

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

Mislav Brnčić

*Simulacija potrebne energije za grijanje nastambi na  
Marsu*



Zagreb, 2022.

*Ovaj rad izrađen je na Fakultetu strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu (FSB) u Laboratoriju za energetske učinkovitost pod vodstvom mentorice, izv. prof. dr. sc. Tee Žakula. Predan je na natječaj za dodjelu Rektorove nagrade u akademskoj godini 2021./2022.*

*Mislav Brnčić*

## *Sadržaj*

1.	Uvod .....	1
2.	Opći i specifični ciljevi rada.....	3
3.	Atmosferski uvjeti na Marsu .....	4
3.1.	Vanjska temperatura .....	4
3.2.	Atmosferski tlak .....	6
3.3.	Zračenje .....	7
4.	Opis analiziranih nastambi s natjecanja NASA's 3D-printed Habitat Challenge.....	10
4.1.	Nastamba Mars Incubator Habitat .....	11
4.2.	Nastamba Zopherus .....	12
4.3.	. Nastamba Northwestern University.....	14
4.3.	Nastamba MARSHA .....	16
5.	Ulazni parametri energijskog modela.....	19
5.1.	Vanjska temperatura i temperatura tla.....	19
5.2.	Sunčevo zračenje .....	20
5.2.1.	Proračun zračenja na horizontalnu plohu .....	21
5.2.2.	Proračun zračenja na kosu plohu.....	25
5.3.	Koeficijent prijelaza topline s vanjske strane .....	26
5.3.1.	Proračun za nastambe Mars Incubator i Northwestern University.....	27
5.3.2.	Proračun za nastambe MARSHA i Zopherus.....	28
5.4.	Toplinska svojstva materijala zidova i prozora .....	29
6.	Rezultati .....	32
6.1.	Utjecaj geometrije ovojnice i korekcije temperature.....	32
6.2.	Usporedba okoliša Marsa i Zemlje.....	33
6.3.	Utjecaj noćnog smanjenja temperature.....	35
6.4.	Utjecaj toplinskih svojstava zidova .....	36
7.	Rasprava i zaključak.....	39
8.	Sažetak .....	41
9.	Summary .....	43

## *Popis slika*

Slika 1 Promjena temperature tijekom sola (dana na Marsu) [7].....	5
Slika 2 Promjena ekstremnih vrijednosti vanjske temperature tijekom godine .....	5
Slika 3 Ovisnost vanjske temperature o visini [8].....	6
Slika 4 Promjena atmosferskog tlaka tijekom godine [9] .....	7
Slika 5 Dnevno sunčevo zračenje na horizontalnu plohu na površini Marsa [11].....	8
Slika 6 Utjecaj optičke dubine na iznos i raspodjelu sunčevog zračenja [25] .....	9
Slika 7 Nastamba Mars Incubator Habitat i aproksimacija geometrije u TRNSYS energijskom modelu [26] .....	11
Slika 8 Nastamba tvrtke Zopherus [27].....	13
Slika 9 Aproksimacija geometrija nastambe Zopherus u TRNSYS energijskom modelu.....	14
Slika 10 Nastamba Northwestern University [28] .....	15
Slika 11 Aproksimacija geometrije nastambe Northwestern University u TRNSYS energijskom modelu.....	16
Slika 12 Nastamba MARSHA [29].....	17
Slika 13 Aproksimirana geometrija nastambe MARSHA u TRNSYS energijskom modelu ..	18
Slika 14 Primjer satnih vrijednosti temperature, tlaka te brzine i smjera vjetra [15].....	19
Slika 15 Vrijednosti kuta sata za određeno vrijeme [11] .....	22
Slika 16 Kretanje vrijednosti optičke dubine tijekom godine [11] .....	23
Slika 17 Koeficijent $f(z,\tau)$ kao funkcija optičke dubine i kuta zenita [11].....	24
Slika 18 Svojstva ugljičnog dioksida u termodinamičkim tablicama [21].....	27
Slika 19 Izolacijski materijal nastao nakon obrade bazaltnih vlakana [30] .....	30
Slika 20 Usporedba potrebne energije za grijanje za četiri analizirane nastambe .....	32
Slika 21 Usporedba godišnje potrebne energije za grijanje na Marsu i na Zemlji.....	34
Slika 22 Utjecaj koeficijenta prijelaza topline na godišnje potrebe grijanja.....	35
Slika 23 Usporedba godišnje potrebne energije za grijanje sa i bez smanjenja temperature tijekom noći.....	36
Slika 24 Ovisnost potreba grijanja o toplinskoj provodnosti i debljini zida .....	37
Slika 25 Ovisnost potreba grijanja o toplinskoj provodnosti i debljini izolacije .....	38

## *Popis tablica*

Tablica 1 Rezultati proračuna koeficijenta prijelaza topline za nastambe Mars Incubator i Northwestern University .....	28
Tablica 2 Rezultati proračuna koeficijenta prijelaza topline za nastambe MARSHA i Zopherus .....	29

## 1. Uvod

Slanje ljudske posade i osnivanje održive kolonije na planetu Marsu ubraja se u jedan od najvećih izazova današnjice. SpaceX optimistično predviđa dolazak prve misije s ljudskom posadom već 2029. godine, dok je NASA za isti cilj predvidjela desetak godina duži vremenski period. Uvjeti na Marsu nepogodni su za ljude i održavanje života općenito, a razlika u orbitalnim periodima obilaska Zemlje i Mars oko Sunca omogućava putovanje između dva planeta tek svake dvije godine. Zbog toga misije s ljudskom posadom podrazumijevaju izgradnju nastambi za dugotrajan smještaj ljudi, a koje ih mogu zaštititi od štetnih vanjskih utjecaja. Međutim, nedostupnost materijala i nedostatak radne snage predstavlja konstrukcijski izazov za izgradnju takvih nastambi.

Iz toga je razloga, a s ciljem razvoja idejnih rješenja i tehnologija autonomne gradnje nastambi, NASA 2015. godine pokrenula natjecanje *NASA's 3D printed Habitat Challenge* [1]. Na natjecanju je prezentiran velik broj idejnih rješenja autonomne i poluautonomne gradnje nastambi, od kojih su neke prošle kroz sve faze natjecanja.. U trećoj fazi natjecanja [2] izvršena su ispitivanja mehaničkih svojstava dijelova nastambi, poput ispitivanja mehaničke čvrstoće, udarne čvrstoće i hidrostatskog testa s ciljem utvrđivanja mehaničke stabilnost pojedinih nastambi. Međutim, nije provedena niti jedna analiza vezano uz energetske zahtjeve, a što može predstavljati veliku prepreku izgradnji takvih nastambi s obzirom na ekstreme uvjete na Marsu . Stoga su u ovom su radu provedene upravo takve analize, a kojima se za četiri natjecateljske nastambe analiziraju energetske potrebe za grijanje. Pri tome su izabrane nastambe koje idejno i oblikom ovojnice predstavljaju različite koncepte korištenja tehnologije 3D printanja pri različitim stupnjevima autonomne gradnje.

Uvjeti okoliša na Marsu uvelike se razlikuju od onih na Zemlji. Sastav atmosfere čini 95%  $CO_2$ , uz manji udio dušika od 2% [3], a atmosferski tlak postiže vrijednosti ispod 80 mbar [4]. Vanjska temperatura uglavnom se kreće se u rasponu od  $-85^{\circ}C$  do  $-5^{\circ}C$  [5], iako su izmjerene temperature koje izlaze iz navedenog raspona. Vrijednost sunčevog zračenja koje dolazi na površinu Marsa također je znatno niže u odnosu na Zemlju [5]. Navedene uvjete potrebno je uzeti u obzir pri izradi energijskog modela i određivanja potreba nastambi.

Jedan od glavnih izazova ovoga rada bio je istražiti i definirati potrebne ulazne parametre za provođenje simulacija godišnje potrebne energije za grijanje. Primjerice, dostupnost podataka o vanjskim temperaturama, sunčevom zračenju, brzinama vjetra i slično nisu široko dostupna kao što je slučaj za uvjete na Zemlji. Nadalje, ovisnost simulacija o određenih ulaznim parametrima se potencijalno može razlikovati u odnosu na simulacije na Zemlji. Primjerice, promjena temperature po visini nastambe je zanemariv parametar na Zemlji, ali zbog znatno većeg gradijenta temperatura po visini može biti značajan parametar za nastambe na Marsu. Ovakvih primjera je mnogo, te su neki od njih obrađeni u ovome radu.

Cilj ovoga rada je provesti analizu atmosferskih uvjeta na Marsu i odrediti na koji način utječu na godišnju potrebu energije za grijanje nastambe za smještaj ljudi. U prvome dijelu rada dan je opis atmosferskih uvjeta koji su ključni ulazni parametar za simulaciju potreba grijanja. Nakon toga dan je opis odabranih nastambi s natjecanja *NASA's 3D printed Habitat Challenge* te su opisani energijski modeli nastambi razvijeni u programu za dinamičke računalne simulacije, TRNSYS. Na osnovu provedenih dinamičkih simulacija prikazana je analiza potrebne energije za grijanje te utjecajnih parametara pri simulaciji energetske potrebe nastambi na Marsu.

## ***2. Opći i specifični ciljevi rada***

Cilj rada je analiza utjecajnih parametara za simulaciju potrebne energije grijanja na Marsu. Pregledom dostupne literature uočen je nedostatak analize toplinskih svojstava nastambi i potrošnje energije svih energijskih sustava, pa tako i sustava grijanja. U sklopu ovoga rada pokušati će se odgovoriti na sljedeće pitanja:

1. Od ponuđenih nastambi na natjecanju *NASA's 3D printed Habitat Challenge*, koja je optimalna geometrija sa stajališta energetske zahtjeva?
2. Koji su glavni utjecajni parametri za potrošnju energije za grijanje?
3. Koliko toplinska svojstva zidova utječu na potrošnju energije za grijanje?

### ***3. Atmosferski uvjeti na Marsu***

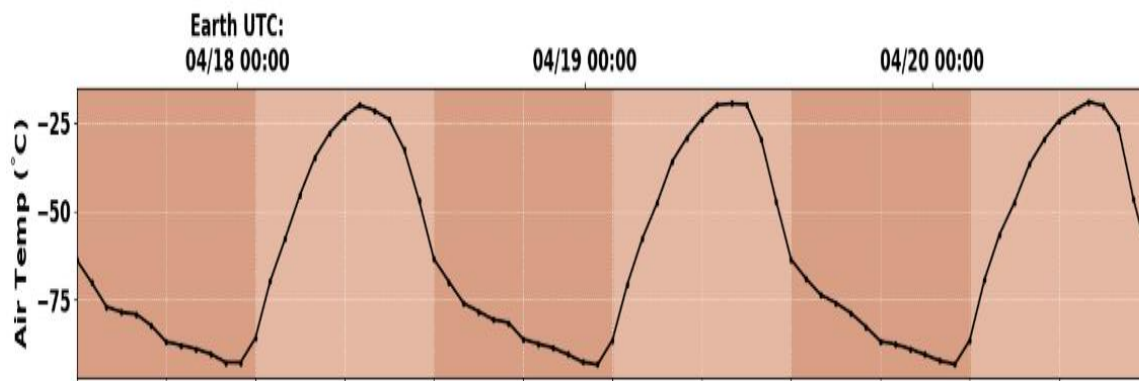
Atmosferski uvjeti na lokaciji nastambe jedni su od ključnih parametara prilikom simulacije potrošnje energije u nastambi. Za uvjete na Zemlji, najveću važnost imaju vanjska temperatura i sunčevog zračenje. Međutim, za uvjete na Marsu, utjecaj atmosferskih parametara može se znatno razlikovati te zbog nedostataka detaljnih analiza u ovom području nije potpuno definiran. Primjerice, za nastambe na Marsu uslijed velike razlike tlaka izvan i unutar nastambe postoji mogućnost značajnih gubitaka zraka prema vanjskome prostoru, a koji uzrokuju značajne toplinske gubitke. Niska vrijednost atmosferskog tlaka isto tako utječe na koeficijent prijelaza topline s vanjske strane nastambe te posljedično, na prolaz topline prema vanjskome okolišu. Modeliranje navedenih atmosferskih uvjeta, a koje se uvelike razlikuje od onih u okolišu na Zemlji prikazano je u nastavku.

#### ***3.1. Vanjska temperatura***

Vrijednosti vanjske temperature na Marsu značajno su niže od onih na Zemlji kao posljedica udaljenosti od Sunca i manjeg iznosa dozračene sunčeve energije na površini. Osim toga, mala gustoća atmosfere uzrokovana niskim atmosferskim tlakom rezultira niskim toplinskim kapacitetom Marsovog omotača. Sve to rezultira prosječnom godišnjom vanjskom temperaturom od  $-60^{\circ}\text{C}$  [6].

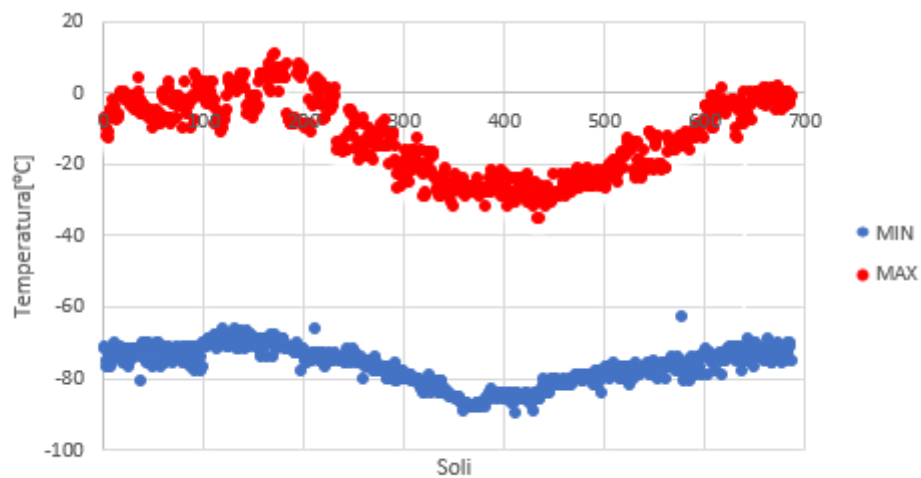
Raspon temperatura varira ovisno o lokaciji, odnosno geografskom smještaju i periodu godine, gdje su granične vrijednosti maksimalnih  $20^{\circ}\text{C}$  i minimalnih  $150^{\circ}\text{C}$ . Sa stajališta grijanja, optimalna lokacija nastambe bila bi u blizini ekvatora, gdje temperature doseže više vrijednosti u odnosu na ostale dijelove planeta. NASA je 2018. godina lansirala *InSight*, robotsko vozilo namijenjeno proučavanju terena i uvjeta na Marsu, koje u sebi sadrži ugrađenu toplinsku sondu i osjetnik za mjerenje brzine i smjera vjetra. Na NASA-inim stranicama [7] se za ravnicu *Elysium Planitia* u blizini ekvatora na Marsu mogu pronaći očitavanja temperature, tlaka i brzine vjetra za prethodna tri dana i temperaturni maksimumi i minimumi za prethodnih tjedan dana. Sol je naziv za jedan dan na Marsu, označava trajanje jedne rotacije Marsa oko svoje osi i traje 24,65 sati. Jedna godina na Marsu traje 668 sola. Na Slici 1 prikazano je kretanje temperature tijekom tri sola.





