

# Kako pobijediti Marsovca?

---

Šunjić, Dea

Undergraduate thesis / Završni rad

2023

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Split, Faculty of Science / Sveučilište u Splitu, Prirodoslovno-matematički fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:166:272470>

Rights / Prava: [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-08**

Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Science](#)



UNIVERSITY OF SPLIT



DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

Sveučilište u Splitu  
Prirodoslovno – matematički fakultet

## **Kako pobijediti *Marsovca*?**

Završni rad

Dea Šunjić

Split, Rujan 2023.

## Temeljna dokumentacijska kartica

Sveučilište u Splitu  
Prirodoslovno – matematički fakultet  
Odjel za fiziku  
Ruđera Boškovića 33, 21000 Split, Hrvatska

Završni rad

### Kako pobijediti *Marsovca*?

Dea Šunjić

Sveučilišni prijediplomski studij Matematika i fizika

#### Sažetak:

Ovaj rad se bavi znanstvenim činjenicama i konceptima predstavljenim u romanu "Marsovac" Andyja Weira, istražujući različite aspekte misija na Mars i preživljavanja Marka Watneyja na Crvenom planetu. Watney se suočava s problemima uglavnom fizikalne prirode, a u ovom radu ih analiziramo i tražimo moguća bolja rješenja. U radu su sažete provedene robotske misije i razmotrene moguće ljudske misije na Mars, Watneyjeve snalažljive metode za proizvodnju vode i kisika, kao i alternativna rješenja. Usto, istražili smo važnost navigacije i komunikacije u međuplanetarnim misijama, zaključno s manevrom Richa Purnella i Watneyjevom modifikacijom MAV-a (Mars Ascent Vehicle) u svrhu spašavanja s Marsa. Seciranjem Watneyjevih strategija preživljavanja, dobivamo uvid u praktičnu izvedivost buduće kolonizacije Marsa i dublje razumijevanje složenosti putovanja u svemir.

**Ključne riječi:** Mars, Marsovac, fizikalni problemi, navigacija, komunikacija

**Rad sadrži:** 24 stranica, 8 slika, 1 tablica, 41 literaturnih navoda. Izvornik je na hrvatskom jeziku

**Mentor:** doc. dr. sc. Martina Požar

**Ocjenjivači:** doc. dr. sc. Martina Požar  
izv. prof. dr. sc. Bernarda Lovrinčević  
Josipa Šćurla, mag. phys.

**Rad prihvaćen:** 26. 9. 2023.

Rad je pohranjen u knjižnici Prirodoslovno – matematičkog fakulteta, Sveučilišta u Splitu.

<b>Basic documentation card</b>
---------------------------------

University of Split  
Faculty of Science  
Department of Physics  
Ruđera Boškovića 33, 21000 Split, Croatia

Bachelor thesis

**How to beat *The Martian*?**

Dea Šunjić

University undergraduate study programme Mathematics and Physics

**Abstract:**

This paper deals with the scientific facts and concepts presented in the novel "The Martian" by Andy Weir, exploring various aspects of the missions to Mars and Mark Watney's survival on the Red Planet. Watney faces problems of a mostly physical nature, and in this paper, we analyze them and look for possible better solutions. The paper summarizes completed robotic missions and discusses possible human missions to Mars, Watney's resourceful methods for producing water and oxygen, as well as alternative solutions. In addition, we explored the importance of navigation and communication in interplanetary missions, concluding with Rich Purnell's maneuver and Watney's modification of the MAV (Mars Ascent Vehicle) for rescue from Mars. By dissecting Watney's survival strategies, we gain insight into the practical feasibility of future Mars colonization and a deeper understanding of the complexities of space travel.

**Keywords:** Mars, The Martian, physical problems, navigation, communication

**Thesis consists of:** 24 pages, 8 figures, 1 table, 41 reference. Original language: Croatian

**Supervisor:** Assist. Prof. Dr. Martina Požar

**Reviewers:** Assist. Prof. Dr. Martina Požar  
Asoc. Prof. Dr. Bernarda Lovrinčević  
Josipa Šćurla, mag. phys.

**Thesis accepted:** 26. 9. 2023.

Thesis is deposited in the library of the Faculty of Science, University of Split.

## Sadržaj

<b>1</b>	<b>Uvod .....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Putovanje izvan Zemljinih granica .....</b>	<b>2</b>
2.1	Svemirske robotske misije .....	2
2.2	Svemirske ljudske misije .....	3
2.2.1	Orion vs. Hermes .....	4
<b>3</b>	<b>Mars .....</b>	<b>8</b>
<b>4</b>	<b>Život na Marsu .....</b>	<b>12</b>
4.1	Hrana.....	12
4.2	Oksigenator.....	13
4.3	Regenerator vode .....	14
4.4	Energetski izvori .....	15
4.4.1	Nuklearna energija.....	16
4.4.2	Solarna energija .....	16
4.5	Komunikacija i navigacija .....	17
<b>5</b>	<b>Odlazak s Marsa .....</b>	<b>22</b>
<b>6</b>	<b>Zaključak .....</b>	<b>24</b>
<b>7</b>	<b>Literatura.....</b>	<b>25</b>

## 1 Uvod

U kraljevstvu znanstvene fantastike, književnost ima osobitu darovitost zarobiti našu maštu dok istovremeno istražuje granice znanstvene vjerodostojnosti. Primjer takvog djela je roman „Marsovac“ Andyja Weira koja isprepliće znanstvenu točnost s zanimljivom narativnom postavom na Marsu. Ovaj završni rad se udubljuje u znanstvenu realnost predstavljenu u djelu „Marsovac“, ispitujući preciznost i izvedivost koncepata, tehnologije i izazova s kojima se susreće protagonist Mark Watney.

Dok stojimo na pragu neviđenog napretka istraživanja Marsa, dugujemo zahvalnost antičkim civilizacijama koje su zamijetile Crveni planet. Neki su ga vezali s božanskom simbolikom, a neki su razmišljali o njemu kao nebeskom tijelu i njegovom mjestu u svemiru. To nas je dovelo do suvremenog istraživanja planeta.

Robotske misije su na čelu naših saznanja o Marsu i utiru put našem razumijevanju aktualnih uvjeta na planetu. Paralelno, vizija slanja ljudi na Mars sve više dobiva na snazi, potaknuta postignućima prošlih svemirskih misija. Jedna od takvih ambicioznih inicijativa je program Artemis, koji predvodi NASA, a za cilj ima vratiti ljude na Mjesec i otvoriti put misijama na Mars s ljudskom posadom.

Da bi rad ispunio ciljeve oslonit će se na znanstvene aspekte knjige, te atmosferske i geološke značajke Marsa. Detaljno će se osvrnuti na pitanje sposobnosti čovjeka da opstane na Marsu i osigura si povoljne uvjete za život, kao što su izvor kisika, vode, hrane te mogućnost izgradnje navigacijskih i komunikacijskih sustava. Također će dati uvid u složenost manevara potrebnih za odlazak s Marsa.

Suprotstavljajući fiksijske elemente realnim fizikalnim činjenicama, kroz ovaj završni rad steći će se uvid u moć znanstvene fantastike da inspirira i educira, kao i moć potencijalnog utjecaja na ljudsku percepciju znanosti.

## 2 Putovanje izvan Zemljinih granica

Najranije zabilježena opažanja Marsa dolaze od drevnih civilizacija kao što su egipatska, babilonska, grčka i rimska. Ovi rani promatrači opazili su osebujno gibanje Marsa u odnosu na zvijezde i počeli ga asociirati s mitskim bićima i bogovima [1].

Međutim, Grci su bili ti koji su postavili temelje za sistematičnije razumijevanje planeta. Renomirani astronom i matematičar Ptolomej dokumentirao je svoja opažanja koja se mogu pronaći u djelu „Almagest“, u kojem je prikazao geocentrični model svemira i dao dragocjene podatke o položajima i kretanju nebeskih tijela, uključujući Mars [2].

Tek u 19. stoljeću Mars opet postaje tema koja izaziva veliku zainteresiranost. U ovom razdoblju došlo je do značajnog napretka u teleskopskim promatranjima, što je omogućilo detaljniji pogled na planete [3]. Talijanski astronom Giovanni Schiaparelli je 1877. godine predstavio revolucionarno otkriće linearnih oblika na Marsu, koje je nazvao kanalima (tal. *canali*). Izraz „canali“ krivo je protumačen na engleskom jeziku kao „kanali“, što je sugeriralo postojanje umjetno napravljenih plovni putova koje je izgradila marsovska civilizacija. Schiaparellijevo otkriće je pokrenulo daljnje rasprave i nagađanja o inteligentnom životu na Marsu. Ideja marsovskih kanala je nadalje bila popularizirana od strane astronoma Percivala Lowella koji je konstruirao puno teorija o marsovske civilizaciji. Iako te teorije nisu bile podržavane od strane drugih znanstvenika, pokrenule su val fasciniranosti Marsom, inspirirajući mnoge znanstvenike i pisce [4].

Kako je napredovala tehnologija, tako je napredovalo i ukupno znanje o Marsu. Robotske misije pridonijele su prve detaljne slike planeta i, iako su tako otklonile ideju o složenim kanalskim sustavima, otkrile svijet geoloških ljepota.

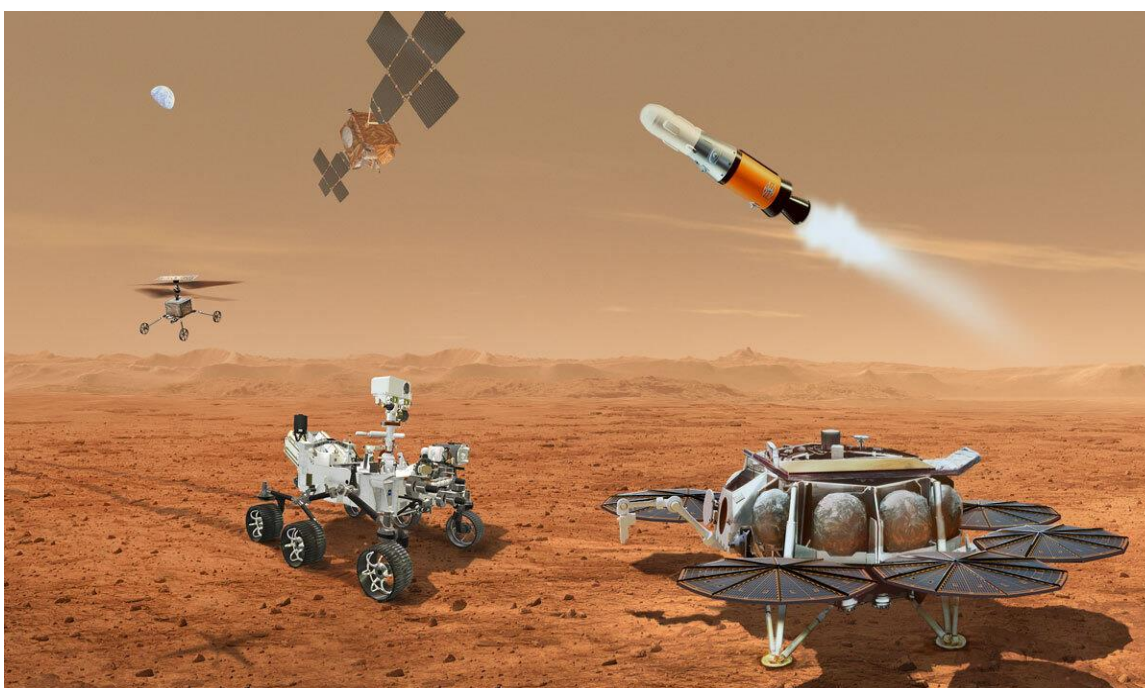
### 2.1 Svemirske robotske misije

Robotski roveri koji putuju na Mars revolucionirali su naše razumijevanje Crvenog planeta i otvorili nove vidike u istraživanju svemira. Znanstvenici su svojom ustrajnošću, uz pomoć ovih izvanrednih strojeva, transformirali našeg planetarnog susjeda iz zagonetne točke na nebu u dinamičan svijet koji nam postaje sve poznatiji.

