

# Analiza rubnih uvjeta i održivog stanovanja na Marsu

---

**Brnčić, Mislav**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2021**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:235:732694>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-11-30**

*Repository / Repozitorij:*

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

**Mislav Brnčić**

Zagreb, 2020.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Doc. dr. sc. Tea Žakula, dipl. ing.

Student:

Mislav Brnčić

U Zagrebu, 2020.

*Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i literaturu navedenu na kraju rada.*

*Zahvaljujem se mentorici doc. dr. sc. Tei Žakuli na ukazanom povjerenju, savjetima i pomoći prilikom pisanja rada. Također se zahvaljujem kolegi Nikoli Bađunu na pomoći pri korištenju računalnog paketa TRNSYS.*

*Posebno bih se želio zahvaliti svojoj obitelji, prijateljima i svima koji su mi bili podrška tokom studija.*

*Mislav Brnčić*



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite  
Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:  
procesno-energetski, konstrukcijski, brodstrojarski i inženjersko modeliranje i računalne simulacije

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: 602 - 04 / 21 - 6 / 1	
Ur.broj: 15 - 1703 - 21 -	

## ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Mislav Brnčić**

Mat. br.: 0035209021

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Analiza rubnih uvjeta i održivog stanovanja na Marsu**

Naslov rada na engleskom jeziku: **The analysis of boundary conditions and sustainable housing solutions on Mars**

Opis zadatka:

Slijetanje i istraživanje planeta Mars ubraja se u jedan od najambicioznijih ciljeva današnjice. Slijetanje na Mars NASA je postavila kao cilj 2024. godine, a SpaceX se nada da će svoj brod spustiti tamo već 2022. godine kao pripremu za NASA-ino slijetanje. Jedan od najvećih izazova za istraživanje Marsa jest osnivanje održivih nastambi za stanovanje ljudi u uvjetima koji su znatno drugačiji nego na Zemlji. Cilj ovog rada je dati prvu analizu problema kao uvod u daljnje istraživanje spomenute tematike.

U radu je potrebno analizirati postojeće rubne uvjete koji su bitni za osiguravanje uvjeta toplinske ugodnosti nastambi na Marsu. Također je potrebno analizirati pojedine prijedloge nastambi na temelju dostupnih podataka natjecanja „NASA's 3D-printed Habitat Challenge“. Za analizu potrebne energije nastambe potrebno je koristiti energijske modele napravljene u računalnom programu TRNSYS®. Konačno, potrebno je definirati kritične probleme i/ili ograničenja koja se očekuju pri osnivanju nastambi na Marsu.

### Rad treba sadržavati:

- opis rubnih uvjeta na Marsu,
- opis trenutnih prijedloga rješenja nastambi,
- rezultat analize potrebne energije za odabrane nastambe,
- opis kritičnih problema i ograničenja.

U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:  
30. studenoga 2020.

Datum predaje rada:  
1. rok: 18. veljače 2021.  
2. rok (izvanredni): 5. srpnja 2021.  
3. rok: 23. rujna 2021.

Predviđeni datumi obrane:  
1. rok: 22.2. – 26.2.2021.  
2. rok (izvanredni): 9.7.2021.  
3. rok: 27.9. – 1.10.2021.

Zadatak zadala:

Doc. dr. sc. Tea Žakula

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Vladimir Soldo

## SAŽETAK

U radu su analizirani postojeći rubni uvjeti na Marsu bitni za održavanje uvjeta toplinske ugodnosti unutar nastambi. Analizirane su četiri nastambe predstavljene na natjecanju *NASA's 3D-printed Habitat Challenge* te su na temelju dostupnih podataka izrađeni energijski modeli nastambi korištenjem računalnog programa *TRNSYS*. Pomoću dokumenata dostupnih na *NASA*-inim stranicama definirane su satne vrijednosti vanjske temperature i proveden proračun dozračene Sunčeve energije na površini Marsa u računalnom programu *MATLAB*. Simulacija godišnjih potreba grijanja analiziranih nastambi provedena je korištenjem računalnog programa *TRNSYS*. Rad sadrži opis rubnih uvjeta i kritičnih problema prisutnih pri osnivanju održivog stanovanja na Marsu, te detaljan opis odabranih nastambi i postupak izrade računalnih modela unutar korištenog alata. Modeli nastambi izrađeni su pod pretpostavkom jednakog životnog prostora od 110 m<sup>2</sup> namijenjenog stalnom boravku četiri odrasle osobe. Pod pretpostavkom cjelodnevnog grijanja nastambi pri postavnoj temperaturi od 20°C, izračunato je da najmanju godišnju potrebnu energiju za grijanje od 1818 kWh/m<sup>2</sup> ima nastamba *MARSHA*, tvrtke *AI Space Factory*.

Ključne riječi: godišnje potrebe grijanja, Mars, *NASA's 3D-printed Habitat Challenge*

## SUMMARY

The paper analyzes the existing boundary conditions on Mars, which are relevant for maintaining thermal comfort conditions within buildings. Four buildings presented at *NASA's 3D-printed Habitat Challenge* have been analyzed and energy models have been developed in the computer program *TRNSYS*, based on available data. Using the documents available on *NASA's* website, hourly values of the outdoor temperature have been defined and the calculation of solar radiation on the surface of Mars has been done in *MATLAB*. The simulation of the annual heating needs of the analyzed buildings has been performed using the computer program *TRNSYS*. The paper gives a description of boundary conditions and critical problems present in the establishment of sustainable housing for Mars, as well as a detailed description of selected buildings and the energy modeling procedures. Housing models have been developed assuming an equal living space of 110 m<sup>2</sup> intended for the permanent residence of four adults. Assuming continuous heating at the set temperature of 20°C, it was calculated that the building *MARSHA*, from the company *AI Space Factory*, has the lowest annual energy required for heating and is equal to 1818 kWh/m<sup>2</sup>.

Key words: annual heating needs, Mars, *NASA's 3D-printed Habitat Challenge*

---

## Sadržaj:

1. UVOD.....	1
2. KRITIČNI PROBLEMI ODRŽIVOG STANOVANJA NA MARSU .....	2
2.1 ENERGETSKI IZVORI .....	2
2.2 KARAKTERISTIKE ATMOSFERE .....	3
2.3 SASTAV TLA .....	3
2.4 JAKOST GRAVITACIJSKOG POLJA .....	5
2.5 UDALJENOST MARS A I ZEMLJE.....	5
3. RUBNI UVJETI ZA NASTAMBE NA MARSU .....	6
3.1 TEMPERATURA .....	7
3.2. INFILTRACIJA .....	9
3.3. ZRAČENJE .....	10
4. IZRAČUN DOZRAČENE SUNČEVE ENERGIJE .....	12
POPIS OZNAKA.....	12
4.1. PRORAČUN ZRAČENJA NA HORIZONTALNU PLOHU.....	14
4.2. PRORAČUN ZRAČENJA NA KOSU PLOHU .....	19
5. SATNE VRIJEDNOSTI TEMPERATURE.....	20
6. OPIS ODABRANIH NASTAMBI S NATJECANJA NASA'S 3D-PRINTED HABITAT CHALLENGE .....	22
6.1. MARS INCUBATOR HABITAT .....	23
6.2. ZOPHERUS.....	24
6.3. NORTHWESTERN UNIVERSITY .....	25
6.4. AI SPACE AGENCY – MARSHA .....	28
6.5. SVOJSTVA MATERIJALA ZIDOVA I PROZORA .....	29
7. OPIS MODELA ZA SIMULACIJU POTROŠNJE ENERGIJE .....	31
7.1. POSTAVKE MODELA NASTAMBE .....	31
7.2. POSTAVKE RAČUNALNE SIMULACIJE .....	34
8. REZULTATI SIMULACIJE .....	36
9. ZAKLJUČAK.....	39
10. POPIS LITERATURE.....	41
11. POPIS LITERATURE SLIKA I TABLICA.....	42
12. PRILOG.....	43
MATLAB ALGORITAM ZA IZRAČUN SUNČEVOG ZRAČENJA HORIZONTALNA PLOHA .....	43
MATLAB ALGORITAM ZA IZRAČUN SUNČEVOG ZRAČENJA KOSA PLOHA .....	44



## 1. UVOD

Osnivanje održive kolonije na drugome planetu predstavlja jedan od velikih izazova za cijelo čovječanstvo u bliskoj budućnosti. Od svih planeta u Sunčevom sustavu glavni kandidat za kolonizaciju, zbog svojeg položaja i prihvatljivijih uvjeta u odnosu na ostale planete, je Mars. Iako po nekim karakteristikama sličan Zemlji, Mars je nepogodan za život i postoje mnogi tehnički problemi koje je potrebno riješiti prije nego se uspijemo barem kratkoročno nastaniti na Marsu.

U ovom radu će se opisati rubni uvjeti koji vladaju na Marsu, sagledati glavni problemi pri ostvarivanju trajnih nastambi te analizirati koje uvjete zadovoljavaju i koliko su trenutni prijedlozi rješenja nastambi energetske učinkoviti sa stajališta grijanja. U analizi će se koristiti podaci prikupljeni na prethodnim NASA-inim misijama na Marsu dostupnim na NASA-inim stranicama.

Glavni cilj ovoga rada je detaljna analiza pojedinih nastambi prezentiranih na natjecanju *NASA's 3D-printed Habitat Challenge*. Pri simulaciji potrebne energije za grijanje nastambe koristiti će se energijski modeli napravljeni u računalnom programu TRNSYS, a proračun će biti proveden satnom metodom.

## 2. KRITIČNI PROBLEMI ODRŽIVOG STANOVANJA NA MARSU

Značajnih sličnosti sa Zemljom, koje vrijedi spomenuti kao prednosti pri nastanjivanju i ljudskoj prilagodbi životu na Marsu, iako malobrojnih, ipak ima. Vrijeme potrebno za jednu rotaciju Marsa oko svoje osi iznosi 24 sata i 40 min što omogućava održavanje prirodnog bioritma sličnog onome na Zemlji. Nagib Marsove osi od 25° također je neznatno veći od Zemljinih 23° zbog čega Mars prolazi kroz godišnja doba slična Zemljinim. Mars ima izraženiju eliptičnu putanju u odnosu na Zemlju, zbog čega godišnja doba, koja se mogu povezati s promjenama vanjske temperature, imaju različiti period trajanja. Tijekom ljeta planet je najbliže Suncu i dobije 40% više Sunčeve energije nego za vrijeme zime. Navedene sličnosti bitne su za biološku i psihološku prilagodbu, ali su zanemarive u početnoj fazi osnivanja nastambe koja treba pružiti osnovne uvijete za održavanje života. U nastavku će se dati opis kritičnih problema vezanih uz glavna obilježja okoliša i izložiti neka od mogućih rješenja.

### 2.1 ENERGETSKI IZVORI

Prva velika prepreka jest činjenica da je Mars vrlo siromašan energijom. Zbog udaljenosti od Sunca, dozračena energija 60% je manja od Zemljine. Uzme li se u obzir učinkovitost postojećih sustava i učestale pješčane oluje koje mogu trajati tjednima, pa i mjesecima u određenim periodima, dolazi se do zaključka da bi za opskrbljivanje manje kolonije Sunčevom energijom bila potrebna velika površina pokrivena solarnim panelima. Veličina sama po sebi nije problem, budući da na Marsu postoji dovoljno slobodne površine. Međutim, sva potrebna oprema treba biti prebačena sa Zemlje, što bi uzrokovalo velike troškove i dovelo u pitanje isplativost samoga projekta. Pouzdanost sustava također je upitna zbog dugih pješčanih oluja tijekom kojih bi sustav bio manje učinkovit ili uopće ne bi isporučivao energiju dostatnu za funkcioniranje kolonije. Budući da pouzdanost sustava u početnim fazama kolonizacije ima najviši prioritet, mala je vjerojatnost da će se za opskrbu nastambi koristiti Sunčeva energija.

Energija vjetra čini se kao pouzdan izvor zbog čestih pješčanih oluja, što potvrđuju NASA-*ini* instrumenti s ravnice *Elysium Planitia*, čija očitavanja daju prosječne dnevne brzine vjetra od 5 m/s. Unatoč zadovoljavajućim brzinama, atmosfera na Marsu ima više od 100 puta manju gustoću nego Zemljina, što čini raspoloživu brzinu vjetra zanemarivom za praktičnu uporabu.

Geotermalna energija također je neupotrebljiva budući da je Marsova unutrašnjost, kao i atmosfera, puno niže temperature od Zemljine.

Nalazišta konvencionalnih fosilnih goriva i hidroenergija kao takva, ne postoje.

Nuklearna energija jedini je pouzdan i dovoljno izdašan izvor u početnoj fazi dok se ne razvije kompleksnija infrastruktura. Nuklearni reaktor i gorivo morat će zajedno s nastambama biti dostavljeni sa Zemlje i trebaju biti u stanju napajati manje naselje nekoliko godina.

## 2.2 KARAKTERISTIKE ATMOSFERE

Atmosfera na Marsu uvelike se razlikuje od Zemljine, stoga su potrebne velike prilagodbe kako bi se osigurali uvjeti pogodni za život ljudi. Marsova atmosfera sastoji se većinom od ugljičnog dioksida (95%), te nešto dušika (2,6%), argona (1,9%) i tragova ostalih plinova. Prosječni tlak pri nula metara „nadmorske visine“ iznosi 660 Pa, što znači da nastambe na Marsu moraju biti opremljene zračnim sustavom koji bi u unutrašnjost nastambe upuhivao komprimirani dušik i kisik u odgovarajućem omjeru. Nastambe moraju biti zrakonepropusne, a prozori i vrata iznimno dobro zabrtvljeni. Zbog velike razlike vanjskog i unutarnjeg tlaka, oštri rubovi su slabe točke konstrukcije, stoga se preferiraju zakrivljene plohe zidova bez pravokutnih spojeva, što se može vidjeti na natjecanju *NASA's 3D-printed Habitat Challenge*.

Osim rijetke atmosfere, Mars ima i vrlo hladnu i neaktivnu jezgru koja proizvodi slabu magnetosferu. Posljedično, polovina svog zračenja dozračenog od Sunca dolazi do tla. Bez adekvatne zaštite, osoba na Marsu bila bi izložena 50 puta većem zračenju od osobe na Zemlji. Velika izloženost ultraljubičastom i kozmičkom zračenju može uzrokovati značajne zdravstvene probleme i mutacije, zbog čega je zaštita od zračenja jedan od ključnih faktora pri konstrukciji nastambi za dugotrajan boravak ljudi na Marsu. Pri zaštiti od zračenja moguće je iskoristiti resurse iz okoliša i prekriti nastambe kristaliziranim ugljičnim dioksidom, odnosno suhim ledom dobivenim iz atmosfere i pijeskom dostupnim na tlu. Ovime nije moguće potpuno eliminirati zračenje, ali ga je moguće smanjiti na zdravstveno prihvatljive iznose kod dugotrajne izloženosti.

## 2.3 SASTAV TLA

Iskorištenje tla važan je korak za osnivanje samoodržive kolonije. Prijevoz hrane potrebne za prehranu astronauta mogućnost je kod misija s malim brojem ljudi, ali uzmemo li u obzir da put do Marsa traje duže od pola godine dolazi se do zaključka da to nije opcija kod dugotrajnijih misija. Uzgoj hranjivih biljnih kultura imperativ je za trajni boravak na Marsu.

Izgled Marsovog reljefa prikazan je na Slici 1. Tlo na Marsu lužnato je i nedostaju mu esencijalni dušični spojevi potrebni za razvoj biljaka. Prije uzgoja potrebno je dekontaminirati tlo, sniziti pH te ukloniti višak teških metala i štetne perkloratne soli. Perkloratne soli štetne su za razvoj biljaka, a putem prehrane mogu dospjeti u ljudski organizam te u velikim količinama uzrokovati trovanje. Pročišćavanje tla moguće je provesti kompleksnim postupkom koji se zasniva na ispiranju tla vodom, kojim se voda odvaja od štetnih tvari i tako zatvara ciklus na kraju čega se dobiva pročišćeno tlo i voda spremna za ponovnu uporabu. Alternativa ovome postupku je korištenje bakterija koje se hrane perkloratnim solima, a kao nusprodukt ispuštaju kisik koji može biti iskorišten u druge svrhe. Nakon dekontaminacije dobiva se podloga pogodna za uzgoj biljaka koju je potrebno obogatiti hranjivim tvarima. U početnoj fazi jedino dostupno gnojivo biti će izmet. Prije upotrebe izmet je potrebno obraditi da bi se uklonile prisutne patogene bakterije. Kasnije, nakon što proizvodnja krene, kao gnojivo koristiti će se reciklirani biološki otpad od starih biljaka i ostataka hrane.