Slika 1 Promjena temperature tijekom sola (dana na Marsu) [7]

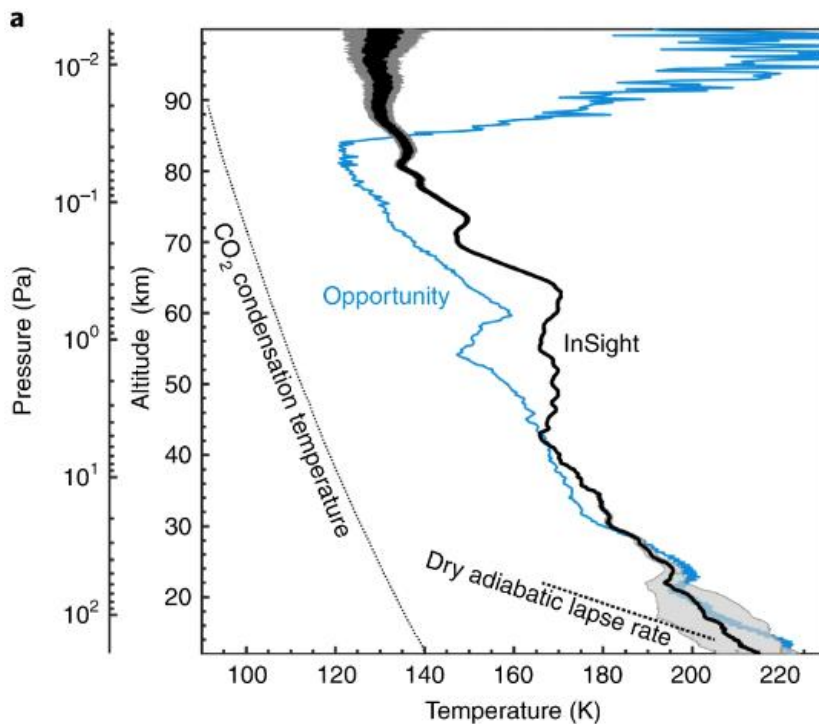
Velike oscilacije između dnevnih ekstrema temperature, prikazanih na Slici 1, posljedica su relativno malog toplinskog kapaciteta atmosfere, te činjenice da na Marsu ne postoje oceani. Naime, oceani na Zemlji imaju ulogu toplinskog spremnika, te omogućavaju skladištenje toplinske energije od sunčevog zračenja i zagrijavaju atmosferu kada izvor topline nije dostupan.



Slika 2 Promjena ekstremnih vrijednosti vanjske temperature tijekom godine

Kretanje dnevnih ekstrema temperature tijekom godine prikazano je na Slici 2. Iz Slike se jasno vidi ekvivalent godišnjih doba na Marsu u kontekstu smanjenja temperature u periodu kada je Mars najudaljeniji od Sunca – *aphelion*, u odnosu na period kada je najbliži Suncu – *perihlion*. Promjene temperaturnih ekstrema moguće je približno opisati harmonijskom funkcijom, a vrijedi spomenuti da jedna godina na Marsu, odnosno jedan obilazak oko Sunca traje 686 dana, što odgovara trajanju jednog perioda spomenute harmonijske funkcije.

Prilikom slijetanja *InSight* je zabilježio vrijednosti vanjske temperature ovisno o visini mjerenoj od tla kako je prikazano na Slici 3 [8]. Vrijednost vanjske temperature pada s porastom visine, što je očekivano, međutim u području visine do 20 metara uočljiv je izraziti negativan gradijent temperature od približno  $2^{\circ}\text{C}$  po metru visine. Ovaj gradijent značajno je veći od gradijenta na Zemlji koji iznosi približno  $0,6^{\circ}\text{C}$  na 100 metara visine. Stoga je prilikom modeliranja potrebno provesti korekciju vanjske temperature s obzirom na visinu nastambe, a što je detaljno opisano u Poglavlju 5.

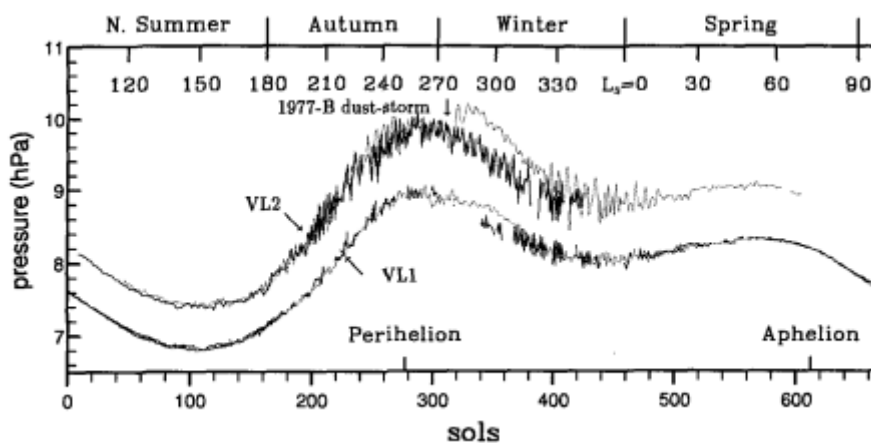


Slika 3 Ovisnost vanjske temperature o visini [8]

### 3.2. Atmosferski tlak

Atmosferski tlak se prema [9] kreće u rasponu između 7 i 10 hPa kroz period jedne godine na Marsu, kako je prikazano na Slici 4. Maksimalne vrijednosti atmosferskog tlaka mogu odstupati od prikazanih u slučaju globalne pješčane oluje [10]. Unutar nastambe potrebno je održavati vrijednost tlaka od približno 1 bar za siguran boravak ljudi, što rezultira pretlakom u usporedbi s vanjskim tlakom. Posljedica razlike tlakova u ovome slučaju može uzrokovati propuštanje zraka iz prostora prema vanjskome okolišu, a što se u energetske bilanci očituje kao toplinski gubitak koji može biti značajan. Osim toplinskog gubitka uslijed propuštanja

zraka potrebno je uzeti u obzir i toplinske gubitke pripreme zraka. Naime, s obzirom da se ne nalazi u atmosferi kisik je na Marsu potrebno u potpunosti proizvesti prije nego što se komprimirana struja dobavnog zraka ubaci u kondicionirani prostor. Priprema zraka stoga zahtjeva poseban sustav proizvodnje zraka u odnosu na uobičajene ventilacijske sustave na Zemlji te svako propuštanje zraka prema vanjskom okolišu uzrokuje velike gubitke energije. Iz ovog je razloga pri izgradnji nastambe potrebno staviti posebni naglasak na zrakonepropusnost nastambe, posebice na spojevima vrata i prozora.



Slika 4 Promjena atmosferskog tlaka tijekom godine [9]

Dodatni utjecaj niske vrijednosti atmosferskog tlaka očituje se kroz utjecaj na koeficijent prijelaza topline s vanjske strane nastambe. Naime, nizak tlak kao posljedicu daje nisku gustoću vanjskog zraka, čime se smanjuje vrijednost koeficijenta prijelaza topline na vanjskoj strani zida. Ova pojava poželjna je okolnost u kontekstu energije za grijanje nastambe budući da se smanjuje ukupni koeficijent prolaza topline, a time i toplinski gubici prema vanjskom okolišu. U radu je provedena analiza izračuna i utjecaj koeficijenta prijelaza topline pri čemu značajnu ulogu ima geometrija ovojnica nastambe.

### 3.3. Zračenje

Sunčevo zračenje jedini je oblik toplinskih dobitaka na Marsu, te koji utječe na energetske potrebe nastambi na način da smanjuje potrebu za grijanjem. Udaljenost Marsa od Sunca rezultira, u odnosu na Zemlju, manjom vrijednosti intenziteta sunčevog zračenja na rubu atmosfere. Intenzitet sunčevog zračenja na rubu atmosfere iznosi  $590 \text{ W/m}^2$  [11], znatno manje od Zemljinih  $1370 \text{ W/m}^2$ . Od ukupnog iznosa zračenja na vanjskom rubu atmosfere, tek oko 20

% može se smatrati toplinskim dobitcima budući da se većina zračenja reflektira od površine ili rasprši u atmosferi. Slika 5 prikazuje iznose dozračene energije na horizontalnu površinu solarnog panela kroz period jedne godine. Solarni panel nalazi se na *Viking Landeru 1*, NASA-inom robotskom vozilu namijenjenom istraživanju površine Marsa.

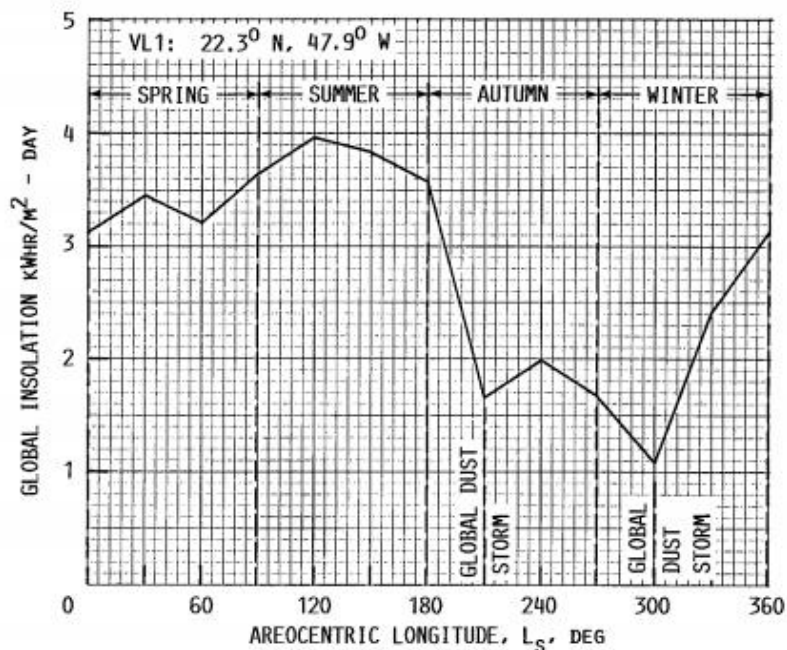


FIGURE 16. - DAILY GLOBAL INSOLATION ON A HORIZONTAL MARS SURFACE AT VIKING LANDER VL1.

*Slika 5 Dnevno sunčevo zračenje na horizontalnu plohu na površini Marsa [11]*

Iz Slike 5, jasno su vidljivi padovi ozračenosti, odnosno solarnih toplinskih dobitaka u razdoblju trajanja pješčanih oluja koje su karakteristične za Mars. Globalne pješčane oluje uzrokovane visokim brzinama strujanja „zraka“ podižu sitne čestice pijeska i prašine te mogu trajati i do četvrtinu godine [12]. Pješčane oluje smanjuju prozirnost atmosfere za sunčevo zračenje, koja je opisana faktorom optičke dubine –  $\tau$ . Niske vrijednosti optičke dubine označavaju nisku prozirnost atmosfere i indikator su trajanja pješčane oluje. Vrijednost parametra optičke dubine kreće se u rasponu od 0 do 1. Slika 6 prikazuje dnevni profil dozračene sunčeve energije na horizontalnu plohu na površini Marsa. Dijagrami na Slici 6 prikazuju omjere direktne i difuzne komponente zračenja za različite vrijednosti optičke dubine  $\tau$ . Za više vrijednosti optičke dubine poput prikazane na desnom grafu ( $\tau = 0,95$ ), ukupno zračenje je smanjeno u odnosu na lijevi graf ( $\tau = 0,50$ ). Udio raspršene komponente (krugovi)

se povećava, a udio direktne komponente (trokuti) u ukupnom zračenju smanjuje s porastom vrijednosti  $\tau$ . Sunčevo zračenje pri visokim koncentracijama prašine ne može prodrijeti do tla nego biva raspršeno u atmosferi.

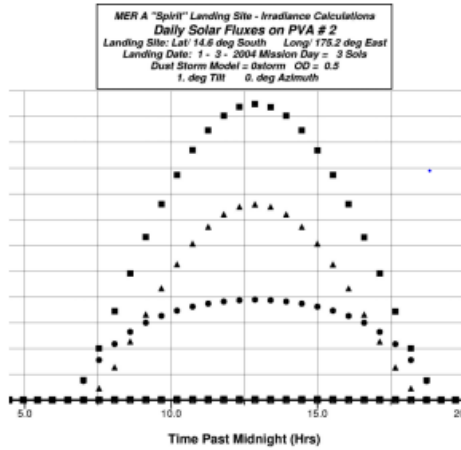


Figure 2.—The Diurnal Profile of Solar Energy on a Horizontal Surface on Mars (Low Dust Case,  $\tau = 0.5$ ), Showing The Direct (Circles), Scattered (Triangles), and Total Isolation During the Course of a Martian Sol.

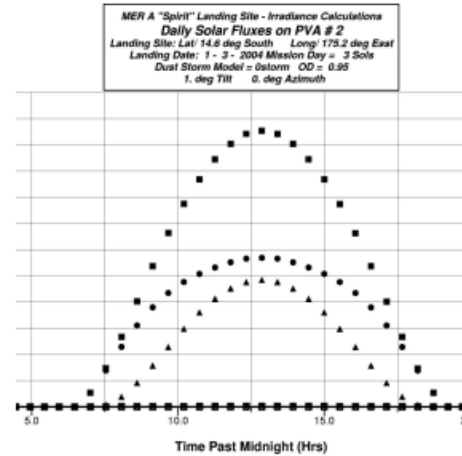


Figure 3.—The Diurnal Profile of Solar Energy on a Horizontal Surface on Mars (High Dust Case,  $\tau = 0.95$ ).

