV-a do nekoliko GeV-a koje se kreću kroz Sunčev sistem. Najveće i najopasnije SPE nastaju prilikom izbacivanja velike mase sa sunčeve korone (Rapp, 2006). Pod dejstvom magnetnog polja Sunca, izbačene čestice bivaju ubrzane i spiralno oko linija magnetnog polja odlaze u međuplanetarni prostor (Durante, Cucinotta, 2011). Protoni su najviše zastupljene čestice u SPE oko 98%, nekoliko procenata čine joni helijuma, dok su teži

⁹ Skraćenica od engleske reči Solar particle events.

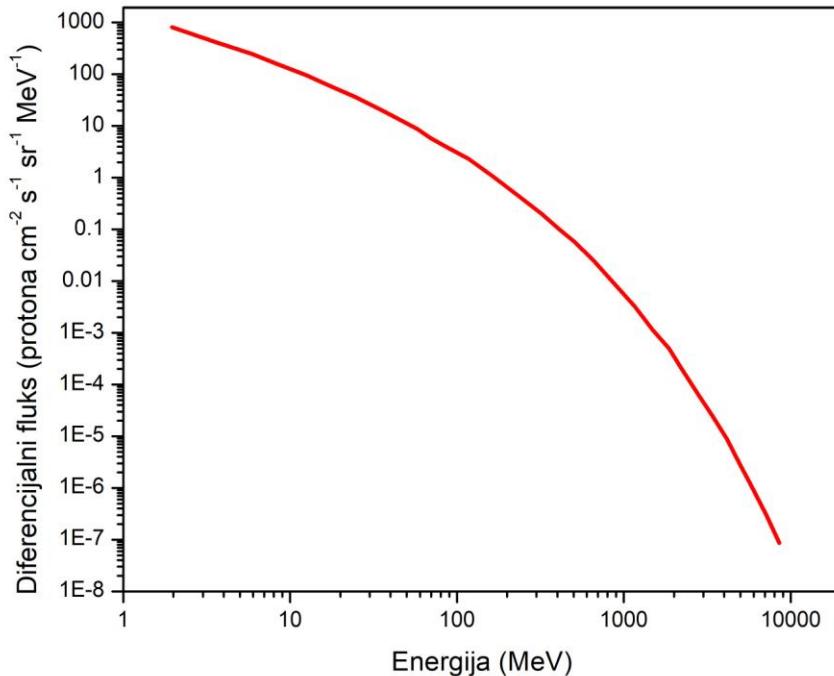
¹⁰ Skraćenica od engleskog naziva Galactic cosmic rays.

elementi zastupljeni manje od 1% (Rapp, 2006; Durante, Cucinotta, 2011). Zastupljenost elemenata u odnosu na vodonik data je na slici 6. Sastav SPE odgovara sastavu korone (Rapp, 2006).



Slika 6: Relativna zastupljenost elemenata sa atomskim brojem Z u SPE u odnosu na kiseonik koji je normiran na 1. Prilagođeno iz: Durante, Cucinotta, 2011.

Ove pojave najčešće nastaju u periodu povećane solarne aktivnosti. Veliki SPE su relativno retki i traju od nekoliko sati do nekoliko dana (Durante, Cucinotta, 2011). Obično tokom 11-godišnjeg ciklusa nastaju oko dve velike SPE (Rapp, 2006). SPE pokazuju veliku varijabilnost po pitanju fluksa čestica i energijskog spektra (Durante, Cucinotta, 2011). Najveći SPE u prethodnom veku bile su februara 1956, novembra 1960, avgusta 1972. i oktobra 1989. godine. Tokom 1989. godine, sem u oktobru, nastale su još dve SPE tokom avgusta i septembra (Rapp, 2006). Spektar septembarske SPE iz 1989. godine dat je na slici 7. Ova vrsta događaja može biti opasna po posadu na putu do Marsa, pošto može proizvesti smrtonosne doze zračenja u kratkim vremenskim intervalima. Zato su predviđanja velikih SPE od krucijalnog značaja kako bi se posada tokom putovanja na vreme obavestila o mogućoj pojavi velikih doza zračenja od SPE. U tu svrhu vrši se monitoring sunčeve aktivnosti putem različitih metoda kao što su broj sunčevih pega, pojava X i radio zračenja sa Sunca. Na primer, neposredno pre pojave jake SPE dolazi do emsije X zračenja sa Sunca koje se na rastojanju 1 AU može detektovati oko 20 minuta pre dolaska SPE (Rapp, 2006).



Slika 7: Diferencijalni fluks protona iz SPE u zavisnosti od kinetičke energije tokom maksimalne aktivnosti Sunca, septembra 1989. godine . Prilagođeno iz Xapsos et al., 2000.

Pošto su SPE manjih energija od GCR, zaštita od ovog zračenja može uspešno da se izvede sklanjanjem posade u skrovište sa dovoljno debelim zidovima koje bi uspešno apsorbovali ove čestice. Najveći problem bi bila pojava SPE tokom aktivnosti izvan letelice ili habitata na površini Marsa gde, ako bi članovi posade bili previše udaljeni od njih, ne bi stigli na vreme da se sakriju (Durante, Cucinotta, 2011). SPE dospeva do površine Marsa usled retke atmosfere. Iako su intenzivne SPE sporadične, njihovu pojavu nemoguće je izbeći. Tako recimo u toku jedne misije u trajanju od 120 dana, šansa da nastane jedan SPE iznosi 80%, za dva SPE verovatnoća je 50% dok je verovatnoća pojave više od dva SPE oko 20%. Znatnim produženjem trajanja misije, praktično je nemoguće izbeći barem jedan SPE (Durante, Cucinotta, 2011).

9.3 Galaktičko kosmičko zračenje (GCR)

GCR nastaje izvan Sunčevog sistema u visokoenergetskim događajima poput eksplozija supernovih, u okolini neutronskih zvezda ili pulsara. Čestice u ovim događajima bivaju ubrzane do velikih brzina usled čega dobijaju velike energije, do 10^{20} eV. GCR se sastoji od 98% bariona i 2% elektrona, od toga barionska komponenta se sastoji od (slika 8): vodonika (protona) 85%, helijuma (alfa čestica) 14% i težih elemenata visoke energije (HZE¹¹) sa atomskim brojevima od 3 do 28, sa 1% zastupljenosti (Durante, Cucinotta, 2011). Elementi teži od nikla ($Z=28$) takođe se nalaze u GCR, međutim, u jako maloj zastupljenosti (Chancellor et al., 2018). Iako je njihova zastupljenost mala, doprinos efektivnoj dozi zračenja od strane HZE je velika. Jezgra gvožđa doprinose efektivnoj dozi zračenja GCR više od

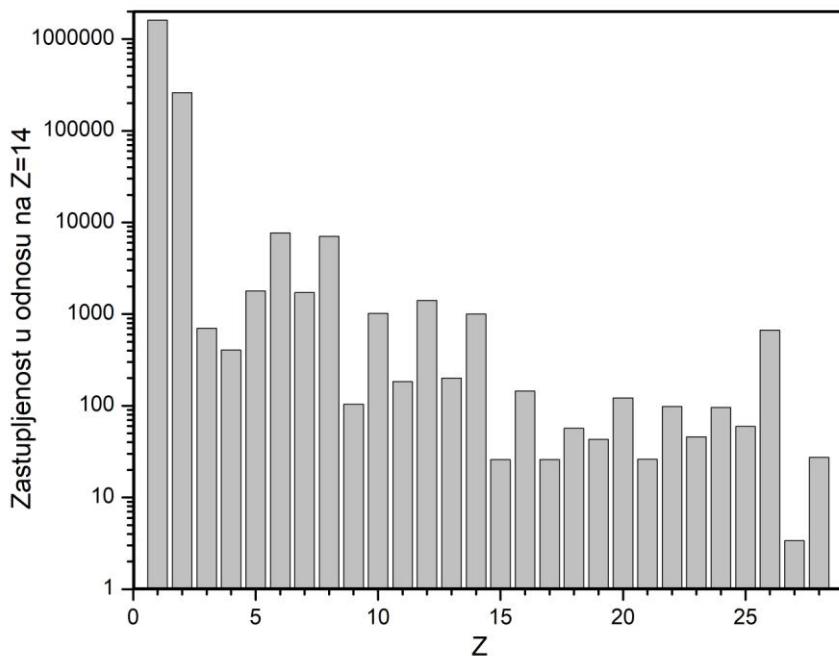
¹¹ Skraćenica od engleske reči High charge Z and high energy E.

protona, zbog velikog faktora kvaliteta i velikog atomskog broja, iako ih u sastavu GCR ima ispod 1%. Usled velike prodornosti i faktora kvaliteta Q , GCR doprinose više od 80% efektivne doze posade ISS-a (Durante, Cucinotta, 2011).

Faktor kvaliteta Q je bezdimenziona veličina a brojna vrednost mu zavisi od specifične ionizacije ili linearog energetskog transfera koja predstavlja srednju energiju koju čestica zračenja ostavi po jedinici puta (Krmr, 2013).

Mesta nastanka GCR nalaze se u Galaksiji. Tokom putovanja kroz Galaksiju ovo zračenje prolazi kroz različita polja sa kojima reaguje, usled čega dolazi do promene pravca kretanja ovih čestic. Usled toga fluks zračenje je izotropno raspoređen u prostoru.