*Slika 1 Izgled reljefa na Marsu [1]*

Cijeli postupak je dugotrajan i energetski zahtjevan zbog čega se nameće mogućnost korištenja aquaponic sustava za proizvodnju hrane. Aquaponic sustavi koriste paralelan uzgoj ribe i biljaka, čime se dobiva na raznovrsnosti prehrane, važnoj stavci kako za fizičko tako i za mentalno zdravlje prvih stanovnika Marsa.

## 2.4 JAKOST GRAVITACIJSKOG POLJA

Mars je veličinom, odnosno volumenom, puno manji planet od Zemlje, s promjerom od 3380 km u odnosu na Zemljinih 6380 km. Posljedično, uz nešto manju srednju gustoću, Mars ima puno manju masu od Zemlje, a samim tim i gravitacijsku silu na svojoj površini. Gravitacijska konstanta na površini Marsa iznosi  $3,71 \text{ m/s}^2$ , što odgovara 38% gravitacije na Zemlji.

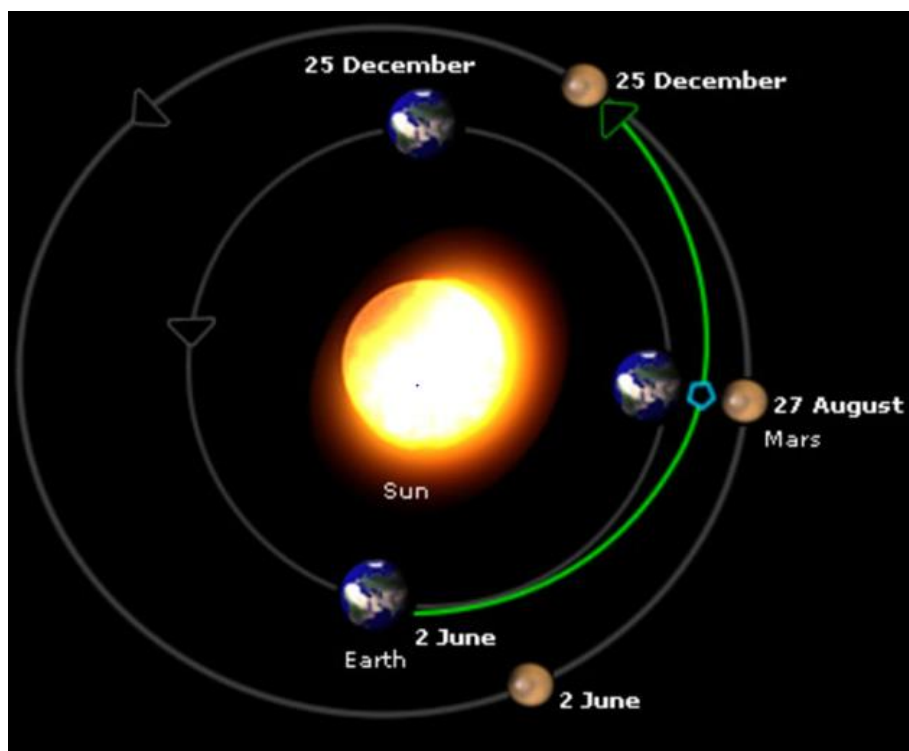
Ljudsko tijelo se brzo prilagođava nametnutim uvjetima u okolišu, što ponekad nije poželjna karakteristika. Testovima provedenim na astronautima nakon boravka na Međunarodnoj svemirskoj stanici (ISS) utvrđeno je da duža izloženost uvjetima niže gravitacije izaziva mišićnu atrofiju, gubitak koštanog tkiva i kardiovaskularne probleme. Rezultate testova obavljenih nakon boravka na ISS-u treba uzeti s rezervom, budući da su testirani astronauti boravili u uvjetima bestežinskog stanja koje nije usporedivo sa smanjenom gravitacijom. Ipak, treba uzeti u obzir da će astronauti poslani na Mars također provesti vrijeme putovanja u istim uvjetima, iz čega se može zaključiti da su dobiveni podaci relevantni.

Slabija gravitacija jedan je od problema koji se ne može riješiti s postojećom tehnologijom, a koji može uzrokovati značajne zdravstvene probleme. Idejna rješenja poput rotirajućih kuća sa umjetnom gravitacijom postoje, ali nisu realizirana u praksi, pa će članovi posade najvjerojatnije biti prisiljeni na višesatnu svakodnevnu vježbu kako bi se smanjili negativni efekti smanjenog opterećenja na tijelo.

## 2.5 UDALJENOST MARS A I ZEMLJE

Udaljenost između dvaju planeta još je jedna prepreka koju nije moguće riješiti u bliskoj budućnosti. Prosječna udaljenost Marsa i Zemlje je 225 milijuna kilometara. Za usporedbu, svjetlosnom signalu potrebno je 12,5 minuta da prijeđe put od Zemlje do Marsa, dok mu za put oko ekvatora treba nešto više od 0,1 sekunde. Udaljenost se mijenja s vremenom zbog različitih orbitalnih vremena. Mars je udaljeniji od Sunca te nešto sporiji od Zemlje, stoga mu je potrebno 686 dana za jednu rotaciju oko Sunca. Neusklađenost orbitalnih perioda ostavlja kratak vremenski period za putovanje svake dvije godine. Optimalan period za početka putovanja prikazan je na Slici 2. Ukoliko se raketa lansira tijekom optimalnog perioda, bit će potrebno između 150 i 300 dana da raketa dođe do Marsa, ovisno o brzini i točnom položaju planeta. Putovanje je, naravno, moguće i izvan tog perioda, no za sada ne postoji tehnologija koja bi ga učinila izvedivim u praksi. Rast potrošnje goriva i trajanja putovanja učinilo bi ga

neizvedivim ili jednostavno neisplativim. Dok se ne razvije učinkovitije gorivo i napredniji pogonski sustav mogućnost putovanja otvara se svake dvije godine, a prvi stanovnici Marsa između tih perioda ne mogu računati na pomoć sa Zemlje.



Slika 2 Trajektorija putovanja među planetima [1]

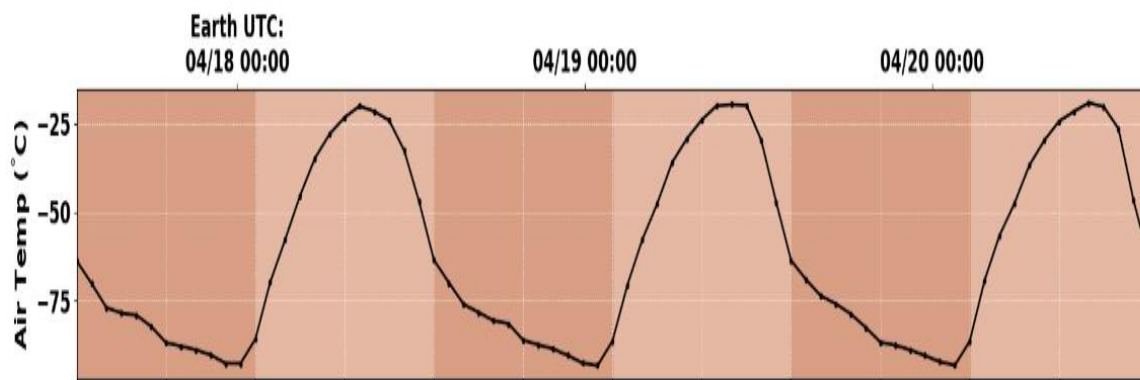
### 3. RUBNI UVJETI ZA NASTAMBE NA MARSU

Poznavanje rubnih uvjeta potrebno je da bi se definirao pojedini slučaj općenitog fizikalnog problema. Rubni uvjeti koji vladaju u okolišu na Marsu definiraju rješenje problema u vidu potrebne energije te daju ograničenja i zahtjeve za sustav grijanja i ventilacije. U ovom odlomku dati će se kratak opis rubnih uvjeta relevantnih za osiguranje uvjeta toplinske ugodnosti nastambi na Marsu.

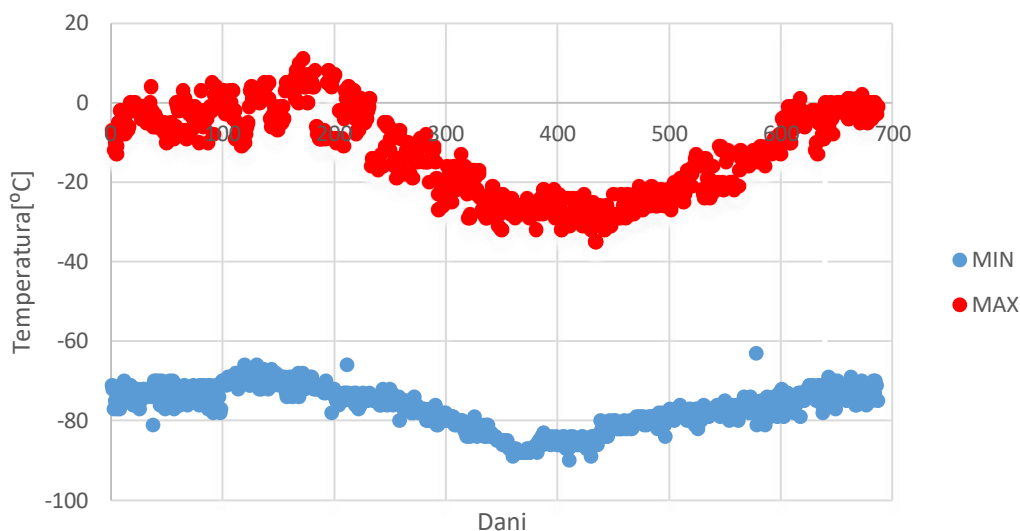
### 3.1 TEMPERATURA

Mars je znatno hladniji planet od Zemlje iz mnogih prethodno spomenutih razloga. Udaljenost od Sunca glavni je uzrok niskih temperatura zbog manje količine dozračene Sunčeve energije. Unatoč atmosferi koja se sastoji većinom od ugljičnog dioksida koji je poznati staklenički plin, većina energije koja dođe do Marsove površine ne zadrži se u atmosferi zbog njene male gustoće.

Raspon temperatura kreće se između maksimalnih 20°C blizu ekvatora i minimalnih -150°C na polovima, u odgovarajućim dijelovima godine. Ekstremne vrijednosti temperatura postižu se i zadržavaju kratak period u godini, a prosječna temperatura od -50°C reprezentativniji je podatak. Vrijednosti temperature ovise uvelike o geografskom smještaju. Slično kao i na Zemlji, područja bliže ekvatoru imaju više temperature tijekom cijele godine, dok udaljavanjem od ekvatora vrijednosti temperatura opadaju. Sa stajališta grijanja i energetske učinkovitosti nastambi poželjan je smještaj što bliže ekvatoru. Sukladno tomu, NASA je 2018. lansirala InSight, robotsko vozilo dizajnirano za proučavanje unutrašnjosti Marsa, koje je opremljeno toplinskom sondom. InSight sletio je na određeno mjesto Elysium Planitia, ravnicu blizu ekvatora gdje svakodnevno bilježi vrijednosti temperature, tlaka i brzine vjetra. Iz dostupnih podataka [1] prikazanih na Slici 1 vidi se kretanje temperature tijekom tri sola (sol je naziv za jedan solarni dan na Marsu). Mogu se primijetiti značajne temperaturne oscilacije od 80-ak stupnjeva između dnevnog temperaturnog maksimuma i minimuma. Velike oscilacije temperature posljedica su nepostojanja medija, vode ili zraka, koji bi tijekom noći, kada toplinski izvor nije dostupan, pohranio toplinsku energiju.



Slika 3 Kretanje temperature tijekom dana [1]



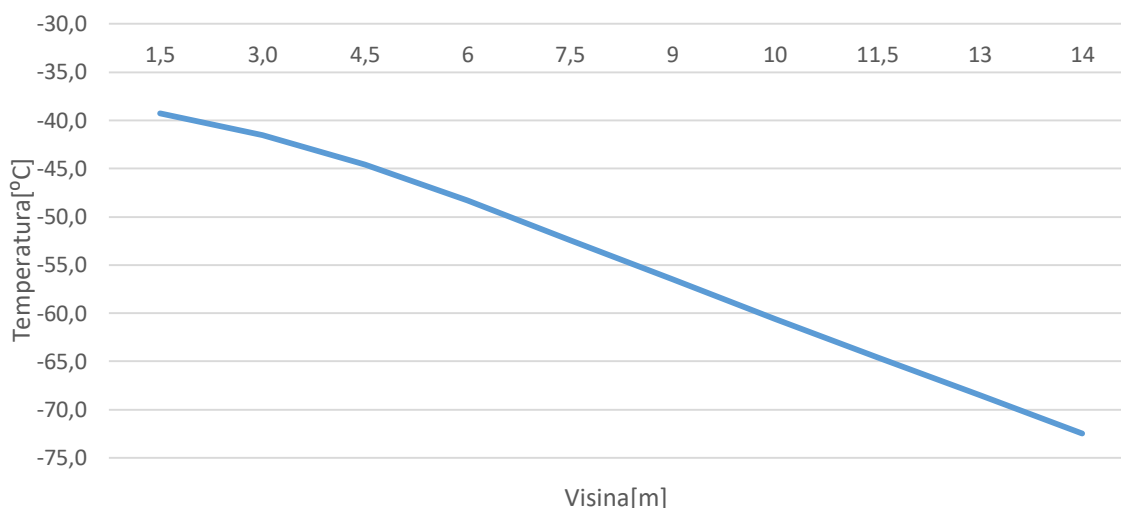
Slika 4 Kretanje ekstremnih vrijednosti temperature tijekom godine

Na Slici 4. istaknute su prethodno spomenuti dnevni ekstremi temperature. Dnevni maksimum temperature postiže se tijekom dana, a dnevni minimum neposredno pred izlazak Sunca. Slika 4. također jasno prikazuje kretanje temperature tijekom godine, a koje slijedi približno sinusoidnu funkciju. Temperatura doseže godišnji maksimum za vrijeme periheliona, kada je Mars najbliži Suncu, a minimum za vrijeme apheliona, kada je najudaljeniji od Sunca. Za temeljni period oscilacije temperature uzima se 686 dana, što odgovara trajanju jedne godine na Marsu. Ovaj podatak potrebno je uzeti u obzir pri analizi energije za grijanje nastambi.

Ovisnost temperature o visini također je potrebno uzeti u obzir za potpunu ispravnost proračuna. Pretpostavka o jednolikoj vanjskoj temperaturi zraka, odnosno medija, koji okružuje



nastambu ne vrijedi u ovome slučaju. Zbog tankog atmosferskog sloja temperatura značajno pada s porastom visine, pa je za zgrade više od nekoliko metara potrebna korekcija vanjske temperature. Slika 5. prikazuje funkcijsku ovisnost temperature o visini. Profil temperature u nižem sloju atmosfere do visine od 20 metara može se aproksimirati linearnom funkcijom. Pad temperature s visinom varira između 1,5 i 2,5°C po metru visine ovisno o lokaciji i razdoblju dana.



Slika 5 Ovisnost temperature o visini

### 3.2. INFILTRACIJA

Prema ranije spomenutom opisu, poznato je da se atmosfera sastoji najvećim dijelom od ugljikovog dioksida i da se vrijednosti vanjskog tlaka kreću između 600 i 900 Pa. Budući da je unutrašnjost nastambi potrebno održavati na tlaku od približno 1 bar, infiltracija CO<sub>2</sub> iz okoliša nije moguća zbog velikog pretlaka koji vlada u nastambi. Pretlak može izazvati propuštanje komprimiranog kisika i dušika u okoliš ukoliko spojevi vrata, prozora i ostalih kritičnih mjesta na nastambi nisu dobro zabrtvljeni. Propuštanje uzrokuje toplinske gubitke potrebne za ponovno zagrijavanje dobavnog zraka, međutim puno veći trošak iziskuje nadomještanje nepovratno izgubljenog kisika koji nije lako dostupan na Marsu. Mala propuštanja mogu dugoročno izazvati velike troškove u pogonu za proizvodnju kisika, stoga se naglasak u konstrukciji stavlja na zrakonepropusnost nastambe u cjelini. Osiguranje kvalitete zraka ovisi o sustavu mehaničke ventilacije potpomognutog sustavom za proizvodnju komprimirane smjese N<sub>2</sub> i O<sub>2</sub>, a infiltracija se pri analizi zanemaruje.

