

# SIMULACIJA GRIJANJA NA MODELU PASIVNE SOLARNE KUĆE POMOĆU SUNČEVOG ZRAČENJA (SUSTAVOM PASIVNOG GRIJANJA PODA KROZ STAKLENE KLIZNE PLOHE)

---

**Manojlović, Ivan**

**Master's thesis / Specijalistički diplomski stručni**

**2024**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **Karlovac University of Applied Sciences / Veleučilište u Karlovcu**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:128:543589>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-12-22**



**VELEUČILIŠTE U KARLOVCU**  
Karlovac University of Applied Sciences

*Repository / Repozitorij:*

[Repository of Karlovac University of Applied Sciences - Institutional Repository](#)



zir.nsk.hr



DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJ

VELEUČILIŠTE U KARLOVCU  
STROJARSKI ODJEL  
STRUČNI DIPLOMSKI STUDIJ STROJARSTVA

IVAN MANOJLOVIĆ

**SIMULACIJA GRIJANJA NA MODELU  
PASIVNE SOLARNE KUĆE POMOĆU  
SUNČEVOG ZRAČENJA (SUSTAVOM  
PASIVNOG GRIJANJA PODA KROZ  
STAKLENE KLIZNE PLOHE)**

DIPLOMSKI RAD

KARLOVAC, 2024. godina

VELEUČILIŠTE U KARLOVCU  
STROJARSKI ODJEL  
STRUČNI DIPLOMSKI STUDIJ STROJARSTVA

IVAN MANOJLOVIĆ

**SIMULACIJA GRIJANJA NA MODELU  
PASIVNE SOLARNE KUĆE POMOĆU  
SUNČEVOG ZRAČENJA (SUSTAVOM  
PASIVNOG GRIJANJA PODA KROZ  
STAKLENE KLIZNE PLOHE)**

DIPLOMSKI RAD

Mentor: dr.sc. Vladimir Tudić, prof. struč. stud.

KARLOVAC, 2024. godina



VELEUČILIŠTE U KARLOVCU  
Karlovac University of Applied Sciences

Klasa:  
602-07/\_\_\_-01/\_\_\_

Ur.broj:  
2133-61-04-\_\_\_-01

Datum:

## ZADATAK ZAVRŠNOG / DIPLOMSKOG RADA

* Ime i prezime	Ivan Manojlović		
OIB / JMBG			
Adresa			
Tel. / Mob./e-mail			
Matični broj studenta	0123422011		
JMBAG	0069084390		
Studij (staviti znak X ispred odgovarajućeg studija)	preddiplomski	<input checked="" type="checkbox"/> <b>specijalistički diplomski</b>	
Naziv studija	STROJARSTVO		
Godina upisa	2022.		
Datum podnošenja molbe	09.07.2024.		
Vlastoručni potpis studenta/studentice			

* Naslov teme na hrvatskom: SIMULACIJA GRIJANJA NA MODELU PASIVNE SOLARNE KUĆE POMOĆU SUNČEVOG ZRAČENJA (SUSTAVOM PASIVNOG GRIJANJA PODA KROZ STAKLENE KLIZNE PLOHE)	
* Naslov teme na engleskom: SIMULATION OF HEATING ON A PASSIVE SOLAR HOUSE MODEL USING SOLAR RADIATION (PASSIVE FLOOR HEATING SYSTEM THROUGH SLIDING GLASS PANELS)	
Opis zadatka: Nakon kratkog uvoda, u teorijskom dijelu opisuje se što je i kako funkcionira pasivno solarno grijanje te što sve utječe na isto. U praktičnom dijelu rada provodi se eksperiment kojim se želi prikazati učinkovitost opisanog pasivnog solarnog grijanja, te se provodi proračun kojim se to dokazuje. Nadalje, na kraju rada se donose zaključci koji proizlaze iz samog eksperimenta i proračuna.	
Mentor:	Predsjednik Ispitnog povjerenstva:

**NAPOMENA:** Obrazac je poželjno ispuniti elektronski. Ukoliko isti niste u mogućnosti ispuniti elektronski, podatke označene \* obavezno popuniti čitko velikim tiskanim slovima

## IZJAVA

Izjavljujem da sam ovaj diplomski rad izradio samostalno koristeći navedenu literaturu i znanja stečena tijekom studija.

Zahvaljujem se svom mentoru prof. dr. sc. Vladimiru Tudiću na podršci, pomoći te korisnim savjetima i sugestijama tijekom pisanja ovoga diplomskoga rada.

Posebno se zahvaljujem svojoj obitelji i prijateljima koji su me podupirali sve ove godine studiranja.

Karlovac, 10.09.2024.

Ivan Manojlović

---

## SAŽETAK

Simulacija grijanja na modelu pasivne solarne kuće pomoću sunčevog zračenja (sustavom pasivnog grijanja poda kroz staklene klizne plohe).

U ovom diplomskom radu istražuje se i opisuje simulacija grijanja na modelu pasivne solarne kuće pomoću sunčevog zračenja, to jest grijanje kuće sustavom pasivnog grijanja poda kroz staklene klizne plohe.

Prvi, teorijski dio rada objašnjava i opisuje kako funkcionira pasivno solarno grijanje te prikazuje potrebna svojstva materijala koji su potrebni za učinkovito pasivno grijanje. Nadalje rad prikazuje utjecaj geolokacije i klime u kojoj se koristi takav sustav grijanja te se uspoređuje sa konvencionalnim metodama grijanja.