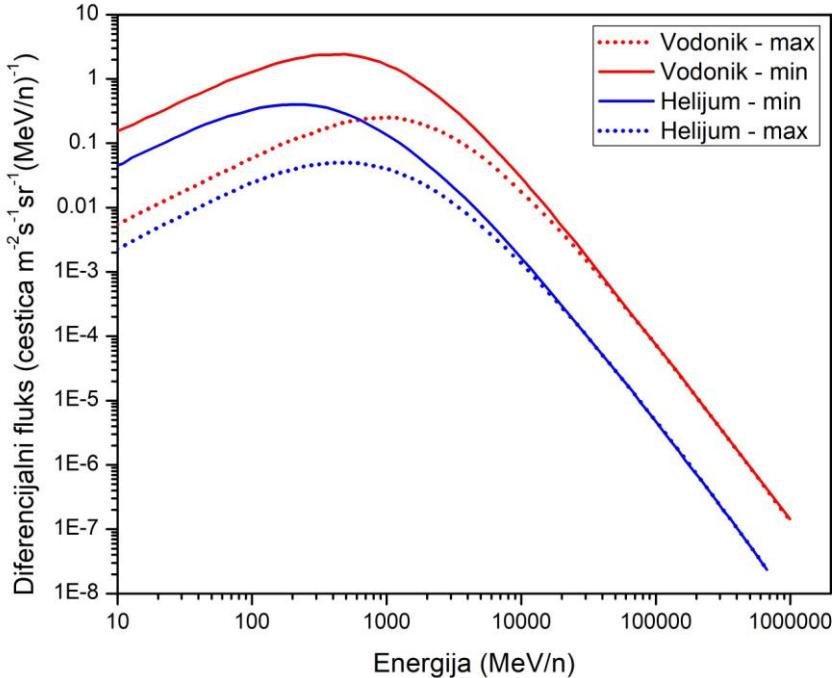
Prilikom ulaska GCR u oblast dejstva Sunca zvanog heliosfera, dolazi do interakcije sa česticama sunčevog vetra koje se kreću od Sunca i magnetnim poljem pod čijim uticajem se ove čestice kreću. Na taj način dolazi do smanjenja fluksa GCR prilikom prodiranja u unutrašnjost Sunčevog sistema. Međutim, smanjenje fluksa nije uvek isto. Njegovo smanjenje je podređeno rotaciji dipolnog momenta, odnosno magnetnih polova na Suncu, usled deformacije magnetnog polja pri čemu ceo ciklus traje od 20 do 24 godine. Tokom perioda između dva stabilna položaja magnetnih polova, nastaje jedanaestogodišnji ciklus promene aktivnosti Sunca. Ova pojava praćena je pojmom sunčevih pega koje su mesta uvrтанja magnetnih linija sunčevog magnetnog polja. Kada dipolni moment dostigne minimalnu vrednost, dolazi do zamene magnetnih polova. Broj sunčevih pega je tada maksimalan a Sunce ima maksimalnu aktivnost. S druge strane, kada je Sunce bez pega dipolni moment dostigao je svoju maksimalnu vrednost u novom smeru. Sunce se tada nalazi u minimumu aktivnosti. Minimum i maksimum sunčeve aktivnosti utiču na sunčev vетар и magnetno polje, pa samim tim i fluks GCR. Pojava promene fluksa GCR kao posledica sunčeve aktivnosti



Slika 8: Relativna zastupljenost elemenata sa atomskim brojem Z u GCR u odnosu na silicijum koji je normiran na 1000. Prilagođeno iz Pacini, 2017.

naziva se solarna modulacija. Kada je Sunce u minimumu aktivnosti GCR ima najveći fluks. (Rapp, 2006; Durante, Cucinotta, 2011).

Na slici 9 predstavljeni su diferencijalni spektri vodonika i helijuma iz GCR kao funkcije kinetičkih energija čestica, na rastojanju 1 AU od Sunca tokom sunčevog minimuma iz 1977. godine i sunčevog maksimuma iz 1959. godine. Tokom ovih ciklusa zabeležena je najveća modulacija GCR spektra u prethodnih 60 godina. Sa slike je uočljivo da maksimum spektra pada oko 0,5 GeV po nukleonu, kao i da pojava modulacije počinje na česticama energije 20 GeV po nukleonu i sa smanjenjem energije čestica se povećava dok kod čestica veće energije



Slika 9: Diferencijalni fluks jona vodonika i helijuma iz GCR u zavisnosti od kinetičke energije u toku minimuma i maksimuma sunčeve aktivnosti. Prilagođeno iz O'Neill et al., 2015.

od 20 GeV modulacija se ne pojavljuje (O'Neill et al., 2015; Durante, Cucinotta, 2011).

U poređenju sa SPE koje traju relativno kratko i brzo dovode do deponovanja energije u sredinu kroz koju prolaze, kratkoročno gledano GCR su manje štetne. Međutim, konstantno bombardovanje ljudskog tela od strane GCR značajno doprinosi dozama zračenja sa povećanjem vremena trajanja misije (Rapp, 2006).

Dodatni problem po pitanju misije na Mars koji može uticati na smanjenje njenog trajanja ili čak i u potpunosti onemogućiti njenu realizaciju, je smanjenje gustine solarnog vetra i jačine magnetnog polja tokom maksimuma aktivnosti u narednim solarnim ciklusima. Između 23 i 24 ciklusa aktivnosti Sunca, nastao je duži period sunčevog minimuma aktivnosti koji je doveo i do neobično slabog solarnog maksimuma aktivnosti u ciklusu 24. Usled toga su zabeleženi veliki fluksevi GCR i izrazito slabe SPE tokom tog maksimuma aktivnosti (Schwadron et al., 2014). Uzimajući ovo u obzir kao i činjenicu da postoji kontinualno slabljenje solarnih maksimuma, počevši od ciklusa 22, može se očekivati da će solarni maksimum u ciklusu 25 takođe biti slab, u vreme kada bi misija na Mars mogla da se realizuje.

10. BIOLOŠKE POSLEDICE USLED ZRAČENJA

Biološki odgovor tela na uticaj zračenja iz svemira izuzetno je složen, u značajnoj meri subjektivan, a ponekad je potrebno i da prođe dosta vremena da bi neke posledice postale očigledne. Usled toga je teško odrediti koje doze zračenja predstavljaju opasnost i koji rizici su prihvativi. Sledeći problem je što ne postoje određeni okviri za procenu dozvoljenog izlaganja zračenju u međuplanetarnom prostoru. Zbog toga se u prvoj aproksimaciji za procene dozvoljenih doza u međuplanetarnom prostoru uzimaju procene koje važe za LEO. Pri određivanju ovih vrednosti mora se poštovati ALARA¹² princip, tj. doze zračenja moraju biti onoliko niske koliko je razumno moguće (Durante, Cucinotta, 2011; Rapp, 2006).

Uzimajući u obzir ALARA princip, formiran je standard prema kome je maksimalna dozvoljena izloženost ona koja dovodi do stvaranja raka kod 4,5% ozračene populacije odnosno gde je mortalitet usled razvoja raka zastavljen sa 3% kod ozračene populacije (Rapp, 2006).

10.1 Dejstvo zračenja na ćeliju

Uticaj zračenja na ćeliju započinje fizičkom fazom u kojoj dolazi do ekscitacije ili ionizacije čestica materije usled primljene energije od zračenja. Tokom ionizacije nastaju joni dok u ekscitaciji usled pucanja kovalentnih i vodoničnih veza u molekulima nastaju slobodni radikali. Slobodni radikali su neutralni molekuli sa jednim nesparennim elektronom usled kojeg su veoma reaktivni. Posebno su opasni slobodni radikali koji nastaju radiolizom molekula vode, kao što su H, HO kao i HO₂ koji nastaje u ćelijama koje osim vode imaju i veću zastupljenost kiseonika. U sledećoj hemijskoj fazi nastale čestice reaguju sa ostalim makromolekulima u ćeliji čime nastaju nova jedinjenja. Ishodi ionizacije i radioliza molekula vode usled ekscitacije imaju iste ishode u poslednjoj biološkoj fazi u kojoj usled nastanka novih jedinjenja u ćeliji može doći do gubitka ili promene funkcionalnosti određenih organskih molekula u ćeliji što u krajnjem slučaju može dovesti do mutacije ćelije ili njene smrti (Krmar, 2013).

Oštećenje lanca dezoksiribonukleinske kiseline (DNK) najznačajnija je promena unutar ćelije usled dejstva zračenja koje se može manifestovati u prekidu baza u lancu DNK, jednostrukom i dvostrukom prekidu lanca DNK. Oštećenja baza ne moraju dovesti do smrti ćelije, ali mogu dovesti do oštećenja genetskog koda u lancu DNK, što dovodi do mutacija. Dvostruki prekidi su oštećenja koja ne mogu da se poprave za razliku od jednostrukih prekida. Dvostruki prekidi mogu dovesti do prekida gubitka nekih funkcija u ćeliji, kao što je sposobnost deobe, pa takve ćelije prestaju da postoje. Ćelije su osjetljivije na zračenja sa većim linearnim energetskim transferom (LET) koje brzo gube energiju čestice po jedinici puta, kao što su alfa čestice ili HZE. Doza zračenja od 1Gy koju izazove alfa čestica, u ćeliji čoveka proizvede oko 5000 prekida baza, oko 1000 jednostrukih i oko 100 dvostrukih prekida lanaca DNK (Krmar, 2013). Sa povećanjem LET upadne čestice, ne samo da dolazi do povećanja broja oštećenih DNK lanaca, već dolazi i do usložnjavanja nastalih oštećenja, tj. postojanja više vrsta oštećenja na jednom lancu, kao recimo zajedno nastajanje jednostrukog i dvostrukog prekida jednog DNK (Cucinotta, Durante 2006).