Slanje rovera u svemir uključuje precizno planiranje i izvedbu. Tijekom godina nekoliko je misija otvorilo put našim robotskim istraživačima za putovanje na Mars. Misije Mariner iz 1960-ih i 1970-ih, koje su se sastojale od Marinera 4, 6, 7 i 9, pružile su nam prve poglede na Crveni planet iz neposredne blizine, donoseći ključne podatke o njegovoj atmosferi i površini [5]. Misije Viking u 1970-ima označile su značajnu prekretnicu s prvim uspješnim slijetanjem na Mars, opremivši nas vrijednim uvidima u njegovu geologiju [6]. U kasnim 1990-ima misija Mars Pathfinder zaokupila je maštu javnosti kada je postavila rover Sojourner, pokazujući potencijal za mobilno istraživanje Marsa [7]. Mars Exploration Rovers, Spirit i Opportunity,

stigli su 2004., krenuvši u misiju koja je daleko nadmašila očekivanja otkrivajući dokaze vodene prošlosti Marsa [8]. Rover Curiosity, koji je sletio 2012., svojim je instrumentima revolucionirao naše razumijevanje nastanjivosti Marsa i geološke povijesti [9]. Gledajući unaprijed, ambiciozna misija Mars Sample Return ima za cilj prikupiti i vratiti uzorke s površine Marsa, nudeći znanstvenicima priliku da proučavaju Crveni planet u laboratorijima na Zemlji. [10]

Ove misije, od kojih se svaka temelji na znanju koje su stekli njihovi prethodnici, potaknule su našu želju da istražimo naš susjedni planet „*in situ*“ (slika 1).



**Slika 1.** Ova ilustracija prikazuje koncept rovera i satelita u timu koji istražuje Mars i uzima uzorke kamenja i tla (slika preuzeta s <https://mars.nasa.gov> [10]).

## 2.2 Svemirske ljudske misije

U ne tako dalekoj budućnosti, snovi čovječanstva o kročenju na Mars ostaju neispunjeni. Crveni planet svojom misterioznom privlačnošću i potencijalom za znanstvena otkrića i dalje mami izdaleka. Međutim, usred te pozadine iščekivanja i neistraženog teritorija, iz mašte Andyja Weira izranja zadivljujuća priča u njegovom romanu „Marsovac“. Na njegovim stranicama upoznajemo se s protagonistom, Markom Watneyjem, koji kreće na nesvakidašnje putovanje koje prkosi ograničenjima vremena i prostora. Dok ostatak svijeta čeka dan kad će čovjek kročiti na Mars, Watney je već postigao naizgled nemoguće – preživio je i napredovao



na pustoj površini Marsa. U trijumfu ljudske genijalnosti i otpornosti, Watney izaziva našu percepciju istraživanja, preživljavanja i avanture.

### 2.2.1 Orion vs. Hermes

Želja čovječanstva za istraživanjem i otkrićima dovela je do izvanrednih postignuća u području svemira. U području znanstvenog istraživanja malo se pothvata može mjeriti s tehničkim čudima Apolla 11, koji je čovječanstvo prvi put odveo na površinu Mjeseca.

NASA-in program Artemis je hrabra inicijativa koja ima za cilj vratiti ljude na Mjesec i uspostaviti održivu prisutnost na našem nebeskom susjedu. Nadovezujući se na naslijeđe povijesnih misija Apollo, Artemis se usmjerava na daljnja istraživanja, znanstvena otkrića i konačni cilj: misija s posadom na Mars [11]. Kao dio ovog velikog pothvata, NASA je planirala niz misija Artemis, pri čemu se Artemis I, II i III ističu kao ključne. Putovanje počinje sa svemirskom letjelicom Orion - NASA-inom novom generacijom letjelice koja će povesti astronaute na put istraživanja Mjeseca i Marsa [12].

Ares je naziv izmišljenog programa istraživanja svemira koji provodi NASA. Program Ares sastoji se od četiri misije i osmišljen je kako bi olakšao ljudske misije na Mars s krajnjim ciljem uspostavljanja stalne ljudske prisutnosti na Crvenom planetu. Program uključuje slanje astronauta i zaliha na Mars, omogućavajući im provođenje znanstvenih istraživanja i pripreme planeta za buduću kolonizaciju. Svaka misija koristi svemirsku letjelicu imena Hermes koja je predviđena za daleka svemirska putovanja. Knjiga prati misiju Ares 3, koja je treća misija s ljudskom posadom na Marsu. Posada Aresa 3 sastoji se od šest astronauta, uključujući protagonista Marka Watneya, botaničara i strojarskog inženjera. Primarni cilj posade je izvođenje znanstvenih eksperimenata i prikupljanje podataka o površini i atmosferi Marsa tijekom njihovog boravka na planetu [13]. Ova misija igra ključnu ulogu u zapletu knjige i služi kao pozadina borbe glavnog lika za opstanak na Marsu.

Dok Orion predstavlja monumentalnu prekretnicu u ljudskoj povijesti, svemirska letjelica Hermes iz romana „Marsovac“ utjelovljuje viziju međuplanetarnog putovanja. Uspoređujući ove dvije svemirske letjelice, možemo steći uvid u tehnološki napredak, ciljeve misije i različite izazove s kojima se susrećemo tijekom ovih izvanrednih pothvata.

U ovom poglavlju opisane su glavne komponente svemirske letjelice Orion i letjelice Hermes, otkrivajući zamršenost ovih pothvata. Usporedba naglašava duboki utjecaj ovih misija na oblikovanje naše percepcije svemira i našeg mjesta u njemu.

Orion se sastoji od tri glavna modula (slika 2). Sustav za prekid lansiranja (eng. *Launch Abort System*) postavljen je na vrhu modula za posadu (eng. *Crew Module*), može se aktivirati unutar milisekundi da pokrene letjelicu i modul za posadu na sigurno mjesto i osigura sigurno slijetanje posade. Modul za posadu je sposoban za prijevoz četiri člana oko Mjeseca, pružajući

sigurno prebivalište od samog lansiranja do slijetanja. Unutar tog modula, koji je namijenjen za duboki svemir, nalaze se oprema za održavanje osnovnih funkcija čovjeka, energetske sustavi za podršku modula i napredni uređaji [12]. Modul za posadu će osigurati astronautima hranu, vodu, kisik i ujedno ih štiti ih od opasnosti kao što je svemirsko zračenje [14]. Servisni modul (eng. *Service Module*) kreiran u kolaboraciji s ESA-om (European Space Agency), daje podršku od lansiranja, kroz odvajanje do ulaska u Mjesečevu orbitu. Opremljen je pogonom za prijelaz u orbitu, održava termalnu kontrolu, kontrolu visine i sprječava uzdizanja na prevelike visine. Dok je još spojen s modulom za posadu, pruža vodu i zrak za posadu [12].

Dok roman pruža ograničene izravne informacije o izgledu svemirske letjelice Hermes, Weir isprepliće kontekstualne detalje koji čitateljima omogućuju povlačenje paralela s modernom tehnologijom i stvaranje utemeljenih pretpostavki o njezinom dizajnu. Od kontrolne sobe do osobnih prostorija, VIP sobe i bolničke ambulante, unutrašnjost Hermesa nudi primamljive poglede u budućnost svemirskih putovanja.

U romanu, kontrolna soba u Hermesu služi kao nervni centar za operacije svemirske letjelice [13]. Iako pojedinih o rasporedu i opremi kontrolne sobe nisu eksplicitno navedene, kontekst ukazuje na vrlo naprednu tehnologiju. Može se pretpostaviti da se u kontrolnoj sobi nalaze napredni računalni sustavi i sofisticirana navigacijska oprema jer se posada oslanjala na te sustave za praćenje putanje letjelice, komunikaciju sa Zemljom i vršenje korekcija kursa tijekom putovanja. Kako je Hermes dugotrajna svemirska letjelica koja prevozi astronaute, svakom članu posade je dodijeljen privatni životni prostor kako bi se osigurala udobnost i privatnost tokom dugog putovanja [13]. Te bi osobne prostorije vjerojatno bile kompaktne, ali funkcionalne, dizajnirane da optimiziraju ograničeni prostor dostupan na letjelici. Mogu uključivati spavaonicu, spremnike za osobne stvari, osobne komunikacijske terminale, omogućujući članovima posade da ostanu povezani jedni s drugima i Zemljom. U letjelici postoji i prostor koji može poslužiti kao bolnička ambulanta, opremljena medicinskim zalihama i medicinskom opremom [13].

U ovom romanu, letjelicu Hermes pokreće nuklearni reaktor. Nuklearni reaktori dobro su poznati izvori koncentrirane energije i imaju razne primjene, uključujući proizvodnju električne energije i pogon podmornica. Uključivanjem nuklearnog reaktora kao primarnog izvora energije za Hermes, Weir temelji pogonski sustav na znanstvenim principima stvarnog svijeta, čineći ga naprednijim od konvencionalnih kemijskih raketa koje se koriste za svemirska putovanja.

Jedna od jedinstvenih značajki Hermesa je implementacija rotirajućeg dijela, koji stvara centripetalnu silu, simulirajući gravitaciju za posadu tijekom putovanja [13]. Ova umjetna gravitacija omogućuje astronautima da rade i žive u poznatom okruženju, smanjujući učinke dugotrajnog bestežinskog stanja na njihova tijela.

Stvaranje umjetne gravitacije u svemirskoj letjelici predstavlja velike tehničke izazove. Prvo što bi nam trebalo pasti na pamet je da na jačinu centripetalne sile utječu brzina rotacije  $\omega$ , udaljenost objekta od osi rotacije  $r$  i masa. Objekti smješteni dalje od središta osjećali bi veću silu, dok oni objekti koji su smješteni bliže središtu manju silu.