U praktičnom dijelu rada definiraju se parametri koji su potrebni za provedbu proračuna koji će pokazati učinkovitost i smisao pasivnog solarnog grijanja. Budući da su za provedbu mjerenja potrebni određeni alati, u navedenom dijelu biti će prikazane tehničke specifikacije tih korištenih alata kako bi se mogla prikazati vjerodostojnost provedenih mjerenja. Kao zadnji dio praktičnog dijela rada biti će prikazan proračun te će se na temelju tog proračuna odrediti jesu li rezultati zadovoljavajući.

U završnom, trećem, dijelu rada ukratko će se opisati način rada pasivnog solarnog grijanja te će se izraditi zaključak temeljen na rezultatima dobivenim mjerenjima.

Ključne riječi: pasivno solarno grijanje, kuća, mramor, staklo, pod

## **SUMMARY**

Simulation of heating on a passive solar house model using solar radiation (passive floor heating system through glass sliding surfaces).

This final paper investigates and describes the simulation of heating on a model of a passive solar house using solar radiation, that is, heating the house with a system of passive floor heating through glass sliding surfaces.

The first, theoretical part of the work explains and describes how passive solar heating works and shows the necessary properties of materials that are needed for effective passive heating. Furthermore, the paper shows the influence of the geolocation and the climate in which such heating system is used and compares it with conventional heating methods.

In the practical part of the work, the parameters necessary for the implementation of the calculation are defined, which will show the efficiency and meaning of passive solar heating. Since certain tools are needed to carry out the measurements, the technical specifications of those used tools will be presented in the mentioned section in order to show the credibility of the measurements. As the last part of the practical part of the work, the calculation will be presented, and based on that calculation, it will be determined whether the results are satisfactory.

In the final, third, part of the paper, the mode of operation of passive solar heating will be briefly described, and a conclusion based on the results obtained from the measurements will be made.

Keywords: passive solar heating, house, marble, glass, floor.

# SADRŽAJ

1. UVOD.....	1
2. TEORIJSKI DIO.....	2
2.1. Pasivno solarno grijanje .....	2
2.2. Toplinska masa i materijal .....	6
2.2.1. Mramor.....	8
2.2.2. Staklo.....	10
2.3. Utjecaj lokacije i klime .....	12
2.4. Primjeri kuća s pasivnim solarnim grijanjem.....	14
2.5. Usporedba sustava pasivnog solarnog grijanja i konvencionalnih sustava grijanja 19	
3. POSTAVKA ZADATKA .....	21
4. PRAKTIČNI DIO RADA.....	25
4.1. Infracrveno zračenje .....	25
4.2. Wienov i Stefan – Boltzmannov zakon .....	30
4.3. Refleksija, transmisija i apsorpcija zračenja .....	32
4.4. Toplinski kapacitet mramora.....	34
4.5. Proračun.....	35
5. ANALIZA PRAKTIČNOG DIJELA .....	40
6. ZAKLJUČAK .....	46
LITERATURA .....	47



## POPIS SLIKA

Slika 1 Pet elemenata pasivnog solarnog grijanja [6] .....	3
Slika 2 Pristupi pasivnom solarnom grijanju [7] .....	3
Slika 3 Utjecaj materijala s velikim toplinskim potencijalom na temperaturu u prostoru [8] ..	6
Slika 4 Utjecaj materijala niskog toplinskog potencijala na temperaturu prostora [8].....	7
Slika 5 Primjer uzorka belgijskog crnog mramora [10].....	9
Slika 6 Primjer uzorka crnog španjolskog mramora [11].....	9
Slika 7 Koeficijent sunčevog toplinskog dobitka [14] .....	11
Slika 8 Heliotrope House [16] .....	14
Slika 9 Projekcija ulaska sunčeve svjetlosti zimi i ljeti [17] .....	15
Slika 10 Presjek Trombeovog zida [19] .....	16
Slika 11 Shematski prikaz centra za posjetitelje [17] .....	17
Slika 12 Prikaz prednje strane eksperimenta.....	22
Slika 13 Gornja strana eksperimenta.....	23
Slika 14 Prikaz ispitnog mramora i točaka mjerenja .....	24
Slika 15 Prikaz područja infracrvenog zračenja [24].....	25
Slika 16 Količina infracrvenog zračenja u ovisnosti o geografskom položaju i vremenu [26] .....	26
Slika 17 Photovoltaic geographical information system [27] .....	27
Slika 18 Krivulja zračenja crnog tijela .....	30
Slika 19 Vrste refleksije i transmisije [30] .....	32
Slika 20 Prosječni mjesečni broj sunčanih sati za Karlovac .....	35
Slika 21 Prosječni mjesečni broj sunčanih sati za Krk .....	35
Slika 22 Prosječni mjesečni broj sunčanih sati za Split .....	36
Slika 23 Grafički prikaz rezultata za Karlovac 2018. godine .....	41
Slika 24 Grafički prikaz rezultata za Karlovac 2019. godine .....	41
Slika 25 Grafički prikaz rezultata za Karlovac 2020. godine .....	42
Slika 26 Grafički prikaz rezultata za Krk 2018. godine.....	42
Slika 27 Grafički prikaz rezultata za Krk 2019. godine.....	43
Slika 28 Grafički prikaz rezultata za Krk 2020. godine.....	43

Slika 29 Grafički prikaz rezultata za Split 2018. godine .....	44
Slika 30 Grafički prikaz rezultata za Split 2019. godine .....	44
Slika 31 Grafički prikaz rezultata za Split 2020. godine .....	45

## POPIS OZNAKA

A – površina [ $\text{m}^2$ ]

m – masa [kg]

c – specifični toplinski kapacitet [ $\text{J/kgK}$ ]

$\Delta T$  – promjena temperature [ $^{\circ}\text{C}$ ]