¹² Skraćenica od engleskog naziva As Low As Reasonable Achievable.

Ćelije koje prežive uticaj zračenja, ali su doživele određene gubitke ili mutaciju DNK molekula, predstavljaju osnovu za razvoj raka (Cucinotta, Durante 2006).

Povećana osetljivost ćelije nastaje u vreme njene deobe (mitoze), kadu su lanci DNK razdvojeni, pa prekid ne može da se popravi kopiranjem susednog lanca i u periodu neposredno nakon deobe u kojoj se sintetišu bitni enzimi i proteini. Ćelije koje se češće dele, prolaze tokom života i više puta kroz fazu deobe, pa su po tom pitanju te ćelije osetljivije na zračenje od ćelija koje se ređe dele. Ćelije epiderma kože, sluzokože i ćelije koštane srži se češće dele u odnosu na ćelije mišića, kostiju ili nerava koje se slabije ili nimalo ne dele (Krmar, 2013).

Jedan način da se umanji dejstvo štetnog zračenja je upotreba takozvanih radioprotectora. Oni stupaju u reakcije sa slobodnim radikalima i na taj način smanjuju njihovu sposobnost za stvaranje veza odnosno odlažu period za deobu ćelije i time smanjuju njenu osetljivost na zračenje. Da bi radioprotectori imali efekta, moraju se naći u telu pre ozračivanja. Učinkovitost radioprotectora u slučaju ionizacije putem čestica sa velikim LET, kao što su alfa čestice ili neutroni, znatno je slabija nego u slučaju slobodnih radikala. (Krmar, 2013).

10.2 Uticaj zračenja na organizam

Uticaji zračenja na telo manje su poznati nego na nivou ćelije iz razloga veće složenosti, ali i nedostatka istraživanja na ovom polju. Glavni izvori podataka dobijaju se na osnovu pojedinačnih slučajeva nuklearnih akcidenata poput Černobilja, preživelih stanovnika Hirošime i Nagasakija ili na osnovu pacijenata u medicini koji su u svrhe lečenja izloženi zračenjima.

NASA je definisala četiri najbitnije promene koje nastaju na telu usled zračenja a to su: nastanak i razvoj raka, pojava akutnog radijacionog sindroma, degeneracije na tkivima i centralnom nervnom sistemu (Chancellor et al. 2014).

U zavisnosti od toga koliko dozi zračenja je izložen organizam, efekti se mogu podeliti na determinističke ili stohastičke. Deterministički nastaju posle izlaganja tela velikim dozama zračenja reda veličine 1 Gy po celom telu, odnosno kada doze zračenja pređu određeni prag, tako da se posledice po zdravlje relativno dobro znaju. Stohastički efekti nastaju posle izlaganja malim dozama zračenja, ali se ne može sa sigurnošću predvideti kako i kad će se posledice zračenja manifestovati. Dugogodišnje prikupljanje doza ozračivanja organizama sa dozama mnogo nižim od onih koje dovode do pojave determinističkih efekata govore o povećanju verovatnoće pojave određenih oboljenja posle određenog vremena od ozračivanja, tj. do pojave stohastičkih efekata zračenja. Intenzitet stohastičkih efekta, odnosno težina i trajanje nekog oboljenja ne zavise od primljene doze, oni samo dovode do njegove pojave. Stohastički efekti se manifestuju pre svega pojavom kancerogenih promena koje nastaju kao rezultat mutacije ćelije (Krmar, 2013).

Sve promene koje nastaju u ozračenoj jedinki se nazivaju somatski efekti dok oni koji nastaju na potomstvu ozračene jedinke se nazivaju genetski efekti.

10.3 Akutni radijacioni sindrom

Akutni radijacioni sindrom je deterministički efekat koji predstavlja skup posledica koje nastaju posle primljenih velikih doza zračenja. Može se podeliti na tri grupe posledica: hematopoezne, gastrointestinalne i cerebrovaskularne. Ova podela ujedno predstavlja i podelu

po osetljivosti na zračenje kao i po vremenu potrebnom da se posledice manifestuju (Krmar, 2013).

Hematopoezni sistem, pre svega koštana srž, jedan je od najosetljivijih organa u telu na zračenje, pošto se ćelije ovog organa najčešće dele. Ozračivanje dozom 1 Gy dovodi do teških oštećenja koštane srži. Ovo dovodi do smanjenja i prestanka proizvodnje crvenih i belih krvnih zrnaca (eritrocita i leukocita) i krvnih pločica (trombocita). Posledice se pojavljuju posle nekoliko nedelja, kada postojeće krvne ćelije u krvi odumiru a nove se zbog oštećenja ne stvaraju. Nedostaci belih krvnih zrnaca dovode do infekcija usled smanjenja imuniteta organizma a smanjenje broja trombocita dovodi do unutrašnjeg krvarenja. Smrtni ishod može nastupiti posle mesec dana (Krmar, 2013).

Gastrointestinalni sistem je manje osetljiv na zračenje, ali je primećeno u eksperimentima na životinjama da usled veće doze od 4 do 6 Gy, smrtni ishod nastaje u roku od dva dana od ozračivanja. Posledice se ogledaju u oštećenju krvnih sudova, poremećaju u balansu tečnosti i infekcijama itd. Sluzokoža ovog sistema predstavlja najosetljiviji deo na zračenje (Krmar, 2013).

Nervno tkivo cerebrovaskularnog sistema izuzetno je rezistentno na zračenje. Na dozama od 50 Gy može biti oštećeno do nivoa prekida funkcijanja. Smrt može nastupiti u roku od nekoliko sati do par dana. Uzrok smrti biva oštećenje neurona, krvnih sudova mozga i gubitka balansa u dinamici tečnosti (Krmar, 2013).

Tok akutnog radijacionog sindroma kod ljudi zavisi od veličine primljene doze. Tako recimo, ako je primljena ekvivalentna doza 2,5 Sv, u prvim satima posle ozračivanja se očekuje slabost i povraćanje, posle čega nastaje period bez simptoma. U toku treće nedelje od ozračivanja očekuju se krvarenje, prolijevanje, upala sluzokože, nedostatak apetita, da bi u četvrtoj nedelji počeo opravak. Ekvivalentna doza 4 Sv počinje na isti način kao i prva. U drugoj nedelji nastaje slabost, gubitak kose, u trećoj groznica i upala sluzokože, dok u četvrtoj se još javlja i krvarenje a smrtni ishodi nastaju u 50% slučajeva. Ekvivalentna doza od 6 Sv se odigrava sa istim simptomima, ali brže da bi u drugoj nedelji kod većine ozračene populacije nastupila smrt (Krmar, 2013).

Kada je reč o putu na Mars, pojavu Akutnog radijacionog sindroma može da izazove SPE. U roku od nekoliko sati veliki SPE u slučaju boravka u otvorenom svemiru, može na celom telu proizvesti doze zračenja preko 0,5 Gy (Wu et al., 2009). Najveća pretnja od pojave Akutnog radijacionog sindroma nastala bi onda prilikom boravka članova izvan skrovišta koje bi značajno smanjilo fluks SPE, odnosno izvan svemirske letelice.

10.4 Uticaj na kardiovaskularni sistem

Uticaji zračenja na krvne sudove i srce dugo su poznati pošto su nastajali pre svega prilikom ozračivanja pacijenata u terapijama tumora sa velikim dozama zračenja malog LET-a, pri čemu je zahvaćeno i okolno kardiovaskularno tkivo. Posledice ozračivanja kao što su ubrzana ateroskleroza, fibroza miokarda, poremećaj protoka krvi kroz srce i druge, počinju da se manifestuju godinama ili decenijama posle ozračivanja. Istraživanja na preživelima posle eksplozije atomske bombe, govore o povećanoj učestalosti ishemičnih bolesti srca i infarkta na ljudima koji su primili doze od najmanje 2 Gy putem γ -zračenja (Boerma et al., 2015).

Istraživanja uticaja zračenja iz svemira na kardiovaskularni sistem tek su u začetku, te ne raspolažu bogatom bazom podataka, tako da mehanizmi kojima ionizacija utiče na

kardiovaskularni sistem, nisu u potpunosti razumljivi. Eksperimenti u kojima su simulirani uticaji zračenja iz svemira upotrebom zračenja sa velikim LET, sprovedeni su na miševima ili njihovim modelima u kojima su primali doze zračenja do 0,5 Gy putem jona gvožđa i silicijuma. Njihovi uticaji na tkivo srca doveli su do povećanja DNK oksidacije, fibrozu miokarda, promena u radu srca i produženja trajanja apoptoze (programirane smrti) ćelija srca (Boerma et al., 2015). Na krvnim sudovima, iste doze zračenja dovele su do pojava dugoročnih indikatora povećanja krutosti aorte i poremećaja funkcije endotelijuma (unutrašnje obloge krvnih sudova). Doze od 2 Gy do 5 Gy dovele su do ubrzanja ateroskleroze u ozračenim delovima aorte. Smatra se da endotelijum igra glavnu ulogu u odgovoru kardiovaskularnog sistema na uticaj zračenja (Boerma et al., 2015). Ove promene na kardiovaskularnom sistemu kod miševa usled zračenja oslikavaju promene koje bi nastale na kardiovaskularnom sistemu ljudi usled puta na Mars pod dejstvom zračenja.