Npr. za astronauta visine  $h$ , koji leži u rotirajućoj strukturi duž radijusa  $r$  sa stopalima postavljenim na rubu i glavom usmjerenom prema središtu rotacije, njegova glava ima radijus rotacije jednak  $r - h$ . Omjer ubrzanja glave i stopala može se jednostavno izraziti kao:

$$\frac{A_g}{A_s} = \frac{\omega^2(r-h)}{\omega^2 r} = \frac{r-h}{r} \quad (1)$$

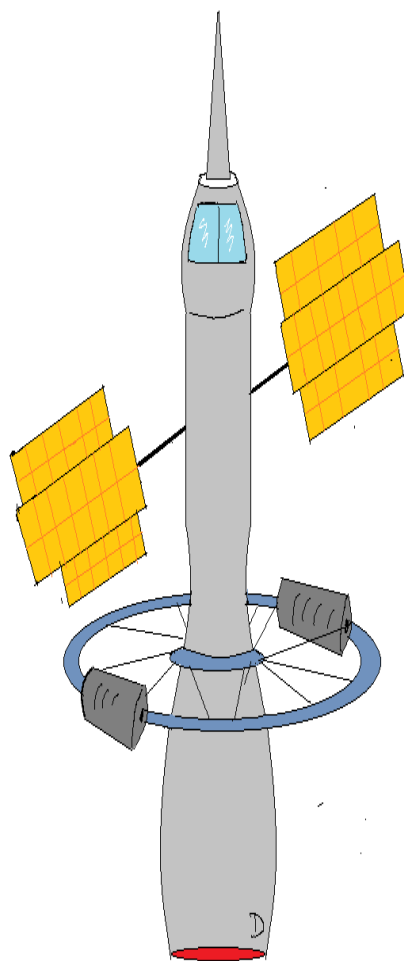
Pri čemu je  $A = \omega^2 r$  centripetalna akceleracija [15].

Na sustav unutar rotirajuće strukture djeluje i Coriolisov efekt. Npr. ako se nalazimo u rotirajućoj strukturi i bacimo loptu uvis, zbog Coriolisovog efekta, primijetit ćemo da je putanja lopte zakrivljena. Dakle, ta pojava bi mogla dovesti do potencijalno pogrešnih predodžbi u navigaciji objekata kroz rotirajuću strukturu. Sama tura letjelice morala bi biti projektirana da podnese naprezanja rotacije i dovoljno velikog radijusa da smanjimo negativne utjecaje sila i efekata na astronaute. Dodavanje rotirajuće strukture svemirskoj letjelici povećalo bi njezinu složenost, masu i cijenu. Lansiranje težih tereta u svemir skupo je i zahtijeva snažne rakete. Iako je koncept centripetalne gravitacije u svemiru fascinantn, on zasad ostaje samo fiktivni element.

Slika 3 prikazuje osobnu interpretaciju svemirske letjelice Hermes.



**Slika 2.** Slika prikazuje svemirsku letjelicu Orion i njena tri glavna dijela; pod brojem jedan: sustav za prekid lansiranja, pod brojem dva: modul za posadu, pod brojem tri: servisni modul (slika preuzeta s <https://www.nasa.gov> [12]).



**Slika 3.** Crtež prikazuje svemirsku letjelicu Hermes iz osobnog viđenja. Rotirajuća struktura je njegov modul za centrifugu, a narančaste ploče solarni paneli.

### 3 Mars

Mars, četvrti planet od Sunca koji se često naziva Crveni planet, stoljećima je plijenio maštu znanstvenika i svemirskih entuzijasta. Mars se uvelike razlikuje od planeta Zemlje, uključujući njegove mjesece, atmosferu, klimu, temperaturu, geologiju, trajanje dana i godine. Istaknute su jedinstvene karakteristike koje Mars čine predmetom trajnog znanstvenog interesa.

S radijusom od 3390 kilometara, Mars je otprilike upola manji od Zemlje. S prosječnom udaljenosti od 228 milijuna kilometara, Mars je 1.5 astronomske jedinice udaljen od Sunca. S ove udaljenosti, sunčevoj svjetlosti treba 13 minuta da doputuje do Marsa [16].

Mars ima gustu jezgru u svom središtu radijusa od 1500 do 2100 kilometara. Sastoji se od željeza, nikla i sumpora. Jezgru okružuje plašt debljine između 1240 i 1880 kilometara, a iznad toga je kora sastavljena od željeza, magnezija, aluminijska, kalcija i kalija. Kora je duboka između 10 i 50 kilometara [16].

Mars ima dva mala mjesece, Phobos i Deimos (slika 4). Ti su mjeseci nepravilnog oblika i smatra se da su zarobljeni asteroidi. Phobos, veći od njih dvojice, kruži vrlo blizu Marsa i obiđe ga tri puta dnevno, dok Deimos ima udaljeniju orbitu [17].

Atmosfera na Marsu prvenstveno se sastoji od ugljičnog dioksida (96%), s tragovima dušika, argona i drugih plinova.[18]. Atmosfera je tanka i ne nudi mnogo zaštite od meteora, asteroida i kometa i razlog je zašto toplina lako odlazi s planeta. Temperatura na Marsu uvelike varira, može narasti do 20°C ili spustiti se do -153°C. Kad bi u podne stajali na ekvatoru Marsa, osjećali bi se kao da je pod nogama proljeće (24°C), a nad glavom zima (0°C) [16].

Na površini Marsa vidimo razne boje kao što su crvena, smeđa i zlatna. Marsovo tlo, poznato kao regolit, sadrži razne minerale i stijene te je bogato željeznim oksidom, što planetu daje crvenkastu boju (slika 5) [16]. Stijene su uglavnom magmatski bazalt, sedimentni pješčenjak, muljnjak, impaktit i evaporit, a minerali sulfati (gips), silicij i fosfati [18]. Mars je imao vodenu prošlost s mrežama riječnih dolina, delta i jezerskih korita. Pronađeni su minerali i stijene koji su mogli nastati samo u tekućoj vodi. Na Marsu danas ima vode, ali je atmosfera prerijetka da bi postojala kao tekuća na površini. Voda se na Marsu nalazi u obliku vodenog leda neposredno ispod površine u polarnim područjima, kao i slana voda koja sezonski teče niz obronke i zidove kratera [16]. Prisutnost vodenog leda ukazuje na potencijal za ljudska istraživanja i uzimanje vrijednih resursa. Planet ima različite geološke značajke kao što su drevni vulkani, masivni kanjoni i udarni krateri. Najveći vulkan na Marsu, Olympus Mons, uzdiže se preko 21 kilometar, što ga čini najvišim vulkanom u Sunčevom sustavu, a sustav kanjona Valles Marineris proteže se preko 4000 kilometara, što ga čini najdubljim poznatim kanjonom u Sunčevom sustavu [16].

U usporedbi sa Zemljom, godina na Marsu traje otprilike 687 zemaljskih dana, dok dan na Marsu, poznat kao sol, otprilike traje 24 sata i 37 minuta [18]. Os rotacije Marsa nagnuta je za 25 stupnjeva u odnosu na ravninu njegove orbite oko Sunca, dok Zemlja ima nagib od 23.4 stupnja. Mars, poput Zemlje, ima različita godišnja doba, ali oni traju duže od onih na Zemlji jer Marsu treba više vremena da obiđe Sunce [16].

Mars nema snažno magnetsko polje kao što ima Zemlja. Umjesto toga, ima nejednako magnetsko polje koje potječe iz lokalno magnetiziranih područja kore planeta. Osim toga, na strani planeta gdje je dan, prisutno je inducirano magnetsko polje koje potječe od solarnog vjetra<sup>1</sup> koji se komprimira na Marsu i obavija planet. Zbog nedostatka svog magnetskog polja, solarni vjetar izravno djeluje na ioniziranu atmosferu Marsa [20].

Sunčeva energija koja bombardira planet jedan je od razloga poznatih pješćanih oluja na Marsu. One nastaju zbog disbalansa između energije koju Mars apsorbira i emitira s površine [20]. Jednom svake tri godine na Marsu (oko 5.5 zemaljskih godina) normalne oluje prerastu u pješćane oluje koje nekad okruže cijeli planet. U knjizi „Marsovac“ Mark Watney ostane sam na Marsu uoči oluje koja iščupa antenu iz opreme. Međutim, malo je vjerojatno da bi te oluje mogle naškoditi astronautu koji se našao na Marsu. Čak ni vjetar u najvećim olujama ne bi mogao rastrgati neku veću mehaničku opremu. Vjetrovi u najjačim olujama na Marsu dosežu brzinu od oko 97 km/h, što je i upola manje od nekih uraganskih vjetrova na Zemlji. No, pješćane oluje nisu sasvim bezopasne. Pojedine čestice prašine su blago naelektrizirane, pa se lijepe za površine s kojima dolaze u dodir. Ova prašina je veliki problem za solarne ploče rovera (slika 6). Prašina prekrije opremu i smanji količinu sunčeve svjetlosti koja dopire do solarnih ploča. U romanu „Marsovac“ protagonist Watney potroši jedan dio svakog dana na čišćenje solarnih panela da bi osigurao maksimalnu korisnost. Globalne oluje također mogu predstavljati drugi oblik problema, uzdižu prašinu u atmosferu praveći štit koji smanjuje količinu sunčeve svjetlosti koja dopire do površine Marsa [22].

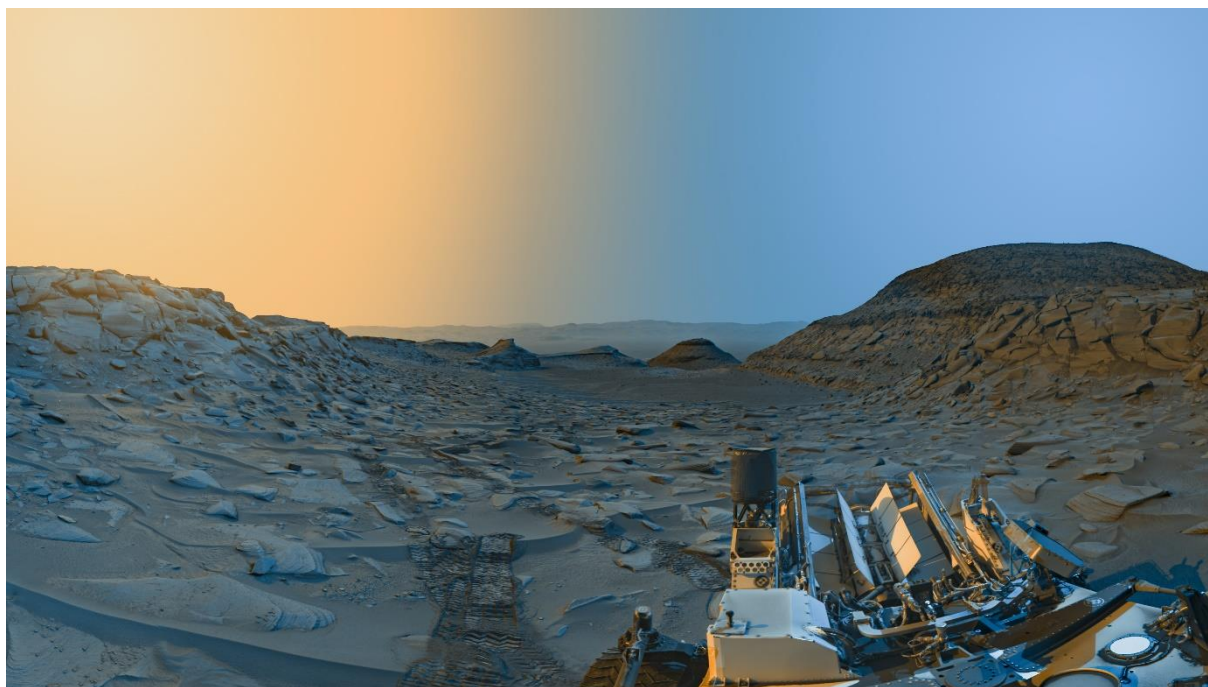
Radi lakše usporedbe neke činjenice o Marsu navedene su u tablici 1.