### Slika 6 Utjecaj optičke dubine na iznos i raspodjelu sunčevog zračenja [25]

Sunčevo zračenje značajna je prepreka osiguranju sigurnog boravka ljudi na površini Marsa kroz duži vremenski period. Naime, nepostojanost magnetosfere i vrlo rijetka atmosfera pružaju nedovoljnu zaštitu od štetnog UV zračenja i kozmičkog zračenja koje dolazi do površine Marsa u znatno većim količinama u odnosu na uobičajene iznose zračenja na površini Zemlje. Dugotrajna izloženost velikim količinama zračenja može imati negativne posljedice na ljudsko zdravlje, izazvati mutacije, ubrzati razvoj raznih bolesti i pojavu brojnih oblika raka. Astronauti će tijekom puta na Mars, a koji traje između pola godine i godinu dana, biti izloženi dosad neviđenim iznosima zračenja. Potrebno je stoga prilikom dolaska na Mars osigurati prostor za siguran dugotrajan boravak ljudi. Zaštita od zračenja jedna je od ključnih stavki koje će nastambe na Marsu morati zadovoljiti prije nego budu odobrene za izgradnju.

## ***4. Opis analiziranih nastambi s natjecanja NASA's 3D-printed Habitat Challenge***

*NASA's 3D printed Habitat Challenge* natjecanje je s ciljem razvoja idejnih rješenja i tehnologija autonomne gradnje nastambi na Marsu. Natjecanje je podijeljeno u tri faze. Prva faza fokusirala se na razvoj arhitektonskih koncepata oblika nastambe koji se mogu izraditi pomoću tehnologija 3D printanja. U drugoj fazi natjecanja naglasak je stavljen na izradu sustava aditivne proizvodnje koji koristi materijale dostupne na Marsu u kombinaciji s manjim udjelom recikliranog materijala za izgradnju ovojnice nastambe. Građevni elementi proizvedeni navedenim tehnološkim procesom podvrgnuti su testiranjima čvrstoće poput udarnog i hidrostatskog testa kako bi se pokazao njihov strukturni integritet. Završna faza natjecanja [14] zahtijevala je od timova izgradnju cjelokupne nastambe u stvarnoj veličini. Glavni cilj treće faze bio je autonoman proces izgradnje, temeljen na tehnologiji 3D printanja, sa što manjim brojem intervencija i pomoći čovjeka.

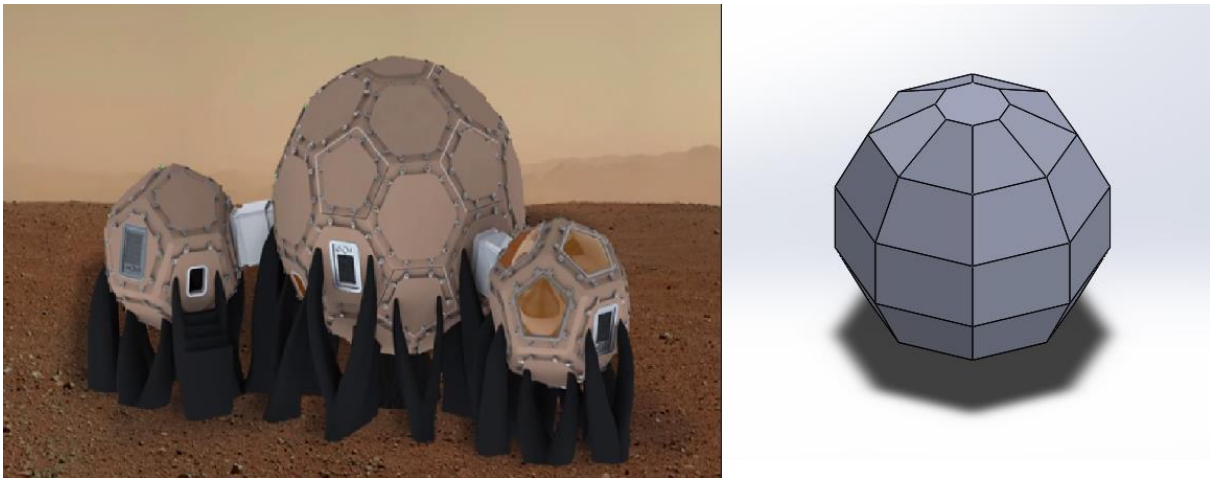
Posebnost uvjeta koji vladaju u okolišu na Marsu stavlja visoke zahtjeve na konstrukciju i proces izrade nastambe. Nastambe moraju izdržati razliku tlakova unutarnjeg i vanjskog prostora, pružiti zaštitu od visokog iznosa štetnog zračenja te osigurati potpunu zabrtvljenost spojeva kako ne bi došlo do propuštanja zraka prema vanjskom okolišu. Također, oscilacije temperature između dana i noći uzorkuju toplinska naprezanja koja dodatno opterećuju konstrukciju nastambe i iziskuju kreativna rješenja u izvedbi. Među natjecateljskim rješenjima, za analizu su odabrane slijedeće četiri nastambe: nastamba nazvana *Mars Incubator Habitat*, nastamba tvrtke *Zopherus*, nastamba ekipe sveučilišta *Northwestern University*, te nastamba *MARSHA*, tvrtke *AI Space Factory*, koja je i konačni pobjednik natjecanja. Odabrane nastambe koristile su različite koncepte izgrade, oblika nastambe i materijala zidova, pa samim time daju dobar pregled različitih idejnih rješenja za izgradnju budućih nastambi na Marsu.

Pravila natjecanja nalažu da ukupna iskoristiva površina svake nastambe mora sadržavati minimalno 93 m<sup>2</sup>, budući da su zamišljene kao prostor za stanovanje i rad 4 odrasle osobe. Temeljem navedenog podatka, a obzirom da natjecatelji nisu javno objavili detaljne nacрте nastambi, simulacijski modeli opisani u nastavku izrađeni su s pretpostavkom jednake korisne površine od 110 m<sup>2</sup> za svaku nastambu. Pri izradi modela zadržani su omjeri gabaritnih dimenzija i oblik ovojnice nastambe, a sve dimenzije skalirane su kako bi se postigao prethodno navedeni uvjet od 110 m<sup>2</sup> korisne životne površine. Ova pretpostavka temelj je usporedbe

različitih oblika ovojnice sa stajališta ukupnih potreba grijanja i energetske učinkovitosti pojedinog rješenja. Pregled idejnih rješenja i organizacije prostora nastambi dan je u nastavku.

#### ***4.1. Nastamba Mars Incubator Habitat***

*Mars Incubator Habitat* nudi zanimljivo idejno rješenje za postupak gradnje nastambi na Marsu. Neuobičajeni oblik (Slika 7) podsjeća na zgrade viđene u znanstveno fantastičnim filmovima te značajno odstupa od konvencionalnih oblika zgrada. Središnji, najveći dio, služi kao prostor za rad, boravak i spavanje, dok dva manja djela služe kao ulaz u nastambu i prostor za odmor. Simulacijski model, prikazan također na Slici 7, pojednostavljen je u odnosu na idejni oblik nastambe budući da su dva manja prostora volumenom i vanjskom površinom ovojnice značajno manja od glavnog dijela i kao takvi se sa zadovoljavajućom točnošću mogu izuzeti iz energetske bilance nastambe. Ipak, spomenuta pojednostavljenja rezultiraju smanjenjem godišnje potrebe energije za grijanje, što treba uzeti u obzir prilikom usporedbe rezultata.



*Slika 7 Nastamba Mars Incubator Habitat i aproksimacija geometrije u TRNSYS energijskom modelu [26]*

Proces izgradnje *Mars Incubator Habitat-a* djelomično koristi tehnologiju 3D printanja. Temelji nastambe (prikazani crnom bojom na Slici 7) formiraju se dodavanjem slojeva bazaltnih vlakana i imaju funkciju temelja cijele nastambe. Nakon izrade temelja, iduća faza izgradnje je lijevanje modularnih poligonalnih panela. Paneli se lijevaju iz mješavine prosijanog pijeska regolita, dostupnog na Marsovoj površini i praha polietilena. Pri visokoj temperaturi mješavina materijala se sintetizira te formira panele visoke čvrstoće i otpornosti na

udarna opterećenja. Paneli su ojačani bazaltnim vlaknima i spajani zavarivanjem rubova ojačanim polietilenom. Unutarnja nosiva konstrukcija izrađena je također od bazaltnih vlakana i služi kao stubište koje povezuje dva kata glavnog dijela nastambe. Način gradnje nastambe zahtjeva dug vremenski period od početka do potpune funkcionalnosti nastambe, a osim toga nije u potpunosti autonoman jer zahtjeva pažljivo zavarivanje panela s velikim brojem i površinom zavora. Zbog toga vjerojatno nije prikladan za potpunu automatizaciju, ali usprkos tome daje zanimljivo rješenje za korištenje dostupnih materijala u gradnji prvih nastambi na Marsu.

## **4.2. *Nastamba Zopherus***

Nastamba tvrtke *Zopherus* nudi potpuno autonoman pristup izgradnji nastambi na Marsu koji se može odvijati u potpunosti bez prisutnosti čovjeka. Razvojem tehnologije predstavljene idejnim rješenjem bilo bi moguće poslati letjelicu koja će prije dolaska ljudi izgraditi nastambu za njihov boravak na Marsu. Postupak izgradnje odvija se u cijelosti u zaštićenom prostoru, koji štiti opremu, ali i samu nastambuu od utjecaja vjetra, pijeska i vanjske temperature prilikom gradnje. Na početku gradnje, autonomni robot, odnosno letjelica, sakuplja resurse dostupne na površini te potom proizvodi materijal iz kojega oblikuje ovojnicu nastambe. Materijal za gradnju zidova proizvodi se iz mješavine leda, kalcijevog oksida i pijeska, pri čemu materijale u potpunosti sakuplja na lokaciji nastambe. Gotovi dijelovi poput vrata, prozora i brtvi ugrađeni su unutar letjelice te se pomoću robotske ruke montiraju na odgovarajuća mjesta prilikom gradnje. S obzirom na nepostojanje potporne konstrukcije, unutarnji sloj gradi se od polietilena visoke gustoće koji se 3D printa paralelno s vanjskim slojem zida.. U konačnici, nastamba se sastoji od tri samostalne zgrade koje su povezane kratkim zračnim tunelima (Slika 8).





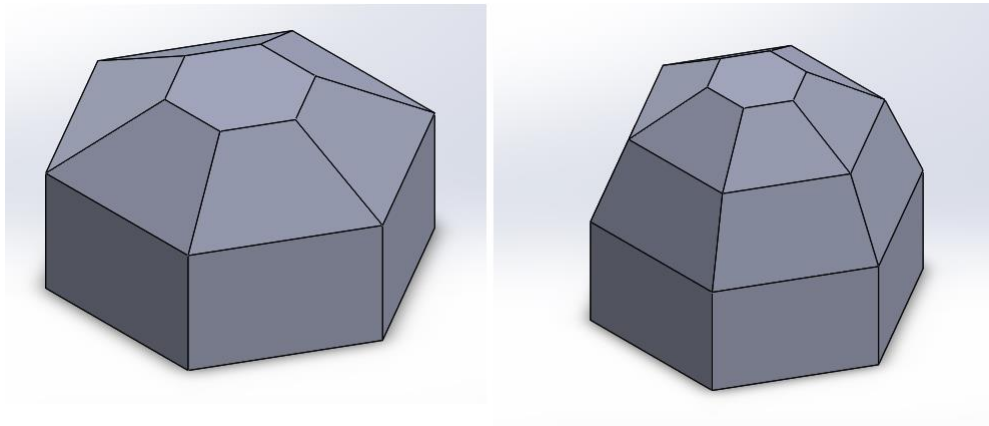
*Slika 8 Nastamba tvrtke Zopherus [27]*

Središnja zgrada ima funkciju prostora za pripremu obroka i boravak, te vježbanje u gornjem dijelu zgrade. Na vrhu zgrade nalazi se prozor koji služi kao izvor prirodnog svjetla neophodnog za hidroponski vrt za proizvodnju svježih namirnica, ribe i povrća. Na središnjoj zgradi nalazi se jedini ulaz u nastambu, dok se na pomoćnoj zgradi nalazi otvor za pristup rovera s uzorcima izvana. Druga zgrada služi kao radni prostor i istraživački laboratorij te su u njoj smješteni svi alati, komunikacijska oprema i računalni sustavi. U trećoj zgradi nalaze se 4 odvojene spavaonice i manji sanitarni prostor.

Predloženi koncept nastambe ima nekoliko prednosti. Prva prednost jest potpuno autonoman način izgradnje. Druga prednost je odvojenost spavaonica u manjim prostorima koji pružaju privatnost neophodnu za duži boravak ljudi. Treća prednost leži u činjenici modularnosti nastambe, a koja omogućava dodatno proširivanje kapaciteta i gradnju novih nastambi, uz dobavu ugradbenih elemenata sa Zemlje. Ipak, modularnost i veći broj samostalnih nastambi rezultira većom vanjskom površinom ovojnice za isti volumen životnog prostora, što je nepovoljno sa stajališta potrošnje energije za grijanje, kako će biti pokazano u Poglavlju 6.

Energijski model nastambe *Zopherus* sastoji se od tri zasebne zgrade. Za svaku zgradu provedena je računalna simulacija u TRNSYS-u, te su ukupne potrebe grijanja cijele nastambe dobivene kao zbroj potreba grijanja svake zgrade zasebno. Oblik zgrade aproksimiran je prizmom baze pravilnog četverokuta sa svojevrsnom kupolom na vrhu (Slika 9). Središnja zgrada, prikazana na desnoj slici, viša je od ostale dvije, dok se zgrada sa spavaonicama i zgrada

s laboratorijem i radnim prostorom razlikuju isključivo po orijentaciji prozora i prikazane su lijevo na Slici 9.