10.5 Razvoj katarakte

Katarakta na oku je još jedan stohastički efekat koji može da se razvije tokom puta na Mars. Još tokom prvih boravaka u svemiru, astronauti su primetili neobičan fenomen bljeska svetlosti koji nastaje kao rezultat prolaska visoko energetskih čestica, sa velikom vrednošću LET kroz mrežnjaču (Cucinotta et al., 2001). Nastajanje bljeska svetlosti objašnjava se jonizacijom koju vrše visoko energetske čestice ili usled stvaranja čerenkovljevog zračenja (Cucinotta et al., 2014). Ova pojava dovela je do mogućnosti nastanka i drugih oštećenja tkiva oka, kao što je katarakta na sočivu oka. Sam mehanizam nastanka katarakte nije sasvim jasan, ali se prepostavlja da nastaje usled oštećenja gena u epiteljskim ćelijama sočiva i promena na proteinskim vlaknima sočiva poput apoptoze, abnormalnog rasta itd. (Cucinotta et al., 2001). Na osnovu bogate baze medicinskih pregleda oka astronauta, primećena je korelacija između povećanja rizika od razvoja katarakte i zračenja iz svemira. Tokom boravka astronauta na orbitama sa inklinacijom većom od 50° u odnosu na ekvatorijalnu ravan Zemlje, kao i tokom putovanja na Mesec, telo je izloženo fluksu težih jona sa velikim LET što doprinosi povećanju doze zračenja, za razliku od boravka na manjim inklinacijama gde su uglavnom prisutni protoni sa malim LET (Cucinotta et al., 2001). Kod astronauta koji su boravili u oblastima gde su dobili veće doze, verovatnoća preživljavanja bez pojave katarakte manja je nego kod astronauta koji su boravili u oblasti gde su bili izloženi manjim dozama zračenja. Isto tako verovatnoća pojave katarakte, u odnosu na vreme od prve misije, veća je kod astronauta koji su primili veće doze zračenja (Cucinotta et al., 2001).

Ova istraživanja govore u prilog tome da i mali fluks energetskih čestica sa velikim LET je dovoljan da dovede do razvoja katarakte, za razliku od ranijih istraživanja na ozračivanim pacijentima u medicini, prema kojima do razvoja simptoma katarakte dolazi pri dozama od 2 Gy putem X ili γ zraka koje karakteriše mala vrednost LET (Cucinotta et al., 2001).

Smanjenje rizika razvoja katarakte oka tokom putovanja na Mars, postiglo bi se pravljenjem odbrambenih zidova ispunjenih vodonikom koji bi smanjili fluks visokoenergetskih čestica sa velikim LET ili upotrebom hemijskih radioprotectora (Cucinotta et al., 2001).

10.6 Uticaj na centralni nervni sistem

Uticaji zračenja tokom radioterapije u lečenju raka imali su uticaj i na centralni nervni sistem. Tom prilikom detektovane su određene promene na pacijentima poput hroničnog umora i

depresije. Promene kognitivnih sposobnosti primećene su pre svega na deci. Kod dece koja su podvrgnuta zračenju glave prilikom lečenja tumora mozga, zabeleženo je: smanjenje koeficijenta inteligencije, verbalnih sposobnosti, poremećaja pažnje, brzine slanja podataka, sposobnosti rešavanja matematičkih zadataka, smanjenja sposobnosti orijentacije u prostoru, sposobnosti pamćenja, promene u ponašanju itd. (Cucinotta et al. 2014; Jandial et al. 2018). Nova istraživanja povezala su ove promene sa smanjenjem strukturalne složenosti neurona, promena u kapilarnom sistemu i čestim upalama nerava (Jandial et al. 2018). Međutim, rezultati ozračivanja ljudi dobijeni ovim putem mogli bi se značajno razlikovati od rezultata koji bi se dobili u svemiru, pre svega zbog upotrebe zračenja čije doze uglavnom iznose od 25 do 50 Gy koje premašuju one očekivane u svemiru (Chancellor et al., 2014) i koje su uglavnom sa malim LET poput X i γ zračenja. Klinička ispitivanja uglavnom ne mogu da daju pogodna predviđanja dejstva zračenja iz svemira na telo usled različitog deponovanja energije u odnosu na zračenja koja se uglavnom koriste na Zemlji (Jandial et al. 2018). Usled toga su osmišljeni eksperimenti u kojima su ispitivani uticaji čestica sa visokim vrednostima LET.

Funkcionalno bihevioralne promene nastale pod dejstvom čestica sličnim onim iz GCR, povezuju se sa gubitkom strukture neurona i celovitosti sinapsi u određenim delovima mozga koje ostaju prisutne i godinu dana posle dejstva zračenja, što govori da su posledice dejstva ovih zračenja praktično trajne. Eksperimenti na ozračenim miševima pokazali su smanjenje kognitivnih sposobnosti tokom testa snalaženja u novim i nepoznatim situacijama koje su povezane sa promenama u hipokampusu i kortikalnom delu mozga. Gubici pamćenja i smanjena sposobnost prepoznavanja neke su od najistrajnjih promena ponašanja ozračenih glodara. Testovi Morisovog vodenog lavirinta ukazali su na probleme u adaptaciji na novu sredinu (Jandial et al. 2018).

U testovima sprovedenim na pacovima sa malim dozama zračenja putem jona gvožđa zabeležena su smanjenja senzomotornih sposobnosti i neurohemiske promene. Doze ispod 1 Gy dovele su do smanjenja sposobnosti na testu viseće žice. Bihevioralne promene trajale su do osam meseci od ozračivanja (Cucinotta et al. 2014).

Ozračivanja prefrontalnog korteksa na pacovima u kojima su putem jona gvožđa primili doze zračenja 0,2 Gy, pokazali su u testu koji je sproveden tri meseca posle ozračivanja da se sposobnost pacova da izvrše određen broj zadataka značajno smanjila u odnosu na kontrolnu grupu pacova koja nije ozračena. Smanjena funkcionalnost prefrontalnog korteksa kao posledice ozračivanja mozga mogla bi prilikom obavljanja neurokognitivnih zadataka spričiti astronaute u obavljanju složenih zadataka tokom misije ka Marsu (Cucinotta et al. 2014).

Na miševima ozračenim jonima titanijuma ili kiseonika energije 400 MeV-a pri čemu su primili doze zračenja 0,05 Gy, šest nedelja od ozračivanja detektovano je smanjenje broja bodljki na dendritima neurona do skoro 50% u hipokampusu i kortikalnom delu mozga koje se obično javlja kod stanja poput demencije, pa se prepostavlja da ove promene dovode do kognitivnih promena usled dejstva GCR (Jandial et al. 2018).

11. DOZE ZRAČENJA

Da bi se kvalifikovale promene koje nastaju u tkivu, usled gubitka energije nanelektrisane čestice prilikom prolaska kroz sredinu i da bi se uopšteno jasnije shvatili efekti zračenja na tu sredinu, uvode se specifične fizičke veličine.

11.1 Apsorbovana doza D

Apsorbovana doza je obično prva veličina koja se određuje u dozimetriji koja se odnosi na živo tkivo. Ona predstavlja ukupnu energiju koja je deponovana po kilogramu mase tela prilikom prolaska zračenja ili čestica kroz telo. Jedinica ove veličine grej (Gy), definisana je kao količnik količine energije u džulima deponovana u telo jedinične mase (J/kg). Često se upotrebljava i stara jedinica rad, gde važi $1 \text{ Gy} = 100 \text{ rad}$. Ova veličina se može odrediti pomoću jednačine

$$D = \int \frac{S(E) \cdot t}{\rho} \Phi(E) \cdot dE \quad (3)$$

gde S (MeV/m) predstavlja gubitke energije čestice po jedinici puta prilikom njenog kretanja kroz sredinu gustine ρ , t je vreme trajanja dejstva zračenja na telo, dok Φ (čestica/m²·s·MeV) predstavlja diferencijalni fluks zračenja (Mewaldt et al., 2005; Warden, Bayazitoglu, 2018).

11.2 Ekvivalentna doza H

Apsorbovana doza zračenja ne mora uvek da proizvede jednakе biološke efekte u tkivu. Nejednakost je posledica različitih uslova ozračivanja odnosno upotreba različitih čestica ili vrsta zračenja koje različito reaguju sa tkivom. Usled toga se definiše veličina ekvivalentna doza H koja opisuje ozračivanje tkiva u kome bi nastali identični biološki efekti, pri upotrebi različitih vrsta zračenja. U jednoj formi se definiše putem apsorbovane doze D i radijacionog faktora kvaliteta ω_R , putem jednačine

$$H = \sum_R \omega_R \cdot D_R \quad (4)$$

Radijacioni faktor kvaliteta ω_R , bezdimenzionalna je veličina i zavisi od vrste čestica ili zračenja koje prolaze kroz sredinu i zavisi od te sredine. Veće vrednosti ove veličine proizvode štetnije biološke posledice. D_R su apsorbovane doze zračenja dobijene od jedne vrste čestica ili zračenja (Warden, Bayazitoglu, 2018). Sumiranje se vrši na osnovu rednog broja elementa. Stara jedinica ove veličine je rem. Savremena jedinica ekvivalentne doze je sivert (Sv), gde važi $1 \text{ Sv} = 100 \text{ rem}$. Sv ima iste jedinice kao i Gy, ali uzima u obzir proizvedene različite biološke efekte (Warden, Bayazitoglu, 2018; Rapp, 2006).