U – toplinska vodljivost materijala [ $\text{W/m}^2\text{K}$ ]

Q – toplina [J]

$\eta$  – korisnost [%]

$\lambda$  – valna duljina [m]

T – temperatura [K]

$C_w$  – Wienova konstanta [mK]

P – snaga [W]

e – intenzitet zračenja

$\sigma$  – Stefan – Boltzmanova konstanta [ $\text{Wm}^2\text{K}^{-4}$ ]

## POPIS TABLICA

Tablica 1 Svojstva mramora .....	8
Tablica 2 Konstrukcijski elementi i termalna svojstva [19] .....	18
Tablica 3 Materijal i dimenzije.....	21
Tablica 4 Mjesečni podaci za Karlovac – 2018. – 2020.....	28
Tablica 5 Mjesečni podaci za Krk – 2018. – 2020. ....	29
Tablica 6 Mjesečni podaci za Split – 2018. – 2020.....	29
Tablica 7 Izmjerene vrijednosti temperatura .....	37
Tablica 8 Rezultati proračuna .....	38
Tablica 9 Proračun za 2018. godinu .....	39
Tablica 10 Proračun za 2019. godinu .....	39
Tablica 11 Proračun za 2020. godinu .....	39

## 1. UVOD

U današnje vrijeme klimatske promjene vidljive su diljem svijeta, od povišenja razine oceana, ekstremnih poplava do jakih toplinskih valova koji bilježe najviše temperature ikad izmjerene. Povećanje prosječne globalne temperature javlja se najviše zbog emisije stakleničkih plinova u atmosferu. U izvješću Ujedinjenih Naroda iz 2022. godine predviđa se kako će se do kraja stoljeća prosječna temperatura povisiti za 2,8 °C.

Europska Unija je 2021. godine donijela paket "Spremni za 55%", kojim se do 2030. godine želi smanjiti emisija stakleničkih plinova za 55%, odnosno do 2050. godine postignuti ugljična neutralnost. Taj paket je izrazito važan za obnovu zgrada i sustave grijanja i hlađenja budući da se na zgrade odnosi 40% potrošene energije i 36% izravnih i neizravnih emisija stakleničkih plinova povezanih s energijom, odnosno u kućanstvima u Europskoj Uniji 80% energije potroši se na grijanje, hlađenje i grijanje potrošne vode [1].

Jedan od načina kako postignuti ciljeve iz navedenog paketa "Spremni za 55%" je i korištenje sunčevog zračenja. U ovom diplomskom radu opisan je sustav pasivnog solarnog grijanja temeljen na grijanju mramornog poda kroz klizne staklene stijene te je provedeno mjerenje koje će pokazati učinkovitost tog sustava.

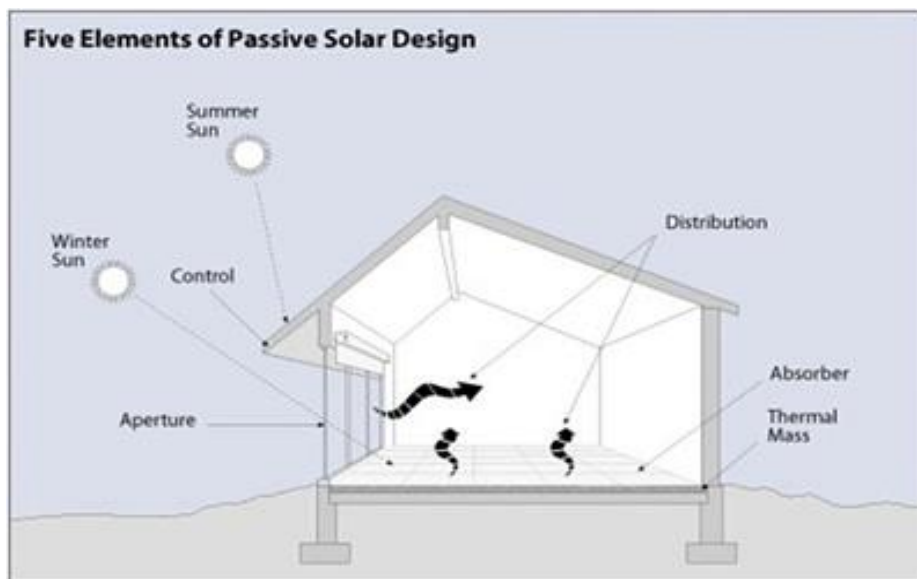
## 2. TEORIJSKI DIO

### 2.1. Pasivno solarno grijanje

Pasivno solarno grijanje jedan je od nekolicine pristupa dizajniranju skupno nazvanom pasivni solarni dizajn. Dobrom procjenom i primjenom dizajna moguće ga je primijeniti na gotovo svim građevinama. Zgrade koje koriste pasivno solarno grijanje izgrađene su tako da tijekom zimskih mjeseci propuštaju, a tijekom ljetnih mjeseci ograničuju ulazak topline u prostor.