*Slika 9 Aproximacija geometrija nastambe Zopherus u TRNSYS energijskom modelu*

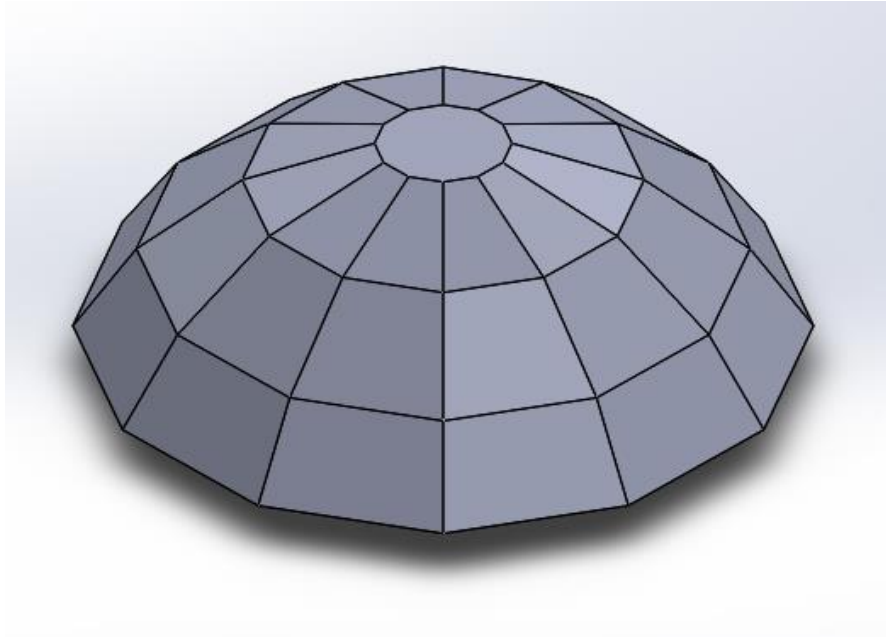
### **4.3. Nastamba Northwestern University**

Za razliku od prethodne dvije nastambe koje su prema svome konceptu modularnog tipa nastamba sveučilišta *Northwestern University* ima svih 110 m<sup>2</sup> smještenih u jednoj zgradi. Oblikom podsjeća na bunker, kako je prikazano na Slici 10, ali prednost takve izgradnje su debeli zidovi koji pružaju zaštitu od štetnog zračenja koje dolazi do površine Marsa. Konstrukcija nastambe, nakon izgradnje temelja, započinje napuhavanjem svojevrsnog balona koji služi kao podloga za 3D printanje. Po podlozi se kreće robot koji sukcesivnim dodavanjem materijala oblikuje ovojnicu nastambe. Strukturna ojačanja kupole i otvori za vrata i prozore programirani su u hodu robota, a vrata i prozori se stavljaju nakon printanja zidova. Osim kao podloga pri gradnji, balon služi kao barijera koja rasterećuje ovojnicu od razlike tlakova i smanjuje mehaničko opterećenje nastambe. Materijal gradnje su njegovi izumitelji nazvali *Marscrete*, budući da je materijal (sličan betonu na bazi sumpora) proizveden od resursa dostupnih na Marsu. Za potrebe natjecanja razvijene su i testirane metode lijevanja materijala uz dovođenje topline kako je opisano u [13].



*Slika 10 Nastamba Northwestern University [28]*

Organizacija unutarnjeg prostora naglasak je stavila na funkcionalnost i potpuno iskorištenje prostora. Gotovo svaki dio nastambe je višenamjenski i može se lagano reorganizirati kako bi se promijenila namjena. Primjerice blagovaonica može postati prostor za sastanke, spavaća soba, prostor za vježbu, a sve to brzim i jednostavnim preslagivanjem elemenata u prostoriji. U središtu nastambe nalazi se prozor kroz koji dopire prirodna svjetlost za vrt u kojem se uzgaja povrće u simbiozi s ribom, slično nastambi *Zopherus*. Od svih nastambi, samo je nastamba *Northwestern University* prizemnica i ima u usporedbi s ostalim nastambama najveću dodirnu površinu s tlom, zbog čega će modeliranje izmjene topline s tlom imati značajan utjecaj na ukupne potrebe energije za grijanje. Slika 11 prikazuje geometriju energijskog modela nastambe. Oblikom nalik kupolu, nastamba je modelirana velikim brojem ploha kako bi se što bolje simulirao utjecaj solarnih toplinskih dobitaka.



*Slika 11 Aproximacija geometrije nastambe Northwestern University u TRNSYS energijskom modelu*

### **4.3. Nastamba MARSHA**

Posljednja od četiri nastambe, projekt *MARSHA* tvrtke *AI SpaceFactory*, pobjednik je NASA-inog natjecanja *NASA's 3D printed Habitat Challenge*. Iako je oblik ovojnice približno cilindričan, *MARSHA* oblikom najviše sličí zgradama na Zemlji. Konstruktori tvrtke *AI SpaceFactory* ponudili su inovativno rješenje za problem temperaturnih dilatacija uslijed naglih i velikih promjena temperature tijekom karakterističnog dana na Marsu. Ovojnica nastambe povezana je u temelju za prirubnicu koja se nalazi na kliznim ležajevima, a koji omogućavaju slobodno pomicanje uslijed deformacija. 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. Sustavi razvoda zraka i vode smješteni su u prostoru između ljuski i omogućavaju održavanje mikroklimatskih uvjeta na svakome katu, ovisno o namjeni i želji korisnika.

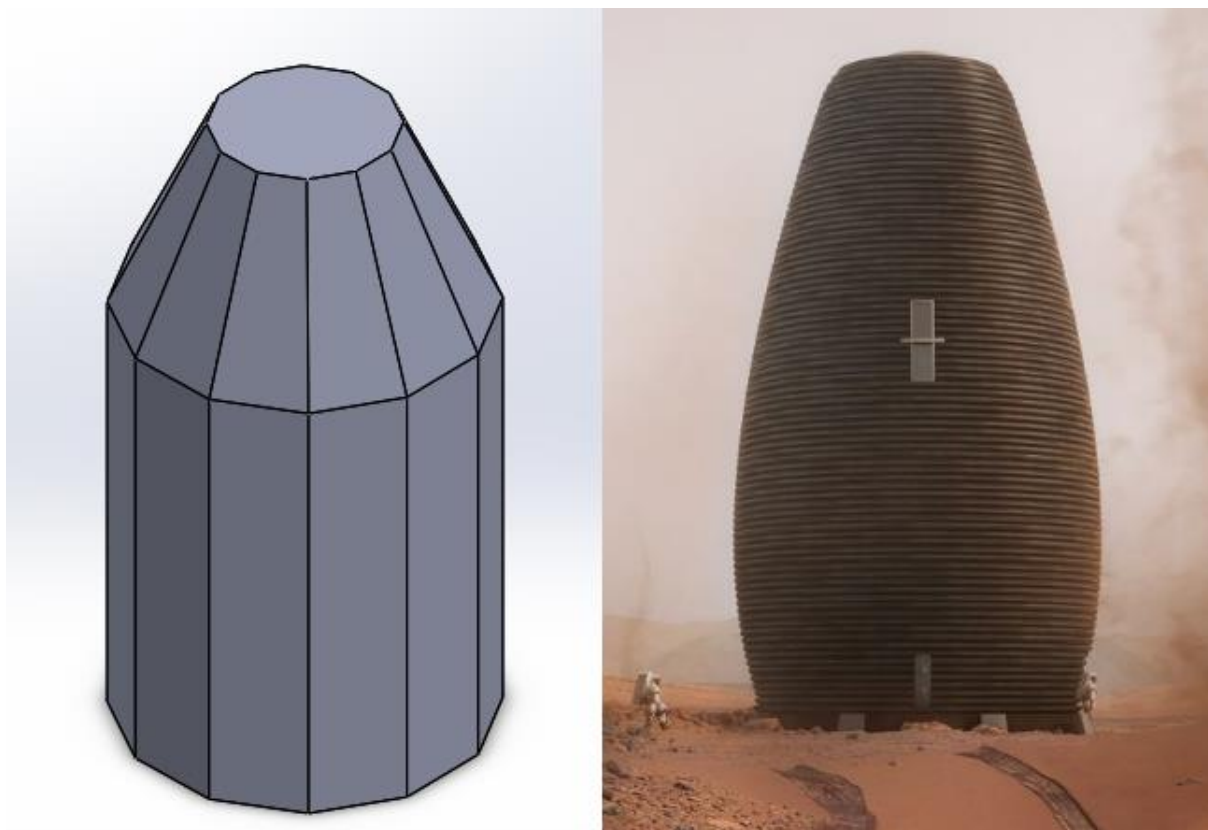


*Slika 12 Nastamba MARSHA [29]*

Prizemlje nastambe namijenjeno je za smještaj tehničkih sustava i prihvata uzoraka te njihovu obradu u laboratoriju. Na prvom katu nalazi se kuhinja i prostor laboratorija za osjetljivija ispitivanja. Drugi kat sadrži spavaonice i sanitarni čvor, dok je na trećem katu prostor za rekreaciju, odmor i vježbanje sa prozorom za ulaz vanjskog svjetla. Na različitim stranama nastambe i različitim katovima smješteni su prozori koji pružaju panoramski pregled prostora u okruženju nastambe. Vanjska ljuska izrađena je iz smjese PLA (polilaktična kiselina) i bazaltnih vlakana dobivenih iz tla na Marsu, čime se postiže kompozitni materijal s povoljnim svojstvima. Bazalna vlakna osiguravaju povećanu vlačnu čvrstoću i dobra izolacijska svojstva, dok je PLA plastomer s najmanjim koeficijentom toplinskog širenja, koji sprječava pojavu pucanja zidova nakon velikog broja ciklusa toplinskih naprezanja.

Energijski model u računalnom programu TRNSYS izrađen je kako je prikazano na Slici 13. Donji dio nastambe opisan je kao dvanaesterostrana prizma sa svojevrsnom kupolom na vrhu. Pri izradi modela očuvana je jednaka površina ovojnice, odnosno izmjene topline s vanjskim okolišem, kao iznimno bitan faktor za proračun godišnje potrebne energije za grijanje nastambe.





*Slika 13 Aproksimirana geometrija nastambe MARSHA u TRNSYS energijskom modelu*

## 5. Ulazni parametri energijskog modela

Geometrijski oblik analizirane četiri nastambe opisan je u prethodnom poglavlju. Energijski modeli nastambi izrađeni su računalnom programu za dinamičke simulacije TRNSYS. Kako u TRNSYS-u nije moguće definirati zakrivljene plohe, ovojnice nastambi aproksimirane su velikim brojem ravnih ploha, a što omogućuje precizniji opis utjecaja solarnih toplinskih dobitaka. Osim geometrije ovojnice, za provođenje simulacije potrebno je definirati i ostale utjecajne parametre poput vanjskih uvjeta, termodinamičkih svojstava ovojnice te načina korištenja nastambe, a što je opisano u nastavku.

### 5.1. Vanjska temperatura i temperatura tla

U radu je provedena simulacija potrebne energije za grijanja za svaki sat u godini. Stoga je u modelu bilo potrebno definirati satne vrijednosti vanjske temperature, a koje su preuzete iz NASA-ine baze podataka [15]. Izmjerene vrijednosti temperature odgovaraju lokaciji na kojoj se nalazio *Viking Lander2*, odnosno koordinatama 47,7°N i 225,7°W na sjevernoj polutki. Vrijednosti optičke dubine koje su korištene u radu za proračun sunčevog zračenja na površini Marsa preuzete su za istu lokaciju. Satni podaci temperature dostupni su za period od 1050 sola, što odgovara trajanju od godine i pol dana na Marsu. Zbog održavanja i nepogodnih uvjeta za mjerenje tijekom velikih pješčanih oluja, instrumenti su bili ugašeni u određenim periodima. Stoga su za periode bez mjerenih očitavanja temperature zamijenjene s onima iz odgovarajućeg dijela iduće godine ili su aproksimirane iz zadnjih dostupnih podataka.

Year	Solar		Wind	Wind	Pressure	Temperature	
	Longitude	Sol	Speed	Dir		F.	C.
	L_s (deg.)		m/sec	deg.	mb		
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

Slika 14 Primjer satnih vrijednosti temperature, tlaka te brzine i smjera vjetra [15]

Na Slici 14 dan je primjer mjerenja atmosferskih parametara s *Viking Lander* 2, NASA-inog uređaja za istraživanje Marsa. Slika 14 prikazuje mjerenja brzine vjetra i smjera vjetra te tlaka i temperature. Prva tri stupca pokazuju vrijeme mjerenja, u relativnom smislu, koliko je dana, odnosno sola proteklo od slijetanja i koji je dio godine, odnosno u kojem se položaju nalazi Mars u svojoj putanji oko Sunca.

Vrijednosti vanjske temperature potrebno je korigirati ovisno o visini nastambe kako je spomenuto u Poglavlju 3. Za svaku nastambu provedena je korekcija vanjske temperature po visini korištenjem podataka iz [14]. Korigirana vrijednosti vanjske temperature aproksimirana je kao prosječna vrijednost na polovici visine nastambe, odnosno pretpostavkom o linearnom profilu temperature po visini. Provedena je i analiza utjecaja korekcije vanjske temperature na konačne rezultate potrebne eneergije grijanje, odnosno kvantificirana je greška proračuna u slučaju da se promjena temperature po visini zanemari.

Uzevši u obzir konstantan boravak ljudi u prostoru, uz povremene izlaske radi održavanja opreme ili eventualnog skupljanja uzoraka, potrebno je neprestano održavati prostor na temperaturi koja će biti ugodna za boravak ljudi. Stoga je u redu definirana unutarnja temperatura prostora od 20°C tijekom čitave godine. Također je analiziran utjecaj smanjenja unutarnje temperatura tijekom noći, a što može pozitivno utjecati na kvalitetu sna te uštede energije za grijanje.

Temperatura tla, važan je ulazni parametar, posebno za nastambe koje imaju veliku površinu izmjene topline s tlom. Budući da precizni satni podaci temperature tla tijekom godine nisu dostupni, temperatura tla definirana je kao rubni uvjet konstantne temperature -15°C [16]. Ovakva definicija temperature tla (preko srednje godišnje vrijednosti) unosi određenu grešku u proračun, što treba posebno uzeti u obzir kod rezultata za nastambu *Northwestern University*.

## **5.2. Sunčevo zračenje**

Toplinski dobici od sunca rezultiraju smanjenjem potrebne energije za grijanje. Specifičnost okoliša na Marsu, između ostalog, leži u činjenici da zbog niske vrijednosti vanjske temperature sezona grijanja traje cijelu godinu. Iznimka su par sati tijekom godine za lokacije blizu ekvatora. Stoga je za točnu simulaciju energetski potreba potrebno uzeti u obzir i sunčevo zračenje na vanjske plohe. U nastavku je prikazan satni proračun sunčevog zračenja



na horizontalnu plohu, a potom i na proizvoljno orijentiranu plohu za period cijele godine. Za simulaciju godišnje potrebe grijanja nastambi korištene su satne vrijednosti zračenja na kose plohe, zbog čega su kompleksnije geometrije i zakrivljene plohe u modelima opisane većim brojem ravnih ploha prema opisu u prethodnom poglavlju.