Prirodne doze zračenja na godišnjem nivou, za osobe koje nisu podvrgnute zračenju iz medicinskih ili drugih razloga, odnosno ne sreću se sa izvorima zračenja, kreću se od 1 do 4 mSv. U većini zemalja je propisana maksimalna doza zračenja od 20 mSv godišnje za profesionalce. Tokom rendgenskog radiografskog pregleda pacijenti prime dozu od nekoliko mSv. Izlaganje zračenju celog tela doze 1 Sv izazvalo bi simptome akutne radijacione bolesti dok se prepostavlja da srednja letalna doza za čoveka iznosi oko 3 Sv (Krmar, 2013).

11.3 Efektivna doza E

Da bi se ocenili stohastički efekti zračenja na različite organe tela koji mogu imati različite posledice po zdravlje čoveka, uvodi se veličina efektivna doza E kao ekvivalentna doza zračenja nastala pri ravnomernoj ekspoziciji celog tela, modifikovana preko tkivnog faktora kvaliteta ω_T

$$E = \sum_T H \cdot \omega_T \quad (5)$$

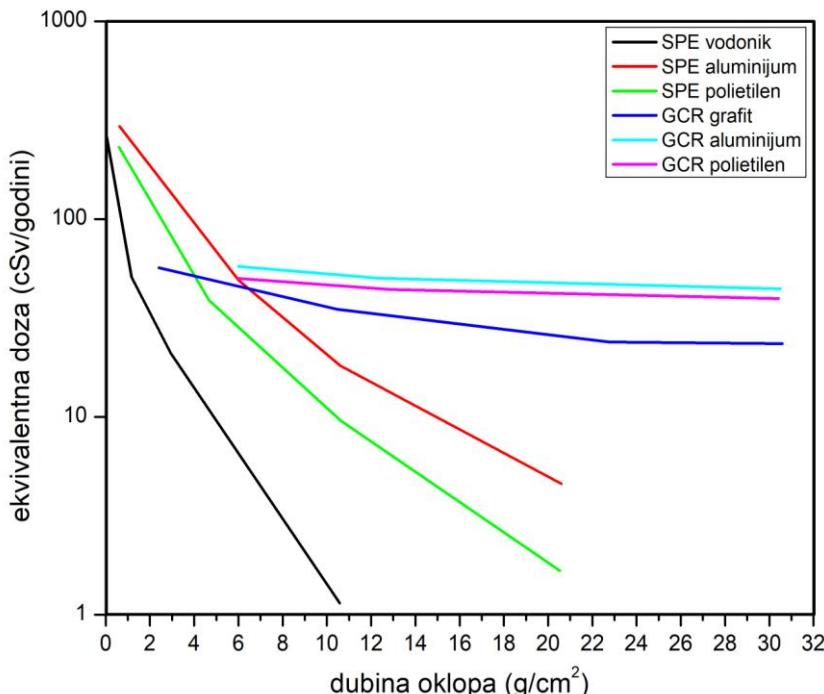
Tkivni faktor kvaliteta ω_T definisan je posebno za svaki organ u telu (Warden, Bayazitoglu, 2018). U tabeli 6 predstavljene su vrednosti ω_R za različite čestice i zračenja i faktor kvaliteta ω_T za različite organe u telu.

vrsta zračenja	ω_R	organ	ω_T
X i γ	1	grudi, koštana srž, pluća, debelo crevo, stomak	0,12
Elektron	1	polne žlezde	0,08
Proton	2	tiroidna žlezda, bešika, jetra, jednjak	0,04
α čestica i teža jezgra	20	površina kosti, mozak, koža, pljuvačne žlezde	0,01
Neutroni	2-20	ostalo	0,12

Tabela 6: Vrednosti radijacionog ω_R i tkivnog ω_T faktora kvaliteta za različite vrste zračenja odnosno različite organe u telu. Izvor: Durante, Cucinotta, 2011.

11.4 Uticaj zidova letelice na doze zračenja

Na slici 10 data je zavisnost ekvivalentne doze zračenja GCR i SPE čestica u zavisnosti od debljine oklopa letelice primenjujući različite materijale. Pored aluminijuma, standardnog materijala za izradu oklopa letelice, kao efikasan materijal za izradu oklopa ili trupa letelice može se upotrebiti polietilen. Kada je reč o GCR, debljina oklopa letelice samo delimično utiče na smanjenje apsorbovane doze koju primi posada. Povećanje debljine ne samo da ne smanjuje dozu zračenja, nego je može i povećati. Uzrok tome je stvaranje sekundarnog zračenja u reakciji primarnog GCR zračenja velikih energija (vrh spektra nalazi se oko 1 GeV) sa oklopom letelice i tkivom. Sekundarno zračenje ima veliku energiju, pa može više da doprinese dozi zračenja od primarnog (Ballarini et al., 2006). Povećanje debljine oklopa dovodi i do povećanja ukupne mase letelice, što ima za posledicu



Slika 10: Uticaj debljine oklopa od koga je napravljena letelica na smanjenje doze zračenja.

potrebu za povećanjem količine goriva, odnosno ukupnih troškova misije.

S druge strane, povećanje debljine oklopa pozitivno utiče na smanjenje prodiranja SPE. Ove čestice u proseku imaju manju energiju od GCR. Glavni deo spektra nalazi se na energijama ispod 200 MeV (Ballarini et al., 2006). U reakciji sa oklopom nastaju spore sekundarne čestice (malih energija) koje ne utiču na povećanje doze zračenja. Kao što je uočljivo sa slike 10, najoptimalniji materijal za zaustavljanje SPE čestica je vodonik, ali problem je što on ne može da se iskoristi za izradu samog trupa ili oklopa, nego se za njega moraju graditi posebni odeljci za skladištenje, što je neefikasno.

11.5 Očekivane doze zračenja

U tabeli 7 predstavljene su ekvivalentne i efektivne doze zračenja koje se upotrebljavaju u NASA-i koje je 1989. i 2001. preporučio Američki nacionalni savet za zaštitu od zračenja (NCRP). U njemu su predstavljene granične vrednosti ekvivalentnih doza zračenja za boravak u LEO u toku meseca, godine ili za profesionalna lica, u odnosu na organe koji formiraju krv (OFK), očno sočivo (OS) i kožu, odnosno efektivna doza s obzirom na pol i godine života (Rapp, 2006).

Vreme ekspozicije	OFK ekvivalentna doza (mSv)	OS ekvivalentna doza (mSv)	Koža ekvivalentna doza (mSv)
30 dana	250	1000	1500
1 godina	500	2000	3000
profesionalno	tabela dole	4000	6000
Efektivne doze (mSv) na osnovu pola i godina			
Godine	25	35	45
muškarci	700	1000	1500
Žene	400	600	900
1600			

Tabela 7: Vrednosti preporučenih vrednosti ekvivalentnih i efektivnih doza zračenja za LEO za različite organe tela. Prilagođeno iz: Rapp, 2006.

Međutim, u svemiru ljudi su više izloženi protonima i HZE jonima koji na drugačiji način reaguju sa tkivom. Zbog toga procena štetnosti zračenja se mora odrediti upotrebom modela uzimajući u obzir biofizičke karakteristike. U tabeli 8 predstavljene su projektovane doze zračenja posebno za muškarce i žene starosti 40 godina, za dugotrajne misije na Mars tokom solarnog minimuma u letelici sa aluminijumskim oklopom debljine 5 g/cm^2 (Cucinotta, Durante 2006).

Tip misije	Apsorbovana doza (mGy)	Ekvivalentna doza (mSv)
Konjukciona (1000 dana)	420	1070
Opoziciona (600 dana)	370	1030

Tabela 8: Vrednosti očekivanih apsorbovanih i ekvivalentnih doza tokom različitih misija na Mars u toku solarnog minimuma. Prilagođeno iz: Cucinotta, Durante, 2006.

Ekvivalentne doze zračenja za misiju u kojoj bi posada 6 meseci putovala do Marsa, 18 meseci se zadržala na Marsu i 6 meseci putovala sa Marsa na Zemlju u vreme solarnog minimuma i maksimuma, date su u tabli 9 (Mewaldt et al., 2005).

Period	Tokom puta (360 dana)	Na Marsu (540 dana)	Ukupno
Solarni maksimum	730 mSv	410 mSv	1140 mSv
Solarni minimum	280 mSv	180 mSv	460 mSv

Tabela 9: Vrednosti očekivanih ekvivalentnih doza tokom različitih perioda misije na Mars u toku solarnog minimuma i maksimuma. Prilagođeno iz: Mewaldt et al., 2005.