### 3.3. ZRAČENJE

Sunčevo zračenje predstavlja svojevrsan toplinski izvor i smanjuje iznos godišnje potrebne energije za grijanje nastambe. Ranije je spomenuto da zračenje na površini Marsa može biti izrazito štetno za zdravlje ljudi. Dugotrajna izloženost velikim količinama kratkovalnog UV zračenja izaziva mutacije i uzrokuje rak. Ipak, povećana izloženost zračenju posljedica je tankog atmosferskog zaštitnog sloja i slabe magnetosfere, dok je energija dozračena na površinu zamjetno manja nego na Zemlji. Srednja vrijednost Sunčevog zračenja na vanjski rub atmosfere na Marsu iznosi  $590 \text{ W/m}^2$ , znatno manje u usporedbi sa Zemljinih  $1370 \text{ W/m}^2$ . Na Slici 6. prikazane su dnevne dozračene energije na horizontalnu površinu solarnog panela na *Viking Landeru 1* tijekom jedne godine na Marsu. Iznosi Sunčevog zračenja, dobiveni iz ukupne ozračenosti, kreću se između  $100$  i  $150 \text{ W/m}^2$ . Ukupna ozračenost znatno je manja od vrijednosti zračenja na rubu atmosfere, što je posljedica raspršenja i refleksije zračenja od površine. Uočava se nagli pad u Sunčevom zračenju u dva navrata, a koji se poklapaju sa trajanjem globalnih pješčanih oluja koje su uobičajena pojava na Marsu. Tijekom pješčanih oluja Sunčeva energija pada i do  $40 \text{ W/m}^2$ .

Podaci s *Mars Exploration Rovera* pokazuju kvalitativnu ovisnost zračenja o optičkoj dubini ( $\tau$ ). Optička dubina parametar je koji označava prozirnost atmosfere. Niže vrijednosti optičke dubine odgovaraju niskoj neprozirnosti uzrokovanj pješčanom prašinom, odnosno čistom nebu. Slika 7. prikazuje dnevni intenzitet Sunčevog zračenja za slučajeve  $\tau=0,5$  (niža koncentracija prašine u atmosferi), i  $\tau=0,95$  (viša koncentracija prašine u atmosferi). Podaci potvrđuju smanjenje zračenja uslijed povećanja koncentracije prašine te daju omjer direktnog i difuznog zračenja na površinu. Pri uvjetima povišene optičke dubine, difuzno zračenje raste i dominira nad direktnim.

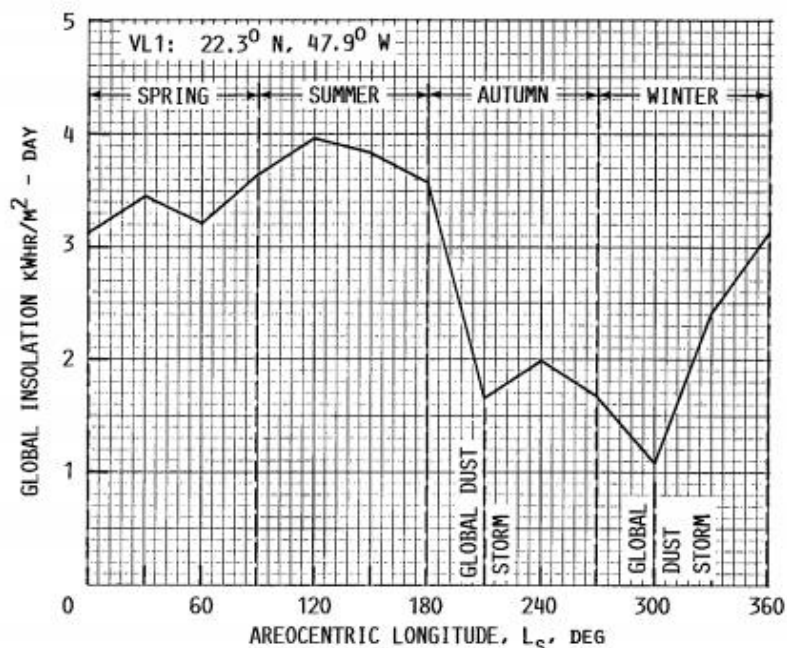


FIGURE 16. - DAILY GLOBAL INSOLATION ON A HORIZONTAL MARS SURFACE AT VIKING LANDER VL1.

Slika 6 Dnevno Sunčevo zračenje na horizontalnu plohu na površini Marsa [4]

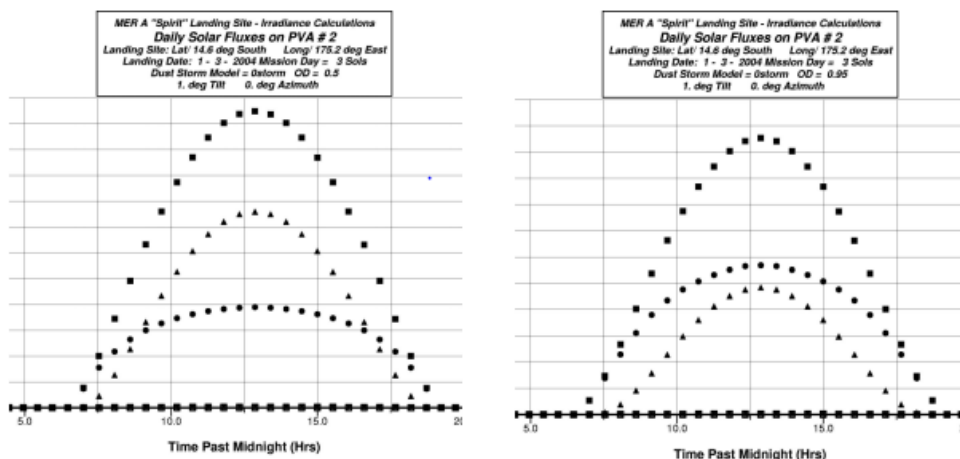


Figure 2.—The Diurnal Profile of Solar Energy on a Horizontal Surface on Mars (Low Dust Case,  $\tau = 0.5$ ), Showing The Direct (Circles), Scattered (Triangles), and Total Isolation During the Course of a Martian Sol.

Figure 3.—The Diurnal Profile of Solar Energy on a Horizontal Surface on Mars (High Dust Case,  $\tau = 0.95$ ).

Slika 7 Utjecaj optičke dubine na iznos i raspodjelu Sunčevog zračenja [5]

## 4. IZRAČUN DOZRAČENE SUNČEVE ENERGIJE

Prije računalne simulacije i energijske analize potrebno je odrediti toplinske dobitke koji smanjuju potrebe grijanja, u ovome slučaju kroz čitavu godinu. Sunčevo zračenje najznačajniji je toplinski dobitak u energijskoj bilanci, pa stoga matematički opis zračenja ima velik utjecaj na pouzdanost modela nastambi. U idućem poglavlju prikazati će se satni proračun dozračene energije na proizvoljno orijentiranu plohu kroz period od jedne godine. Nastambe s natjecanja *NASA's 3D-printed Habitat Challenge*, zbog relativno složene geometrije biti će aproksimirane skupom ravnih ploha, što će omogućiti adekvatan opis Sunčevog zračenja.

Modeli zgrada izrađeni su s velikim brojem ploha s ciljem bolje aproksimacije stvarnog oblika zgrade, odnosno Sunčevog zračenja na plohe različitih orijentacija. Računalna simulacija pokazala je zanemariv utjecaj solarnih toplinskih dobitaka u ukupnoj toplinskoj bilanci nastambi. Provedene su simulacije za dva slučaja. U prvom slučaju zanemareni su solarni toplinski dobitci, a u drugom je za zračenje na sve plohe korišteno zračenje na horizontalnu plohu. Razlika između godišnjih potreba grijanja u navedenim slučajevima iznosi 1,2% pa je u svrhu pojednostavljenja simulacije i smanjenja ukupnog broja podataka, zračenje na horizontalnu plohu korišteno za plohe svih orijentacija, u svim modelima zgrada.

U narednom poglavlju prikazan je postupak izračuna zračenja na kosu plohu, iako nije korišten u sklopu ovog rada. Budući da u općem slučaju solarni toplinski dobitci mogu imati značajniji udio u toplinskoj bilanci, potrebno je odrediti Sunčevo zračenje na plohe s različitim orijentacijama i iste koristiti u proračunu godišnjih potreba grijanja.

### POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
$a$	AU	velika poluos
$e$	AU	ekscentricitet
$G_b$	W/m <sup>2</sup>	direktno zračenje na Marsovoj površini
$G_h, G_{bh}, G_{dh}$	W/m <sup>2</sup>	ukupno, direktno i difuzno zračenje na horizontalnu plohu na površini Marsa

$G_{0b}$	W/m <sup>2</sup>	direktno zračenje na vrhu Marsove atmosfere
$G_{0bh}$	W/m <sup>2</sup>	direktno zračenje na horizontalnu plohu na vrhu Marsove atmosfere
$H_{0bh}$	Wh/m <sup>2</sup>	dnevna ozračenost horizontalne plohe na vrhu Marsove atmosfere
$H_h, H_{bh}, H_{dh}$	Wh/m <sup>2</sup>	ukupna, direktna i difuzna dnevna ozračenost horizontalne plohe na površini Marsa
$I_{0bh}$	Wh/m <sup>2</sup>	satna ozračenost horizontalne plohe na vrhu Marsove atmosfere
$I_h, I_{bh}, I_{dh}$	Wh/m <sup>2</sup>	ukupna, direktna i difuzna satna ozračenost horizontalne plohe na površini Marsa
$I, I_b, I_d$	Wh/m <sup>2</sup>	ukupna, direktna i difuzna satna ozračenost kose plohe na površini Marsa
$L_s$	°	Sunčeva dužina
$m(z)$	kg	zračna masa
$r$	AU	udaljenost Marsa od Sunca
$R_b$	-	Omjer zračenja na kosu i horizontalnu plohu
$S$	W/m <sup>2</sup>	solarna konstanta
$T$	h	Sunčevo vrijeme na Marsu
$T_d$	h	dnevni sati
$Z$	°	kut zenita
$B$	°	nagib plohe
$\Gamma$	°	azimut
$\delta$	°	kut deklinacije
$\delta_0$	°	nagib Marsove osi
$\Theta$	°	kut anomalije
$\Theta$	°	kut upada zračenja
$T$	-	optička dubina
$\Phi$	-	geografska širina
$\omega$	°	kut sata
$\omega_{ss}$	°	kut zalaska Sunca

Indeksi:

Oznaka	Opis
B	direktno
D	difuzno
h	horizontalno
O	na vrhu atmosfere

#### 4.1. PRORAČUN ZRAČENJA NA HORIZONTALNU PLOHU

Izračun zračenja na horizontalnu plohu preuzet je iz [4].

Vrijednost Sunčevog zračenja na rubu Marsove atmosfere:

$$G_{ob} = \frac{S}{r^2} \quad (1)$$

gdje je  $S = 1371 \text{ W/m}^2$  solarna konstanta koja odgovara zračenju na rubu Zemljine atmosfere odnosno udaljenosti od 1AU (AU – astronomical unit) od Sunca.

Udaljenost Marsa i Sunca:

$$r = \frac{a(1-e^2)}{1+e \cos \theta} \quad (2)$$

u kojemu je  $a = 1,5237 \text{ AU}$ , velika poluos eliptične putanje Marsa oko Sunca,  $e = 0,093377$  AU ekscentričnost.

Kut anomalije  $\theta$  računa se pomoću izraza:

$$\theta = L_s - 248^\circ \quad (3)$$

Sunčeva dužina (Solar longitude),  $L_s$ , predstavlja kut koji zatvaraju linije Mars – Sunce, Marsovog položaja na početku godine i trenutnog položaja. Pomoću ovoga kuta određuje se u kojoj se točki na svojoj putanji oko Sunca Mars nalazi u određenome trenutku tijekom godine. Kut od  $248^\circ$  odgovara perihelionu, položaju u kojemu je Mars najbliži Suncu.

Uvrštavanjem jednadžbe (2) i (3) u (1) dobiva se izraz:

$$G_{ob} = 590 \frac{[1+e \cos(L_s-248^\circ)]^2}{(1-e^2)^2} \quad (4)$$

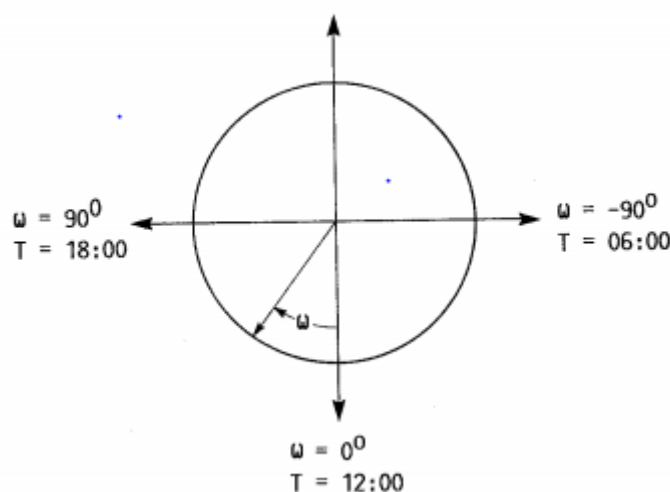
Sunčevo zračenje na horizontalnu plohu na rubu atmosfere:

$$G_{obh} = G_{ob} \cos z \quad (5)$$

Kosinus kuta zenita dobiva se iz izraza:

$$\cos z = \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos \omega \quad (6)$$

gdje je  $\varphi$  geografska širina,  $\delta$  kut deklinacije,  $\omega$  kut sata mjereno zapadno od podneva. Kut sata  $\omega$  mjeri položaj Sunca u određenom trenutku dana mjereno od njegovog položaja u zenitu. Radi jednostavnost izračuna, jedan dan na Marsu, koji odgovara vremenu između dva zalaska Sunca, podijeljen je u 24 vremenska perioda, iako je poznato da dan na Marsu traje 24,65 sati. Stoga je potrebno dobivene rezultate ozračenosti pomnožiti sa faktorom  $24,65/24 = 1,027$  kako bi se rezultati mogli referencirati na stvarno („zemaljsko“) vrijeme. Kut sata prikazan je na Slici 8.



Slika 8 Vrijednosti kuta sata za odgovarajuće vrijeme [4]

Kut deklinacije:

$$\sin \delta = \sin \delta_0 \sin L_s \quad (7)$$

pri čemu je nagib Marsove osi rotacije  $\delta_0 = 24,936^\circ$ .

Kut sata računa se prema:

$$\omega = 15T - 180 \quad (8)$$

Kut koji odgovara vremenu zalaska Sunca računa se prema:

$$\omega_{ss} = \cos^{-1}(-\tan \varphi \tan \delta) \quad (9)$$

Broj dnevnih sati, odnosno sati u kojima postoji Sunčevo zračenje na površinu računa se prema:

$$T_d = \frac{2}{15} \cos^{-1}(-\tan \varphi \tan \delta) \quad (10)$$

Dnevna dozračena energija na horizontalnu plohu na vrhu Marsove atmosfere računa se prema:

$$H_{obh} = \frac{24}{\pi} G_{ob} \left[ \frac{2\pi\omega_{ss}}{360} \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \sin \omega_{ss} \right] \quad (11)$$

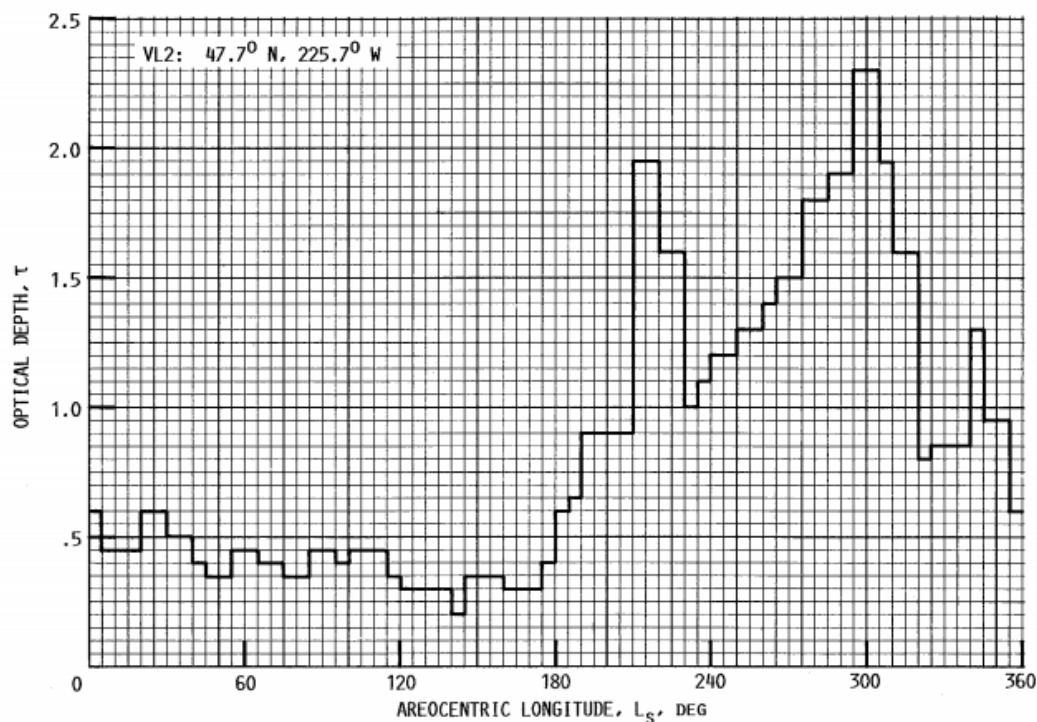
Ukupno zračenje na Marsovoj površini računa se prema:

$$G_b = G_{ob} \exp(-\tau m(z)) \quad (12)$$

gdje je  $\tau$  optička dubina koja se očitava iz Slike 9., a  $m(z)$  zračna masa aproksimirana kao funkcija kuta zenita koja se računa kao:

$$m(z) = \frac{1}{\cos z} \quad (13)$$





Slika 9 Kretanje optičke dubine tijekom jedne godine [4]

Ukupno zračenje na horizontalnu plohu na Marsovoj površini zbroj je direktnog i difuznog zračenja, što se kasnije koristi za izračun difuznog zračenja.

$$G_h = G_{bh} + G_{dh} \quad (14)$$

Ukupno zračenje na horizontalnu površinu računa se prema:

$$G_h = G_{ob} \cos z \frac{f(z, \tau)}{0,9} \quad (15)$$

Koeficijent 0,9 u nazivniku proizlazi iz izraza  $1-r$ , gdje je  $r$  refleksijski faktor za koji je uzeta vrijednost 0,1. Koeficijent  $f(z, \tau)$  očitava se iz Slike 10. u ovisnosti o parametrima optičke dubine i kuta zenita.