### **5.2.1. Proračun zračenja na horizontalnu plohu**

Proračun zračenja na horizontalnu plohu preuzet je iz [11].

Vrijednost Sunčevog zračenja na rubu Marsove atmosfere iznosi:

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

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 iznosi:

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

gdje su  $a = 1,5237 \text{ AU}$  (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 točka u kojoj se Mars nalazi u odnosu na Sunce u određenome trenutku u godini.

Kut od  $248^\circ$  odgovara perihelionu, položaju u kojemu je Mars najbliži Suncu.

Iz prethodnih jednadžbi 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 računa se prema:

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

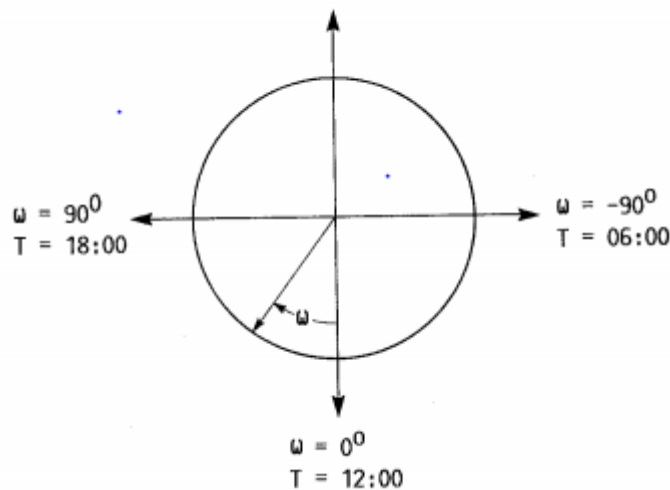
Pri čemu se kosinus kuta zenita računa pomoću izraza:

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

gdje su  $\varphi$  geografska širina,  $\delta$  kut deklinacije. Kut sata

$\omega$  mjeri položaj Sunca u određenom trenutku mjereno od njegovog položaja u zenitu.

Radi pojednostavljenja 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 bilo 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 15.



Slika 15 Vrijednosti kuta sata za određeno vrijeme [11]

Kut deklinacije računa se prema:

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

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:

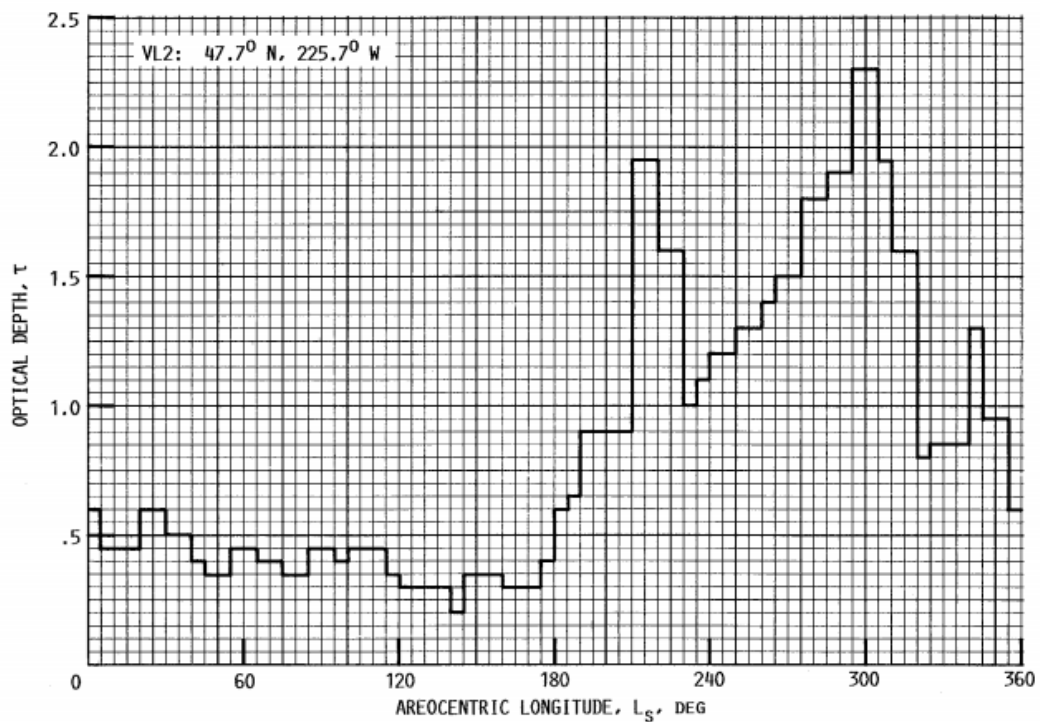
$$\omega_{ss} = \cos^{-1}(-\tan \varphi \tan \delta) \quad (9)$$

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:

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



Slika 16 Kretanje vrijednosti optičke dubine tijekom godine [11]

Ukupno zračenje na horizontalnu površinu računa se prema:

$$G_h = G_{ob} \cos z \frac{f(z, \tau)}{0,9} \quad (12)$$

Koeficijent 0,9 u nazivniku proizlazi iz izraza  $1-r$ , gdje je  $r$  refleksijski faktor za koji je definirana vrijednost 0,1. Koeficijent  $f(z, \tau)$  očitava se iz Slike 17. 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 17 Koeficijent  $f(z, \tau)$  kao funkcija optičke dubine i kuta zenita [11]

Direktno zračenje na horizontalnu plohu računa se prema:

$$G_{bh} = G_{ob} \cos z \exp\left(\frac{-\tau}{\cos z}\right) \quad (13)$$

Difuzno zračenje na horizontalnu površinu dobiva se iz poznatog ukupnog i direktnog zračenja.

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

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

$$I_{bh} = \frac{12}{\pi} G_{ob} \int_{\omega_1}^{\omega_2} (\sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos \omega) \exp[-\tau / \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos \omega] d\omega \quad (15)$$

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

$$I_h = \frac{12}{\pi} G_{ob} \frac{f(z, \tau)}{0,9} \left[ \frac{2\pi(\omega_2 - \omega_1)}{360} \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta (\sin \omega_2 - \sin \omega_1) \right] \quad (16)$$

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

$$I_{dh} = I_h - I_{bh} \quad (17)$$

### 5.2.2. Proračun zračenja na kosu plohu

Izračun zračenja na kosu plohu preuzet je iz [17] i [18].

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

$$\begin{aligned} \cos \theta = \sin \delta \sin \varphi \cos \beta - \sin \delta \cos \varphi \sin \beta \cos \gamma + \cos \delta \cos \varphi \cos \beta \cos \omega \\ + \cos \delta \sin \varphi \sin \beta \cos \gamma \cos \omega + \cos \delta \sin \beta \sin \gamma \sin \omega \end{aligned} \quad (18)$$

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

$$R_b = \frac{\cos \theta}{\cos z} \quad (19)$$

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:

$$I_b = I_{bh} * R_b \quad (20)$$

Difuzna dozračena energija na kosu površinu računa se prema:

$$I_d = 0,5I_{dh}(1 + \cos \beta) \quad (21)$$

Ukupna dozračena energija na kosu površinu računa se prema:

$$I = I_b + I_d \quad (22)$$

### 5.3. Koeficijent prijelaza topline s vanjske strane

Koeficijent prijelaza topline s vanjske strane zida za lokaciju na Marsu potencijalno ima velik utjecaj na koeficijent prolaza topline kroz zid, a samim time i na energetske bilancu. Naime, ukoliko koeficijent prijelaza topline poprima niske vrijednosti (zbog specifičnih uvjeta koji vladaju u okolišu nastambe) on postaje dominantan toplinski otpor i može imati značajan utjecaj na energiju za grijanje kako je pokazano u Poglavlju 6. Stoga je u nastavku prikazan proračun korišten u ovom radu za izračun koeficijenta prijelaza topline, a koji je nužan za ispravnu simulaciju potreba grijanja nastambi.

U nastavku je prikazan proračun koeficijenta prijelaza topline prema [19] i [20] ovisno o modelu koji bolje opisuje oblik pojedine nastambe. Proračun koeficijenta prijelaza topline za nastambe *Mars Incubator* i *Northwestern University* proveden je temeljem [19], budući da oblik nastambe odgovara izopotencijalnim sferoidima za koje je navedeni model konstruiran, dok nastambe *MARSHA* i *Zopherus* oblikom ovojnice više odgovaraju modelu [20] koji, među ostalim, odgovara cilindričnim oblicima.

Za svojstva atmosfere na Marsu u proračunu su korištene sljedeće pretpostavke :

- *atmosferski tlak*:  $p = 660 \text{ Pa}$ ;
- *srednja godišnja temperatura (prosječna satnih vrijednosti)* :  $T = 196,15 \text{ K}$ ;
- *sastav atmosfere*: 95%  $\text{CO}_2$ , ostatak čine dušik i argon, (u radu pretpostavljen sastav 100%  $\text{CO}_2$ );
- *srednja brzina vjetrova*:  $w = 10 \text{ m/s}$ ;
- *plinska konstanta  $\text{CO}_2$* :  $R = 0,189 \text{ kJ/kgK}$

Pod pretpostavkom da vrijedi jednačina stanja idealnog plina (dovoljno visoka temperatura i nizak tlak) vrijedi za gustoću:

$$\rho = \frac{p}{RT} = 0,018 \text{ kg/m}^3 \quad (23)$$

Vrijednost dinamičke viskoznosti  $\mu$  ekstrapolirana je iz [21], pri čemu se u tablicama mogu pronaći vrijednosti za temperature od 685 do 1052°C (Slika 18). Ekstrapolirana vrijednost za temperaturu od -77°C, iznosi  $15 \times 10^{-6} \text{ Pa s}$ . Usporedi li se navedene vrijednosti s vrijednostima dinamičke viskoznosti za ugljični monoksid i zrak, uočava se vrijednost istog

reda veličine. Uzme li se u obzir da dinamička viskoznost idealnih plinova ne ovisi o tlaku, može se zaključiti da je podatak uporabljiv kao dobra procjena stvarne dinamičke viskoznosti.

Plin	Kemijska formula	Temperatura		Dinamički viskozitet	
		t	T	10 <sup>4</sup> × η	
		°C	K	kps/m <sup>2</sup>	Pas
Ugljični dioksid	CO <sub>2</sub>	685	958,15	3,875	38,00
		764	1037,15	4,164	40,84
		850	1123,15	4,444	43,58
		1008	1281,15	4,872	47,78
		1052	1325,15	4,880	47,86
Ugljični monoksid	CO	-80	193,15	1,295	12,7
		-60	213,15	1,397	13,7
		-40	233,15	1,499	14,7
		-20	253,15	1,601	15,7
		0	273,15	1,693	16,6
		20	293,15	1,795	17,6
		50	323,15	1,927	18,9
		100	373,15	2,141	21,0
		150	423,15	2,335	22,9
		200	473,15	2,519	24,7
		250	523,15	2,692	26,4
		300	573,15	2,845	27,9
		Uzduh (zrak)		-194	79,15
-183	90,15			0,639	6,27
-150	123,15			0,887	8,70
-100	173,15			1,203	11,80
-50	223,15			1,489	14,60
0	273,15			1,753	17,19
50	323,15			1,964	19,26
100	373,15			2,141	21,24

Slika 18 Svojstva ugljičnog dioksida u termodinamičkim tablicama [21]

Ostala svojstva CO<sub>2</sub> potrebna za proračun koeficijenta prijelaza topline su također iz [21]. Za toplinska provodnost CO<sub>2</sub> korištena je vrijednost  $\lambda = 0,014 \frac{W}{m^2K}$ , a za toplinski kapacitet vrijednost  $c_p = 0,74 \frac{kJ}{kgK}$ .

### 5.3.1. Proračun za nastambe Mars Incubator i Northwestern University

Kako je prethodno navedeno, proračun koeficijenta prijelaza topline za nastambe Mars Incubator i Northwestern University proveden je prema [19].

U proračunu se koristi karakteristična dužina koja odgovara korijenu oplošja sferoida, odnosno površini ovojnice nastambe:

$$L = \sqrt{A} \quad (24)$$

Reynoldsov broj dobiva se pomoću karakteristične dužine:

$$Re = \frac{\rho w L}{\mu} \quad (25)$$

Prandtlov broj dobiva se iz svojstava fluida, odnosno atmosferskog  $CO_2$ :

$$Pr = \frac{\mu c_p}{\lambda} \quad (26)$$

Vrijednosti Reynoldsovog i Prandtlovog broja moraju zadovoljavati slijedeće kriterije:

$$0 < Re < 2 * 10^5 ; Pr > 0,7 \quad (27)$$

Ukoliko Re i Pr zadovoljavaju, Nusseltov broj se računa prema slijedećem izrazu:

$$Nu = 3,545 + \left[ 0,15 * \left(\frac{p}{L}\right)^{\frac{1}{7}} * Re^{\frac{1}{2}} + 0,35 * Re^{0,566} \right] * Pr^{\frac{1}{3}} \quad (28)$$

gdje je  $p$  maksimalni perimetar, odnosno opseg najvećeg longitudinalnog presjeka ovojnice.

Koeficijent prijelaza topline dobiva se u konačnici iz izraza:

$$\alpha = \frac{Nu * \lambda}{L} \quad (29)$$

Temeljem prikazanog proračuna dobivaju se slijedeće vrijednosti koeficijenta prijelaza topline prikazane u Tablici 1. Bitno je napomenuti da se ove vrijednosti znatno razlikuju od onih za simulacije zgrada na Zemlji, a koje obično iznose oko 20 W/m<sup>2</sup>K

*Tablica 1 Rezultati proračuna koeficijenta prijelaza topline za nastambe Mars Incubator i Northwestern University*

	$A [m^2]$	$L [m]$	$Re$	$Pr$	$Nu$	$\alpha [W / m^2 K]$
<i>Mars Incubator</i>	312	17,66	210 000	0,79	421,84	0,334
<i>Northwestren University</i>	221	14,92	177 000	0,79	397,42	0,373

### 5.3.2. Proračun za nastambe MARSHA i Zopherus

Proračun koeficijenta prijelaza topline za nastambe *MARSHA* i *Zopherus* proveden je prema [19], kako je navedenu u početku poglavlja.