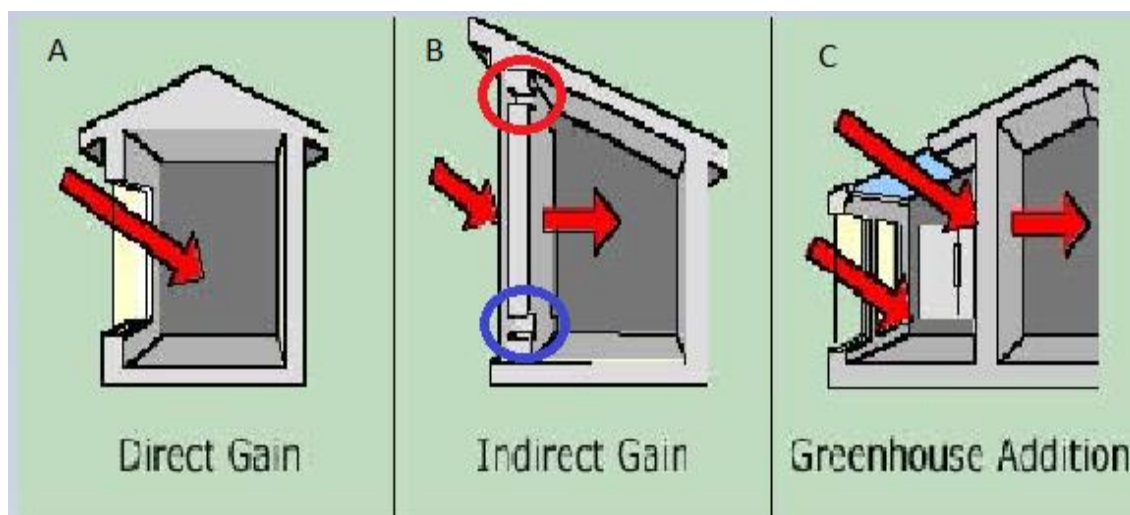
Ovaj način dizajniranja najčešće uključuje prozore okrenute prema jugu koji služe za prikupljanje sunčeve energije, toplinsku masu, u vidu građevinskih materijala koji svojim svojstvima poput visokog toplinskog kapaciteta pohranjuju sunčevu energiju te mehanizme prirodne konvekcije i zračenja koji distribuiraju pohranjenu sunčevu energiju u stambeni prostor kada je to potrebno.

Kako bi sustav pasivnog solarnog grijanja kvalitetno funkcionirao mora se sastojati od pet međusobno povezanih dijelova. [6] Prvi dio takvog sustava su staklene površine kroz koje sunčeva svjetlost ulazi u prostor. Kako bi se postignula maksimalna osvjetljenost površine bi trebale biti zakrenute  $30^\circ$  od stvarnog juga, te u razdoblju od 9 do 15 sati ne bi smjele biti zasjenjene drvećem, zgradama ili nekim drugim preprekama. Svjetlost nakon prolaska kroz stakla preuzima unutarnja površina, zidovi, pod, pregrade, koji se nalaze na izravnom putu sunčeve svjetlosti. Budući da svjetlost pada na te površine i apsorbira se, te površine se nazivaju apsorberi. Toplinska masa čini iste zidove, podove i pregrade kao i apsorberi, ali se razlikuju po tome što se kao apsorber smatra izložena površina, dok je toplinska masa materijal koji se nalazi ispod ili iza te površine. Kako bi se ta toplina prenosila u sve dijelove građevine distribucija je moguća na tri prirodna načina prijenosa topline, zračenje, provodljivost i konvekciju. U građevinama gdje nije uvjetovan strogo pasivni dizajn distribuiranje topline moguće je i pomoću ventilatora i puhala. Za kontrolu količine protoka topline moguće je koristiti krovne prepuste, niskoemisijske rolete i tende koje se koriste za zasjenjivanje područja otvora tijekom ljetnih mjeseci te elektroničke senzorske uređaje poput termostata.



Slika 1 Pet elemenata pasivnog solarnog grijanja [6]

Postoje tri osnovna pristupa pasivnom solarnom grijanju koji uključuju sustav s izravnim dobitkom (direct gain), neizravnim dobitkom (indirect gain) te sustav sa stakleničkim dodatkom (greenhouse addition).



Slika 2 Pristupi pasivnom solarnom grijanju [7]

Sustav s izravnim dobitkom omogućuje ulazak sunčeve energije kroz prozorska stakla okrenuta prema jugu.

Sustav s neizravnim dobitkom omogućuje sunčevom zračenju da zagrije zid te zatim energiju prenosi u unutrašnjost zgrade. Otvori u zidovima, nazvani Trombeov zid, pospješuju konvekciju topline na način da zrak iz hladne prostorije ulazi u prostor između stakla i zida kroz donji otvor (označeno plavo na slici 2 – primjer B) te kako se postupno zagrijava diže se prema vrhu i ulazi u prostoriju kroz gornji otvor (označeno crveno na slici 2 – primjer B).

Sustav s dodatkom za staklenik sastoji se od pridruženog prostora koji se koristi za uzgoj biljaka te se dio energije oslobađa za grijanje ostalog prostora.

Kako bi sustav pasivnog solarnog grijanja radio učinkovito potrebno je provesti i određene proračune. Prikazane formule su preuzete iz knjiga Nauka o toplini [20] te su prilagođene parametrima koji se odnose na solarno grijanje.

Za proračun korisne solarne energije koja se može proizvesti koristi se formula:

$$Q_{solarna} = A_{prozori} \cdot Insolacija \cdot Učinkovitost\ stakla \quad (1)$$

pri kojoj je  $A_{prozori}$  ukupna površina prozora [m<sup>2</sup>], insolacija prosječna dnevna ili godišnja solarna insolacija te učinkovitost stakla, količina sunčeve energije koja prolazi kroz staklo.

Kako bi se vidjela akumulirana toplina u termalnoj masi potrebno je provesti proračun koji se u strojarском priručniku [19] računa prema formuli:

$$Q_{termalna\ masa} = m \cdot c \cdot \Delta T \quad (2)$$

pri čemu je  $m$  masa termalne mase izražena u kilogramima,  $c$  specifični toplinski kapacitet materijala [J/kgK] te  $\Delta T$  promjena temperature termalne mase [K].