TABLE III. - NORMALIZED NET FLUX FUNCTION  $f(z, \tau)$  AT THE MARTIAN SURFACE

Optical depth $\tau$	Zenith angle $Z$ , deg									
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	85
0.1	0.885	0.883	0.882	0.880	0.876	0.870	0.857	0.830	0.755	0.635
0.2	.866	.865	.860	.858	.851	.836	.813	.758	.640	.470
0.3	.847	.846	.841	.836	.826	.806	.774	.708	.562	.412
0.4	.828	.827	.821	.815	.802	.778	.740	.667	.502	.373
0.5	.810	.810	.802	.796	.778	.752	.708	.628	.452	.342
0.6	.793	.791	.785	.775	.755	.725	.677	.593	.414	.318
0.7	.776	.773	.766	.755	.733	.700	.646	.555	.383	.298
0.8	.760	.756	.750	.736	.710	.675	.616	.520	.360	.280
0.9	.745	.740	.733	.717	.690	.650	.587	.487	.336	.264
1.0	.732	.725	.717	.700	.670	.628	.560	.455	.317	.252
1.1	.713	.709	.700	.682	.651	.604	.539	.433	.300	.239
1.2	.697	.692	.683	.662	.632	.585	.518	.413	.288	.230
1.3	.682	.677	.667	.646	.613	.567	.498	.394	.273	.220
1.4	.666	.661	.650	.629	.596	.546	.478	.379	.262	.210
1.5	.651	.646	.633	.612	.580	.530	.460	.362	.251	.202
1.6	.637	.630	.618	.597	.563	.512	.441	.348	.240	.195
1.7	.622	.615	.601	.581	.546	.494	.424	.332	.232	.188
1.8	.609	.600	.586	.568	.531	.480	.408	.318	.224	.181
1.9	.596	.587	.571	.551	.514	.464	.393	.304	.217	.176
2.0	.582	.573	.558	.537	.500	.448	.378	.293	.208	.170
2.25	.552	.542	.522	.501	.462	.410	.343	.265	.190	.156
2.50	.518	.509	.492	.469	.430	.378	.316	.242	.174	.145
2.75	.486	.478	.462	.440	.401	.353	.293	.224	.158	.136
3.00	.460	.450	.434	.414	.376	.330	.273	.206	.150	.128
3.25	.434	.424	.410	.390	.354	.308	.254	.193	.140	.120
3.50	.411	.400	.387	.367	.333	.290	.240	.180	.132	.110
4.00	.370	.360	.347	.330	.296	.258	.212	.160	.118	.100
5.00	.294	.286	.275	.258	.230	.203	.166	.130	.094	.080
6.00	.228	.223	.215	.200	.178	.153	.130	.103	.080	.068

Slika 10 Koeficijent  $f(z, \tau)$  kao funkcija optičke dubine i kuta zenita [4]

Direktno zračenje na horizontalnu plohu računa se prema:

$$G_{bh} = G_{ob} \cos z \exp\left(\frac{-\tau}{\cos z}\right) \quad (16)$$

Difuzno zračenje na horizontalnu površinu dobiva se iz izraza (14), odnosno, poznatog ukupnog i direktnog zračenja.

$$G_{dh} = G_h - G_{bh} \quad (17)$$

Direktna ozračenost horizontalne plohe za traženi vremenski period između  $\omega_1$  i  $\omega_2$  računa se prema:

$$I_{bh} = \frac{12}{\pi} G_{ob} \int_{\omega_1}^{\omega_2} (\sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos \omega) \exp[-\tau / (\sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos \omega)] d\omega \quad (18)$$

Ukupna ozračenost horizontalne plohe za traženi vremenski period između  $\omega_1$  i  $\omega_2$  računa se prema:

$$I_h = \frac{12}{\pi} G_{ob} \frac{f(z, \tau)}{0,9} \left[ \frac{2\pi(\omega_2 - \omega_1)}{360} \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta (\sin \omega_2 - \sin \omega_1) \right] \quad (19)$$

Difuzna ozračenost horizontalne plohe za traženi vremenski period između  $\omega_1$  i  $\omega_2$  računa se prema:

$$I_{dh} = I_h - I_{bh} \quad (20)$$

## 4.2. PRORAČUN ZRAČENJA NA KOSU PLOHU

Izračun zračenja na kosu plohu preuzet je iz [6] i [7].

Kut upada direktnog Sunčevog zračenja na kosu plohu računa se prema:

$$\begin{aligned} \cos \theta = & \sin \delta \sin \varphi \cos \beta - \sin \delta \cos \varphi \sin \beta \cos \gamma + \cos \delta \cos \varphi \cos \beta \cos \omega + \\ & \cos \delta \sin \varphi \sin \beta \cos \gamma \cos \omega + \cos \delta \sin \beta \sin \gamma \sin \omega \end{aligned} \quad (21)$$

Omjer dozračene energije na kosu i horizontalnu plohu računa se prema:

$$R_b = \frac{\cos \theta}{\cos z} \quad (22)$$

Ukoliko  $\cos \theta$  ili  $\cos z$  poprimaju negativne vrijednosti,  $R_b$  poprima vrijednost nula. Za vrijednosti  $\cos \theta < 0,07$  ili  $\cos z < 0,07$ ,  $R_b$  također poprima vrijednost nula.

Direktna dozračena energija na kosu površinu računa se prema:

$$I_b = I_{bh} * R_b \quad (23)$$

Difuzna dozračena energija na kosu površinu računa se prema:

$$I_d = 0,5I_{dh}(1 + \cos \beta) \quad (24)$$

Ukupna dozračena energija na kosu površinu računa se prema:

$$I = I_b + I_d \quad (25)$$

## 5. SATNE VRIJEDNOSTI TEMPERATURE

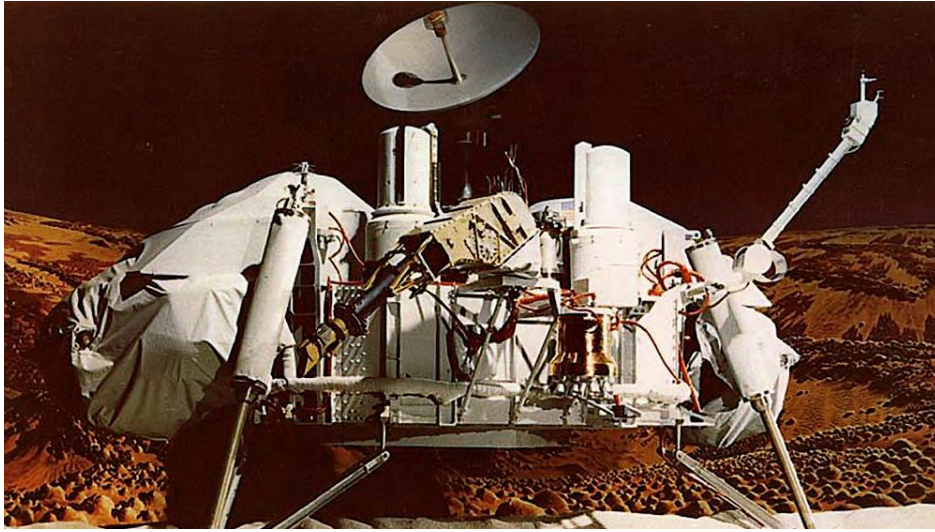
Pri simulaciji energije potrebne za grijanje nastambi u računalnom programu TRNSYS vremenski korak simulacije iznosio je jedan sat. Podaci o satnim vrijednostima temperature preuzeti su iz NASA-ine baze podataka s internetskih stranica [8]. Mjerenja temperature odgovaraju lokaciji *Viking Lander 2*, koji se nalazi na 47,7° N i 225,7° W. Vrijednosti optičke dubine u proračunu zračenja vezani su za istu lokaciju. Dostupni satni podaci temperature obuhvaćaju period od 1050 sola, što je dovoljno podataka za godišnji proračun. Budući da su instrumenti radi održavanja i tehničkih problema ili nepovoljnih uvjeta ugašeni u određenim periodima, mjerenja za ta razdoblja zamijenjena su s mjerenjima za odgovarajući sol iduće godine ili aproksimirana iz dostupnih podataka.

Year	Solar Longitude L_s (deg.)	Sol	Wind Speed m/sec	Wind Dir deg.	Pressure mb	Temperature F.	C.
1	117.993	1.02	0.0	0	0.00	-459.67	-273.15
1	118.012	1.06	1.5	79	7.82	-97.69	-72.05
1	118.031	1.10	1.7	65	7.82	-106.44	-76.91
1	118.050	1.14	2.5	67	7.83	-111.82	-79.90
1	118.070	1.18	3.3	78	7.82	-112.47	-80.26
1	118.089	1.22	4.0	97	7.80	-108.24	-77.91
1	118.108	1.26	6.5	111	7.81	-102.35	-74.64
1	118.127	1.30	7.4	121	7.82	-85.97	-65.54
1	118.146	1.34	4.5	149	7.80	-59.37	-50.76
1	118.165	1.38	3.1	194	7.74	-49.70	-45.39
1	118.184	1.42	3.3	215	7.73	-43.60	-42.00
1	118.204	1.46	3.1	213	7.73	-35.12	-37.29
1	118.223	1.50	2.0	203	7.73	-29.88	-34.38
1	118.242	1.54	2.5	348	7.73	-34.55	-36.97
1	118.261	1.58	1.8	306	7.73	-26.43	-32.46
1	118.280	1.62	3.7	342	7.73	-26.45	-32.47
1	118.299	1.66	2.0	354	7.73	-25.53	-31.96
1	118.318	1.70	2.7	355	7.73	-27.72	-33.18
1	118.338	1.74	2.9	8	7.73	-37.75	-38.75
1	118.357	1.78	2.8	8	7.72	-38.54	-39.19
1	118.376	1.82	1.0	37	7.74	-62.86	-52.70
1	118.395	1.86	1.6	40	7.82	-77.33	-60.74
1	118.414	1.90	1.2	42	7.84	-76.94	-60.52
1	118.433	1.94	1.8	52	7.82	-87.14	-66.19
1	118.453	1.98	1.3	73	7.82	-94.05	-70.03
1	118.472	2.02	1.4	77	7.82	-93.93	-69.96

Slika 11 Podaci s Viking Lander 2 [8]

Slika 11. prikazuje primjer podataka za prva dva sola prikupljenih pomoću instrumenata na *Viking Landeru 2* (Slika 12). Osim temperature, mjeren je tlak, brzina i smjer puhanja vjetrova. Prva tri stupca daju vrijeme određenog mjerenja, u prvom stupcu se nalazi

godina mjerenja,  $L_s$  definira položaj planeta u odnosu na Sunce, a treći stupac prikazuje broj sola protekao od slijetanja landera.



Slika 12 Viking Lander 2 [9]

## 6. OPIS ODABRANIH NASTAMBI S NATJECANJA *NASA'S 3D-PRINTED HABITAT CHALLENGE*

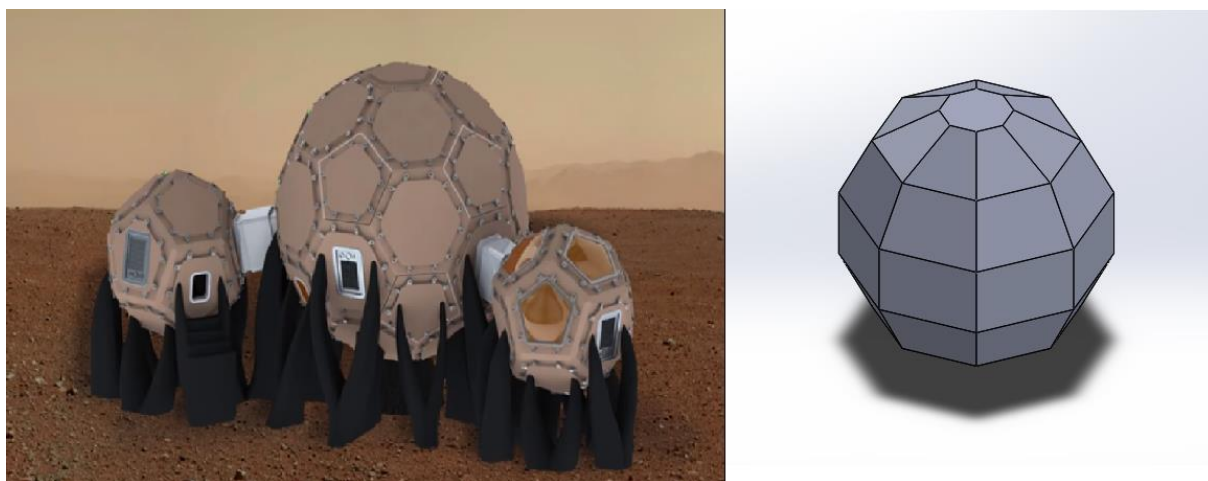
*Nasa 3D-printed Habitat Challenge* natjecanje podijeljeno je u tri faze. Prva faza sastojala se od izrade i prezentacije računalnih modela nastambi. U drugoj fazi naglasak je stavljen na tehnologije izrade i materijale. Natjecatelji su konstruirali strukturne komponente koje su potom podvrgnute ispitivanjima čvrstoće. U završnoj fazi od timova se zahtijevalo da u određenom vremenskom roku sagrađe umanjeni prototip svoje nastambe korištenjem tehnologije 3D printanja. Autonoman proces konstrukcije nastambi glavni je faktor završne ocjene projekta.

Pregled osnovnih problema održivog stanovanja na Marsu predstavljen je u drugom poglavlju. Nastambe predstavljene na *Nasa 3D-printed Habitat Challenge* natjecanju ponudile su različita rješenja za probleme poput povećane izloženosti ionizirajućem zračenju, razlike vanjskog i unutarnjeg tlaka te dnevnih oscilacija temperature koje uzrokuju toplinska naprezanja i stoga predstavljaju dodatno opterećenje na ovojnice nastambi. Između svih kandidata odabrane su četiri nastambe koje će biti predstavljene u nastavku. Nastamba *Mars Incubator Habitat*, nastamba tvrtke *Zopherus*, nastamba sveučilišta *Northwestern University*, te pobjednik natjecanja – nastamba *MARSHA* tvrtke *AI Space Factory*. Navedene nastambe razlikuju se u dizajnu, materijalu i procesu konstrukcije te će posljedično dati dobar pregled različitih pristupa budućem osnivanju kolonije na Marsu.

Budući da detaljne dimenzije i nacrti nastambi nisu javno dostupni, računalni modeli u ovom radu konstruirani su korištenjem dostupnih materijala i pod pretpostavkom jednakog životnog prostora od 110 m<sup>2</sup>. Navedena pretpostavka utemeljena je na pravilniku natjecanja u kojemu stoji da se od nastambi zahtjeva minimalan životni prostor od 93 m<sup>2</sup>, koji je namijenjen smještaju četiri osobe. Modeli nastambi skalirani su prema prethodnoj pretpostavci zadržavajući svoj izvorni oblik. Pretpostavka olakšava usporedbu konačnih rezultata simulacije i pruža mogućnost ocjene optimalnog dizajna nastambe sa stajališta energetske učinkovitosti. U nastavku je dan pregled odabranih nastambi i aproksimacija geometrije napravljena u svrhu izrade energijskih modela u računalnom programu TRNSYS.