U proračunu se za izračun Reynoldsovog broja koristi promjer cilindra, budući da je proračun konstruiran za proračun prijelaza topline kod cilindričnih oblika. Za promjer zamišljenog cilindra odabran je maksimalan pr omjer promatrane nastambe.

Reynoldsov broj dobiva se pomoću karakterističnog promjera:

$$Re = \frac{\rho w D}{\mu} \quad (30)$$

Prandtllov broj dobiva se iz svojstava fluida, odnosno atmosferskog  $CO_2$  :

$$Pr = \frac{\mu c_p}{\lambda} \quad (31)$$

Vrijednosti Reynoldsovog i Prandtlvog broja moraju zadovoljavati slijedeće kriterije :

$$3,4 < Re < 7,6 * 10^4 \quad ; \quad 0,71 < Pr < 380 \quad (32)$$

Ukoliko Re i Pr zadovoljavaju, Nusseltov broj se računa prema slijedećem izrazu :

$$Nu = 2 + (0,4Re^{1/2} + 0,6Re^{2/3}) * Pr^{0,4} * \left(\frac{\mu_{\infty}}{\mu_w}\right)^{1/4} \quad (33)$$

gdje je  $\mu_{\infty}/\mu_w$  omjer viskoznosti fluida koji je postavljen na vrijednost 1.

Temeljem prikazanog proračuna dobivaju se slijedeće vrijednosti koeficijenta prijelaza topline prikazane u Tablici 2. Kao što je spomenuto ranije, vrijednosti se znatno razlikuju od onih za simulacije zgrada na Zemlji, a koje obično iznose oko 20 W/m<sup>2</sup>K

Tablica 2 Rezultati proračuna koeficijenta prijelaza topline za nastambe MARSHA i Zopherus

	$D$ [m]	$Re$	$Pr$	$Nu$	$\alpha$ [W/m <sup>2</sup> K]
MARSHA	7	83 200	0,79	201,81	0,404
Zopherus A	7,7	91 500	0,79	213,23	0,388

#### 5.4. Toplinska svojstva materijala zidova i prozora

U sklopu natjecanja NASA's 3D printed Habitat Challenge proizvedeni su prototipovi dijelova zidova. Organizacijom sustava bodovanja naglasak je stavljen na korištenje materijala dostupnih u okolišu na Marsu te recikliranih materijala, kako bi se minimizirao udio materijala

koje je potrebno donijeti sa Zemlje zbog visokih troškova prijevoza. Prototipovi zidova su potom podvrgnuti testiranjima čvrstoće materijala kako bi se utvrdilo mogu li ispuniti svoju primarnu funkciju, to jest osigurati konstrukcijski integritet nastambe.

S obzirom da su nastambe na Marsu opterećene brojnim opterećenjima koja su gotovo zanemariva na Zemlji, poput razlike tlakova ili toplinskih naprezanja uslijed naglih promjena temperature, razumljivo je da je naglasak stavljen na mehaničku čvrstoću i stabilnost nosive konstrukcije nastambe. Međutim, nedostatak ispitivanja toplinskih svojstava zidova ostavlja veliku nesigurnost prilikom proračuna toplinskog opterećenja nastambi.

Zbog toga je u sklopu ovog rada odabran jedan materijal zidova za sve opisane. Za materijal zidova odabran je kompozit čija je osnova proizvedena od pijeska dostupnog u okolišu na Marsu, koji s dodatkom ojačala polietilenskih ili bazaltnih vlakana dobiva nakon toplinske obrade strukturni integritet i povoljna toplinska svojstva. Bazalna vlakna, inače prisutna u vulkanskim stijenama, mogu se naći u okolišu Marsa. Bazalt je poznata sirovina za izradu izolacijskih materijala poput kamene vune (Slika 19). Svojstva i struktura bazalta razlikuju se značajno prije i nakon obrade, pa je stoga teško pretpostaviti toplinska svojstva nakon obrade, budući da ona uvelike ovise o kvaliteti postupka i samoj opremi za proizvodnju. Osim toga, bazalt se može koristiti za proizvodnju vlakana za ojačanje betonske matrice, kako navodi [22]. Betonska matrica najsličnija je *Marscrete-u*, materijalu nastambe *Northwestern University*.



Slika 19 Izolacijski materijal nastao nakon obrade bazaltnih vlakana [30]

Početna faza simulacije provedena je s materijalom istih toplinskih svojstava za sve četiri nastambe, te su nastambe uspoređene sa stajališta potrebne energije za grijanje. U idućoj fazi simulacija varirane su debljine zidova pojedine nastambe kako bi se utvrdilo na koji način

debljina zida utječe na ukupne potrebe grijanja. Potom su u završnoj fazi razmatrani slučajevi kada bi se iz dostupnih materijala i bazaltnih vlakana uspio proizvesti izolacijski materijal, te kako bi dodavanje slojeva izolacijskog materijala utjecalo na toplinsku bilancu nastambe. S obzirom na nesigurnosti oko toplinskih svojstava za materijal zidova i hipotetskog izolacijskog materijala, svojstva materijala su varirana između prosječnih vrijednosti materijala visoke i niske kvalitete toplinskih svojstava, a koja se koriste na tržištu. Rezultati analize prikazani su kao parametarske krivulje za različite toplinske provodnosti materijala.

Vrsta prozora za sve nastambe odabrana je iz baze materijala TRNSYS-a, prema kriteriju najmanjeg koeficijenta prolaza topline i propusnosti sunčevog zračenja. Odabran je tip prozora s vrijednostima  $U = 0,4 \text{ W/m}^2\text{K}$  i  $g = 0,408$ .

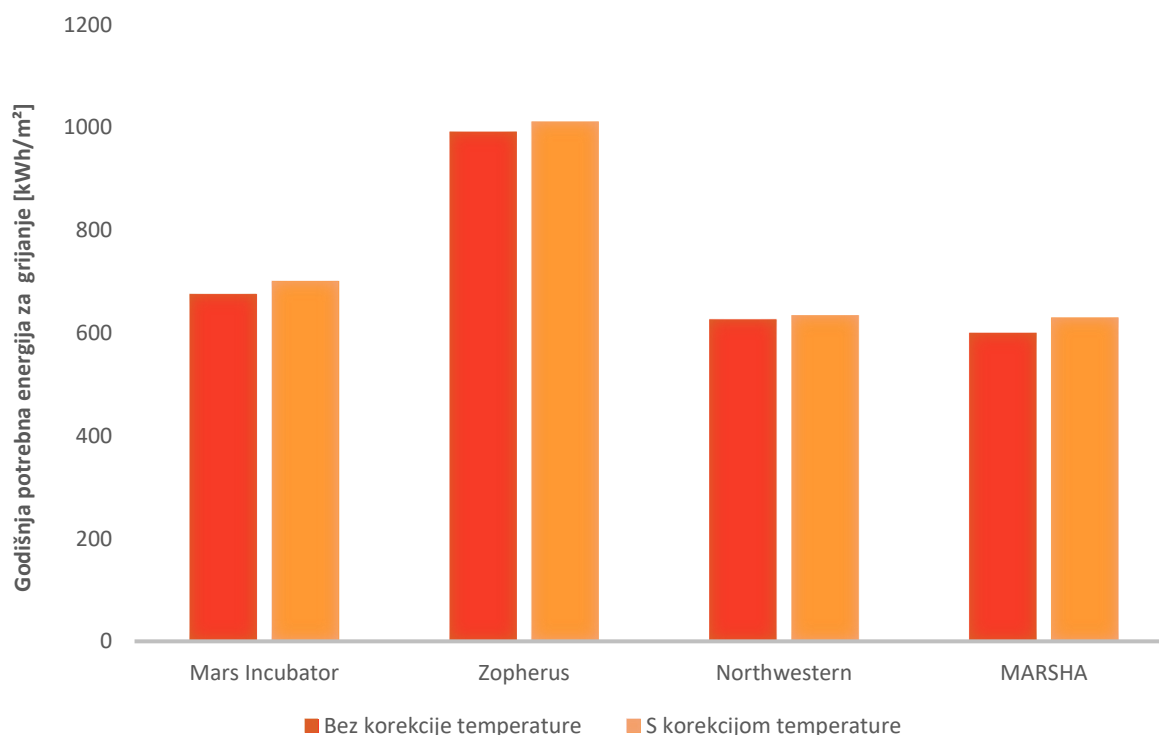
Iz razloga opisanih u prethodnim poglavljima, infiltracija ili izlazak zraka iz unutrašnjosti nastambe je zanemaren pod pretpostavkom idealnog brtvljenja na spojevima vrata i prozora.

Toplinski dobici definirani su s konstantnom vrijednošću od 320 W, uz pretpostavku konstantnog boravka četvero odraslih ljudi u prostoru nastambe. Toplinski dobici od opreme i računala nisu uzeti u obzir budući da nije poznato kolika količina opreme će se nalaziti u prostoru nastambe.

## 6. Rezultati

### 6.1. Utjecaj geometrije ovojnice i korekcije temperature

U ovom poglavlju prikazani su rezultati dinamičkih, satnih simulacija kojima je cilj izračun godišnje potrebne energije za grijanje za četiri odabrane nastambe s natjecanja „NASA's 3D printed Habitat Challenge (Slika 21). Rezultati na Slici 20 su za slučaj da sve nastambe imaju identične zidove debljine 30 cm, toplinske provodnosti 0,3 W/mK, gustoće 1350 kg/m<sup>2</sup> i toplinskog kapaciteta 0,8 kJ/kgK. Crvenom bojom je prikazana potrebna energija pod pretpostavkom konstantne vanjske temperature okoliša. Narančastom bojom prikazana je potrebna energija kada se provede korekcija temperature vanjskog medija (CO<sub>2</sub>). Naime, kako je ranije opisano, za razliku od okoliša na Zemlji gdje u najvećem broju slučajeva nema varijacija vanjske temperature duž ovojnice nastambe, na Marsu postoji značajan temperaturni gradijent po visini, što treba uzeti u obzir kod viših objekata.



Slika 20 Usporedba potrebne energije za grijanje za četiri analizirane nastambe

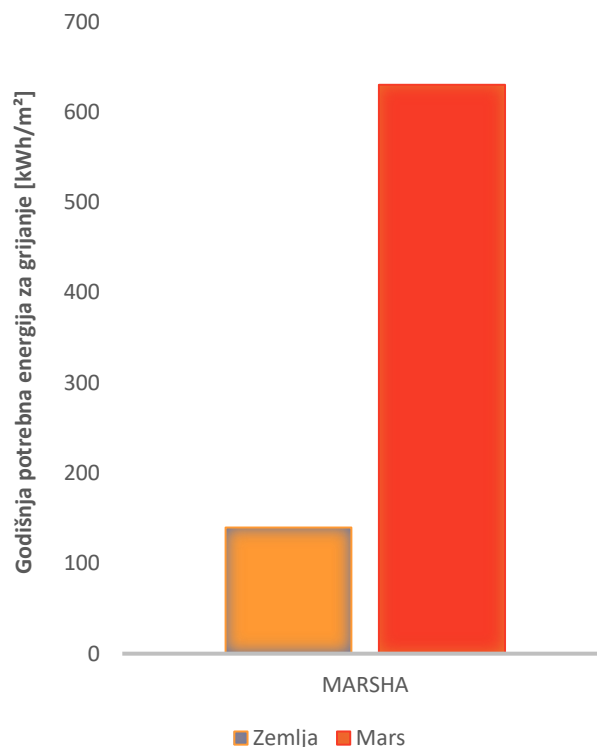
Najmanju godišnju potrebnu energiju za grijanje od 600 kWh/m<sup>2</sup> ima nastamba MARSHA tvrtke AI SpaceFactory, a slijedi ju nastamba Northwestern University s 627 kWh/m<sup>2</sup>.

Ovaj rezultat posljedica je činjenice da nastamba *Northwestern University* ima nešto manju površinu ovojnice koja graniči s atmosferom, no zbog svojeg dizajna ima veću površinu izmjene topline s tлом. Budući da je na izmjenu topline s tлом postavljen rubni uvjet konstantne temperature tla od  $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$  temeljem [16], dvije navedene nastambe imaju najniže potrebe energije grijanja od navedenih nastambi. Vrijednost temperature od  $-15^{\circ}\text{C}$  se svakako čini previsoka za vrijednost prosječne vanjske temperature  $-77^{\circ}\text{C}$ . Ipak, službena literatura koja navodi takav podatak dosta je stara, te bi temperaturu tla trebalo modelirati kvalitetnijim modelom od konstantne prosječne godišnje vrijednosti.

Iz rezultata se može uočiti da kod nastambe *MARSHA*, najviše nastambe od odabrane četiri, korekcija vanjske temperature očekivano ima najveći utjecaj na ukupnu potrebnu energiju za grijanje. Promjena ukupne energije za grijanje uslijed korekcije vanjske temperature iznosi 5% ukupne energije, što upućuje da bi se navedena korekcija mogla zanemariti, posebno za nastambe visine ispod 10 metara. Ipak, navedenih 5% odgovara iznosu energije od  $30\text{ kWh/m}^2$ , što nikako nije zanemarivo usporedi li se navedeni podatak s potrebama grijanja zgrada na Zemlji.