Kao i svaki sustav, sustav pasivnog solarnog grijanja ima i gubitke. Proračun toplinskih gubitaka provodi se putem formule:

$$Q_{gubici} = U \cdot A \cdot \Delta T \quad (3)$$



pri čemu je  $U$  toplinska vodljivost materijala [ $W/m^2K$ ],  $A$  površina podova ili zidova kroz koje se toplina gubi [ $m^2$ ] i  $\Delta T$  razlika između unutarnje i vanjske temperature [ $K$ ].

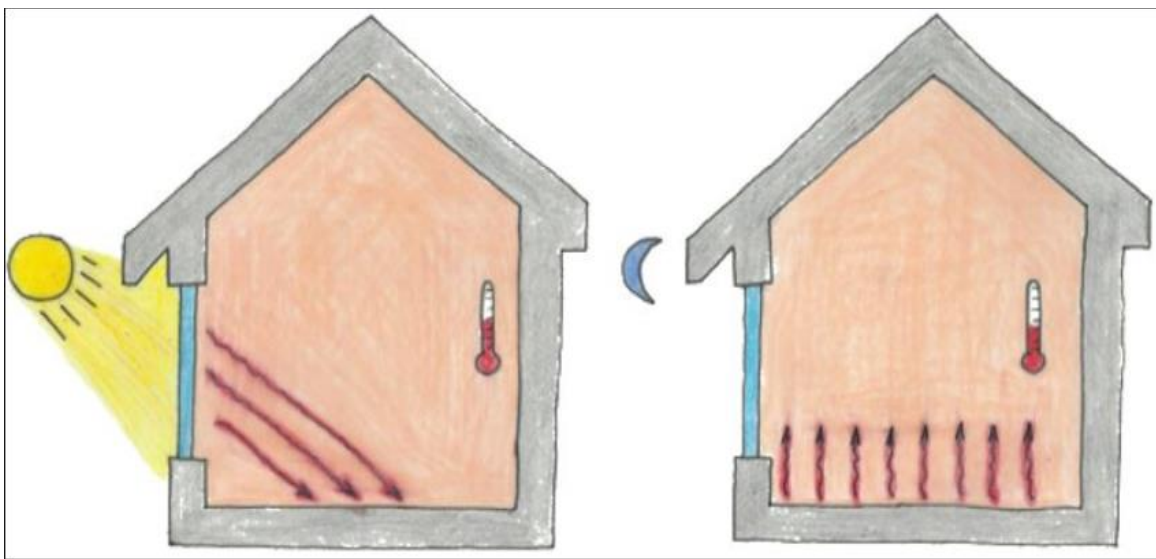
Ukupna učinkovitost sustava može se procijeniti usporedbom korisne solarne energije i toplinskih gubitaka pomoću formule:

$$\eta = \frac{Q_{korisna} - Q_{gubici}}{Q_{solarna}} \quad (4)$$

pri čemu je  $Q_{korisna}$  toplina koja je učinkovito akumulirana i korištena za grijanje prostora, a  $Q_{solarna}$  ukupna solarne energije dostupna kroz prozore.

## 2.2. Toplinska masa i materijal

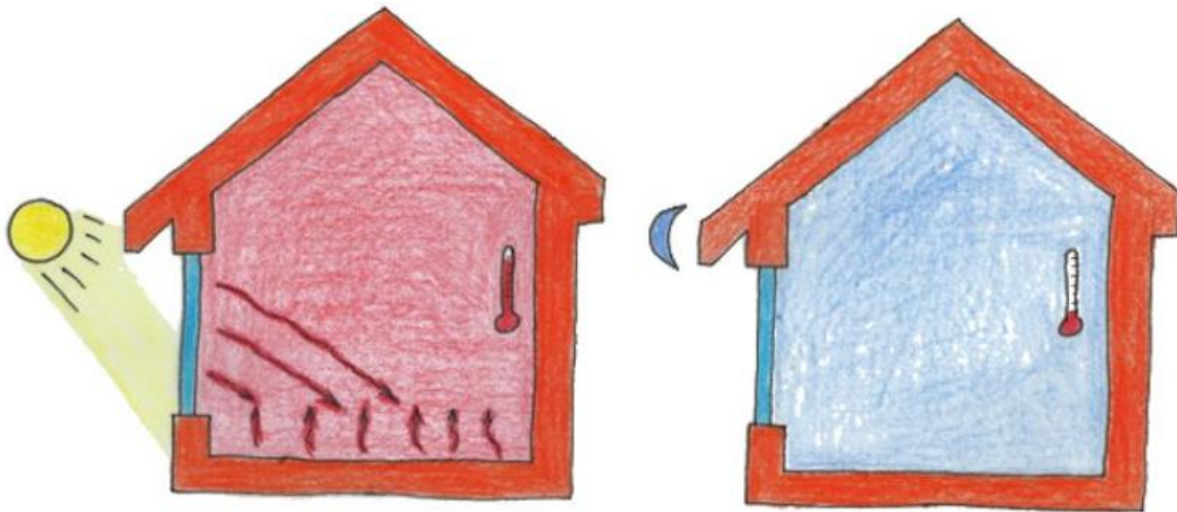
Toplinska masa je svojstvo građevinskih materijala da apsorbiraju, pohranjuju te otpuštaju toplinsku energiju. Smisao toplinske mase u sustavu pasivnog solarnog grijanja je da tijekom dana skuplja toplinsku energiju te da ju noću otpušta u prostor kako bi se povećala temperatura. Suprotno, prilikom hlađenja, toplinska masa noću zadržava hladnoću koju ispušta tijekom dana kako bi se temperatura u prostoru održala niskom, uz uvjet da se toplinska masa tijekom dana ne izlaže direktnoj sunčevoj svjetlosti.