## 6.1. MARS INCUBATOR HABITAT

*Mars Incubator Habitat* razlikuje se od ostalih nastambi po načinu konstrukcije i neuobičajenom obliku. Izvorni oblik nastambe i prijedlog aproksimacije geometrije za izradu računalnog modela u TRNSYS-u prikazani su na Slici 13. Nastamba izgledom podsjeća na oblik nogometne lopte, a sastoji se od glavnog dijela namijenjenog za svakodnevne aktivnosti, boravak i spavanje, te dva manja dijela koja se koriste kao ulaz te prostor za odmor i rekuperaciju. Zbog jednostavnosti modela cjelokupna površina od 110 m<sup>2</sup> smještena je u glavni prostor zanemarujući dva manja pomoćna prostora. Ovim pojednostavljenjem rezultati analize dat će nešto manju potrebnu energiju za grijanje od stvarnog slučaja, a uslijed smanjenja površine izmjene topline s okolišem.



Slika 13 Mars Incubator Habitat i aproksimacija geometrije u TRNSYS modelu [10]

*Mars Incubator* koristi tehnologiju 3D printanja za izradu vanjske strukturne potpora (Slika 13). Potpora se formira uzastopnim dodavanjem slojeva bazaltnih vlakana i služi kao svojevrsan temelj za montažu panela, odnosno zidova nastambe. Nakon konstrukcije temelja slijedi proces lijevanja modularnih poligonalnih panela. Paneli se izrađuju od mješavine prosijanog regolita, pijeska dostupnog na Marsovoj površini i usitnjenog polietilena. Mješavina se stavlja u kalup i peče na temperaturi od 130°C, čime se formira struktura velike čvrstoće i otpornosti na udarna opterećenja. Paneli su dodatno ojačani bazaltnim vlaknima, a povezuju se zavarivanjem rubova ojačanih polietilenom. Unutarnja nosiva konstrukcija izrađena je također od bazaltnih vlakana i služi kao stubište koje povezuje dva kata glavnog dijela nastambe. Specifičan način konstrukcije nastambe produžuje vrijeme izrade dijelova, stoga i nastambe u cjelini, a uz to je nejasno može li se proces konstrukcije automatizirati u potpunosti ili barem smanjiti potreba za rukovanjem alatima do prihvatljive granice. Usprkos tome,

jedinstven dizajn i način konstrukcije čine *Mars Incubator Habitat* potencijalnim rješenjem održivog stanovanja u budućnosti.

## 6.2. ZOPHERUS

Tvrtka *Zopherus* predstavila je praktičan, potpuno autonoman postupak gradnje nastambe. Cjelokupan proces izgradnje odvija se u zaštićenoj atmosferi komore za 3D printanje pod visokim tlakom. Komora za printanje sastavni je dio robota koji pruža siguran prostor za konstrukciju, neovisan o vanjskim uvjetima poput pješčane oluje, vjetrova i oscilacija temperature. Prije početka procesa robot sakuplja materijal potreban za proizvodnju svojevrsnog betona sastavljenog od leda, kalcijevog oksida i pijeska, pri čemu su svi materijali dostupni na Marsovoj površini. Nakon toga robot pronalazi adekvatnu lokaciju te započinje s printanjem nastambe. Pomoću ruku za manipulaciju umeće gotove dijelove poput vrata, prozora, brtvi i otvora za prihvat rovera. Radi izbjegavanja potporne konstrukcije, unutarnji sloj nastambe, sagrađen od HDPE-a (polietilen visoke gustoće), printa se istovremeno s vanjskim slojem betona i služi kao potpora ovojnici nastambe. Pri završetku printanja robot se odvaja od površine i premješta na iduću lokaciju gdje iznova započinje proces. Nastamba se u konačnici sastoji od tri susjedne samostalne zgrade povezane kratkim zračnim tunelima. Konačan oblik nastambe prikazan je na Slici 14.

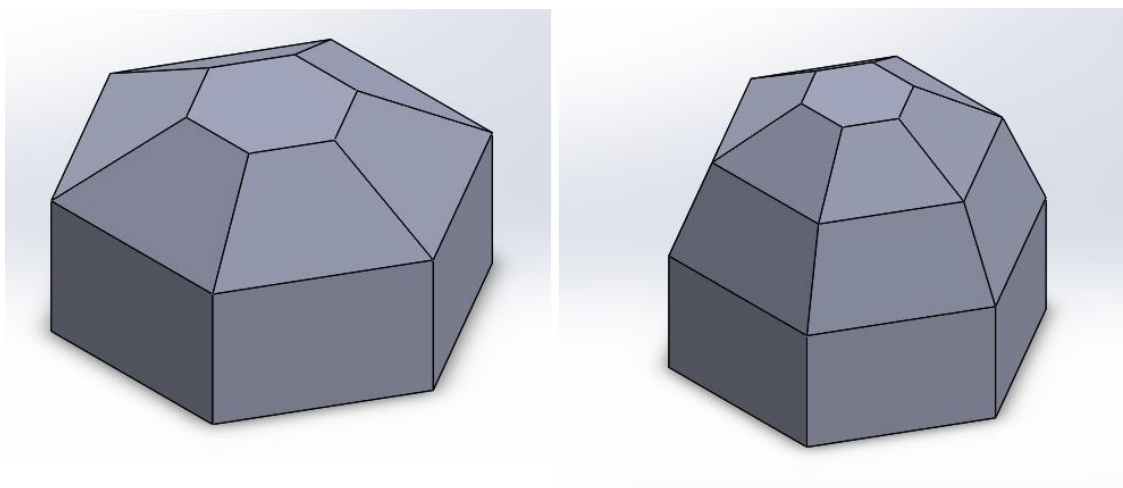


Slika 14 Zopherus nastamba s robotom [11]



Glavna zgrada služi kao prostor za pripremu obroka, vježbanje i boravak. Sastoji se od donjeg dijela i polukata sa najvećim prozorom na nastambi, što je vidljivo iz Slike 13. Prozor osim pogleda na Marsov okoliš omogućava dotok svjetlosti potreban za hidroponski vrt koji se nalazi u prizemlju. Izlaz iz nastambe moguć je isključivo iz glavne zgrade, dok je spajanje rovera moguće i u pomoćnoj zgradi radi lakšeg iskrcavanja uzoraka. Druga zgrada koristi se kao laboratorij, odnosno prostor za rad i istraživanje, te su u njega smješteni komunikacijski sustavi, skladištena oprema i alati. U trećoj zgradi nalaze se četiri odvojene spavaće sobe koje osiguravaju privatni prostor na dugim misijama. Pokraj spavaćih soba nalazi se sanitarni prostor sa školjkom, umivaonikom i tušem. Prednost *Zopherus* nastambe, osim potpuno autonomnog procesa izgradnje je također modularni dizajn koji ostavlja opciju budućeg proširenja nastambe za veći broj ljudi.

Izrađeni računalni model nastambe u TRNSYS-u sastoji se od tri zasebna modela zgrada. Simulacija energijskog modela zgrade provedena je zasebno za svaku zgradu te je ukupna potreba energija za grijanje nastambe određena kao njihov zbroj. Ovojnica svih zgrada aproksimirana je oblikom pravilnog šesterokuta s kupolom na vrhu, pri čemu se glavna zgrada razlikuje u visini od ostale dvije. Zgrada laboratorija i zgrada sa spavaćim sobama razlikuju se jedino po broju i orijentaciji prozora zbog čega je na Slici 15. prikazano samo dva modela, desno za glavnu, a lijevo za dvije sporedne zgrade.



Slika 15 Aproksimacija geometrije *Zopherus* nastambe u TRNSYS modelu

### 6.3. NORTHWESTERN UNIVERSITY

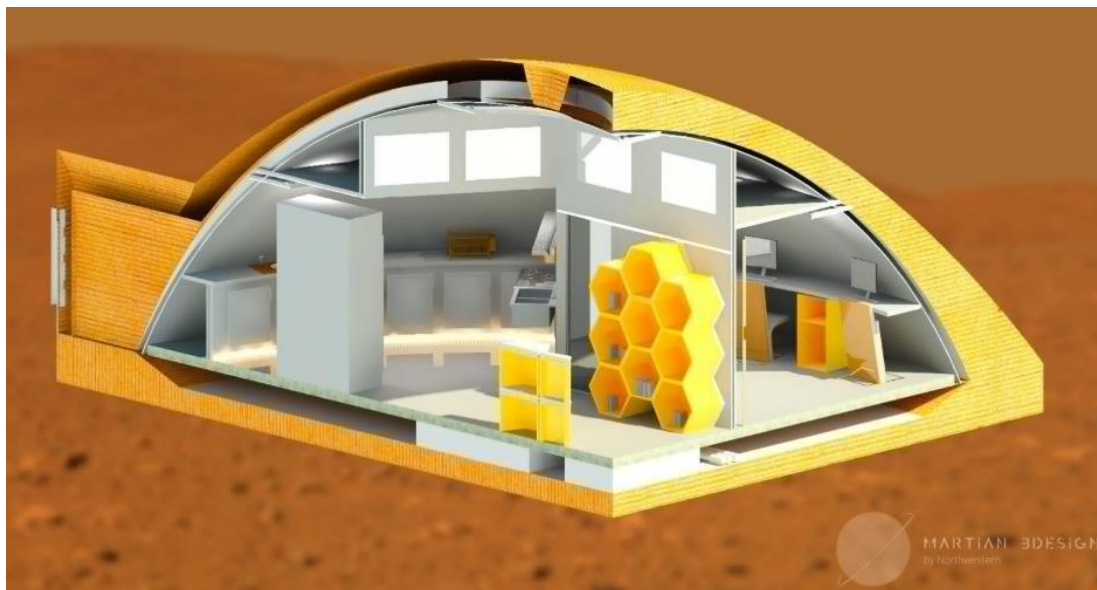
Nastamba sveučilišta *Northwestern University* u odnosu na prethodne dvije ima cjelokupan životni prostor smješten unutar jedne zgrade. Oblik nastambe nalikuje na rotacijski

paraboloid, odnosno kuglinu kalotu (Slika 16). Ovakav tip nastambe ima značajan nedostatak u vidu neiskorištene površine u blizini vanjskog ruba nastambe zbog nedovoljne visine stropa, što je prikazano na Slici 17. Konstrukcija nastambe, nakon izgradnje temelja, započinje napuhavanjem podloge za 3D printanje po kojoj se robot kreće i dodavanjem materijala oblikuje ovojnici. Na podlozi su ugrađeni upusti za strukturna ojačanja ovojnice i izbočine za mjesta gdje dolaze vrata i prozori. Uloga podloge je dvojaka jer služi kao primarna barijera za održavanje unutarnje atmosfere koju ovojnica zgrada ne bi mogla sama zadržati. Građevni materijal nastambe nazvan „Marscrete“, suhi je spoj na bazi sumpora, sličan betonu. Materijal osim dobrih mehaničkih svojstava i zaštite od ionizirajućeg zračenja pruža i zaštitu od udarnih opterećenja uslijed mogućih udara meteorita.



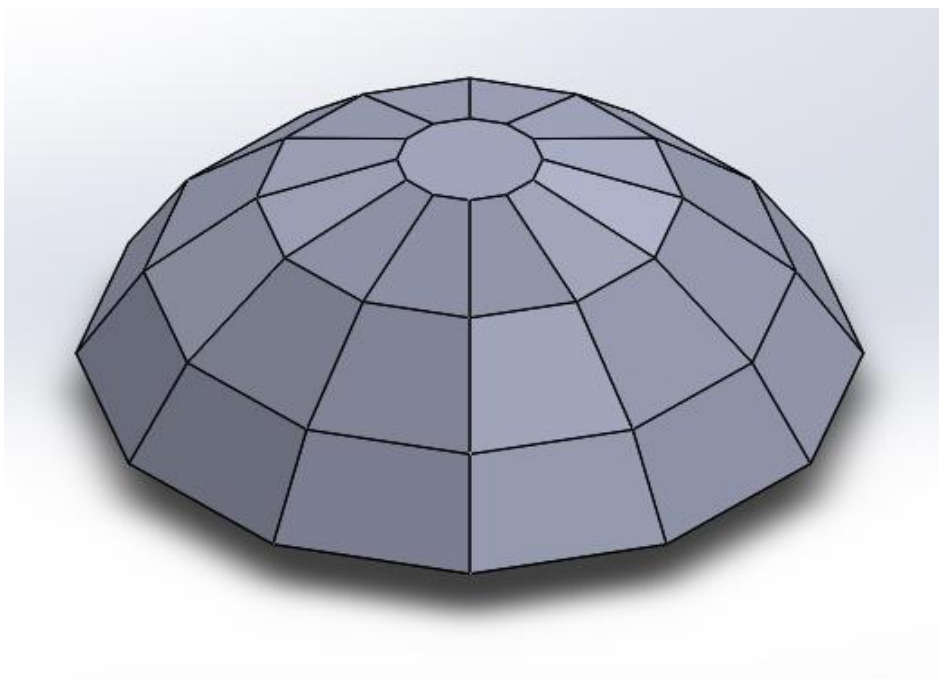
Slika 16 Nastamba sveučilišta Northwestern University [12]

Unutrašnjost nastambe organizirana s ciljem ekonomičnog iskorištenja prostora. Višenamjenski prostori poput sobe za sastanke koja se može transformirati u blagovaonicu ili prostor namijenjen za vježbu standardna su ideja organizacije nastambe. Razvod električne energije, vode i grijanja centraliziran je u jednom dijelu nastambe. Srce nastambe je vrt u središtu, iznad kojega se nalazi prozor kroz kojeg ulazi prirodna svjetlost. Za razliku od ostalih nastambi, nastamba sveučilišta *Northwestern* ima sav životni prostor u prizemlju.



*Slika 17 Unutrašnjost i neiskorišten prostor nastambe [13]*

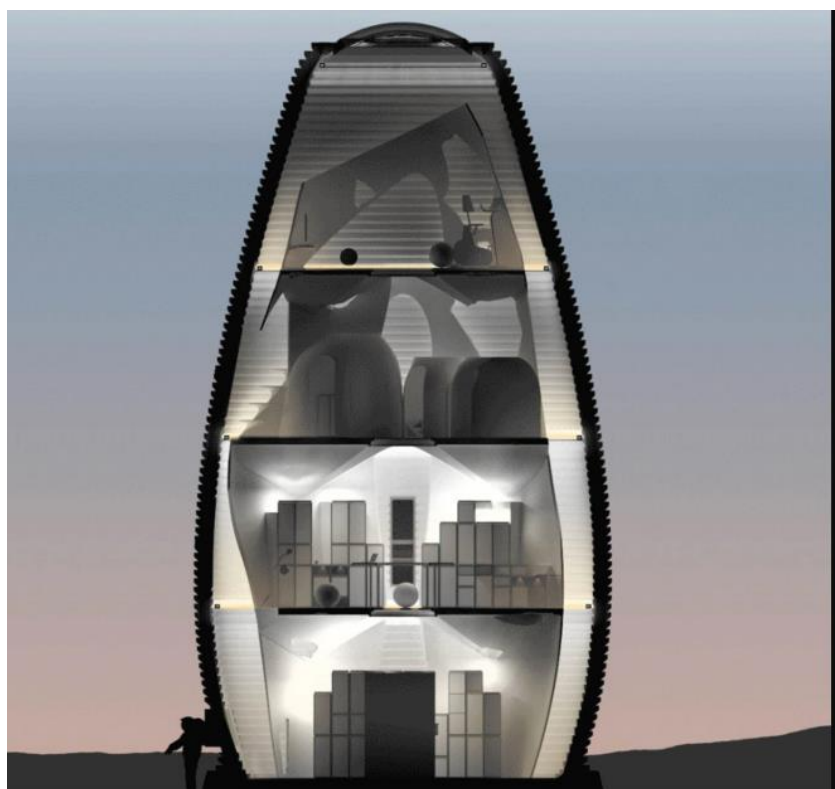
Geometrija korištena u računalnom modelu nastambe prikazana je na Slici 18. Bitna razlika s ostalim modelima je u varijabilnoj debljini zida koja se, zbog naprezanja uslijed razlike tlakova povećava u blizini temelja. Veća debljina zidova pri tlu povećava strukturnu stabilnost nastambe. Varijabilna debljina zidova prikazana je na Slici 17.