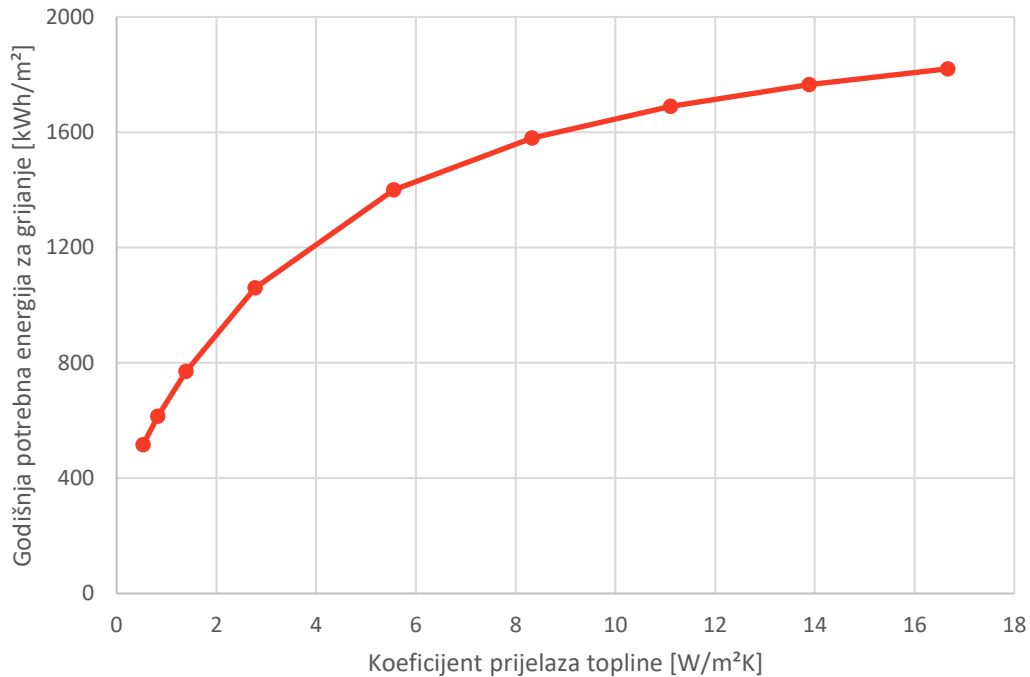
## **6.2. Usporedba okoliša Marsa i Zemlje**

Za usporedbu i ocjenu kvalitete materijala zidova, odnosno ovojnice nastambi, provedena je simulacija radi usporedbe godišnja potrebna energije za grijanje nastambe *MARSHA* u okolišu na Marsu i na Zemlji, odnosno na prostoru grada Zagreba. Rezultati simulacija prikazani su na Slici 21.



*Slika 21 Usporedba godišnje potrebne energije za grijanje na Marsu i na Zemlji*

Iz rezultata je jasno vidljivo da je godišnja potrebna energija za grijanje na području grada Zagreba ( $140 \text{ kWh/m}^2$ ) značajno niža nego na Marsu ( $631 \text{ kWh/m}^2$ ), što pokazuje utjecaj izuzetno niske temperature vanjskog okoliša. Potrebno je u također uzeti u obzir da jedna godina na Marsu traje više od 16 000 sati, što odgovara gotovo dvije godine na Zemlji, pa samim time navedeni podaci i nisu lako usporedivi u smislu da predstavljaju različito vremensko razdoblje. Ispravnije bi bilo podijeliti potrebe grijanja nastambe na Marsu s faktorom 1,8 i potom usporediti vrijednosti. Uzme li se u obzir da sezona grijanja na Marsu traje cijelu godinu, dok na području grada Zagreba traje otprilike pola godine, može se zaključiti da se potrebe grijanja za jedan dan u prosjeku ne razlikuju značajno usprkos daleko nižim temperaturama na Marsu. Uzrok leži u činjenici da niske vrijednosti koeficijenta prijelaza topline na Marsu imaju velik utjecaj na toplinsku bilancu nastambe, a što je prikazano u nastavku (Slika 22).



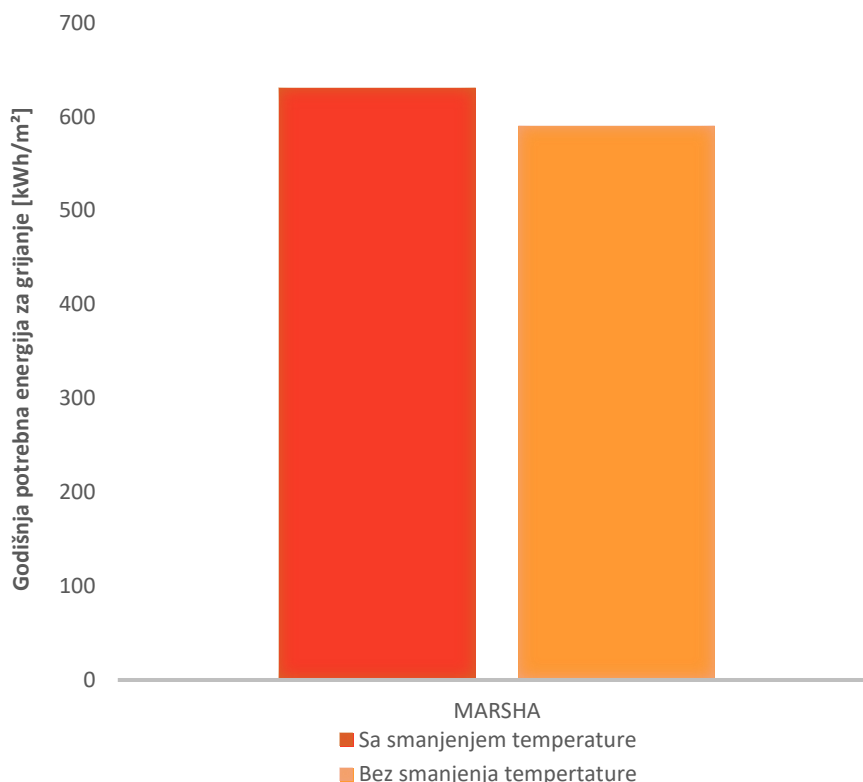
Slika 22 Utjecaj koeficijenta prijelaza topline na godišnje potrebe grijanja

Iz rezultata na Slici 21 također se može zaključiti da ovojnica nastambe, zbog nepostojanja toplinske izolacije, ima relativno loša toplinska svojstva u odnosu na nove zgrade na Zemlji. Naime, potrebna energija za grijanja zgrade *MARSHA* na području Zagreba iznosi 140 kWh/m<sup>2</sup>, što je znatno više od najvećih dopuštenih vrijednosti za nove zgrade prema „Tehničkom propisu o racionalnoj uporabi energije“, a koje za obiteljske zgrade iznose 40 do 75 kWh/(m<sup>2</sup>a). Međutim, treba imati na umu da većinu materijala potrebnog za izgradnju nije moguće ponijeti sa Zemlje, budući da svaki kilogram materijala iziskuje velike troškove prilikom transporta. Zbog toga je poželjno iskoristiti materijale dostupne na Marsu, čime se sužava izbor toplinskih svojstava materijala budući da su prioriteti ipak mehanička svojstva i stabilnost konstrukcije cijele građevine.

### 6.3. Utjecaj noćnog smanjenja temperature

Jedan od načina smanjenja potrebne energije za grijanje bilo bi korištenje rasporeda u kojemu bi sustav grijanja u određenom periodu (primjerice noću) radio u djelomičnom opterećenju ili bio potpuno ugašen. Budući da nije moguće ugasiti sustav grijanja zbog

cjelodnevnog boravka ljudi i niskih vanjskih temperatura, predlaže se opcija smanjenja unutarnje temperature tijekom noći na 15°C. Na Slici 23 prikazana je usporedba potrebne energije za grijanje s korištenjem rasporeda te s konstantnom unutarnjom temperaturom od 20°C. Potrebna energija za grijanje u slučaju niže temperature noću pokazuje smanjenje s 630 na 590 kWh/m<sup>2</sup>, odnosno 6,3%.



*Slika 23 Usporedba godišnje potrebne energije za grijanje sa i bez smanjenja temperature tijekom noći*

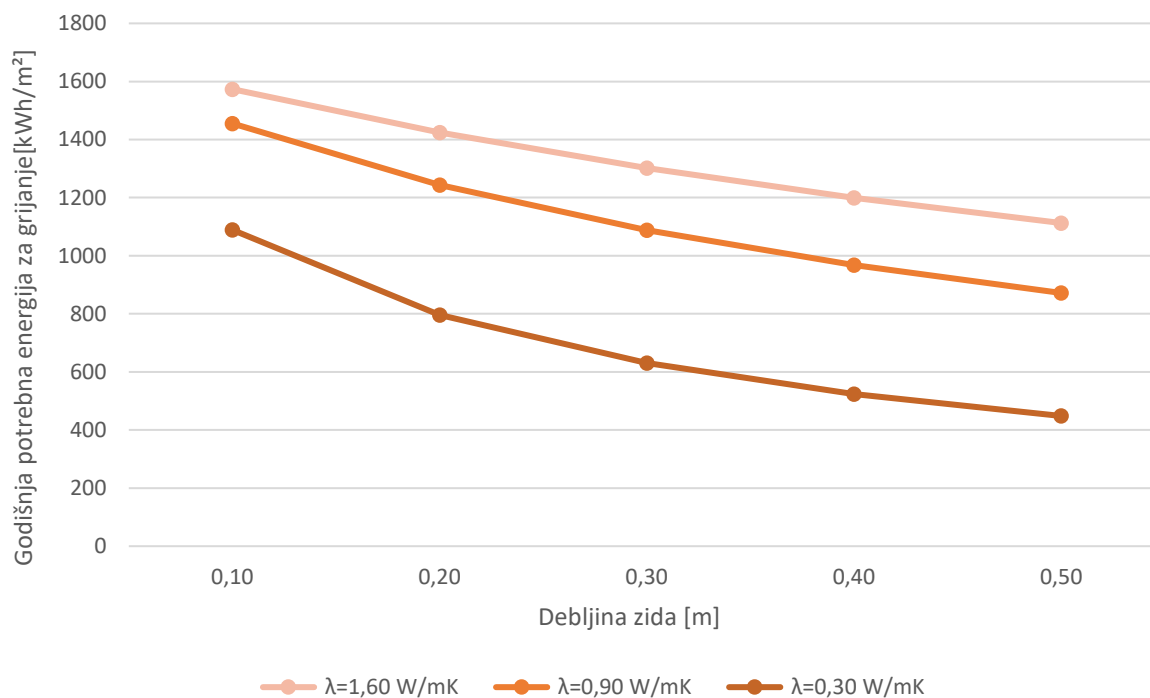
#### **6.4. Utjecaj toplinskih svojstava zidova**

Glavna nesigurnost simulacija godišnjih potreba grijanja zgrade na Marsu uzrokovana je nepoznavanjem toplinskih svojstava materijala zidova. Bazu za izradu zida zgrade na Marsu čini vrsta pijeska prisutna u tlu na Marsu bogata bazaltnim vlaknima u kombinaciji s polietilenskim vlaknima koja osiguravaju potrebnu čvrstoću i mehaničku stabilnost. Bazalna vlakna koriste se za proizvodnju izolacijskih materijala poput mineralne vune. Ipak, iluzorno je očekivati da će materijal zida imati toplinska svojstva poput mineralne vune budući da je



mineralna vuna izrazito porozan materijal bez velike nosivosti i mehaničke čvrstoće. Teško je bez ispitivanja odrediti, pa čak i pretpostaviti kakva će biti toplinska svojstva zida nakon izgradnje. Zbog toga je provedeno više simulacija u cilju analize utjecaja svojstava zidova na potrebnu energiju za grijanje.

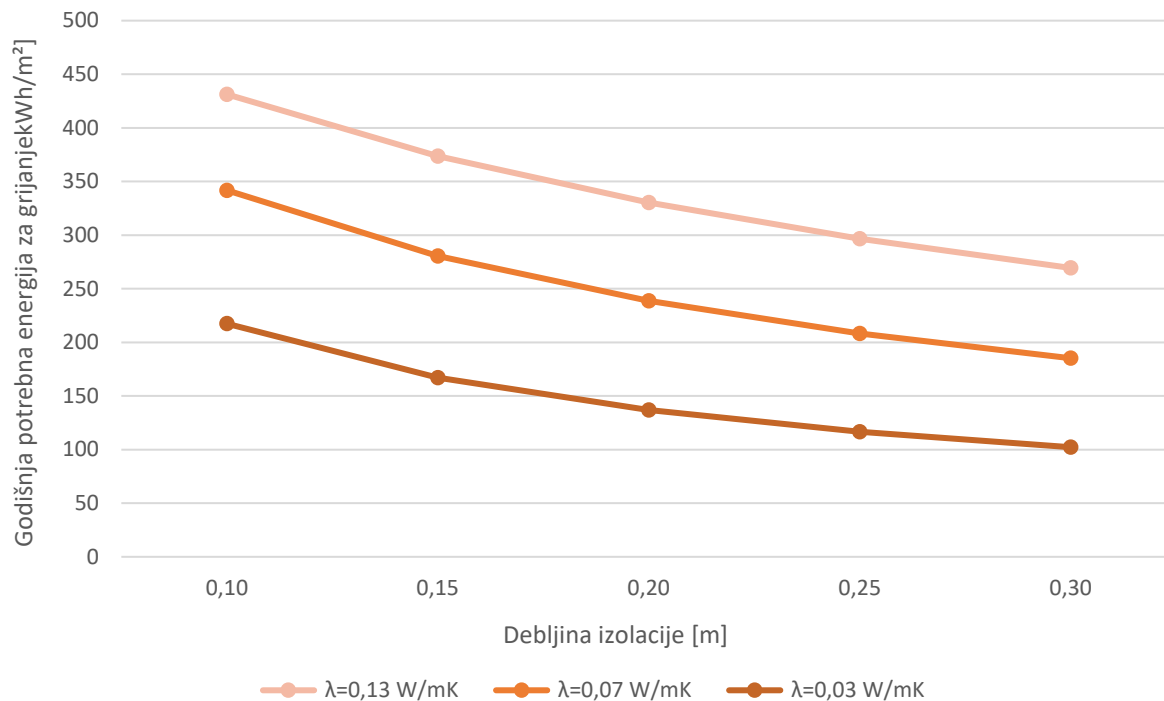
Slika 24 prikazuje rezultati parametarske analize kojom se istražuje utjecaj svojstava zidova, prvenstveno toplinske provodnosti i debljine, na potrebnu energiju za grijanje. Pri tome su varirane vrijednosti toplinske provodnosti od 1,6 W/mK do 0,3 W/mK. Vrijednost od 1,6 W/mK odgovara bazaltnom pijesku (sirovini), dok vrijednost od 0,3 W/mK odgovara kvalitetnim građevnim materijalima poput aeriranog betona ili šuplje cigle, što bi bila izuzetno niska toplinska provodnost za materijal čija je glavna funkcija osigurati visoki mehanički integritet zgrade. Rezultati ukazuju da potrebe grijanja značajno ovise o toplinskim svojstvima zida, odnosno kvaliteti postupka izgradnje zida. Također je vidljivo da za analizirani slučaj povećanje debljine zida iznad 50 cm nema značajan efekt u smislu smanjenja potreba grijanja.



Slika 24 Ovisnost potreba grijanja o toplinskoj provodnosti i debljini zida

Razmatrana je također mogućnost unaprjeđenja postupka 3D printanja ili neke druge tehnologije gradnje koja bi omogućila proizvodnju svojevrsnog izolacijskog materijala kao nadogradnje na toplinsku izolaciju ovojnice nastambe na Marsu. U tu svrhu provedene su simulacije s osnovnim slojem zida debljine 30 cm i toplinske provodnosti 0,3 W/mK te

dodatnim slojem vanjske izolacije različitih debljina. Toplinska svojstva izolacije varirana su ovisno o kvaliteti izrade (različite vrijednosti toplinske provodnosti), kako je prikazano na Slici 24.