Slika 3 Utjecaj materijala s velikim toplinskim potencijalom na temperaturu u prostoru [8]

Na prethodnoj slici prikazan je građevinski materijal velikog toplinskog potencijala koji može pohraniti veliku količinu toplinske energije. Kao rezultat korištenja takvog materijala spriječen je brz porast temperature unutar prostora.

Sljedeća slika prikazuje korištenje materijala s malim toplinskim potencijalom koji ne može pohraniti veliku količinu toplinske energije, zbog kojeg će i temperatura u prostoru brzo porasti.



Slika 4 Utjecaj materijala niskog toplinskog potencijala na temperaturu prostora [8]

Kao jedna od najvažnijih karakteristika materijala korištenih za izgradnju pasivnih solarnih sustava je toplinska inercija. Toplinska inercija je kašnjenje u vremenu između trenutka kada materijal apsorbira toplinu i trenutka kada tu toplinu otpusti. Materijali s visokom toplinskom inercijom mogu apsorbirati veliku količinu topline tijekom dana kada je sunčevo zračenje najintenzivnije i postepeno otpuštati tu toplinu tijekom noći. Pri korištenju pasivnih solarnih sustava, za izradu podova i zidova, koriste se takvi materijali i u te materijale spadaju mramor, beton, opeka te kamen.

### 2.2.1. Mramor

Kao osnovni materijal korišten kao termalna masa u ovom radu biti će mramor. Mramor je metamorfna stijena koja nastaje od vapnenca koji se nalazi u Zemljinoj kori. Nastaje pod utjecajem visokog pritiska i pri visokim temperaturama. Proces kojim mramor nastaje uzrokuje rekristalizaciju kalcijevog karbonata, stvarajući karakterističnu zrnastu strukturu. U najvećem se postotku sastoji od kalcijeva karbonata, no može sadržavati i razne druge materijale poput željeznih oksida, gline te dolomita, koji utječu na boju i uzorke mramora. Mramor dolazi u širokom spektru boja, uključujući bijelu, crnu, sivu, plavu i zelenu. Neke od najpoznatijih vrsta mramora su bijeli mramor – Carrara (Italija), Thassos (Grčka), crni mramor – Nero Marquina (Španjolska), Belgian Black (Belgija) i zeleni mramor – Verde Alpi (Italija), Tinos Green (Grčka). [9] Bitna svojstva mramora prikazana su u sljedećoj tablici.

Tablica 1 Svojstva mramora

SVOJSTVA	IZNOS	MJERNA JEDINICA
Gustoća	2680 - 2710	Kg/m <sup>3</sup>
Tlačna čvrstoća	79 – 100 x 10 <sup>6</sup>	Pa
Modul loma	9 – 26 x 10 <sup>6</sup>	Pa
Dinamički modul elastičnosti	40 – 50 x 10 <sup>9</sup>	Pa
Statički modul elastičnosti	16 – 25 x 10 <sup>9</sup>	Pa
Poissonov koeficijent	0,25 – 0,41	/
Toplinska vodljivost	2 – 3	W/m <sup>2</sup> K
Specifični toplinski kapacitet	1000	J/kgK

Osim bitnih mehaničkih i toplinskih svojstava, obzirom da se koristi u izgradnji kuća i ostalih objekata kojima se ljudi koriste bitne su i njegove estetske vrijednosti. Univerzalan je materijal koji dolazi u mnogo boja i sa mnogo različitih uzoraka te se može koristiti u različitim stilovima dizajna, od klasičnih do modernih. Svaki komad mramora je jedinstven zbog prirodnih varijacija u boji i uzorcima. Ova neponovljivost čini mramor visoko cijenjenim materijalom u arhitekturi i dizajnu interijera.



Slika 5 Primjer uzorka belgijskog crnog mramora [10]



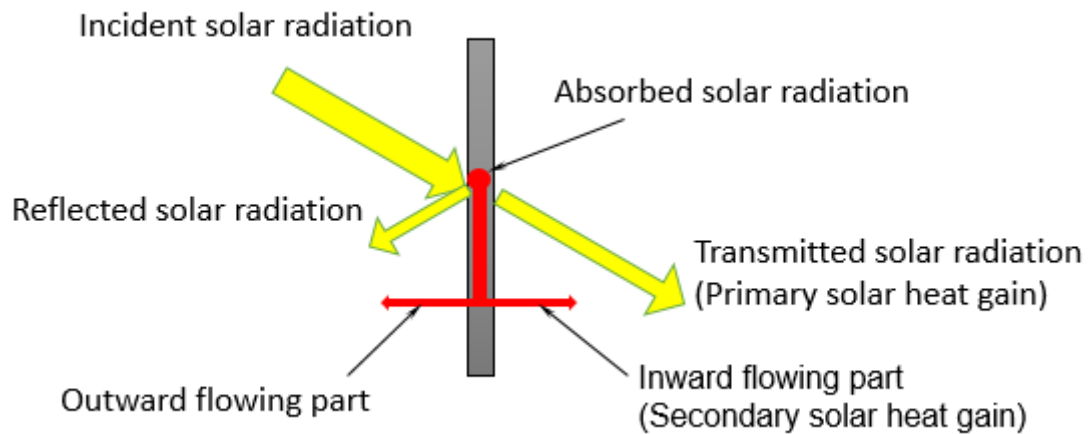
Slika 6 Primjer uzorka crnog španjolskog mramora [11]

### 2.2.2. Staklo

Osim mramora bitna stavka za sustav pasivnog solarnog grijanja je i staklo. U nastavku su objašnjena glavna termalna svojstva stakla te su navedene njihove najčešće okvirne vrijednosti.