*Slika 18 Aproximacija geometrije nastambe Northwestern University u TRNSYS modelu*

## 6.4. AI SPACE AGENCY – MARSHA

Posljednja od četiri nastambe, projekt MARSHA tvrtke *AI Space Agency*, pobjednik je NASA-inog natjecanja *Nasa 3D-printed Habitat Challenge*. MARSH-in oblik je vertikalno orijentirani cilindar, što je prikazao na Slici 19. Konstrukcijska rješenja koja je izdvajaju od ostalih nastambi su rješenje problema temperaturnog širenja materijala uslijed velikih temperaturnih oscilacija na Marsu. Ovojnica zgrade vezana je pri temelju za prirubnicu koja se nalazi na kliznim ležajevima, a koji omogućavaju slobodno pomicanje uslijed deformacije. Od vertikalnog uzgona uzrokovanog razlikom tlakova osigurana je sustavom stezaljki i utega pričvršćenih za tlo. Ovojnica nastambe sastoji se od dvije ljuske. Vanjska ljuska služi kao barijera s vanjskim okolišem i opterećena je razlikom vanjskog i unutarnjeg tlaka. Unutarnja ljuska lagana je i porozna te nosi strukturu nastambe, raspršuje difuzno prirodno svjetlo i umjetnu rasvjetu. Također služi za povezivanje katova pomoću stuba konstruiranih na vanjskom rubu između dvaju ljuski. Zračni i vodeni razvodni sustav smješteni su između ljuski i imaju mogućnost održavanja zasebnih mikroklimatskih uvjeta na svakom katu, ovisno o njegovoj namjeni.

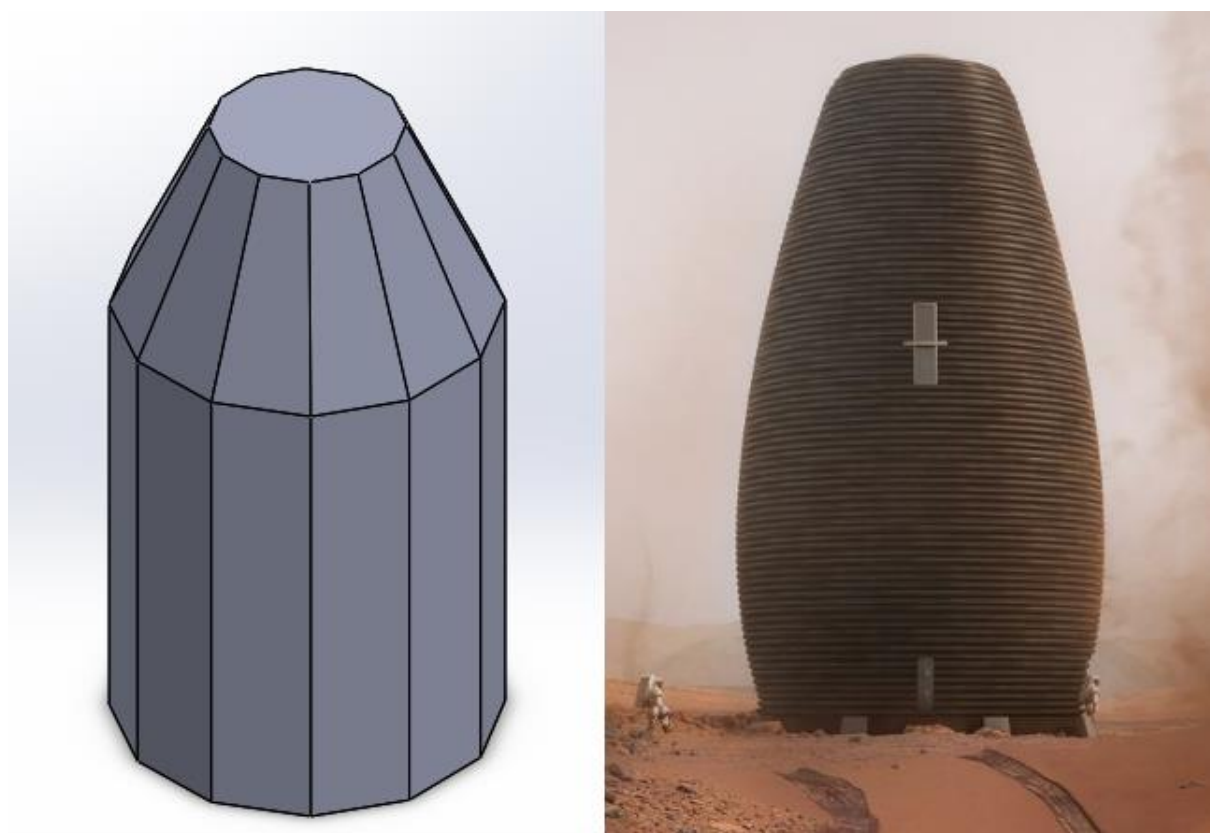


Slika 19 MARSHA unutarnja struktura [14]

U prizemlju su smješteni tehnički sustavi i alati potrebni za provođenje testova i istraživanja. Na prvome katu se nalaze kuhinja i suhi laboratorij za čišća ispitivanja. Drugi kat

sadrži spavaonice i sanitarni čvor dok se na trećemu katu sa stropnim prozorom nalazi prostor za rekreaciju i vježbanje. Svaki od katova ima barem jedan prozor koji zajedno daju 360° panoramski pogled okruženja nastambe. Vanjska ljuska izrađena je tehnologijom 3D printanja od kompozitnog materijala kombinacije PLA (polaktična kiselina) i bazaltnih vlakana dobivenih iz Marsovog tla. PLA je jedan od plastomera s najmanjim koeficijentom toplinskog širenja, a bazaltna vlakna daju povećanu vlačnu čvrstoću i dobra izolacijska svojstva.

MARSH-in geometrija korištena za izradu računalnog modela aproksimirana je pomoću kombinacije pravilne dvanaesterostrane prizme i krnje dvanaesterostrane piramide kako je prikazano na Slici 20. Kao i kod ostalih modela nastambi, pri izradi modela očuvana je jednaka površina ovojnice kao bitnog faktora za izmjenu topline s vanjskim okolišem.



Slika 20 Aproximacija geometrije nastambe MARSHA u TRNSYS modelu

## 6.5. SVOJSTVA MATERIJALA ZIDOVA I PROZORA

Zbog nedostupnosti točnog sastava i toplinskih svojstava korištenih građevnih materijala, u radu je za sve nastambe korišten isti građevni materijal. Posljedično je smanjen broj varijabli u proračunu te će analiza rezultata dati informaciju o tome koja nastamba ima

optimalan oblik ovojnice sa stajališta potrebne energije za grijanje. Odabran je građevni materijal nastambe *Mars Incubator*, zbog javno dostupnih podataka o sastavu ovojnice.

Tablica 1 Toplinska svojstva materijala (vrijednosni nakon obrade materijala navedeni su u zagradi)

	<i>Bazalt</i>	<i>Polietilen</i>
$\rho, kg/m^3$	2900 (200)	950
$c_p, kJ/kgK$	800	2000
$\lambda, W/mK$	1,6 (0,03)	0,42

Građevni materijal nastambe *Mars Incubator* izrađuje se iz mješavine prosijanog bazaltnog pijeska i usitnjenog polietilena. Svojstva konstituenata građevnog materijala, preuzeta iz [15], [16] i [17], prikazana su u Tablici 1. Bazaltna vlakna, osim što povećavaju čvrstoću materijala, imaju velik utjecaj na izolacijska svojstva. Bazalt je poznata sirovina za izradu izolacijskih materijala poput mineralne vune, pa mu se svojstva nakon obrade značajno razlikuju u odnosu na sirovinu. Nakon obrade struktura je poroznija, što uzrokuje dodatan toplinski otpor i smanjenu toplinsku provodnost i gustoću (vrijednosti nakon obrade navedene su u zagradi), što predstavlja problem pri određivanju toplinskih svojstava konačnog materijala. Zbog poteškoće preciznog određivanja toplinskih svojstava materijala zida, uslijed nedostatka pouzdanog modela, svojstva zida određena su kao aritmetička sredina svojstava bazalta i polietilena, temeljem činjenice jednakog masenog udjela u smjesi iz koje se izrađuje zid.

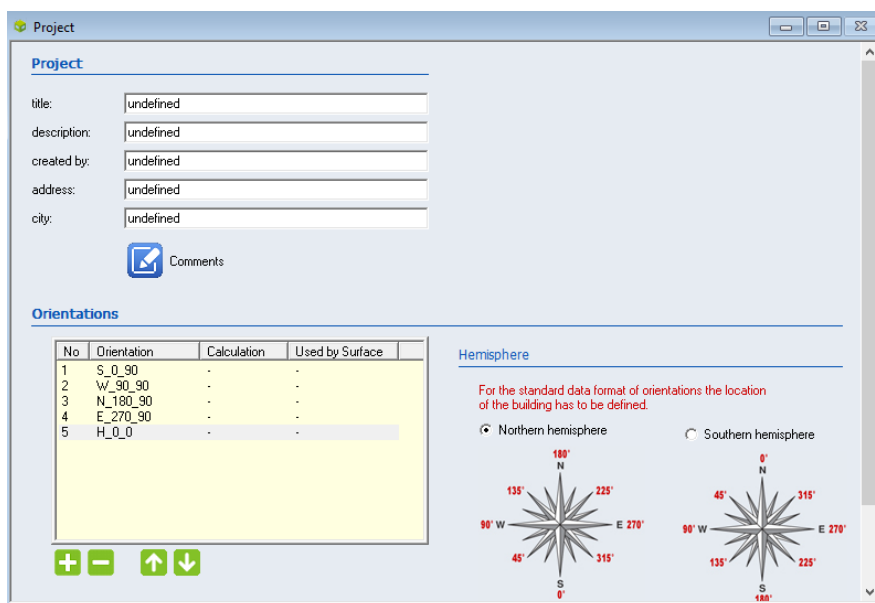
Vrsta prozora odabrana je iz baze programa TRNSYS, prema kriteriju najmanjih vrijednosti koeficijenta prolaza topline i koeficijenta propusnosti Sunčevog zračenja. Odabrani tip prozora nosi naziv Insulating, 0,4, Xenon s vrijednostima  $U = 0,4 W/m^2K$  i  $g = 0,408$ .

## 7. OPIS MODELA ZA SIMULACIJU POTROŠNJE ENERGIJE

Za analizu potreba grijanja nastambi korišten je računalni program TRNSYS (Transient System Simulation Tools). Modeli nastambi izrađeni korištenjem korisničkog sučelja TRNBuild za modeliranje višezonske zgrade, dok su energijske simulacije provedene korištenjem korisničkog sučelja Simulation Studio. Za izračun intenziteta direktnog i difuznog Sunčevog zračenja na površine nastambi razvijen je algoritam u općem programskom jeziku MATLAB, koji je dan u prilogu. U nastavku će se ukratko prikazati način rada u TRNSYS-u.

### 7.1. POSTAVKE MODELA NASTAMBE

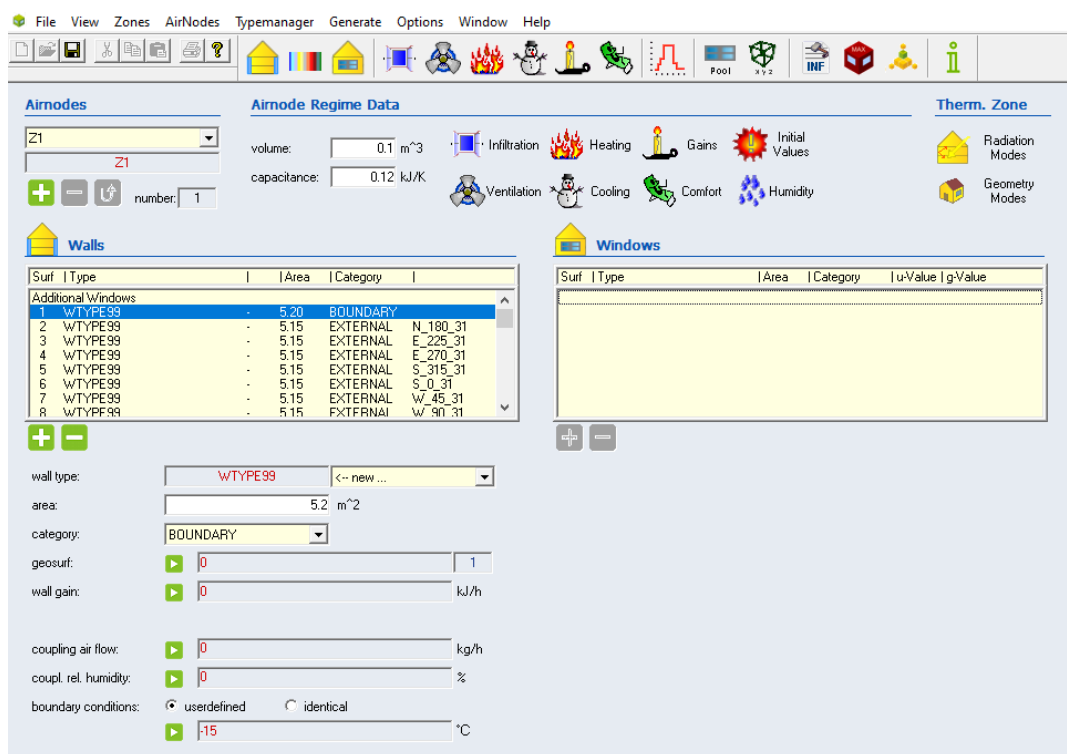
Nakon definiranja geometrije prethodno prikazanih nastambi, potrebno je njihove računalne modele izraditi unutar programa TRNBuild. Izrada modela provodi se u nekoliko koraka. Pri početku rada potrebno je izabrati na kojoj se zemljinoj polutci nalazi odabrana zgrada (Slika 21.). Nakon toga potrebno je definirati sve orijentacije ploha koje se koriste u modelu. Orijentacije se definiraju pomoću nagiba i azimuta. Orijentacije ploha kasnije će se koristiti pri definiranju zidova, krova, prozora i ostalih elemenata koji čine ovojnici zgrade (Slika 21.).



Slika 21 Definiranje orijentacija ploha

Idući korak u izradi modela je definiranje zona unutar zgrade. U ovome slučaju sve su zgrade promatrane kao jednozonske. Potom je potrebno definirati zidove, prozore i ostale elemente koji dijele promatrani prostor zgrade od ostatka okoliša ili dijele prostor zgrade na više odjeljaka. Na Slici 22. prikazan je način definiranja ploha zidova s prethodno definiranim orijentacijama. Potrebno je navesti površinu, orijentaciju određene plohe, materijal od koje je izrađena i kategoriju (graniči li s vanjskim okolišem, unutarnjim prostorom ili je rubna površina na koju je postavljen rubni uvjet).

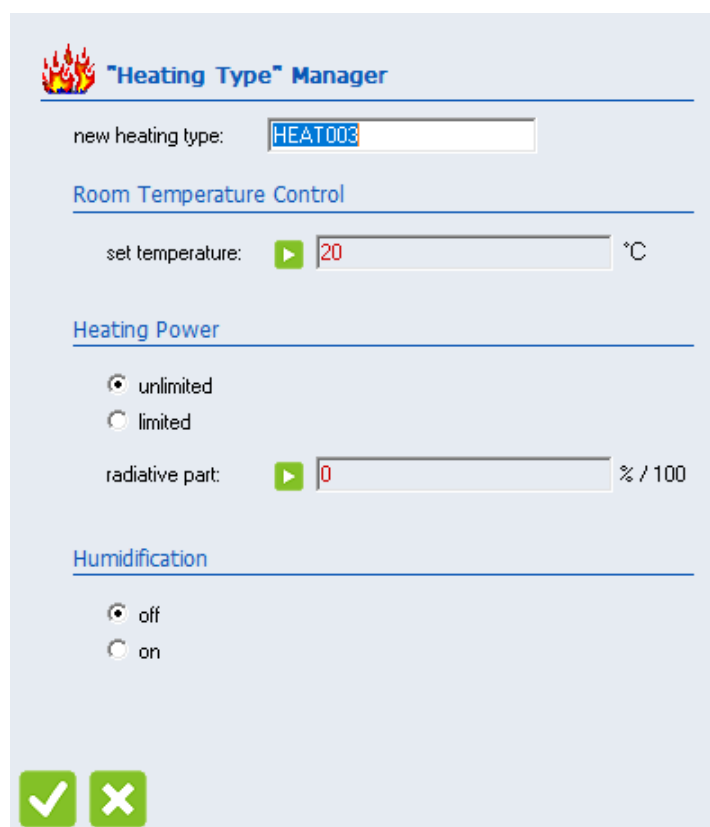
Model nastambe *Mars Incubator* na Slici 22. sastoji se od 42 plohe od kojih su 41 vanjski zidovi koji graniče s okolišem (tip ploha „external“), a jedna površina graniči s tlom konstantnog rubnog uvjeta  $-15\text{ °C}$  (tip plohe „boundary“). Modeli ostalih zgrada principijelno su isti, razlikuju se u broju i dimenzijama ploha koje graniče s vanjskim okolišem s manjim te također imaju jednu plohu s rubnim uvjetom konstantne temperature koja predstavlja pod nastambe. Rubni uvjet konstantne temperature tla preuzet je iz [18]. Materijali zidova i prozora mogu se odabrati iz baze podataka ili vlastoručno kreirati ukoliko vrsta zida nije dostupna u bazi. Nova vrsta zida definira se odabirom slojeva od kojih se zid sastoji (npr. cigla, kamena vuna, cementni špric). U modelima svih zgrada je zbog nedostatka podataka korišten isti materijal nastambe *Mars Incubator*.. Na prethodno definiranim zidovima definiraju se prozori, odnosno njihova vrsta i površina.