12. PROCENA DOZE ZRAČENJA PRILIKOM MISIJE NA MARS

Pošto je fluks zračenja unutar letelice složena funkcija primarnog i sekundarnog zračenja nastalog prolaskom kroz samu letelicu i članove posade, kao najjednostavnija varijanta računanja doza zračenja mogu se odrediti doze koje bi članovi posade primili bez zaštitnog dejstva zidova letelice.

Kao model ljudskog tela često se uzima voda, te vrednost ρ uzima vrednost 1000 kg/m^3 . Vreme dejstva zračenja t je vreme za koje je posada putovala od Zemlje do Marsa, što iznosi 180 dana i vreme za koje je posada putovala od Marsa do Zemlje koje takođe iznosi 180 dana, tako ukupna vrednost ima vrednost 360 dana.

Vrednost gubitaka energije teške nanelektrisane čestice po jedinici puta tokom prolaska kroz određenu sredinu može se odrediti putem Bete-Blobove funkcije

$$S = \frac{4\pi \cdot k^2 \cdot Z^2 \cdot e^4 \cdot n}{m_0 \cdot c^2 \cdot \beta^2} \left(\ln \left(\frac{2 \cdot m_0 \cdot c^2 \cdot \beta^2}{I \cdot (1 - \beta^2)} \right) - \beta^2 \right) \quad (6)$$

gde su: β - odnos brzine upadne čestice u odnosu na brzinu svetlosti, m_0 - masa mirovanja elektrona, c - brzina svetlosti, n - broj elektrona po jedinici zapremine materijala mete, Z - atomski broj atoma projektila, e - elementarno nanelektrisanje, I - srednji ionizacioni potencijal atoma materijala kroz koji se čestica kreće a konstanta k ima vrednost $1/(4\pi\epsilon_0) = 9 \cdot 10^9 \text{ Nm}^2/\text{C}^2$.

Ako u jednom molekulu vode postoji 10 elektrona, broj elektrona po jedinici zapremine iznosi

$$n = 10 \frac{N_A \cdot \rho_{H_2O}}{M(H_2O)} = 10 \frac{6,022 \cdot 10^{23} \frac{\text{čestica}}{\text{mol}} \cdot 10^3 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}{18,016 \cdot 10^{-3} \frac{\text{kg}}{\text{mol}}} = 3,34 \cdot 10^{29} \frac{\text{elektrona}}{\text{m}^3} \quad (7)$$

Srednji ionizacioni potencijal za vodonik iznosi $I_H = 19 \text{ eV}$ dok se za kiseonik izračunava iz jednačine

$$I_O = 11,2 \text{ eV} + (11,7 \cdot Z \text{ eV}) = 11,2 \text{ eV} + (11,7 \cdot 8 \text{ eV}) = 105 \text{ eV} \quad (8)$$

za ostale materijale može se izračunati iz jednačine

$$n \cdot \ln I = \sum_i N_i \cdot Z_i \cdot \ln I_i \quad (9)$$

gde N_i predstavlja broj određenih atoma u molekulu. U slučaju vode, srednji ionizacioni potencijal iznosi

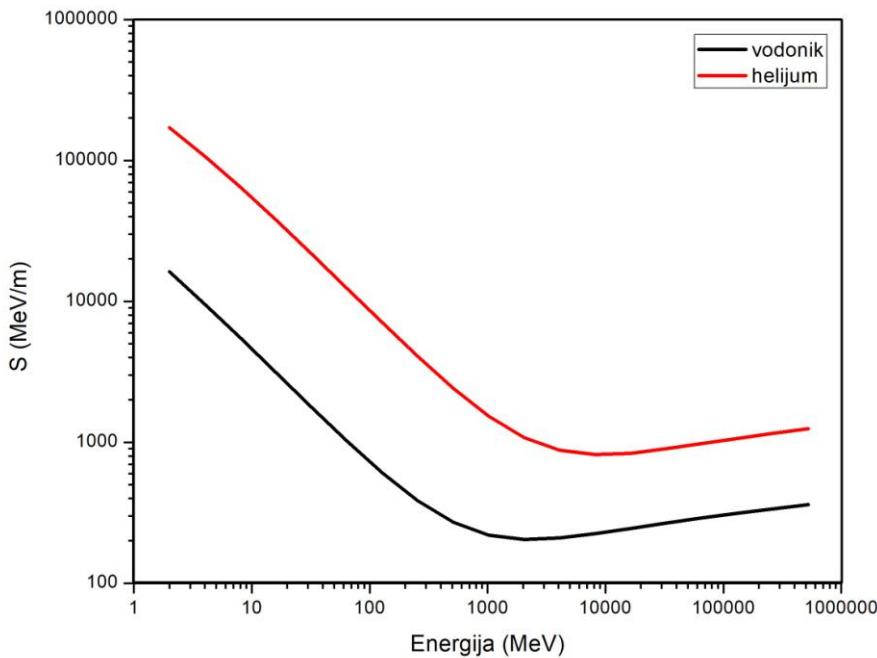
$$I = e^{\frac{N_H \cdot Z_H \cdot \ln I_H + N_O \cdot Z_O \cdot \ln I_O}{10}} = e^{\frac{2 \cdot 1 \cdot \ln 19 + 1 \cdot 2 \cdot \ln 105}{10}} = 74,6 \text{ eV} \quad (10)$$

Parametar β je pogodnije izraziti pomoću energija koje imaju čestice projektila putem izraza

$$\beta = \left(1 - \left(\frac{1}{\frac{E_K}{E_0} + 1} \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (11)$$

gde E_K i E_0 predstavljaju kinetičke energije i energije mirovanja čestica projektila, respektivno.

Pošto su u GCR najzastupljeniji joni vodonika i helijuma, biće određene doze zračenja koje proizvode ove čestice. Na osnovu toga vrednosti masa mirovanja za jone vodonika i helijuma iznose $E_{0H} = 938,28$ MeV i $E_{0He} = 3727,3$ MeV dok su raspodele kinetičkih energija E_K date fluksevima na slici 9.



Slika 11: Gubici energije protona i alfa čestica iz GCR prilikom prolaska kroz vodu, izračunati putem Bete-Blobove funkcije.

Na osnovu ovih podataka i upotrebot jednačine (6) izračunali smo zavisnosti gubitaka energije S od energije za protone i alfa čestice iz GCR prilikom prolaska kroz vodu koje su predstavljene na slici 11.

Kao što se vidi sa slike 11, protoni imaju za iste vrednosti energije približno 10 puta manje gubitke energije od alfa čestica. Pošto manje energije gube po metru, protoni će lakše prodirati dublje u tkivo za razliku od alfa čestica koje će zbog bržeg gubitka energije teže prodirati u tkivo. Usled toga, alfa čestice bi svoju energiju deponovale na kraćim putanjama u odnosu na protone, čime bi zahvatile manji broj organa, za razliku od protona koji bi zbog dužeg puta zahvatili više organa. Samim tim, alfa čestice bi dovele do većeg oštećenja manjeg broja organa, tj. većih doza zračenja u tim organima, pre svega kože. Protoni bi oštetili veći broj organa, ali bi ta oštećenja bila manjeg intenziteta, tj. doze zračenja bi bile manje.

Zavisnosti vrednosti S od energije za vodonik i helijum sa slike 11 mogu se zarad lakšeg računa predstaviti stepenim funkcijama, koje imaju oblik

$$S_H = 10^{4,60-1,14\log(E)+0,14\log^2(E)} \left[\frac{MeV}{m} \right] \quad (12)$$

$$S_{He} = 10^{5,77-1,24\log(E)+0,13\log^2(E)} \left[\frac{MeV}{m} \right] \quad (13)$$

Pošto fluks GCR raste 1,5%/AU u toku solarnog minimuma i 3%/AU u toku solarnog maksimuma u odnosu na rastojanje od Sunca (McKibben et al.), može se smatrati da je fluks GCR na rastojanju 1,5 AU (rastojanje Mars od Sunca) jednak kao i na rastojanju 1 AU, pa se za procenu doza zračenja mogu upotrebiti diferencijalni spektri vodonika i helijuma iz GCR na rastojanju 1 AU. Fitovanja vrednosti fluksa vodonika i helijuma od energije tokom solarnog minimuma i maksimuma sa slike 9 daju jednačine

$$\Phi_{H \min} = 10^{-3,06+2,80\log(E)-0,59\log^2(E)} \left[\frac{1}{m^2 \cdot s \cdot \frac{MeV}{nuk.}} \right] \quad (14)$$

$$\Phi_{He \ min} = 10^{-2,78+2,14\log(E)-0,52\log^2(E)} \left[\frac{1}{m^2 \cdot s \cdot \frac{MeV}{nuk.}} \right] \quad (15)$$

$$\Phi_{H \ max} = 10^{-5,16+3,26\log(E)-0,60\log^2(E)} \left[\frac{1}{m^2 \cdot s \cdot \frac{MeV}{nuk.}} \right] \quad (16)$$

$$\Phi_{He \ max} = 10^{-4,96+2,85\log(E)-0,58\log^2(E)} \left[\frac{1}{m^2 \cdot s \cdot \frac{MeV}{nuk.}} \right] \quad (17)$$

Apsorbovana doza usled dejstva GCR, može se odrediti upotreborom jednačine (3) i onda važi

$$D = \int_{10}^{10^6} \frac{\Phi(E) \cdot S(E) \cdot dE \cdot t}{\rho_{H_2O}} = \frac{4\pi \cdot t}{\rho_{H_2O}} \left(\int_{10}^{10^6} \Phi_H \cdot S_H \cdot dE + \int_{10}^{10^6} \Phi_{He} \cdot S_{He} \cdot dE \right) \quad (18)$$