U – vrijednost, odnosno toplinska vodljivost stakla je brzina prijenosa topline kroz staklo zbog razlike u unutarnjoj i vanjskoj temperature te označava učinak toplinske izolacije stakla. [14] Ovaj parametar je vrlo bitan u zimskom periodu obzirom da su tada razlike u unutarnjoj i vanjskoj temperaturi vrlo visoke. Toplinska vodljivost ovisi i o uvjetima okoline, poput vjetra ili brzine strujanja zraka, budući da veća brzina tih stavki dovodi do jačeg konvekcijskog prijenosa topline. Najčešće korištena vrijednost za jednoslojno staklo bez premaza iznosi  $5,5 \text{ W/m}^2\text{K}$ , dok za isto takvo staklo s niskoemisijским premazom iznosi između  $3,5$  i  $4 \text{ W/m}^2\text{K}$ . [14]

Koeficijent sunčevog toplinskog dobitka – SHGC izražava udio sunčeve energije koja se prenosi kroz staklo u vidu topline. Ovaj parametar ovisi o optičkim svojstvima stakla koja se odnose na sunčevo zračenje, poput propusnosti i refleksije sunčeve energije, te svojstvima koja se odnose na radijacijsku izmjenu topline temperature površina. SHGC se sastoji od dvije komponente, primarnog dobitka sunčeve energije i sekundarnog dobitka. U primarni dobitak sunčeve energije ubraja se toplina koja se izravno prenosi kroz staklo u izvornom obliku, dok se u sekundarni dobitak ubraja toplina koju staklo apsorbira te prenosi u unutarnji prostor putem sva 3 načina prijenosa topline (provodljivost, konvekcija, zračenje). [14]



Slika 7 Koeficijent sunčevog toplinskog dobitka [14]

Koeficijent sunčevog toplinskog dobitka izražava se u rasponu 0-1, u decimalnom obliku, te za prozirno staklo bez premaza iznosi između 0,8 i 0,9. [14] Kod drugih oblika stakala, poput zatamnjenog ili s niskoemisijским premazom je ta vrijednost niža.

### 2.3. Utjecaj lokacije i klime

Utjecaj klime i lokacije na učinkovitost sustava pasivnog solarnog grijanja je ključan, jer različite geografske i klimatske zone imaju različite uvjete za prikupljanje i korištenje solarne energije. Mnogo parametara utječe na učinkovitost takvih sustava grijanja, a oni najvažniji su: sunčevo zračenje, temperatura zraka, vjetar, vlažnost, oblačnost te sezonske promjene.

Za što veću učinkovitost pasivnog solarnog grijanja vrlo su važni intenzitet sunčevog zračenja te trajanje sunčevog zračenja. Intenzitet sunčevog zračenja je količina sunčeve energije koja dopijeva na površinu, te što je taj intenzitet veći moguća je veća apsorpcija topline kroz staklene površine na termalnu masu. Trajanje sunčevog zračenja odnosi se na broj sunčanih sati, odnosno dana, u godini, te što je taj broj veći to će sustav prikupiti veću količinu sunčeve energije.

Temperatura zraka također ima ključnu ulogu. Prosječne vanjske temperature određuju potrebe za grijanje, odnosno hlađenjem prostora. U hladnijim klimama pasivni solarni sustavi moraju biti dizajnirani kako bi maksimalno iskoristili dostupnu sunčevu energiju, koristeći materijale pogodne za prikupljanje velike količine topline, koji će tijekom noći otpuštati tu toplinu u prostor. Nasuprot tome, u toplijim klimama sustavi moraju spriječiti pregrijavanje, a to se najlakše postiže zasjenjivanjem staklenih površina i prirodnom ventilacijom.

Relativna vlažnost može utjecati na učinkovitost pasivnog grijanja. Visoka vlažnost smanjuje učinkovitost jer toplina teže prelazi te se zadržava u zraku, stoga za bolju učinkovitost sustava pasivnog solarnog grijanja bolja je što manja relativna vlažnost.

Brzina i smjer vjetra mogu imati značajan utjecaj na sustave grijanja. Utjecaj vjetra povećava gubitke topline te se prilikom izgradnje sustava grijanja moraju uzeti u obzir lokalni vjetrovi. Vjetar osim svojih loših utjecaja ima i neke pozitivne, može pomoći pri hlađenju prostora ljeti putem prirodne ventilacije.

Oblačnost i magla mogu smanjiti količinu sunčeve energije koja dopijeva do građevine pa je u svrhu maksimiziranja učinkovitosti u područjima s češćim oblačnim danima potrebno optimizirati dizajn sustava grijanja.



U regijama gdje su sezonske promjene u temperaturi i sunčevom zračenju izražene potrebno je dizajnirati sustave grijanja na način da tijekom zimskih mjeseci optimalno koriste sunčevu energiju, dok ljeti trebaju spriječiti pregrijavanje sustava.

Gore navedeni uvjeti imaju veliki utjecaj na učinkovitost sustava pasivnog solarnog grijanja. Ti uvjeti su različiti za svaku lokaciju i stoga je prilikom dizajniranja takvih sustava potrebno uzimati u obzir parametre tih uvjeta za specifičnu lokaciju građevine.