Slika 22 Definiranje zidova



Također je potrebno definirati režime grijanja, hlađenja, ventilacije, toplinskih dobitaka i početne uvjete. Za promatrani slučaj zgrade na površini Marsa hlađenje nije potrebno, a ventilacija nije analizirana u ovom radu. Toplinski dobitci od opreme i rasvjete nisu uzeti u obzir budući da oprema i rasvjeta nisu definirane, a toplinski dobitci od ljudi definirani kao konstantna vrijednost od 320W, što odgovara osjetnoj toplini koju odaju četiri odrasle osobe pri sjedenju ili uredskom radu. Početni uvjeti također nemaju značajan utjecaj na rezultat simulacije uzmemo li u obzir trajanje godine na Marsu od preko 16 000 sati. Preostalo je definirati režim grijanja za koji je odabrana konstantna temperatura od 20°C, uzevši u obzir cjelodnevni boravak astronauta unutar nastambe uz tek povremene izlaske radi prikupljanja uzoraka ili održavanja opreme. Definiranje režima grijanja prikazano je na Slici 23.



**Heating Type Manager**

new heating type:

**Room Temperature Control**

set temperature:  °C

**Heating Power**

unlimited  
 limited

radiative part:  % / 100

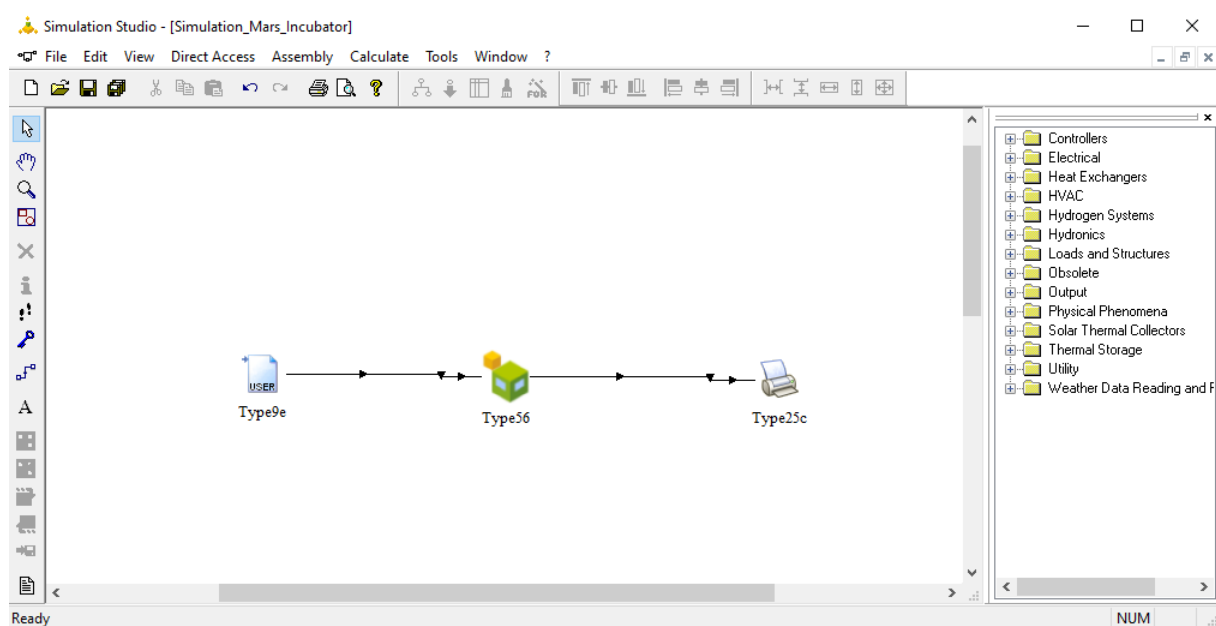
**Humidification**

off  
 on

Slika 23 Definiranje režima grijanja

## 7.2. POSTAVKE RAČUNALNE SIMULACIJE

Nakon izrade modela nastambi korištenjem korisničkog sučelja TRNBuild potrebno je povezivanje modela nastambe s meteorološkim uvjetima na lokaciji te modulom za obradu izlaznih podataka simulacije korištenjem sučelja Simulation Studio. Slika 24. prikazuje korisničko sučelje programa sa svim komponentama simulacije.



Slika 24 Sučelje računalnog programa Simulation Studio

Glavni model sastoji se tri osnovne komponente potrebne za provođenje simulacije. Komponenta *Type9e* učitava podatke o uvjetima okoliša (direktno i ukupno zračenje te vanjske temperature) koji su prethodno izračunati u MATLABU prema opisu u prethodnom poglavlju 4. *Type56* komponenta sadrži sve informacije o geometriji, sastavu i režimima korištenja nastambe, prema opisu u poglavlju 7.1. Posljednja komponenta je pisač (*Type25c*) koji izlazne podatke simulacije zapisuje u izlazni datoteku u obliku matrice. Simulacija se pokreće u izborniku odabirom opcije *Run Simulation* nakon što su definirani početni (prvi sat u godini) i krajnji (zadnji sat u godini) trenutak simulacije te vremenski korak koji je u ovom slučaju iznosio 1 sat.

Classic Table

Select variable filter : All

Component	Value
Ukupno_zracenje	0
Direktno_zracenje	0
Difuzno_zracenje	0
Temperatura	0
Output 5	0
Output 6	0
Output 7	0
Output 8	0
Output 9	0
Output 10	0
Output 11	0
Output 12	0
Output 13	0
Output 14	0
Output 15	0
Output 16	0
Output 17	0
Output 18	0
Output 19	0
Output 20	0
Output 21	0
Output 22	0
Output 23	0

USER

1- TAMB 0

2- RELHUMAMB 0

3- TSKY 0

4- TSGRD 0

5- AZEN 0

6- AAZM 0

7- IT\_H\_0\_0 0

8- IT\_N\_180\_90 0

9- IT\_E\_240\_90 0

10- IT\_E\_300\_90 0

11- IT\_S\_0\_90 0

12- IT\_W\_60\_90 0

13- IT\_W\_120\_90 0

14- IT\_N\_180\_32 0

15- IT\_E\_240\_32 0

16- IT\_E\_300\_32 0

17- IT\_S\_0\_32 0

18- IT\_W\_60\_32 0

19- IT\_W\_120\_32 0

20- IB\_H\_0\_0 0

21- IB\_N\_180\_90 0

22- IB\_E\_240\_90 0

23- IB\_E\_300\_90 0

Slika 25 Primjer povezivanja ulaznih i izlaznih komponenti TRNSYS-a

## 8. REZULTATI SIMULACIJE

Rezultati provedenih simulacija dali su odgovor na pitanje koja od nastambi prezentiranih na natjecanju *NASA's 3D-printed Habitat Challenge* ima najmanje godišnje potrebe energije za grijanje u ovisnosti o geometriji zgrade, odnosno pod pretpostavkom da su sve izgrađene od istog materijala. Rezultati također daju dobru ocjenu energetskih potreba za grijanje zgrade životnog prostora 110 m<sup>2</sup>, koja odgovara dugoročnom smještaju za 4 odrasle osobe. U budućnosti kolonizacije Marsa ovakve zgrade mogu biti ekvivalent obiteljske kuće na Zemlji te podaci dobiveni simulacijom mogu biti dobar pokazatelj pri osnivanju i planiranju potrošnje energije sa stajališta grijanja.

Tablica 2 prikazuje potrebe grijanja nastambe *MARSHA* za dva slučaja. U prvome slučaju zanemareni su solarni toplinski dobici, dok je u drugome slučaju zračenje na sve plohe nastambe aproksimirano zračenjem na horizontalnu plohu. U četvrtome stupcu tablice prikazano je postotno odstupanje u iznosu godišnjih potreba grijanja u odnosu na prvi slučaj. Usporedbom je utvrđen zanemariv utjecaj solarnih toplinskih dobitaka na ukupnu potrebu energije grijanja. Iz rezultata prikazanih u tablici može se zaključiti da se zračenje na plohe svih orijentacija može aproksimirati zračenjem horizontalne plohe, što unosi zanemarivu pogrešku u modele.

Tablica 2 Analiza utjecaja solarnih toplinskih dobitaka

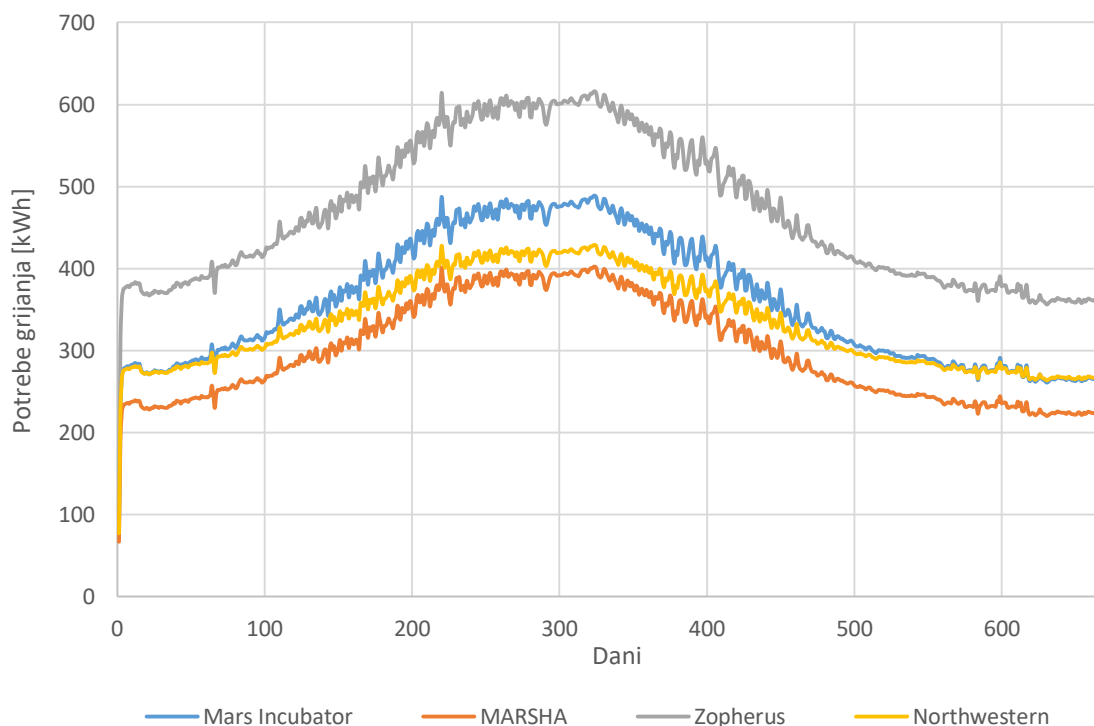
	<i>MARSHA</i>	<i>MARSHA</i> (bez solarnih dobitka)	Odstupanje
<i>dnevni min (kWh)</i>	220	223	+1,4%
<i>dnevni max (kWh)</i>	402	109	+1,2%
<i>dnevni prosjek</i>	299	303	+1,3%
<i>ukupno godišnje (<math>\frac{kWh}{m^2}</math>)</i>	1818	1840	+1,2%

Rezultati analize prikazani su u Tablici 3 za sve četiri analizirane nastambe. Podaci u prva tri retka daju ekstremne i prosječne vrijednosti dnevnih potreba energije za grijanje, a u zadnjem retku prikazani su podaci ukupnih potreba energije za grijanje po kvadratnom metru. Iz rezultata je jasno vidljivo da je energetski najučinkovitija, odnosno ima optimalni oblik sa stajališta grijanja, nastamba *MARSHA*. Godišnja potrebna energije za grijanje za ovu nastambu iznosi 1818 kWh/m<sup>2</sup>.

Tablica 3 Potrebna energija za grijanje

	MARSHA	Mars Incubator	Zopherus	Northwestern
dnevni min (kWh)	220	261	356	264
dnevni max(kWh)	402	489	616	429
dnevni prosjek	299	360	470	335
ukupno godišnje ( $\frac{kWh}{m^2}$ )	1818	2186	2851	2037

Na Slici 26. prikazano je kretanje dnevnih potreba za grijanje svake od analiziranih nastambi. Očekivano se potrebe grijanja približno poklapaju s kretanjem vanjske temperature kroz godinu. Među nastambama se zbog iznimno velike potrošnje izdvaja ona tvrtke *Zopherus*, na dijagramu označena sivom bojom. Znatno veću potrošnju energije moguće je objasniti većom površinom za izmjenu topline koja nastaje kao rezultat načina konstrukcije nastambe. *Zopherus* nastamba sastoji se od tri zasebne zgrade zbog čega nastamba u cjelini ima puno veće transmisijske gubitke. Simulacija *Zopherus* nastambe provedena je s pretpostavkom konstantne unutarnje temperature unutar sve tri zgrade. Međutim, planiranjem rasporeda grijanja moguće je smanjiti ukupne potrebe grijanja ako se uzme u obzir da su zgrade jasno podijeljene po funkcijama te ne zahtijevaju pun kapacitet grijanja tokom cijeloga dana.



Slika 26 Dnevna potrebna energija za grijanje

Na Slici 26. može se uočiti da je druga najučinkovitija nastamba sveučilišta *Northwestern* s godišnjim potrebama grijanja 2037 kWh/m<sup>2</sup>. Velik dio godine energetske potrebe grijanja neznatno se razlikuju od potreba grijanja *MARSHA-e*. Tablica 4 prikazuje ukupne površine izmjene topline za svaku nastambu podijeljene na pod (boundary) i ovojnica, odnosno zidove (exterior). Nastamba sveučilišta *Northwestern* ima najveću površinu poda zbog karakteristične konstrukcije te rubni uvjet postavljen na plohu poda ima velik utjecaj u ukupnom iznosu energije potrebne za grijanje. Budući da je rubni uvjet konstantne temperature poda preuzet iz [18], dobiven na principu teorijskog razmatranja i analogije sa temperaturom tla na Zemlji, postoji mogućnost da je stvarna temperatura tla ipak nešto niža. Temperatura tla ovisi o lokaciji, odnosno geografskom smještaju, što također nije uzeto u obzir.

Tablica 4 Karakteristike nastambi

	<i>MARSHA</i>	<i>Mars Incubator</i>	<i>Zopherus</i>	<i>Northwestern</i>
<i>pod(m<sup>2</sup>)</i>	28,3	5,2	117	157,5
<i>ovojnica(m<sup>2</sup>)</i>	245,4	307,0	351,1	222,5
<i>grijanje(<math>\frac{kWh}{m^2}</math>)</i>	1818	2186	2851	2037

## 9. ZAKLJUČAK

Svrha rada bila je dati uvid u problem osnivanja održivih nastambi na Marsu, analizirati postojeće rubne uvjete bitne za održavanje uvjeta toplinske ugodnosti unutar nastambi i analizirati modele nastambi prezentiranih na natjecanju *NASA's 3D-printed Habitat Challenge*. Cilj rada bio je analizirati koje od nastambi zadovoljavaju uvjete bitne za održivo stanovanje ljudi na Marsu, te potom odrediti koja je od nastambi najučinkovitija sa stajališta potreba grijanja. Izračun godišnje potrebne energije za grijanje proveden je korištenjem računalnog programa za energetsko modeliranje, TRNSYS.