---

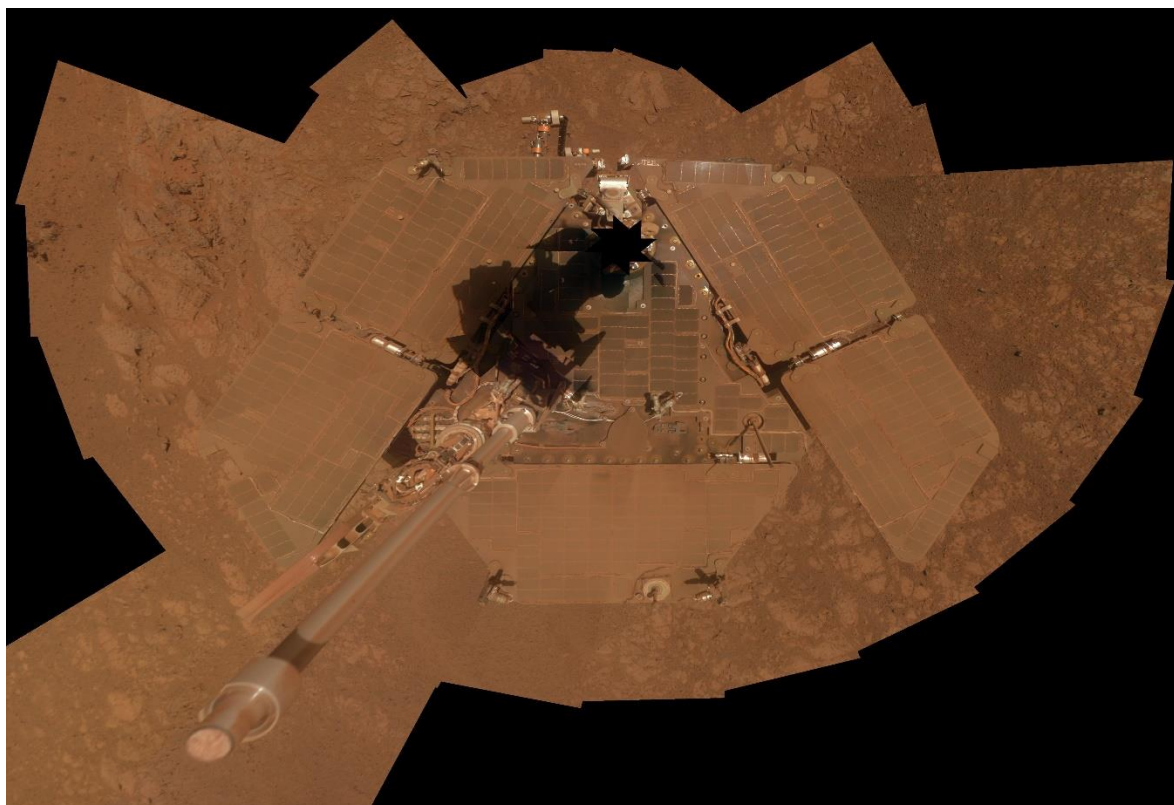
<sup>1</sup> Solarni vjetar je kontinuirani tok protona i elektrona iz Sunčeve najudaljenije atmosfere – korone [22].



*Slika 4. Ovaj poster prikazuje usporedbu radijusa i fizičkog izgleda dva mjeseca Marsa, Phobosa i Deimosa (slika preuzeta s <https://solarsystem.nasa.gov> [17]).*



*Slika 5. Slika prikazuje geološke značajke Marsa kao što su stijene, brežuljci i izgled tla. Desno na slici može se primijetiti crvena boja tla koju daje željezni oksid (slika preuzeta s <https://mars.nasa.gov> [19]).*



**Slika 6.** Pješčana oluja na Marsu uzrokovala je naslagu prašine i pijeska na solarnim pločama rovera Spirit i tako smanjila dotok sunčeva svjetla na ploče (slika preuzeta s <https://www.nasa.gov> [22]).

**Tablica 1.** Usporedba činjenica o udaljenosti od Sunca, brzini u orbiti, gravitaciji, dijametru, duljini dana i godine, masi Zemlje i Marsa. (Svi podaci osim gravitacije preuzeti sa <https://mars.nasa.gov> [23], podaci o gravitaciji preuzeti sa: <https://nssdc.gsfc.nasa.gov> [24])

	Zemlja	Mars
Udaljenost od Sunca (AU)	1	1.5
Brzina planeta u orbiti (km/h)	107218	86676
Gravitacija (m/s <sup>2</sup> )	9.82	3.73
Promjer (km)	12756	6792
Duljina dana (h)	23:56	24:37
Duljina godine (Zemljin dan)	365	687
Prosječna temperatura (°C)	15	-63
Masa (kg)	$5.9722 \cdot 10^{24}$	$6.4169 \cdot 10^{23}$



## 4 Život na Marsu

U romanu „Marsovac“ Andyja Weira, protagonist Mark Watney nađe se ostavljenim na Marsu, suočen sa negostoljubivim planetom s ograničenim resursima i bez trenutnog načina da se spasi. Unatoč fiktivnoj prirodi romana, Watneyeva priča o preživljavanju potiče nas da razmislimo o vjerodostojnosti takvog scenarija i znanstvenim činjenicama koje bi omogućile stvarnom astronautu da preživi uvjete na Marsu.

Sa stalnim napretkom u istraživanju svemira i interesom za međuplanetarna putovanja, razumijevanje usporedbe između fikcije i stvarnosti postaje relevantno. U ovom poglavlju osvrnuti ćemo se na ključne elemente Watneyeva preživljavanja i povući paralelu sa stvarnim mogućnostima i izazovima povezanih s održavanjem ljudskog života na Marsu.

### 4.1 Hrana

Mark se na početku svog putovanja oslanjao na oskudne zalihe koje je ostavila posada Aresa 3. Zalihe su uključivale pakiranu hranu namijenjenu samo za djelić njegovog boravka. Spoznaja da ga raspoložive zalihe neće moći održati na životu do sljedeće planirane misije na Mars natjerala ga je da potraži dugoročno rješenje za hranu.

Odlučio je uzgojiti krumpire. Mark prvo mijenja namjenu Marsovog staništa, koristeći njegov sustav za održavanje života za regulaciju temperature i osiguravanje kontroliranog okruženja za rast biljaka. Marsovo tlo predstavlja ogromnu prepreku zbog nedostatka hranjivih tvari pa improvizira miješajući ga s vlastitim otpadom.

S ograničenom zalihom krumpira kao početnim izvorom sjemena, Mark ih reže na komade koji sadrže pupoljke za sadnju. Pažljivo brine o svom usjevu krumpira, nadzirući temperaturu, vlažnost i razinu vode kako bi stvorio optimalne uvjete za rast. Opskrba hranjivim tvarima postaje još jedan izazov, što navodi Marka da upotrijebi kombinaciju vitamina, hranjivih tvari iz zaliha posade, pa čak i vlastitog prerađenog urina za gnojidbu biljaka. Farma krumpira postaje važan izvor hrane tijekom njegova produženog boravka na Marsu [13].

Uspješan uzgoj hrane na ISS-u (International Space Station) [25] pokazuje da je doista moguće uzgajati usjeve u svemiru, čak i u nedostatku tradicionalnog tla i prirodne sunčeve svjetlosti. Ovaj napredak u svemirskoj poljoprivredi utire put za buduće misije na Mars i dalje, gdje će sposobnost uzgoja hrane biti ključna za opstanak i održivost ljudskih kolonija u okruženjima svemira.

## 4.2 Oksigenator

Za razliku od Zemlje, gdje atmosfera održava život, Mars ne nudi tu mogućnost. Umjesto toga, njegova atmosfera je tanka i hladna, sastavljena uglavnom od ugljičnog dioksida [18]. U romanu, Mark Watney za disanje koristi opremu koja se naziva oksigenator (eng. *Oxygenator*). Oksigenator je vitalna komponenta Hab-a, modula koji pruža sigurno okruženje za astronaute misije Ares 3 tijekom istraživanja Marsa. Primarna funkcija oksigenatora je stvaranje zraka pogodnog za disanje uzimanjem ugljičnog dioksida iz atmosfere Marsa i razdvajanjem na komponente. Iako proces nije detaljno opisan u romanu, očigledno je od koje je važnosti [13].

Na sam spomen atmosfere na Marsu, proces razdvajanja ugljičnog dioksida radi kisika je trivijalna ideja. Pitamo se je li izvediva.

MOXIE je kratica za „Mars Oxygen In-Situ Resource Utilization Experiment“. Riječ je o uređaju kojem je primarni cilj proizvesti kisik iz atmosfere Marsa. Eksperiment ima za cilj pokazati izvedivost „iskorištavanja resursa na licu mjesta“ (eng. *in-situ resource utilization - ISRU*), što znači korištenje lokalnih resursa za podršku ljudskim misijama na planet.

MOXIE koristi proces koji se zove elektroliza čvrstog oksida da bi odvojio atome kisika od molekula ugljičnog dioksida. Uređaj sadrži elektrolit koji omogućuje kretanje iona kisika kroz njega dok održava visoku temperaturu kako bi se olakšala kemijska reakcija, zatim se ioni kisika spajaju u molekularni kisik. Kao nusprodukt procesa elektrolize, također se proizvodi ugljični monoksid. Ugljični monoksid se zatim filtrira da bi zadovoljio zahtjeve planetarne zaštite i ispušta iz uređaja. Uređaj je namijenjen da napravi najmanje 6 grama kisika po satu. Energiju za proizvodnju kisika dobiva od rovera Perseverance, koji mu priušti otprilike 100 vati. Da bi uređaj proizvodio više, potrebno mu je priuštiti pristup većim količinama energije [26].

Prijevoz kisika sa Zemlje na Mars je vjerojatno tehnički izvediva ideja, ali sigurno predstavlja velike izazove u smislu troškova i činjenice da bi onda bilo potrebno imati misije koje bi služile za ponovnu opskrbu. Međutim, postoji praktičnije i poznatije rješenje koje može pomoći u stvaranju kisika na Marsu: elektroliza vode.