Vrednosti energija u integralu izražene su u MeV-ima. U toku solarnog minimuma upotreborom jednačina (12), (13), (14) i (15) onda važi

$$D_{\min} = \frac{4\pi \cdot t}{\rho_{H_2O}} \left(\int_{10}^{10^6} \Phi_{H \ min} \cdot S_H \cdot dE + \int_{10}^{10^6} \Phi_{He \ min} \cdot S_{He} \cdot dE \right) \quad (19)$$

$$D_{\min} = \frac{4\pi \cdot t}{\rho_{H_2O}} \left(\int_{10}^{10^6} 10^{-3,06+2,80\log(E)-0,59\log^2(E)} \cdot 10^{4,60-1,14\log(E)+0,14\log^2(E)} dE + \right.$$

$$\int_{10}^{10^6} 10^{-2,78+2,14 \cdot \log(E) - 0,52 \cdot \log^2(E)} \cdot 10^{5,77-1,24 \cdot \log(E) + 0,13 \cdot \log^2(E)} dE \quad (20)$$

$$D_{\min} = 69,75[mGy] + 56,15[mGy] = 125,9[mGy] \quad (21)$$

Dakle, u toku solarnog minimuma svaki član posade bi primio apsorbovanu dozu zračenja ukupno 125,9 mGy, tj. 69,75 mGy od jona vodonika i 56,15 mGy od jona helijuma. U toku solarnog maksimuma, uz upotrebu jednačina (12), (13), (16) i (17) onda važi

$$D_{\max} = \frac{4\pi \cdot t}{\rho_{H_2O}} \left(\int_{10}^{10^6} \Phi_{H \max} \cdot S_H \cdot dE + \int_{10}^{10^6} \Phi_{He \ max} \cdot S_{He} \cdot dE \right) \quad (22)$$

Upotrebom identičnog postupka, kao i za solarni minimum, dobija se

$$D_{\max} = 13,72[mGy] + 11,59[mGy] = 25,32[mGy] \quad (23)$$

Dakle, u toku solarnog maksimuma svaki član posade bi primio apsorbovanu dozu zračenja ukupno 25,32 mGy, tj. 13,72 mGy od jona vodonika i 11,59 mGy od jona helijuma.

Ekvivalentne doze zračenja mogu se odrediti putem jednačine (4) i vrednosti radijacionog faktora kvaliteta iz tablice 6. Ekvivalentne doze zračenja u vreme solarnog minimuma onda imaju vrednosti

$$H_{\min} = \omega_{RH} \cdot D_{H \min} + \omega_{RHe} \cdot D_{He \ min} \quad (24)$$

$$H_{\min} = 2 \cdot 69,75[mSv] + 20 \cdot 56,15[mSv] = 139,5[mSv] + 1123[mSv] = 1262,5[mSv] \quad (25)$$

Dakle, ukupna ekvivalentna doza tokom solarnog minimuma bi iznosila 1262,5 mSv. Pojedinačno, joni vodonika bi dali dozu zračenja 139,5 mSv a joni helijuma 1123 mSv. U vreme solarnog maksimuma važi

$$H_{\max} = \omega_{RH} \cdot D_{H \ max} + \omega_{RHe} \cdot D_{He \ max} \quad (26)$$

$$H_{\max} = 2 \cdot 13,72[mSv] + 20 \cdot 11,59[mSv] = 27,44[mSv] + 231,8[mSv] = 259,2[mSv] \quad (27)$$

Dakle, ukupna ekvivalentna doza tokom solarnog maksimuma bi iznosila 259,2 mSv. Pojedinačno, joni vodonika bi dali dozu zračenja 27,44 mSv a joni helijuma 231,8 mSv. Poređenjem dobijenih vrednosti uočava se da bi tokom solarnog minimuma članovi posade primili približno 4 do 5 puta veće vrednosti apsorbowane i ekvivalentne doze u odnosu na maksimum solarne aktivnosti, ne računajući doze zračenja koje bi nastale usled dejstva SPE.

13. ZAKLJUČAK

Iako su planovi odlaska ljudi na Mars stari preko pola veka, stalno odlaganje ove Odiseje u svemiru u značajnoj meri je povezano sa nepotpunim poznavanjem i razumevanjem uticaja uslova puta na Mars na ljudsko telo.

Boravak u zatvorenom prostoru i nemogućnost direktnе komunikacije sa Zemljom, mogli bi dovesti do pojave autonomije članova posade, što može ugroziti misiju. Uticaj mikrogravitacije pre svega na kosti i mišiće tokom boravka u LEO, relativno uspešno se umanjuje nekoliko časovnim vežbanjem u toku dana, upotrebom biohemijskih sredstava i odgovarajućom ishranom. Međutim, gubici na ovim organima su i dalje prisutni. Uticaji pomeranja tečnosti u telu tokom dugotrajnog boravka u svemiru dovodi do nastanka promena na telu koje se manifestuju kao trajna promena i ostaju prisutne i posle povratka na Zemlju. Uticaji zračenja na telo u zemaljskim uslovima poznati su uglavnom na osnovu terapijskih upotreba zračenja u medicini, preživelih u eksploziji atomske bombe i nuklearnih akcidenata. Međutim, ova saznanja su uglavnom bazirana na upotrebi zračenja sa malom LET komponentom, za razliku od zračenja u svemiru u kojoj komponenta zračenja sa velikom LET komponentom, iako nije zastupljena u velikom procentu, bi značajno doprinela dozama zračenja, te se pretpostavlja da bi njihov negativni uticaj na tkivo bio veći u odnosu na zračenje sa malom LET komponentom. Eksperimenti koji se sprovode uglavnom na životinjama i njihovim modelima gde se upotrebljavaju zračenja sa velikom LET komponentom, uglavnom su u začecima i u njima se uglavnom upotrebljavaju monohromatska zračenja elemenata koji su prisutni u GCR i SPE koji nisu reprezentativni za realno dejstvo ovih zračenja u svemiru na ljudsko telo. Štetno dejstvo zračenja pre svega GCR u ovom trenutku ne može se značajno smanjiti upotrebom određenog materijala kao rešenje za oklop letelice.

Ono što je sigurno reći da bi štetan uticaj zračenja iz svemira bio nekoliko puta manji ako bi se misija realizovala u periodu maksimalne solarne aktivnosti i izborom konjukcione trajektorije, uz pretpostavku da je uticaj SPE smanjen na minimum upotrebom adekvatnog skloništa.

14. LITERATURA

1. W. Thornton, F. Bonato, *The Human body and Weightlessness*, Springer, 2017
2. M. Durante, F. Cucinotta, Physical basis of radiation protection in space travel, *Review of modern physics*, volume 83, 2011
3. D. Rapp, *Radiation Effects and Shielding Requirements in Human Missions to the Moon and Mars*, *The International Journal of Mars Science and Exploration*, 2006
4. M. Krmar, *Uvod u nuklearnu fiziku*, Prirodno-matematički fakultet, Departman za fiziku, 2013
5. F. Cucinotta, M. Durante, Cancer risk from exposure to galactic cosmic rays – implication for human space exploration, *Lancet Oncology*, 2006
6. F. Cucinotta, F. Manuel, J. Jones, G. Iszard, J. Murrey, B. Djojonegro, M. Wear, *Space Radiation and Cataracts in Astronauts*, Radiation Research Society, 2001
7. F. Cucinotta, M. Alp, F. Sulzman, M. Wang, *Space radiation risks to the central nervous system*, Elsevier, 2014
8. F. Cucinotta, *Space Radiation Organ Doses for Astronauts on Past and Future Missions*, 5th Edition of *Space Physiology and Medicine*, 2007
9. R. Mewaldt, A. Davis, W. Binns, G. de Nolfo, J. George, M. Israel, R. Leske, E. Stone, M. Wiedenbeck, T. von Rosenvinge, *The Cosmic Ray Radiation Dose in Interplanetary Space – Present Day and Worst-Case Evaluations*, 29th International Cosmic Ray Conference Pune, 2005
10. P. O'Neill, S. Golge, T. Slaba, Badhwar - O'Neill 2014 Galactic Cosmic Ray Flux Model Description, NASA, 2015
11. D. Warden, Y. Bayazitoglu, *New Comparative Metric For Evaluating Spacecraft Radiation Shielding*, *Journal of Spacecraft and Rockets*, 2018