Slika 25 Ovisnost potreba grijanja o toplinskoj provodnosti i debljini izolacije

Kako je prikazano na Slici 25, potrebe grijanja, odnosno toplinske gubitke moguće je značajno smanjiti dodavanjem sloja izolacije. Međutim, dodavanje izolacije nakon određene debljine, u ovom slučaju 30 cm, nema velikog utjecaja na energetske potrebe nastambe.

## 7. Rasprava i zaključak

Računalne simulacije prikazane u ovom radu provedene su s ciljem analize godišnje potrebne energije za grijanje budućih nastambi na Marsu te analize glavnih utjecajnih parametara. Analize su provedene za četiri nastambe s natjecanja *NASA's 3D printed Habitat Challenge*, kako bi se odredilo koji je oblik ovojnice od odabranih nastambi najbolji sa stajališta energetske učinkovitosti. Energijski modeli nastambi izrađeni su pod pretpostavkom jednakog životnog prostora od 110 m<sup>2</sup> za sve nastambe. Provedene su satne simulacije godišnje potrebne energije grijanja unutar programa za dinamičke simulacije TRNSYS. Ulazni podaci prikupljeni su sa službenih NASA-inih stranica i obrađeni za primjenu u računalnim simulacijama energetske karakteristika nastambi.

Simulacijom je utvrđeno da najmanju godišnju potrebnu energiju za među analiziranim nastambama ima nastamba *MARSHA* tvrtke *AI SpaceFactory*, a iznosi 600 kWh/m<sup>2</sup>. S obzirom na postojanje značajnog vertikalnog gradijenta temperature od 2°C/m, analiziran je utjecaj korekcije vanjske temperature na rezultate simulacije. Uz pretpostavku linearnog profila temperature po visini, za korigiranu vrijednost temperature odbrana je temperatura na polovici visine nastambe. Rezultati simulacija upućuju da je za nastambe niže od 10 metara moguće zanemariti korekciju temperature budući da ne utječe značajno na ukupne potrebe grijanja. Za zgrade više od 10 metara korekcija temperature povećava potrebe grijanja za više od 5% te se stoga preporuča uzeti ju u obzir.

Energijski model nastambe *MARSHA* korišten je također za analizu utjecajnih parametara na potrebnu energiju. Provedena je usporedba godišnje potrebne energije za grijanje nastambe u okolišu na Marsu i na Zemlji. Rezultati ukazuju da su godišnje potrebe grijanja na području grada Zagreba (140 kWh/m<sup>2</sup>) značajno niže nego na Marsu (631 kWh/m<sup>2</sup>), što je posljedica izuzetno niske temperature vanjskog okoliša na Marsu. Međutim, prilikom usporedbe rezultata potrebno je uzeti u obzir da godina na Marsu traje više od 16 000 sati, što odgovara gotovo dvije godine na Zemlji, pa samim time navedeni podaci i nisu direktno usporedivi u smislu da predstavljaju različito vremensko razdoblje. Točnije bi bilo podijeliti potrebe grijanja nastambe na Marsu s faktorom 1,8 te potom usporediti dobivene vrijednosti. Uzme li se u obzir da sezona grijanja na Marsu traje cijelu godinu, dok na području grada Zagreba traje otprilike pola godine, može se zaključiti da se potrebe grijanja za jedan dan u prosjeku ne razlikuju značajno usprkos daleko nižim temperaturama na Marsu. Uzrok leži u činjenici da relativno niske vrijednosti

koeficijenta prijelaza topline na Marsu imaju veliki utjecaj na toplinsku bilancu zgrade. Vrijednosti koeficijenta prijelaza topline na Marsu (oko  $0,4 \text{ W/m}^2\text{K}$ ) se znatno razlikuju od onih na Zemlji (oko  $20 \text{ W/m}^2\text{K}$ ).

Iz rezultata se također može zaključiti da ovojnica nastambe, zbog nepostojanja toplinske izolacije, ima relativno loša toplinska svojstva u odnosu na nove zgrade na Zemlji. Naime, potrebna energija za grijanja zgrade *MARSHA* na području Zagreba iznosi  $140 \text{ kWh/m}^2$ , što je znatno više od najvećih dopuštenih vrijednosti za nove zgrade prema „Tehničkom propisu o racionalnoj uporabi energije“, a koji za obiteljske zgrade iznose  $40$  do  $75 \text{ kWh/(m}^2\text{a)}$ .

Analiza ovisnosti potreba energije grijanja o toplinskoj provodnosti i debljini zida pokazala je da potrebe grijanja značajno ovise o toplinskim svojstvima zida, odnosno kvaliteti postupka izgradnje zida. Također je pokazano da za analizirani slučaj povećanje debljine zida iznad  $50 \text{ cm}$  nema značajan efekt u smislu smanjenja potreba grijanja.

## 8. Sažetak

Slanje ljudske posade i osnivanje održive kolonije na Marsu ubraja se u jedan od najvećih izazova današnjice. Međutim, uvjeti na Marsu nepogodni su za ljude i održavanje života općenito, zbog čega misije s ljudskom posadom podrazumijevaju izgradnju nastambi za dugotrajan smještaj ljudi. U radu su provedene simulacije potrebne energije za grijanje nastambi na Marsu te analiza utjecajnih parametara. Analiza je provedena za četiri nastambe s natjecanja *NASA's 3D printed Habitat Challenge* koje idejno i oblikom ovojnice predstavljaju različite koncepte korištenja tehnologije 3D printanja pri različitim stupnjevima autonomne gradnje. Simulacije su provedene za svaki sat u godini korištenjem računalnog programa TRNSYS.

Jedan od osnovnih izazova provedenih analiza jest činjenica da ključni ulazni podaci (vanjske temperature, sunčevo zračenje i slično) nisu lako dostupni kao za lokacije na Zemlji. U radu je stoga dan pregled dostupnih podataka mjerenja iz NASA-inih baza podataka, te je prikazan način obrade podataka za korištenje u računalnim simulacijama potrošnje energije. Nadalje, zbog ekstremnih uvjeta na Marsu postoje određeni utjecajni parametri koji se značajno razlikuju od onih na Zemlji, poput primjerice koeficijenta prijelaza topline te gradijenta temperature po visini, a čiji je utjecaj analiziran u radu.

Rezultati pokazuju da zbog ekstremno niskih temperatura na Marsu analizirane nastambe imaju znatno veću godišnju potrebnu energiju za grijanje ( $631 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ ) od onih koje bi imale na Zemlji ( $140 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$  u gradu Zagrebu). Ipak, rezultati nisu potpuno usporedivi jer jedna godina na Marsu traje više od 16 000 sati, što odgovara gotovo dvije godine na Zemlji. Nadalje, analizom je pokazano da zbog ograničenosti građevnih materijala ovojnica nastambi ima znatno lošija toplinska svojstva u odnosu na nove zgrade na Zemlji. Rezultati također pokazuju da koeficijent prijelaza topline na vanjskim zidovima nastambe znatno utječe na rezultate simulacije, s obzirom da je 40 do 50 puta niži od onoga na Zemlji. Unatoč znatno većem gradijentu vanjske temperature po visini u odnosu na Zemlju, rezultati sugeriraju da korekcija vanjske temperature nije nužna za zgrade niže od 10 m, odnosno da promjena nema veliki utjecaj na rezultate simulacije. Konačno, prikazane su usporedbene analize s ciljem analize optimalne geometrije, postavnih unutarnjih temperatura i svojstava zidova nastambe. Rezultati ukazuju da potrebe grijanja značajno ovise o toplinskim svojstvima zida, odnosno kvaliteti postupka izgradnje zida.

Ključne riječi: nastambe na Marsu, *NASA's 3D printed Habitat Challenge*, potrebna energija za grijanje, dinamičke računalne simulacije, utjecajni parametri

## 9. Summary

Sending human crew and establishing a sustainable colony on Mars is considered one of the biggest challenges of our times. However, conditions on Mars are unsuitable for humans and sustaining life in general, which is why manned missions entail the construction of long-term human habitation. In this paper, simulations of heating needs for dwellings on Mars and analysis of the influencing parameters were carried out. The analysis was given for four dwellings from *NASA's 3D printed Habitat Challenge* competition, which conceptually and with envelope shape represent different concepts of using the 3D printing technology at different levels of an autonomous construction. Hourly simulations were carried out using the computer program TRNSYS.

One of the main challenges of the performed analyzes is the fact that key input data (e.g. ambient temperatures, solar radiation, etc.) are not easily available as for locations on Earth. The paper therefore provides an overview of the available data from NASA's databases and shows how to process them into inputs for computer simulations of heating energy consumption. Furthermore, due to the extreme conditions on Mars, there are certain influencing parameters that are significantly different from those on Earth, such as the heat transfer coefficient and the vertical temperature gradient. Hence, their impact has been analyzed in this paper.

The results show that due to the extremely low temperatures on Mars, the analyzed dwellings have significantly higher annual energy needs for heating ( $631 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ ) than they would have on Earth ( $140 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ ) in the city of Zagreb). However, the results are not completely comparable because one year on Mars lasts more than 16,000 hours, which corresponds to almost two years on Earth. Furthermore, the analysis showed that due to the limitation of building materials, the housing envelope has significantly worse thermal properties compared to new buildings on Earth. The results also show that the heat transfer coefficient on the outer walls of the dwelling significantly affects the simulation results, given that it is 40 to 50 times lower than that on Earth. Despite the significantly larger outdoor temperature gradient by height compared to the Earth, the results suggest that the outdoor temperature correction is not necessary for buildings lower than 10 m. In other words, the change does not have a big impact on the simulation results. Finally, comparative analyzes are presented with the aim of analyzing the optimal geometry, set point internal temperatures and

thermal properties of the walls of the dwelling. The results indicate that the heating needs significantly depend on the thermal properties of the wall, that is, the quality of the wall construction process.

Keywords: Mars habitats, NASA's 3D printed Habitat Challenge, heating energy demand, dynamic computer simulations, influencing parameters



## *Popis literature*

- [1] Monsi C. Roman, Tony Kim, Tracie J. Prater, Robert P. Mueller „NASA's Centennial Challenge: 3D-Printed Habitat“, 2017.
- [2] Robert P. Mueller, Tracy J. Prater, Monsi Roman, Jennifer E. Edmunson, Michael R. Fiske, Peter Carrato, „NASA's Centennial Challenge: 3D-Printed Habitat, Phase 3“, 2019.
- [3] Tobias Owen, K. Biemann, D. R. Rushneck, J. E. Biller, D. W. Howarth, A. L. Lafleur, The composition of the atmosphere at the surface of Mars, 1977.
- [4] Tobias Owen, The composition and surface pressure of the Martian atmosphere, 1966.
- [5] Masamichi Yamashita, Yoji Ishikawa, Yoshiaki Kitaya, Eiji Goto, Mayumi Arai, Hirofumi Hashimoto, Kaori Tomita-Yokotani, Masayuki Hirafuji, Katsunori Omori, Atsushi Shiraishi, Akira Tani, Kyoichiro Toki, Hiroki Yokota, Osamu Fujita, An Overview of Challenges in Modeling Heat and Mass Transfer for Living on Mars, 2006.
- [6] Charles Cockell, Mars is an awful place to live, 2013.
- [7] "Mars Weather", MARS InSight Mission, <https://mars.nasa.gov/insight/weather/>
- [8] D. Banfield et al., The atmosphere of Mars as observed by Insight, 2020.
- [9] F. Hourdin, Phu Le Van, F. Forget, O. Talagrand, Meteorological Variability and the Annual Surface Pressure Cycle on Mars, 1993.
- [10] "The Mars Climate Database", Universities Space Research Association <https://www.hou.usra.edu/meetings/ninthmars2019/eposter/6171.pdf>
- [11] Appelbaum, Flood, Dennis J., Solar radiation on Mars, 1989.
- [12] D. M. Kass, J. T. Schofield, A. Kleinböhl, D. J. McCleese, N. G. Heavens, J. H. Shirley, L. J. Steele, Mars Climate Sounder Observation of Mars' 2018 Global Dust Storm, 2019.
- [13] Hui Li, Huamin Meng, Mingzhang Lan, Jian Zhou, Mingfeng Xu, Xudong Zhao, Binfeng Xiang, Development of a novel material and casting method for in situ construction on Mars, 2021.
- [14] Tracie Prater, Tony Kim, Monis C. Roman, Robert P. Mueller, NASA's Centennial Challenge for 3D-Printed Habitat: Phase II Outcomes and Phase III Competition Overview, 2018.
- [15] [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)
- [16] Eells, J. W., Estimate of sub-surface Martian temperatures, 1969.
- [17] Duffie, Beckman. Solar Engineering of Thermal Processes. 4th Ed
- [18] Percec Tadić, Jurković, Gajic-Čapka. Baza klimatskih podataka za izračun energijskih svojstava zgrade

- [19] M.M. Yovanich, General expression for forced convection heat and mass transfer from isopotential spheroids, Paper AIAA 88-0743, presented at the AIAA 26th Aerospace Sciences Meeting, Reno, NV, January 11-14. 1988.
- [20] S. Whitaker, Forced convection heat transfer correlations for flow in pipes , past flat plates, single cylinders, single spheres, and flow in packed beds and tube bundles, AIChE J., Vol. 18, 1972, pp. 361-371.
- [21] Kuzma Ražnjević, Termodinamičke tablice
- [22] Van de Velde K., Kiekens P., Van Langenhove Basalt Fibres As Reinforcement For Composites
- [23] C Buratti, E Moretti, E Belloni, F Agosti, Thermal and Acoustic Performance Evaluation of New Basalt Fiber Insulation Panels for Buildings
- [24] Omer Kaynakli, A review of the economical and optimum thermal insulation thickness for building applications
- [25] G A Landis, T W Kerslake, P P Jenkins, D A Scheiman, Mars Solar Power, 2004.
- [26] <https://www.marsincubator.com/nasa-centennial-challenge/>
- [27] <https://www.washingtonpost.com/>
- [28] <https://sites.northwestern.edu/nasachallenge/virtual-design-level-1/>
- [29] <https://www.pinterest.com/pin/614248836664439177/>
- [30] <https://hr.puntomarnero.com/basalt-cardboard-application-characteristics-price/>