Tijekom zime na Marsu, on postaje dovoljno hladan da se ugljični dioksid iz atmosfere kondenzira na polovima kao snijeg ili mraz. Odmah na vrhu je sezonska ledena kapa napravljena od leda ugljičnog dioksida. Formira se svake jeseni i zime i nestaje u proljeće, kad se temperature povise. Ispod tog ledenog sloja leži ledena kapa od vodenog leda koja se veličinom nije mijenjala stotinama godina [27].

Da bi dobili vodu, prvo moramo doći do leda. Uzimanje leda s polova zahtijevalo bi dobro osmišljenu i tehnološki naprednu misiju. Najsigurnije je osmisliti robotsku misiju bez ljudske posade kojoj bi cilj bio poslati na Mars rovere opremljene instrumentima za bušenje i analizu sastava leda. Ovi instrumenti mogu uključivati spektrometre i kromatografe za određivanje

prisutnosti vode i drugih spojeva. Bušilice bi trebale biti dizajnirane da se nose s izazovima niske temperature i prašine. Roveri bi također trebali imati pouzdanu pokretljivost zbog terena na kojem se nalaze. Uzorke leda koje roveri prikupe trebalo bi smjestiti u prikladne spremnike, otopiti i zatim filtrirati kako bi se otklonile nečistoće. Ono što slijedi je elektroliza vode te skladištenje dobivenog kisika. Zbog kašnjenja komunikacije između Zemlje i Marsa, misija bi trebala biti dizajnirana za autonoman rad, tj. obavljanje zadataka bez stalnih naredbi sa Zemlje.

Kada bi ovaj proces završio nakon filtriranja, dobili bi pitku vodu. Možemo se zapitati postoji li jednostavniji način na koji možemo dobiti pitku vodu.

### 4.3 Regenerator vode

Mark Watney se uvelike oslanja na uređaj zvan regenerator vode (eng. *water reclaimer*) kako bi si osigurao pitku vodu i opstanak tijekom boravka na Marsu. Regenerator vode je uređaj dizajniran za recikliranje i filtriranje vode iz različitih izvora unutar Hab-a. Regenerator vode učinkovito izvlači vlagu iz atmosfere unutar Hab-a, te reciklira urin astronauta kao bi proizveo pitku vodu. Markovo razumijevanje mehanizama sustava omogućuje mu da optimizira njegovu izvedbu [13].

Sličan sustav već postoji i naziva se Environmental Control and Life Support System (ECLSS).

ECLSS je kombinacija hardvera koja uključuje Water Recovery System (WRS), tj. sustav za recikliranje vode. Ovaj sustav prikuplja skoro svu otpadnu vodu i šalje je u Water Processor Assembly (WPA), odnosno sustav koji proizvodi pitku vodu. Jedna posebna komponenta koristi odvlaživače koji skupljaju vlagu koja je oslobođena u zrak iz znoja i daha posade. Drugi podsustav, Urine Processor Assembly (UPA), regenerira vodu iz urina posade pomoću vakuumske destilacije. Nakon destilacije preostaje otopina urina i otpadna voda koju preuzima Brine Processor Assembly (BPA) i provodi kroz membransku tehnologiju kako bi se mogla koristiti.

Dakle, sva prikupljena voda se pročišćava pomoću WPA procesa. Senzori provjeravaju kvalitetu vode i u nju dodavaju jod kako bi se spriječio rast mikroba, a neprihvatljiva voda se ponovno obrađuje. Svakom članu posade je dnevno potrebno oko četiri litre vode za osobnu higijenu i pripremu hrane [28].

U izazovnom okruženju Marsa s oskudnim resursima, Mark Watney upotrijebio je kemijski proces kako bi dobio vitalni resurs: vodu. Watneyjev pristup uključivao je redukciju hidrazina ( $N_2H_4$ ), ključne komponente goriva MDV-a (Mars Descent Vehicle<sup>2</sup>), kako bi se stvorio vodu ( $H_2O$ ). Kako bi postigao ovaj pothvat, Watney je pokrenuo kontrolirano izgaranje hidrazina,

---

<sup>2</sup> Svemirska letjelica korištena da se posada spusti sa Hermesa na površinu Marsa [13].

puštajući da polako kapa na posudu napravljenu od iridija, pokrećući kemijsku reakciju koja je dala plin vodik ( $H_2$ ) i dušik ( $N_2$ ). Značaj ove reakcije leži u oslobođenom plinu vodika. Tako dobiven vodik je ispušten u Hab gdje se miješao s dostupnim kisikom. Od komada religijske ikone napravio je drvene listiće na koje je pustio čisti kisik i uz pomoć baterije i žice napravio iskru. Ova kombinacija je dovela do reakcije izgaranja, pri čemu su vodik i kisik spojeni da bi proizveli vodenu paru ( $H_2O$ ). Watney je pustio da se para kondenzira u tekuću vodu na stijenkama Hab-a, osiguravajući njegovu dostupnost za svoje potrebe preživljavanja. Ta mu je kondenzirana voda služila kao voda za piće, sredstvo za rehidraciju hrane, a što je najvažnije, kao navodnjavanje usjeva krumpira koji su mu spašavali život [13].

Ovaj proces je jedan od najupečatljivijih pothvata opisanih u romanu. Iako ovaj proces služi kao središnja točka zapleta, nameće se pitanje znanstvene vjerodostojnosti.

Opisana kemijska reakcija doista je utemeljena na kemijskim principima. I hidrazin i voda sadrže vodik i dušik, a izgaranjem hidrazina može se dobiti željena vodena para [29]. Međutim, bitno je prepoznati da ovaj prikaz pojednostavljuje složene kemijske reakcije i pretpostavlja idealne uvjete. Koncept korištenja hidrazina kao potencijalnog resursa za proizvodnju vode u svemirskim misijama bi zahtijevao značajan napredak u tehnologiji i sigurnosnim protokolima kako bi bio koristan. Evo nekih razmatranja i potencijalnih nadogradnji kako bi se povećala izvedivost takvog sustava:

Sigurnost je najvažnija u svakoj svemirskoj misiji. Rukovanje hidrazinom je samo po sebi opasno zbog njegove toksičnosti i reaktivnosti [30]. Napredne sigurnosne mjere, uključujući automatizirane sustave, upravljanje na daljinu i sigurnost od grešaka, bile bi potrebne kako bi se rizici sveli na minimum. Smanjenje ljudske uključenosti u proces može povećati sigurnost. Napredna robotika i automatizacija mogu se koristiti za rukovanje, izgaranje i skupljanje vodene pare, smanjujući izloženost astronauta potencijalno opasnim situacijama. Bilo bi dobro kad bi sustav proizvodnje bio zatvoren kako bi se smanjio otpad i maksimalno iskoristili resursi. To uključuje recikliranje otpadnih proizvoda, kao što je dušik, za korištenje u drugim procesima potrebnih u misiji. Filtriranje i pročišćavanje dobivenog produkta bi osiguralo da proizvedena voda ne sadrži nečistoće. Za podršku ovom procesu na svemirskim misijama bili bi potrebni učinkoviti sustavi za upravljanje energijom, kao što je npr. solarna energija i njeno skladištenje.

To nas dovodi do pitanja koje sve oblike energije je moguće iskoristiti u uvjetima kao što je Mars.

#### 4.4 Energetski izvori

Energetski izvori su različita sredstva pomoću kojih stvaramo energiju potrebnu za obavljanje poslova, opskrbu električnom energijom, toplinom i obavljanje raznih drugih

funkcija u svakodnevnom životu. Ti se izvori mogu kategorizirati u dvije glavne vrste: obnovljivi i neobnovljivi izvori energije. Izdvojit ćemo iz svake vrste po jedan značajan za svemirska putovanja.

#### **4.4.1 Nuklearna energija**

Iako nuklearna energija nudi značajne prednosti u svemiru, postoje izazovi i problemi, kao što su sigurnost, utjecaj na okoliš i potencijal za svemirski otpad u slučaju nesreće. Kao rezultat toga, svemirske agencije i organizacije poduzimaju mjere opreza i pridržavaju se strogih propisa pri korištenju nuklearne energije u svemirskim misijama kako bi osigurale sigurnost i uspjeh misije.

Radioizotopski termoelektrični generator (RTG) ili tzv. "svemirska baterija" je generator koji pretvara toplinu od prirodnog radioaktivnog raspada plutonija-238 u pouzdanu električnu energiju. NASA-in rover Curiosity Mars danas koristi upravo takav sustav napajanja na Marsu. Jet Propulsion Laboratory (JPL) je desetljećima predvodio napredak materijala koji se koriste za izradu bitnih komponenti RTG-a koji pretvaraju toplinu u električnu energiju [31].

U romanu, Mark Watney koristi RTG, izvorno dizajniran za napajanje rovera, kao ključni izvor energije uz njegove solarne ploče. Pomoću RTG-a održava bitne sustave tijekom marsovskih noći, kada sunčeva svjetlost nije dostupna, osiguravajući neprekidan rad sustava za održavanje života i grijanje [13]. Watneyjeva snalažljivost i sposobnost, prilagođavajući postojeću tehnologiju svojim potrebama, naglašavaju domišljatost.

#### **4.4.2 Solarna energija**

U eri obilježenoj zabrinutošću oko klimatskih promjena i održivosti okoliša, prijelaz na obnovljive izvore energije nudi put koji je i praktičan i odgovoran. Korištenje obnovljivih izvora energije u svemiru predstavlja nekoliko značajnih prednosti i često se smatra poželjnim pristupom za razne svemirske misije i operacije. Jedna od najperspektivnijih tehnologija su solarni paneli. Njihov značaj proizlazi iz njihove sposobnosti da iskoriste obilnu i obnovljivu energiju sunca za proizvodnju električne energije.

Solarni paneli rade na principu fotonaponskog efekta. Pretvaraju sunčevu svjetlost u električnu energiju pomoću poluvodiča. Evo pojednostavljenog objašnjenja o tome kako solarni paneli rade.

Solarni paneli sastoje se od brojnih solarnih ćelija, obično izrađenih od silicija ili drugih poluvodičkih materijala. Ove ćelije su temeljne komponente koje pretvaraju sunčevu svjetlost u električnu energiju. Kada fotoni sunčeve svjetlosti udare u površinu solarne ćelije, svoju energiju prenose na elektrone u poluvodičkom materijalu. Ovaj prijenos energije omogućuje elektronima da se oslobode svojih normalnih položaja unutar atomske strukture poluvodiča.

Elektroni stvaraju električnu struju kada se kreću kao odgovor na primijenjeno električno polje unutar solarne ćelije [32].

Lokacija solarnih panela na Marsu je ključna za njihovu učinkovitost, tj. maksimiziranje proizvodnje energije. Čimbenici poput geografskog položaja i klime utječu na orijentaciju i kutove nagiba solarne ploče. Geografska širina mjesta slijetanja na Mars značajno utječe na učinkovitost solarnih panela. Solarni paneli primaju više sunčeve svjetlosti u blizini ekvatora i manje sunčeve svjetlosti na višim geografskim širinama. Stoga su mjesta slijetanja bliže ekvatoru općenito poželjnija za proizvodnju solarne energije [23].