12. Human Research Program: Human Health Countermeasures Element (HRP-47060), Risk of Renal Stone Formation, NASA, 2008
13. A. LeBlanc, V. Schneider, L. Shackelford, S. West, V. Oganov, A. Bakulin, L. Voronin, Bone mineral and lean tissue loss after long duration space flight, 2000
14. M. Boerma, G. Nelson, V. Sridharan, X. Mao, I. Koturbash, M. Hauer-Jensen, Space radiation and cardiovascular disease risk, World Journal of Cardiology, 2015
15. S. Moore, H. MacDougall, Journey to Mars: Physiological Effects and Operational Consequences of Long-Duration Microgravity Exposure, Journal of Cosmology, Vol 12, 2010
16. R. Carpenter, T. Lang, S. Bloomfield, J. Bloomberg, S. Judex, J. Keyak, R. Midura, P. Pajevic, J. Spatz, Effects of Long-Duration Spaceflight, Microgravity, and Radiation on the Neuromuscular, Sensorimotor, and Skeletal Systems, Journal of Cosmology, Vol 12, 2010
17. J. Chancellor, R. Blue, K. Cengel, S. Aunon-Chancellor, K. Rubins, H. Katzgraber, A. Kennedy, Limitations in predicting the space radiation health risk for exploration astronauts, 2018
18. D. Landau, J. Longuski, Trajectories for Human Missions to Mars, Part 1: Impulsive Transfers, Journal of Space and Rockets, Vol 43, 2006
19. C. Foster, M. Daniels, Mission Opportunities for Human Exploration of Nearby Planetary Bodies, AIAA SPACE 2010 Conference & Exposition, 2010
20. N. Schwadron, J. Blake, A. Case, C. Joyce, J. Kasper, . E. Mazur, N. Petro, M. Quinn, J. Porter, C. Smith, S. Smith, H. Spence, L. Townsend, R. Turner, J. Wilson, C. Zeitlin Does the worsening galactic cosmic radiation environment observed by CRaTER preclude future manned deep space exploration?, Space Weather, 2014

21. I. Ushakov, B. Morukov, Yu. Bubeev, V. Gushin, G. Vasileva, A. Vinokhodova, D. Shved, Main Findings of Psychophysiological Studies in the Mars 500 Experiment, 2014
22. M. Basner, D. Dinges, D. Mollicone, I. Savelev, A. Ecker, A. Antonio, C. Jones, E. Hyder, K. Kan, B. Morukov, J. Sutton, Psychological and Behavioral Changes during Confinement in a 520-Day Simulated Interplanetary Mission to Mars, 2014
23. R. Fitts, D. Riley, J. Widrick, Physiology of a microgravity environment invited review: microgravity and skeletal muscle, 2000
24. R. Fitts, D. Riley, J. Widrick, Functional and structural adaptations of skeletal muscle to microgravity, The Journal of Experimental Biology 204, 2001
25. R. Gopalakrishnan , K. Genc, A. Rice, S. Lee, H. Evans, C. Maender, H. Ilaslan, P. Cavanagh, Muscle Volume, Strength, Endurance, and Exercise Loads During 6-Month Missions in Space, 2010
26. D. Williams , A. Kuipers, C. Mukai, R. Thirsk, Acclimation during space flight: effects on human physiology, 2009
27. H. Wu, J. Huff, R. Casey, M. Kim, F. Cucinotta, Risk of Acute Radiation Syndromes Due to Solar Particle Events, Human Research Program Requirements Document, HRP-47052, 2009
28. A. Pacini, Cosmic rays: bringing messages from the sky to the Earth's surface, 2017
29. M. Filipović, Astronomija na svim talasima, Spremo, 2007
30. D. Portree, Humans to Mars: fifty years of mission planning ,1950–2000, NASA, 2001
31. V. fon Braun, The Project Mars
32. M. Xapsos, J. Barth, E. Stassinopoulos, S. Messenger, R. Walters, G. Summers, E. Burke, Characterizing solar proton energy spectra for radiation effects applications, ieee transactions on nuclear science, vol. 47, 2000

33. F. Ballarini, D. Alloni, G.Battistoni, F. Cerutti, A. Ferrari, E. Gadioli, M.V. Garzelli, M. Liotta, A. Mairani, A. Ottolenghi, H. G. Paretzke, V.Parini, M. Pellicioni, L. Pinsky, P. Sala, D. Scannicchio, S.Trovati, M.Zankl, Modelling human exposure to space radiation with different shielding: the FLUKA code coupled with anthropomorphic phantoms, Journal of Physics: Conference Series 41, 2006
34. <https://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/mars/marsprof.html>
35. https://www.nasa.gov/sites/default/files/np-2014-03-001-jsc-orion_radiation_handout.pdf
36. <https://mars.jpl.nasa.gov/allaboutmars/mystique/history/early/>
37. <https://www.windows2universe.org/>
38. https://www.nasa.gov/sites/default/files/atoms/files/nasa_space_radiation_ebook_0.pdf
39. <https://history.nasa.gov/EP-107/contents.html>
40. <http://abyss.uoregon.edu/~js/space/lectures/lec21.html>
41. <https://www.space.com/19650-mir-space-station.html>
42. http://www.esa.int/Our_Activities/Human_and_Robotic_Exploration/Mars500/Mars500_quick_facts
43. http://mars500.imbp.ru/en/520_about.html
44. https://esamultimedia.esa.int/docs/Mars500/Mars500_infokit_feb2011_web.pdf
45. <http://wsn.spaceflight.esa.int/docs/Factsheets/19%20Matroska%20LR.pdf>
46. <https://www.mars-one.com/>
47. <https://spaceweatherarchive.com/2019/04/10/experts-predict-the-solar-cycle/>
48. <https://www.spaceweatherlive.com/en/solar-activity/solar-cycle>
49. <https://earthsky.org/space/solar-cycle-25-likely-weak-according-to-predictions>

BIOGRAFIJA AUTORA



Rođen sam 18. juna 1988. godine u Bačkoj Palanci. Osnovnu školu „Jan Kolar“ sam završio u Selenči 2003. godine. Po završetku osnovne škole upisao sam srednju medicinsku školu „Dr Ružica Rip“ u Somboru. Nakon srednje škole 2007. godine upisujem studije fizike, smer astronomija sa astrofizikom na Prirodno-Matematičkom fakultetu u Novom Sadu. Od školske 2012/13. godine predajem fiziku u medicinskoj školi „7. April“ u Novom Sadu i u osnovnoj školi „Jan Kolar“ u Selenči.

UNIVERZITET U NOVOM SADU
PRIRODNO-MATEMATIČKI FAKULTET

KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA

Redni broj:

RBR

Identifikacioni broj:

IBR

Tip dokumentacije:

TD

Tip zapisa:

TZ

Vrsta rada:

VR

Autor:

AU

Mentor:

MN

Naslov rada:

NR

Jezik publikacije:

JP

Jezik izvoda:

JI

Zemlja publikovanja:

ZP

Uže geografsko područje:

UGP

Godina:

GO

Izdavač:

IZ

Mesto i adresa:

MA

Fizički opis rada:

FO

Naučna oblast:

NO

Naučna disciplina:

14.1.1.1 ND

Predmetna odrednica/ ključne reči: Mars, SPE, GCR, Mikrogravitacija, Doze zračenja

PO

UDK

Čuva se:

ČU

Važna napomena:

VN

Monografska dokumentacija

Tekstualni štampani materijal

Master rad

Vlasto Petraš

Prof. dr Tijana Prodanović

Uticaj interplanetarnog putovanja na Mars na ljudsko telo

srpski (latinica)

srpski/engleski

Srbija

Vojvodina

2019.

Autorski reprint

Prirodno-matematički fakultet, Trg Dositeja Obradovića 4,
Novi Sad

Broj poglavlja-14, broj strana-47, broj referenci-49, broj
tabela-9, broj slika-11

FIZIKA

Astrofizika

Biblioteka departmana za fiziku, PMF-a u Novom Sadu

Nema

Izvod:

IZ

U radu su predstavljeni uticaji izolovanosti, mikrogravitacije i zračenja na članove posade tokom putovanja na Mars. Akcenat je dat na procenu doza pod dejstvom GCR u različitim fazama aktivnosti Sunca.

Datum prihvatanja teme od NN

veća:

DP

Datum odrbrane:

DO

Članovi komisije:

KO

Predsednik:

Prof. dr Olivera Klisurić

član:

Prof. dr Tijana Prodanović

član:

Prof. dr Miodrag Krmar

UNIVERSITY OF NOVI SAD
FACULTY OF SCIENCE AND MATHEMATICS

KEY WORDS DOCUMENTATION

Accession number:

ANO

Identification number:

INO

Document type: Monograph publication

DT

Type of record: Textual printed material

TR

Content code: Final paper

CC

Author: Vlasto Petraš

AU

Mentor/comentor: Prof. dr Tijana Prodanović

MN

Title: Influence of interplanetary journey to Mars on human body

TI

Language of text: Serbian (Latin)

LT

Language of abstract: English

LA

Country of publication: Serbia

CP

Locality of publication: Vojvodina

LP

Publication year: 2019

PY

Publisher: Author's reprint

PU

Publication place: Faculty of Science and Mathematics, Trg Dositeja Obradovića 4, Novi Sad

PP

14.1.1.1.1 Physical description: Chapters-14, pages-47, references-49, tables-9, figures-11

14.1.1.1.2 PD

Scientific field: Physics

SF

Scientific discipline: Astrophysics

SD

Subject/ Key words: Mars, SPE, GCR, Microgravity, Doses of radiation

SKW

UC

Holding data: Library of Department of Physics, Trg Dositeja Obradovića 4

HD

Note: none

N

Abstract: This paper presents the effects of isolation, microgravity and radiation on crew members during the trip to Mars. The accent

AB

was given on the assessment of doses under the influence of GCR at different stages of the Sun's activity.

Accepted by the Scientific Board:

ASB

Defended on:

DE

Thesis defend board:

DB

President:

Prof. dr Olivera Klisurić

Member:

Prof. dr Tijana Prodanović

Member:

Prof. dr Miodrag Krmar