Analizirane su 4 nastambe prezentirane na natjecanju *NASA's 3D-printed Habitat Challenge*. Modeli za provođenje simulacija izrađeni su na osnovu javno dostupnih materijala o geometriji zgrada. Satni podaci temperature na Marsu preuzeti su s NASA-inih stranica, a iznosi Sunčevog zračenja izračunati su pomoću proračuna preuzetog iz NASA-inog dokumenta koji govori o intenzitetu Sunčevog zračenja na Marsu pomoću računalnog programa MATLAB. Uslijed nedostatka informacija o točnim dimenzijama nastambi te sastavu i toplinskim svojstvima zidova i prozora, modeli su izgrađeni pod pretpostavkom jednakog životnog prostora od 110 m<sup>2</sup>, zadovoljavajući uvjet natjecanja o minimalnoj korisnoj kvadraturi od 93 m<sup>2</sup>. Tijekom izrade modela vođeno je računa o zadržavanju proporcija i oblika zgrada. Svojstva materijala zida određena su kao prosjek svojstava materijala od kojih je zid izrađen. Materijal prozora odabran je iz baze podataka TRNSYS-a, po kriteriju visokih izolacijskih svojstava, radi smanjenja toplinskih gubitaka. Vrsta zidova i prozora jednaki su u modelima sve četiri nastambe. Odabirom navedenih postavki naglasak je stavljen na određivanje optimalnog oblika ovojnice nastambe za okoliš Marsa. Pretpostavljen je cjelodnevni period korištenja nastambi s održavanjem konstantne unutarnje temperature od 20°C, uz dostupnost neograničenog izvora topline. Sve nastambe modelirane su kao jednozonske zgrade uz iznimku *Zopherus* nastambe koja se sastoji od tri zasebne, također jednozonske zgrade. Unutarnji dobici od ljudi definirani su konstantnom vrijednošću od 320 W, podatak je dobiven kao umnožak osjetne topline koju odaje četvero odraslih ljudi prilikom mirnog boravka u prostoru, a konstantan vrijednost odabrana je uzevši u obzir da će astronauti većinu vremena boraviti unutar nastambe s povremenim izlascima radi prikupljanja uzoraka i održavanja opreme. Toplinski dobici od opreme su zanemareni zbog nemogućnosti precizne procjene njihova iznosa. Za temperaturu tla odabran je rubni uvjet srednje godišnje temperature, konstantne vrijednosti od -15°C.

Računalna simulacija u TRNSYS-u provedena je za svaki sat u godini, odnosno za 16056 sati. Na temelju rezultata simulacije može se zaključiti da najmanje godišnje potrebe energije za grijanje, od 1818 kWh/m<sup>2</sup>, ima pobjednik natjecanja – *MARSHA*. Nakon nje slijedi

nastamba sveučilišta *Northwestern* s godišnjim potrebama grijanja od 2037 kWh/m<sup>2</sup>, te *Mars Incubator* s 2186 kWh/m<sup>2</sup>. Najveće potrebe grijanja, od 2851 kWh/m<sup>2</sup>, dobivene su za nastambu tvrtke *Zopherus*, čiji se modularni dizajn nastambe sastavljen od tri zasebne zgrade pokazao kao najlošiji izbor sa stajališta energetske učinkovitosti sustava grijanja.

Potrebe grijanja moguće je smanjiti odabirom materijala boljih izolacijskih svojstava i većom debljinom zidova, odnosno izolacijskog sloja. Detaljnija usporedba energetske učinkovitosti nastambi treba uključivati podatke o toplinskim svojstvima građevnih materijala, te uzeti u obzir energiju potrebnu za održavanje kvalitete zraka zbog konstantne potrebe proizvodnje kisika nepostojanog u atmosferi na Marsu. Energetsku potrošnju opreme, rasvjete i sustava za proizvodnju hrane također treba uzeti u obzir.

Zaštita od kratkovalnog i kozmičkog zračenja također je važna karakteristika nastambi za siguran dugotrajan boravak ljudi na Marsu, a koja nije razmatrana u sklopu rada. Izloženost zračenju pri putovanju do Marsa premašuje zdravstveno prihvatljive doze popisane za astronaute tijekom cijelog radnog vijeka. Posljedično, na planetu s tankom atmosferom i bez jake magnetosfere, ovojnice nastambi biti će jedina zaštita od zračenja i važna stavka u održavanju zdravlja stanovnika nastambi. Prije konačne ocijene nastambi potrebno je stoga osim energetske efikasnosti i konstrukcijske stabilnosti posebno razmotriti kriterij zaštite od zračenja.



## 10. POPIS LITERATURE

- [1] <https://spacenews.com/letter-safety-cant-come-first-if-we-want-to-put-humans-on-mars/>
- [2] [https://www.esa.int/ESA\\_Multimedia/Images/2003/08/Shortest\\_distance\\_between\\_Earth\\_and\\_Mars](https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Images/2003/08/Shortest_distance_between_Earth_and_Mars)
- [3] <https://mars.nasa.gov/insight/weather/>
- [4] <https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19890018252.pdf>
- [5] <https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20040191326.pdf>
- [6] Duffie, Beckman. Solar Engineering of Thermal Processes. 4th Ed
- [7] Percec Tadić, Jurković, Gajic-Čapka. Baza klimatskih podataka za izracun energerskih svojstava zgrade
- [8] [https://www-k12.atmos.washington.edu/k12/resources/mars\\_data-information/data.html](https://www-k12.atmos.washington.edu/k12/resources/mars_data-information/data.html)
- [9] <https://www.jpl.nasa.gov/missions/viking-2/>
- [10] <https://www.marsincubator.com/nasa-centennial-challenge/>
- [11] <https://www.washingtonpost.com/>
- [12] <https://sites.northwestern.edu/nasachallenge/virtual-design-level-1/>
- [13] [https://sites.northwestern.edu/nasachallenge/habitat\\_modeling/](https://sites.northwestern.edu/nasachallenge/habitat_modeling/)
- [14] <https://www.pinterest.com/pin/614248836664439177/>
- [15] <https://hr.dreamstructuredesignbuild.com/bazaltovaja-mineralnaja-plita.html>
- [16] [http://repositorij.fsb.hr/888/1/11\\_02\\_2010\\_Igor\\_Salov\\_Zavrzni\\_Rad.pdf](http://repositorij.fsb.hr/888/1/11_02_2010_Igor_Salov_Zavrzni_Rad.pdf)
- [17] Kuzma Ražnjević, Termodinamičke tablice
- [18] <http://articles.adsabs.harvard.edu/full/seri/JBAA./0079/0000285.000.html#0000284.00>

## 11. POPIS LITERATURE SLIKA I TABLICA

Slika 1 Izgled reljefa na Marsu [1] .....	4
Slika 2 Trajektorija putovanja među planetima [1] .....	6
Slika 3 Kretanje temperature tijekom dana [1] .....	8
Slika 4 Kretanje ekstremnih vrijednosti temperature tijekom godine.....	8
Slika 5 Ovisnost temperature o visini.....	9
Slika 6 Dnevno Sunčevo zračenje na horizontalnu plohu na površini Marsa [4].....	11
Slika 7 Utjecaj optičke dubine na iznos i raspodjelu Sunčevog zračenja [5] .....	11
Slika 8 Vrijednosti kuta sata za odgovarajuće vrijeme [4].....	15
Slika 9 Kretanje optičke dubine tijekom jedne godine [4] .....	17
Slika 10 Koeficijent $f(z,\tau)$ kao funkcija optičke dubine i kuta zenita [4] .....	18
Slika 11 Podaci s Viking Landera 2 [8] .....	20
Slika 12 Viking Lander 2 [9] .....	21
Slika 13 Mars Incubator Habitat i aproksimacija geometrije u TRNSYS modelu [10] .....	23
Slika 14 Zopherus nastamba s robotom [11].....	24
Slika 15 Aproksimacija geometrije Zopherus nastambe u TRNSYS modelu.....	25
Slika 16 Nastamba sveučilišta Northwestern University [12] .....	26
Slika 17 Unutrašnjost i neiskorišten prostor nastambe [13].....	27
Slika 18 Aproksimacija geometrije nastambe Northwestern University u TRNSYS modelu .....	27
Slika 19 MARSHA unutarnja struktura [14] .....	28
Slika 20 Aproksimacija geometrije nastambe MARSHA u TRNSYS modelu .....	29
Slika 21 Definiranje orijentacija ploha .....	31
Slika 22 Definiranje zidova .....	32
Slika 23 Definiranje režima grijanja .....	33
Slika 24 Sučelje računalnog programa Simulation Studio.....	34
Slika 25 Primjer povezivanja ulaznih i izlaznih komponenti TRNSYS-a .....	35
Slika 26 Dnevna potrebna energija za grijanje .....	37
Tablica 1 Toplinska svojstva materijala (vrijednosni nakon obrade materijala navedeni su u zagradi) 30	
Tablica 2 Utjecaj solarnih toplinskih dobitaka.....	36
Tablica 3 Potrebna energija za grijanje .....	37
Tablica 4 Karakteristike nastambi.....	38

## 12. PRILOG

### MATLAB ALGORITAM ZA IZRAČUN SUNČEVOG ZRAČENJA HORIZONTALNA PLOHA

```

clear;
clc;

fi=47.7; %stupnjeva %geografska širina
fi_satno=fi*ones(16056,1);
fi_dnevno=fi*ones(669,1);

G_ob_satno=xlsread('Globalno_zracenje.xlsx');
Ls=xlsread('Longitude_solar.xlsx');
deklinacija_satno=xlsread('Deklinacija2.xlsx');
tau=xlsread('Opticka_dubina_satno.xlsx');
f_tau_z=xlsread('F_tau_z.xlsx');
I_bh=xlsread('I_bh.xlsx');

kut_sata=(repmat(-172.5:15:172.5,1,669))';
kut_sata2=kut_sata+15;
kut_sata2(kut_sata2>180)=-172.5;

[anomalija,deklinacija]=funkcija1(Ls);
[G_ob,kut_zenita]=funkcija2(anomalija,fi_satno,deklinacija_satno,kut_sata);
G_obh=funkcija3(G_ob_satno,kut_zenita);
[kut_zalaska_sunca,Td]=funkcija4(fi_dnevno,deklinacija);
H_obh = funkcija5(G_ob,kut_zalaska_sunca,fi_dnevno,deklinacija);
[G_b,G_bh,I_h,I_dh]=funkcija6(G_ob_satno,kut_zenita,tau,fi_satno,deklinacij
a_satno,f_tau_z,kut_sata,kut_sata2,I_bh);
sinus=funkcija7(kut_sata2,kut_sata);

function [anomalija,deklinacija] = funkcija1(Ls)
    anomalija=Ls-248; %stupnjeva
    delta_0=24.936; %stupnjeva %kut nagiba Marsove osi
    deklinacija=asin(sin(delta_0*pi()/180)*sin(Ls*pi()/180))*180/pi();
    %rjesenje u stupnjevima
end
function [G_ob,kut_zenita] =
funkcija2(anomalija,fi_satno,deklinacija_satno,kut_sata)
    e=0.093377; %AU % ekscentricnost
    G_ob=590*((1+e*cos(anomalija*pi()/180)).^2)/(1-e^2)^2;

    kut_zenita=acos((sin(fi_satno*pi()/180)).*(sin(deklinacija_satno*pi()/180))
+(cos(fi_satno*pi()/180)).*(cos(deklinacija_satno*pi()/180)).*cos(kut_sata*
pi()/180))*180/pi());
    % u stupnjevima
end
function [G_obh] = funkcija3(G_ob_satno,kut_zenita)
    G_obh=G_ob_satno.*cos(kut_zenita*pi()/180);
    G_obh(cos(kut_zenita*pi()/180)<0)=0;
end
function [kut_zalaska_sunca,Td] = funkcija4(fi_dnevno,deklinacija)
    kut_zalaska_sunca=acos(-

```

```

tan(fi_dnevno*pi()/180).*tan(deklinacija*pi()/180))*180/pi();
    Td=2/15*kut_zalaska_sunca;
end
function H_obh = funkcija5(G_ob,kut_zalaska_sunca,fi_dnevno,deklinacija)

H_obh=24/pi()*G_ob.*(2*pi()/360*kut_zalaska_sunca.*sin(fi_dnevno*pi()/180).
.*sin(deklinacija*pi()/180)+cos(fi_dnevno*pi()/180).*cos(deklinacija*pi()/180)).*sin(kut_zalaska_sunca*pi()/180));
end
function [G_b,G_bh,I_h,I_dh] =
funkcija6(G_ob_satno,kut_zenita,tau,fi_satno,deklinacija_satno,f_tau_z,kut_sata,kut_sata2,I_bh)

    G_b=G_ob_satno.*exp(-tau.*sec(kut_zenita*pi()/180));
    G_b(exp(tau.*sec(kut_zenita*pi()/180))<1)=0;
    G_bh=G_ob_satno.*cos(kut_zenita*pi()/180).*exp(-
tau.*sec(kut_zenita*pi()/180));
    G_bh(exp(tau.*sec(kut_zenita*pi()/180))<1)=0;
    I_h=12/(0.9*pi())*G_ob_satno.*f_tau_z.*(2*pi()/360*(kut_sata2-
kut_sata).*sin(fi_satno*pi()/180).*sin(deklinacija_satno*pi()/180)+cos(fi_s
atno*pi()/180).*cos(deklinacija_satno*pi()/180)).*(sin(kut_sata2*pi()/180)-
sin(kut_sata*pi()/180));
    % I_h u Whr/m^2
    I_dh=I_h-I_bh;
    I_dh(I_dh<0)=0;
    I_h=I_dh+I_bh;
end

```

## MATLAB ALGORITAM ZA IZRAČUN SUNČEVOG ZRAČENJA KOSA PLOHA

```

%Proračun zračenja na kosu plohu
clc;
clear;

fi=47.7; %stupnjeva %geografska širina
fi_satno=fi*ones(16056,1);

deklinacija_satno=xlsread('Deklinacija2.xlsx');
kut_sata=(repmat(-172.5:15:172.5,1,669))';
I_bh=xlsread('Direktno_zracenje.xlsx');
I_dh=xlsread('Difuzno_zracenje.xlsx');
kut_zenita=xlsread('Kut_zenita.xlsx');

azimut=0;
slopee=0;

azimuth=azimut*ones(16056,1);
slope=slopee*ones(16056,1);

[kut_upada,kos_kut_upada]=funkcija(deklinacija_satno,fi_satno,slope,azimuth
,kut_sata);
R_b=funkcija2(kut_upada,kut_zenita);
[I_b,I_d,I]=funkcija3(I_bh,I_dh,R_b,slope);

```

```

function [kut_upada,kos_kut_upada] =
funkcija(deklinacija_satno,fi_satno,slope,azimuth,kut_sata)

kut_upada=acos((sin(deklinacija_satno*pi()/180)).*(sin(fi_satno*pi()/180)).
*(cos(slope*pi()/180))-
(sin(deklinacija_satno*pi()/180)).*(cos(fi_satno*pi()/180)).*(sin(slope*pi(
)/180)).*(cos(azimuth*pi()/180))+cos(deklinacija_satno*pi()/180)).*(cos(fi
_satno*pi()/180)).*(cos(slope*pi()/180).*cos(kut_sata*pi()/180))+cos(dekli
nacija_satno*pi()/180)).*(sin(fi_satno*pi()/180)).*(sin(slope*pi()/180)).*(
cos(azimuth*pi()/180)).*(cos(kut_sata*pi()/180))+cos(deklinacija_satno*pi(
)/180)).*(sin(slope*pi()/180)).*(sin(azimuth*pi()/180)).*(sin(kut_sata*pi(
)/180)))*180/pi();

kos_kut_upada=(sin(deklinacija_satno*pi()/180)).*(sin(fi_satno*pi()/180)).*
(cos(slope*pi()/180))-
(sin(deklinacija_satno*pi()/180)).*(cos(fi_satno*pi()/180)).*(sin(slope*pi(
)/180)).*(cos(azimuth*pi()/180))+cos(deklinacija_satno*pi()/180)).*(cos(fi
_satno*pi()/180)).*(cos(slope*pi()/180).*cos(kut_sata*pi()/180))+cos(dekli
nacija_satno*pi()/180)).*(sin(fi_satno*pi()/180)).*(sin(slope*pi()/180)).*(
cos(azimuth*pi()/180)).*(cos(kut_sata*pi()/180))+cos(deklinacija_satno*pi(
)/180)).*(sin(slope*pi()/180)).*(sin(azimuth*pi()/180)).*(sin(kut_sata*pi(
)/180));
end
function R_b = funkcija2(kut_upada,kut_zenita)
R_b=cos(kut_upada*pi()/180)./cos(kut_zenita*pi()/180);
R_b(cos(kut_upada*pi()/180)<0.07 | cos(kut_zenita*pi()/180)<0.07)=0;
end
function [I_b,I_d,I]=funkcija3(I_bh,I_dh,R_b,slope)
I_b=I_bh.*R_b;
I_d=0.5*I_dh.*(1+cos(slope*pi()/180));
I=I_b+I_d;
end

```