U romanu, Mark Watney se oslanja na 200 solarnih panela koje primaju otprilike 500 do 700 vata po kvadratnom metru. Dobivenu električnu energiju koristi za napajanje raznih bitnih sustava i opreme u staništu Marsa, uključujući sustave za održavanje života, komunikacijske uređaje, rasvjetu, grijanje i druge strojeve. Ta je struja ključna za njegov opstanak i održavanje funkcionalnosti staništa [13].

Moramo uzeti u obzir da je učinkovitost solarnih panela na Marsu manja nego na Zemlji zato što je Mars udaljeniji od Sunca, što rezultira znatno manjom solarnom konstantom. Solarna konstanta na Zemlji je otprilike 1367 vata po kvadratnom metru, dok je na Marsu samo oko 589 vata po kvadratnom metru [33]. Ovo smanjeno sunčevo zračenje znači da solarni paneli na Marsu primaju manje sunčeve energije po jedinici površine, što dovodi do nižeg kapaciteta proizvodnje električne energije u usporedbi sa sličnim panelima na Zemlji. Dodatno, atmosferski uvjeti Marsa, uključujući pješčane oluje, dodatno umanjuju učinkovitost solarnih panela blokiranjem sunčeve svjetlosti, čineći prikupljanje energije težim.

Ukratko, položaj solarnih panela na Marsu ključno je kako bi se osigurala učinkovita i pouzdana proizvodnja električne energije za marsovske misije. NASA i druge svemirske agencije analiziraju potencijalna mjesta slijetanja i dizajniraju solarne panele kako bi izdržali izazove Marsovog okoliša.

## **4.5 Komunikacija i navigacija**

Tijekom pješčane oluje, koja je prisilila posadu Aresa 3 na evakuaciju s površine Marsa, oštetila se komunikacijska antena. Ovo oštećenje dodatno je ugrozilo već ograničene komunikacijske mogućnosti Hab-a. Mark Watney je donio odluku da pronađe Pathfinder i

pokuša vratiti njegove komunikacijske sposobnosti [13]. Ova je odluka bila prekretnica u njegovim nastojanjima da preživi na Marsu i potraži spas od NASA-e.

Mark je upotrijebio svoje znanje iz astronomije, matematike i fizike kako bi izračunao optimalnu rutu za dolazak do Pathfinderera. Uzeo je u obzir čimbenike poput terena Marsa, brzine svog rovera, potrošnju energije i udaljenost kako bi učinkovito isplanirao svoje putovanje. Dok je putovao, Mark je koristio kombinaciju karte Marsa (slika 7), promatranje Marsovog terena u stvarnom vremenu i Phobos kako bi ostao na kursu [13]. Phobos kruži oko Marsa otprilike tri puta dnevno. To znači da je Mark koristio Phobos za procjenu protoka vremena i osigurao da drži dosljedan tempo tijekom putovanja.

U romanu se ne spominje detaljan opis kako Mark koristi Phobos za orijentaciju. Jedna od mogućnosti je da koristi njega kao što mi na Zemlji koristimo Sunce. Npr. prateći Phobos i opažajući njegovo kretanje po Marsovom nebu, Mark Watney je mogao pratiti je li on pomaknut udesno ili ulijevo od mjesta gdje ga je zadnji put vidio i po tome prilagoditi kurs.

Nakon što je Mark našao Pathfinder i njegov rover Sojourner napravio je nekoliko izmjena na njima. Uklonio je nebitne komponente kako bi smanjio njihovu težinu i utovario ih na svoj rover te se vratio u Hab. Nakon što ih je osposobio, uspostavio je komunikaciju s NASA-om. Napisao je poruku i postavio je ispred kamere Pathfinderera i čeko odgovor. Kako je jedini način komunikacije bio preko kamere, NASA je njenim pomicanjem odgovarala na pitanja koja je postavio Mark. Međutim, kako bi mogli imati sofisticiraniju komunikaciju, Mark je osmislio da komuniciraju uz pomoć heksadekadskog sustava, tj. na 16 papira napisao je brojeve od 0 do 9 i slova od A do F te ih posloži oko kamere. Tako su u NASA-i pomicanjem kamere na odrađeni broj i slovo mogli ispisivati riječi. Mark je odabrao ovaj sustav umjesto raspisivanja slova abecede jer je onda kamera imala veći kut između svakog znaka, pa je bilo jednostavnije i preciznije za očitati [13].

Kada znanstvenici i inženjeri žele komunicirati s ljudima ili poslati naredbe svemirskoj letjelici ili roveru u svemir, koriste se s Deep Space Network (DSN). DSN je niz radio antena koje podržavaju međuplanetarne misije i nekoliko onih koje kruže oko Zemlje. DSN također pruža radarska i radioastronomska promatranja koja poboljšavaju naše razumijevanje Sunčevog sustava i šireg svemira. DSN se sastoji od tri satelita jednako udaljena jedan od drugoga otprilike 120 stupnjeva po dužini diljem svijeta. Strateški položaj ovih mjesta dopušta stalnu komunikaciju sa svemirskim letjelicama dok se Zemlja okreće. Prije nego što svemirska letjelica potone ispod horizonta na jednoj DSN lokaciji, druga lokacija može uhvatiti signal i nastaviti komunicirati [34].

DSN igra ključnu ulogu u istraživanju svemira omogućujući komunikaciju i praćenje svemirskih letjelica koje su daleko od Zemlje. Omogućuje kontrolorima misija slanje naredbi svemirskim letjelicama, primanje podataka i slika te praćenje zdravlja i statusa tih misija, pridonoseći našem razumijevanju Sunčevog sustava i svemira izvan njega.

Nakon što je Mark uspostavio redoviti kontakt sa Zemljom, obavijestio ih je o svom planu da iskoristi MAV (Mars Ascent Vehicle<sup>3</sup>) za potencijalno spašavanje s Marsa. NASA-in Laboratorij za mlazni pogon (JPL) i kontrola misije počeli su raditi na planu spašavanja. Kako bi se pripremio za put do MAV-a, Mark je prikupio dodatne zalihe iz Hab-a koje su uključivale hranu, vodu i opremu koja će mu trebati za putovanje. Izračunao je svoj dnevni unos kalorija i rasporedio svoje zalihe kako bi osigurao da potraju za cijelo putovanje. Sa 14 solarnih panela na roveru, mogao je putovati noću, danju ih puniti, a RTG je koristio za grijanje i pomoć pri punjenju baterija rovera. [13]

Put od Hab-a, baze misije Ares 3, do MAV-a koji je smješten u Schiaparelli Krateru je dug 3200 kilometara (slika 7). Nakon deset sola prelaženja marsovskim terenom, Mark Watney se našao u Mawrth Vallisu, jednoj od ključnoj točki na njegovom putu do MAV-a. Međutim, njegove karte su se pokazale nekvalitetne, nudeći samo nejasne naznake, s velikim kraterima koji su služili kao najvidljivije referentne točke. Suočen s ovim izazovom, Watney je znao da treba precizniji način koordiniranja svoje lokacije. Oslanjajući se na svoje znanje o nebeskim orijentacijama Zemlje i Marsa, smislio je rješenje. Prepoznavši da je Zemljina os usmjerena prema Polarisu, a Marsova prema Denebu, odlučio je izraditi sekstant. Koristeći relativne položaje tih zvijezda i kretanje Phobosa preko Marsovog neba, Watney je otprilike izračunao svoju zemljopisnu širinu i dužinu. Ova snalažljiva metoda navigacije omogućila mu je da odredi svoju lokaciju s većom točnošću, osiguravajući da ostane na kursu prema Schiaparelliju. Dok se Mark Watney približavao Marthu, primijetio je da mu je vidljivost postala smanjena. Marsovski krajolik ispred i iza njega djelovao je asimetrično glede vidljivosti, a njegovi su solarni paneli zadnjih dana imali smanjenu učinkovitost. Zaključio je da je ušao u pješčanu oluju. Brzo razmišljajući, Watney je smislio plan. Odlučio je ostaviti jednu od svojih solarnih ploča na mjestu gdje je bio, postavivši drugu otprilike 40 kilometara južno i još 40 kilometara iza toga. Sljedećeg dana se vratio do svake od solarnih ploča i prikupio podatke o snazi panela u isto doba dana. Uspoređujući snagu koju su generirali paneli, mogao je razlučiti oblik i intenzitet oluje. Podaci su pokazali da je najbolje da se Mark kreće jugoistočno, što je upravo kamo i treba ići. Uskoro je bio u Schiaparelliju.

Milijunima godina, rub kratera je bio pod stalnim udarom vjetera. Očekivano je bilo da će se pijesak skupiti po njegovim rubovima i unutar kratera. Na kraju se pijesak toliko nagomilao da je bio u ravnini s tlom izvan kratera. Vrijeme je donijelo dine i pustinjski teren. Neki dijelovi tla su bili čvrsti kao stijena, a neki mekani kao kreda. Mark je cijelim putem bio pažljiv, izbjegavao velika kamenja, vodio računa o svakom zavoju, ali to nije bilo dovoljno. Vizualno nije bilo naznaka neke promjene u tlu, ali prije nego što je Mark uspio reagirati, kotač je propao u mekano tlo i rover se prevrnuo. Nakon što je došao sebi, Mark je smislio plan kako spasiti rover. Povezao je jedan kraj dugog kabela s roverom, zatim drugi kraj kabela s bušilicom koja

---

<sup>3</sup> MAV je svemirska letjelica dizajnirana za prijevoz astronauta s površine Marsa natrag do Hermesa koji bi orbitirao Marsom [13].



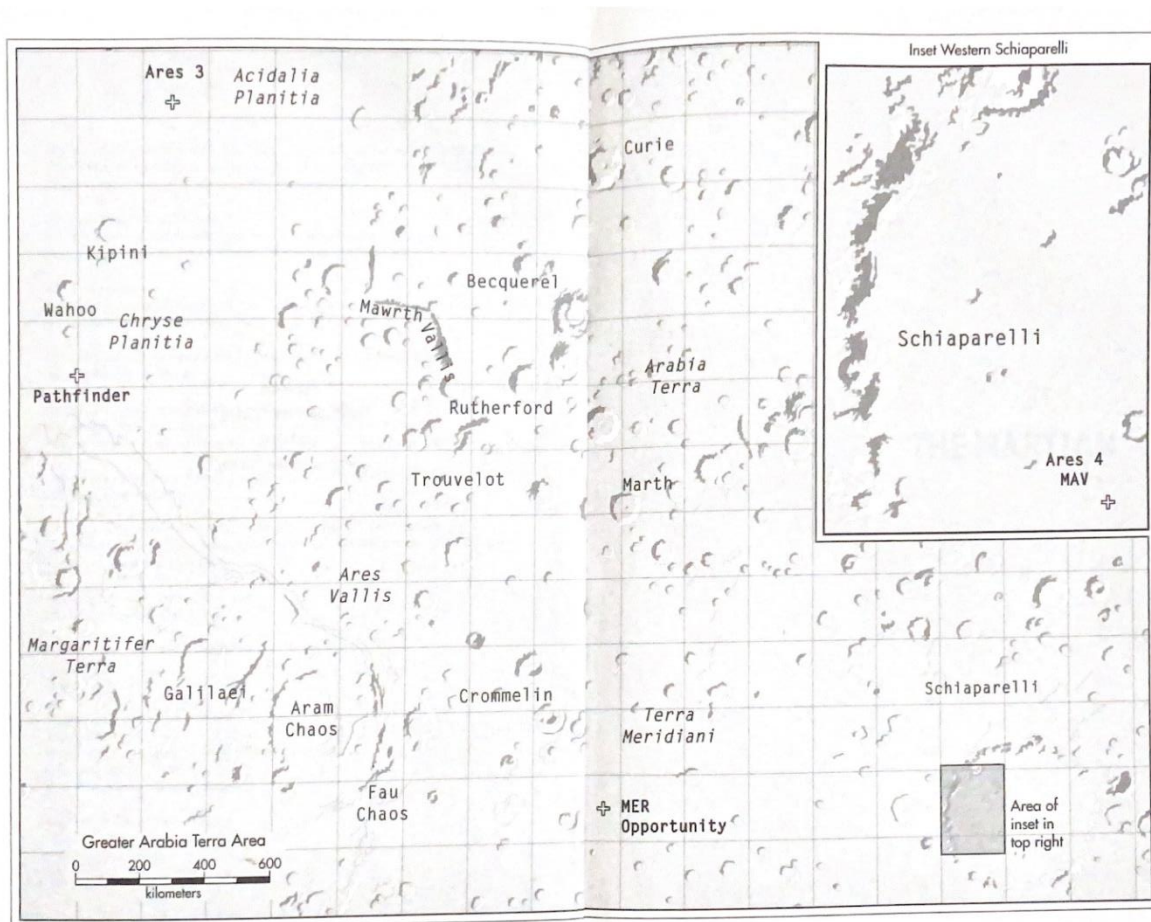
je inače služila za uzimanje uzoraka tla i bušilicu zakačio za stijenu. Kabel je bio okomit na rover. Mark je stao na sredinu kabla i vukao ga bočno, prema sebi. Uspio je prevrnuti rover natrag na kotače. [13]

Markova ideja je dobra. Uzmimo konop dug 100 metara i pretpostavimo da je nerastezljiv. Stanimo na sredinu konopa i povucimo konop prema sebi tako da je nova duljina između rovera i stijene npr. 96 metara. Sada smo dobili dva pravokutna trokuta kojima je hipotenuza po 50 metara i katete koje nisu zajedničke po 48 metara. Moramo izračunati koliko je duga zajednička kateta:  $\sqrt{50^2 - 48^2} = 14$  m. Dakle, da bi pomjerali rover za 4 metra, moramo konop povući prema sebi 14 metara (slika 8).

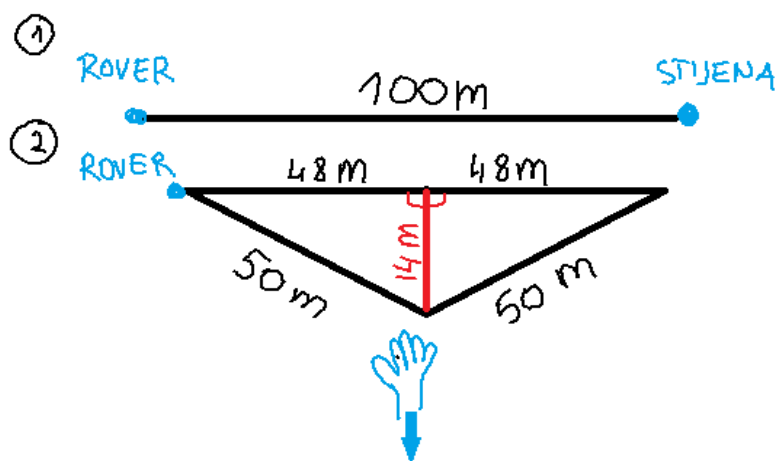
Svom problemu mogao je pristupiti i na drugačiji način. Kao prvi korak u oslobađanju rovera mogao je očistiti pijesak oko guma. Da to učini, mogao je upotrijebiti ruke ili bilo koje raspoložive alate poput kamenja ili komada plastike te napraviti put koji omogućuje gumama da dobiju trenje kako bi se rover mogao voziti. U taj put moguće je i posložiti kamenčiće ako ih ima dovoljno. Mark je mogao i preventivno uraditi neke modifikacije na roveru kako bi spriječio propadanje. Npr. ako je u blizini bila neka stijena, mogao je vezati rover za stijenu konopom i polako se spuštati niz padinu, mogao je čak i ispustiti zrak iz guma kako bi bio stabilniji i spustio težište rovera kako se ne bi prevrnuo.

Nakon što je Mark izbavio rover, trebalo mu je još pet sola da stigne do MAV-a. Kad je napokon stigao, morao je napraviti neke modifikacije na njemu kako bi se lansirao u orbitu i kako bi se mogao prikačiti na Hermes.

Paralelno, tim astronauta na Hermesu planira izvesti Rich Purnellov manevar.



Slika 7. Detaljan prikaz područja Marsa u kojem se kretao protagonist Mark Watney. (slika uzeta iz Weir, A. *The Martian* [13]).



Slika 8. Crtež modela iz primjera o korištenju konopa za povlačenje rovera.

## 5 Odlazak s Marsa

Pogledajmo pojednostavljeni model računa brzine potrebne kako bi MAV uzletio s površine Marsa i penjao se kroz orbite. U romanu, MAV je odgovoran za prijevoz Marka s Marsa u njegovu orbitu i susret s Hermesom. Kako bi letjelica ušla u orbitu Marsa, trebala bi postići određenu brzinu „bijega“ s površine:

$$v = \sqrt{\frac{2GM}{r}} \quad (2)$$

gdje je  $G$  gravitacijska konstanta,  $M$  masa planeta, a  $r$  udaljenost od njegovog središta. Uvrštavajući:  $G = 6.67 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3\text{kg}^{-1}\text{s}^{-2}$ ,  $M = 6.4169 \cdot 10^{23} \text{ kg}$ ,  $r = 3.396 \cdot 10^6 \text{ m}$  za brzinu dobijemo:  $5020.61 \text{ m/s} = 5.02 \text{ km/s}$ .

Ovo je važno jer je MAV dizajniran samo za doseg niske orbite Marsa tj. oko 250 kilometara iznad njegove površine. U referentnom okviru Marsa, smatramo da svemirska letjelica "odlazi" kada napusti sferu utjecaja (sphere of influence - SOI<sup>4</sup>). SOI za Mars iznosi oko 573473 kilometara [36]. U okviru Marsa brzina na rubu SOI će biti:

$$v_{SOI} = v_M - v_{MTO} = 20.18 \frac{\text{km}}{\text{s}} \quad (3)$$

Gdje je  $v_{MTO} = 3.9 \text{ km/s}$  [37] prosječna brzina u prijelazu iz jedne u drugu orbitu Marsa (Mars transfer orbit - MTO<sup>5</sup>), a  $v_M = 24.08 \text{ km/s}$  [23] brzina Marsa. Nadalje, Mark je izbacio višak opreme kako bi MAV bio lakši. Uspio je masu spustiti na 7300 kilograma [13]. Sada zbog manjka informacija o MAV-u u romanu, moramo koristiti neke pretpostavke. Pretpostavimo da MAV koristi tri raketna motora napajana pumpom sa specifičnim impulsom<sup>6</sup> od 360 sekundi. Tada prosječna brzina MAV-a ispada oko  $6.32 \text{ km/s}$  što je malo veća brzina nego što je nama potrebna [39].

Čak i ova pojednostavljena verzija izračuna brzine koju MAV treba kako bi uzletio s Marsa i izašao u orbitu je komplicirana jer zahtijeva razumijevanje nekih pojmova orbitalne mehanike.

Manevar nazvan po Richu Purnellu, liku iz romana koji je astrofizičar i radi za NASA-u, je odvažan plan za spašavanje Marka Watneya. Plan uključuje da se svemirska letjelica Hermes vrati u blizinu Marsa i pokupi Watneya te ga vrati na Zemlju.

Umjesto da Hermes izvrši svoje planirano jednomjesečno usporavanje kako bi ušao u nisku Zemljinu orbitu, umjesto toga je ponovno počeo ubrzavati koristeći svoje ionske motore kako bi izvršio prelet Zemlje. Iskoristio je Zemljinu gravitaciju za povećanja brzine i ponovno „izbacivanje“ prema Marsu. Dok je Hermes letio pokraj Zemlje dobio je zalihe za produženo

<sup>4</sup> Zamišljena sfera oko nebeskog tijela koja opisuje njezin gravitacijski utjecaj [35].

<sup>5</sup> Orbita između neke polazišne orbite i neke krajnje orbite Marsa [37].

<sup>6</sup> Specifični impuls je vrijeme u kojem određena količina pogonskog goriva može generirati potisak jednak početnoj težini pogonskog goriva [38].

putovanje uz pomoć opskrbe letjelice lansirane sa Zemlje. Kad se Hermes približio Marsu, nesposoban ući u orbitu zbog nedostatka raspoloživog pogonskog goriva, izveo je brzi prelet. Tijekom preleta, Mark Watney se lansirao u MAV-u prema putanji Hermesa. Nakon što je Hermes pokupio Marka, iskoristio je Marsovu gravitaciju da izvrši drugu gravitacijsku pomoć kako bi svemirsku letjelicu vratio na putanju do Zemlje [13].

Pitamo se je li moguće izvesti R. Purnellov manevar. Teoretski, Hermes je nuklearna letjelica koja koristi motore VASIMR<sup>7</sup> za pogon. Analizom putanje koja je dovršena korištenjem informacija u romanu daje nam pravo da pretpostavimo da se masa vozila i specifičnosti pogonskog sustava mogu zanemariti. Iako je VASIMR motor s promjenjivim specifičnim impulsom i stoga može održavati potisak kako bi uravnotežio promjenjivu masu vozila, stvarna misija bi iskoristila omjer potrošnje goriva i težine vozila kako bi povećala akceleraciju tijekom putovanja. U analizi se koristi model konstantnog specifičnog impulsa od 5000 sekundi. Također, pretpostavlja se da je snaga propulzije od 2 MW do 50 MW, iskoristivost 60% i pogonsko gorivo argon. Uzimajući to u obzir, rezultati su pokazali da su zakoni fizike očuvani i da je manevar predstavljen u romanu „Marsovac“ moguć [41].

---

<sup>7</sup> VASIMR (The Variable Specific Impulse Magnetoplasma Rocket) motor je električni raketni motor velike snage, dizajniran za pružanje primarne propulzije za širok raspon misija, tj. od ekonomski održivih logističkih operacija prostoru oko mjeseca do brzog transporta u dubokom svemiru [39].

---

## 6 Zaključak

Istraživanje fizike kroz roman "Marsovac" Andyja Weira pružilo je vrijedan uvid u izazove i mogućnosti budućih misija na Mars. Ovaj rad prolazi kroz nekoliko aspekata robotskih misija na Crveni planet, te neke buduće ljudske misije. Poruka koja proizlazi iz analize u ovom radu je nevjerojatan potencijal ljudske genijalnosti i važnost suradnje u potrazi za znanstvenim spoznajama i istraživanjem. Jedna od temeljnih tema bila je važnost korištenja resursa u održavanju ljudskog života na Marsu. Genijalne metode Marka Watneya za proizvodnju vode i kisika naglašavaju nužnost ovladavanja tim procesima za buduće misije. Rad diskutira različita potencijalna rješenja, od kemijskih reakcija do naprednih sustava za održavanje života, naglašavajući potrebu za kontinuiranim istraživanjem i inovacijama u ovom području. Dok gledamo unaprijed na mogućnost dugoročne ljudske prisutnosti na Marsu, postaje jasno da će naša sposobnost prilagodbe i maksimalnog iskorištavanja dostupnih resursa biti ključna.

Nadalje, ispitivanje navigacijskih i komunikacijskih sustava u marsovskim misijama naglašava važnu ulogu koju tehnologija ima u omogućavanju uspješnog istraživanja. Svemirske letjelice i roveri zahtijevaju preciznu koordinaciju i stalnu komunikaciju sa Zemljom. Ovo naglašava važnost robusnih i pouzdanih komunikacijskih mreža, kao i potrebu za napretkom u autonomnoj navigaciji kako bi se prevladalo značajno vremensko kašnjenje u prijenosu signala između dva planeta.

U kontekstu međuplanetarnih putovanja, Rich Purnell Manevar i modifikacije koje izvodi Mark Watney na MAV-u (Mars Ascent Vehicle) služe kao primjeri suradničke prirode istraživanja svemira, kao i pažljivog planiranja kako bi se osigurao siguran povratak astronauta s površine Marsa.

Ukratko, roman "Marsovac" ne samo da nas osvaja uzbudljivom pričom o preživljavanju, već nudi i pogled u budućnost istraživanja Marsa. Podsjeća nas da nas ljudska žed za znanjem i pustolovinom može potaknuti da prevladamo naizgled nepremostive izazove. Središnja poruka ovog rada leži u izvanrednoj sposobnosti ljudi da se prilagode, inoviraju i surađuju u suočavanju s nedaćama. Dok nastavljamo pomicati granice istraživanja svemira, "Marsovac" služi kao inspiracija, podsjećajući nas da uz odlučnost, znanstvenu domišljatost i suradnju možemo postići nevjerojatno i učiniti prve korake prema tome da postanemo međuplanetarna vrsta.

## 7 Literatura

- [1] NASA Science, Mars exploration, URL: <https://mars.nasa.gov/allaboutmars/mystique/history/early/> (12.06.2023.)
- [2] *Hrvatska enciklopedija, mrežno izdanje*. Leksikografski zavod Miroslav Krleža, 2021., URL: <https://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?ID=1881> (12.06.2023.)
- [3] Royal Museums Greenwich, *Astronomy in the 19th century*, URL: <https://www.rmg.co.uk/stories/topics/astronomy-19th-century> (12.06.2023.)
- [4] N. Thomas, *The Interaction between Technology and Art in Astronomical Research*, str 133-135, URL: [https://books.google.hr/books?hl=hr&lr=&id=6Cs-r4KhKOIC&oi=fnd&pg=PA133&dq=Giovanni+Schiaparelli+canals+misunderstood&ots=UZszRbkrcB&sig=vOfOhwZZPH\\_saJ\\_Z6OIHczAPDu8&redir\\_esc=y#v=onepage&q&f=false](https://books.google.hr/books?hl=hr&lr=&id=6Cs-r4KhKOIC&oi=fnd&pg=PA133&dq=Giovanni+Schiaparelli+canals+misunderstood&ots=UZszRbkrcB&sig=vOfOhwZZPH_saJ_Z6OIHczAPDu8&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false) (12.06.2023.)
- [5] NASA Science, Mars exploration, URL: [https://mars.nasa.gov/internal\\_resources/809/](https://mars.nasa.gov/internal_resources/809/) (12.06.2023.)
- [6] NASA Science, Mars exploration, URL: [https://mars.nasa.gov/internal\\_resources/828/](https://mars.nasa.gov/internal_resources/828/) (12.06.2023.)
- [7] NASA Science, Mars exploration, URL: <https://mars.nasa.gov/mars-exploration/missions/pathfinder/> (12.06.2023.)
- [8] NASA Science, Mars exploration, URL: <https://mars.nasa.gov/mars-exploration/missions/mars-exploration-rovers/> (12.06.2023.)
- [9] NASA Science, Mars exploration, URL: [https://mars.nasa.gov/internal\\_resources/824/](https://mars.nasa.gov/internal_resources/824/) (13.06.2023.)
- [10] NASA Science, Mars exploration, URL: <https://mars.nasa.gov/mars-exploration/missions/mars-sample-return/> (13.06.2023.)
- [11] NASA, Artemis II Orion Service Module Completes Acoustic Testing, URL: <https://blogs.nasa.gov/artemis/2023/05/12/artemis-ii-orion-service-module-completes-acoustic-testing/> (13.06.2023.)
- [12] NASA Science, NASA'S ORION SPACECRAFT, URL: [https://www.nasa.gov/sites/default/files/atoms/files/orion\\_factsheet.pdf](https://www.nasa.gov/sites/default/files/atoms/files/orion_factsheet.pdf) (13.06.2023.)
- [13] Weir, A. (2011./2014.) *The Martian*, 1. izdanje, Ballantine Books, Sjedinjene Američke Države
- [14] NASA, Orion Crew Module, URL: <https://sacd.larc.nasa.gov/vab/vab-projects/orion-crew-module/> (13.06.2023.)
- [15] NASA, URL: <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20070001008/downloads/20070001008.pdf> (16.09.2023.)
- [16] NASA, In Depth, URL: <https://solarsystem.nasa.gov/planets/mars/in-depth/> (15.06.2023.)
- [17] NASA, Mars Moons, URL: <https://solarsystem.nasa.gov/moons/mars-moons/overview/> (15.06.2023.)
- [18] NASA, Mars Exploration, URL: [https://mars.nasa.gov/#red\\_planet/0](https://mars.nasa.gov/#red_planet/0) (15.06.2023.)
- [19] NASA, NASA's Curiosity Captures Martian Morning, Afternoon in New 'Postcard', URL: <https://mars.nasa.gov/news/9415/nasas-curiosity-captures-martian-morning-afternoon-in-new-postcard/> (16.06.2023.)
- [20] ESA Science & Technology, MARSIS DATA REVEAL NEW METHOD TO MEASURE THE MAGNETIC FIELD OF MARS, URL: <https://sci.esa.int/web/mars-express/-/45528-marsis-data-new-method-to-measure-mars-s-magnetic-field> (16.06.2023.)

- [21] Space, Massive Mars dust storms triggered by heat imbalances, scientists find, URL: <https://www.space.com/mars-climate-dust-storms-heat-imbalance> (20.06.2023.)
- [22] NASA, The Fact and Fiction of Martian Dust Storms, URL: <https://www.nasa.gov/feature/goddard/the-fact-and-fiction-of-martian-dust-storms>
- [23] NASA, Mars Facts, URL: <https://mars.nasa.gov/all-about-mars/facts/> (20.06.2023.)
- [24] Bulk parameters, URL: <https://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/factsheet/marsfact.html> (20.06.2023.)
- [25] NASA, So You Want to Be a Space Farmer..., URL: [https://www.nasa.gov/mission\\_pages/station/research/benefits/so-you-want-to-be-a-space-farmer](https://www.nasa.gov/mission_pages/station/research/benefits/so-you-want-to-be-a-space-farmer) (23.09.2023.)
- [26] NASA, MOXIE for Scientists, URL: <https://mars.nasa.gov/mars2020/spacecraft/instruments/moxie/for-scientists/> (20.07.2023.)
- [27] Mars Education, Polar Caps, URL: <https://marsed.asu.edu/mep/ice/polar-caps> (20.07.2023.)
- [28] NASA, NASA Achieves Water Recovery Milestone on International Space Station, URL: [https://www.nasa.gov/mission\\_pages/station/research/news/water\\_recovery\\_milestone](https://www.nasa.gov/mission_pages/station/research/news/water_recovery_milestone) (20.07.2023)
- [29] Catalysis Science & Technology, Nanocatalysts for hydrogen generation from hydrazine URL: <https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=83ae621f70900c43eff6b0285701acc00315e0b9> (17.09.2023.)
- [30] Proleksis enciklopedija, URL: <https://proleksis.lzmk.hr/26355/> (17.09.2023.)
- [31] NASA, JPL's Role in Making 'The Martian' a Reality URL: <https://mars.nasa.gov/news/1863/jpls-role-in-making-the-martian-a-reality/>
- [32] Medium, URL: <https://medium.com/@avinashachary678/how-to-do-solar-panel-works-ffd7a617e386> (19.09.2023.)
- [33] Marspedia, Sunlight, URL: <https://marspedia.org/Sunlight> (19.09.2023.)
- [34] NASA, How Do We Communicate with Faraway Spacecraft?, URL: <https://solarsystem.nasa.gov/resources/2681/how-do-we-communicate-with-faraway-spacecraft/> (21.09.2023.)
- [35] Internet Archive, Fundamentals of astrodynamics, URL: <https://archive.org/details/fundamentalsofas00bate/page/332/mode/2up> (22.09.2023.)
- [36] ISRO, Mars Orbiter Mission Profile, URL: [https://www.isro.gov.in/mission\\_mars\\_orbiter\\_mission\\_profile.html](https://www.isro.gov.in/mission_mars_orbiter_mission_profile.html) (22.09.2023.)
- [37] Hohmann Transfer, URL: <https://orbital-mechanics.space/orbital-maneuvers/hohmann-transfer.html> (22.09.2023.)
- [38] ScienceDirect, Specific Impulse, URL: <https://www.sciencedirect.com/topics/earth-and-planetary-sciences/specific-impulse> (22.09.2023.)
- [39] Embry Riddle Aeronautical University, URL: [http://pages.erau.edu/~andrewsa/sci\\_fi\\_projects\\_fall\\_2018/Project\\_3/Taylor\\_Alexis/webpage3\\_alexis\\_taylor/webpage3/webpage3.html](http://pages.erau.edu/~andrewsa/sci_fi_projects_fall_2018/Project_3/Taylor_Alexis/webpage3_alexis_taylor/webpage3/webpage3.html) (22.09.2023.)
- [40] Ad Astra, Our Engine, URL: <https://www.adastrarocket.com/our-engine/> (23.09.2023.)
- [41] An Examination of „The Martian“ Trajectory, URL: <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20150019662/downloads/20150019662.pdf> (23.09.2023.)