## 2.4. Primjeri kuća s pasivnim solarnim grijanjem

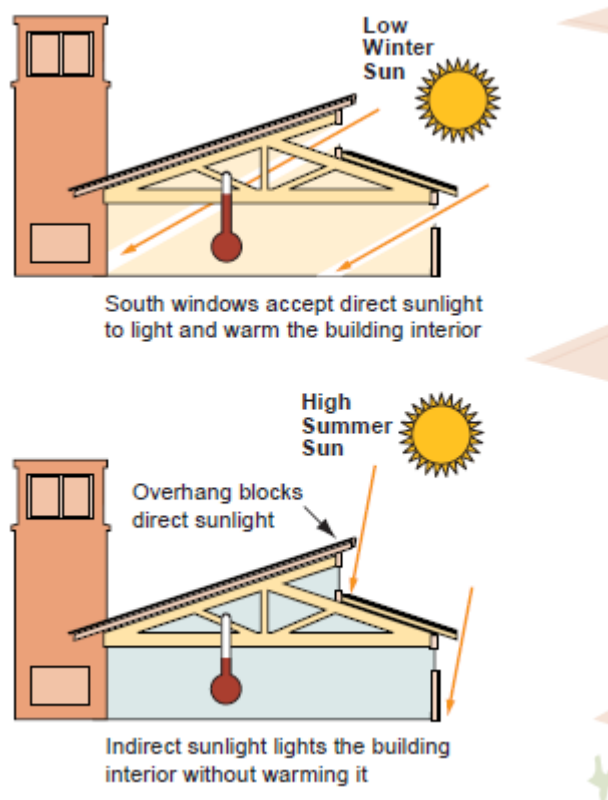
Kao relevantni primjeri kuća s pasivnim solarnim grijanjem uzete su Heliotrope House koja se nalazi u Freiburgu, u Njemačkoj te Zion National Park Visitor Center u SAD-u.

Heliotrope House je jedna od prvih ekološki prihvatljivih kuća. Dizajnirao ju je njemački arhitekt Rolf Disch, te je prva od ukupno tri izgrađena 1994. godine. Zbog svojih karakteristika, mogućnosti rotacije prema položaju sunca i krovnim fotonaponskim panelima, kuća proizvodi pet puta više energije nego što je iskoristi. Kuća je projektirana tako da je u mjesecima grijanja okrenuta prema suncu sa svojim trostrukim prozorima ( $U = 0,5$ ), a tijekom toplijih mjeseci prema suncu okreće visoko izoliranu poledinu ( $U = 0,12$ ). [16] Uz navedeni pasivni sustav grijanja i hlađenja, glavni razlog zašto kuća proizvodi pet puta više energije su fotonaponski solarni paneli nazivne snage 6,6 kW na krovu kuće, te je ta zgrada energetska pozitivna. [16]



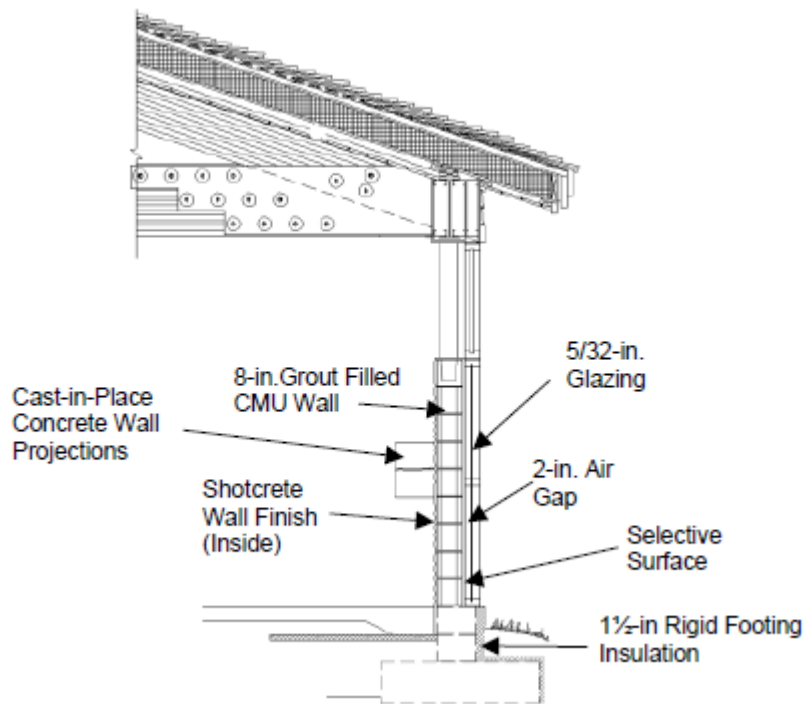
Slika 8 Heliotrope House [16]

Zion National Park Visitor Center je također dobar primjer zgrade sa pasivnim solarnim grijanjem i hlađenjem. Nalazi se u sklopu nacionalnog parka Zion u američkoj saveznoj državi Utah te se prostire na 818 m<sup>2</sup>. Prilikom izgradnje zgrade uzete su u obzir sve važne smjernice za izgradnju ekološki prihvatljivih zgrada. Glavni izvor svjetlosti u centru za posjetitelje je dnevna svjetlost, a ukoliko nema dovoljno dnevne svjetlosti dodatnu količinu svjetlosti nadopunjuju fluorescentne žarulje koje se aktiviraju sensorima koji očitavaju količinu svjetlosti. Prozori također pripadaju sustavu osvjetljenja, no njihova glavna uloga je u sustavu grijanja i hlađenja prostora. Računalnim simulacijama postignuti su optimalni uvjeti za prikupljanje sunčeve energije. Tijekom zime, kada je sunce nisko, prozori propuštaju sunčevu energiju i tako zagrijavaju prostor, dok ljeti, kada je sunce visoko, oblik krova zasjenjuje stakla i sprječava ulazak neželjene topline.

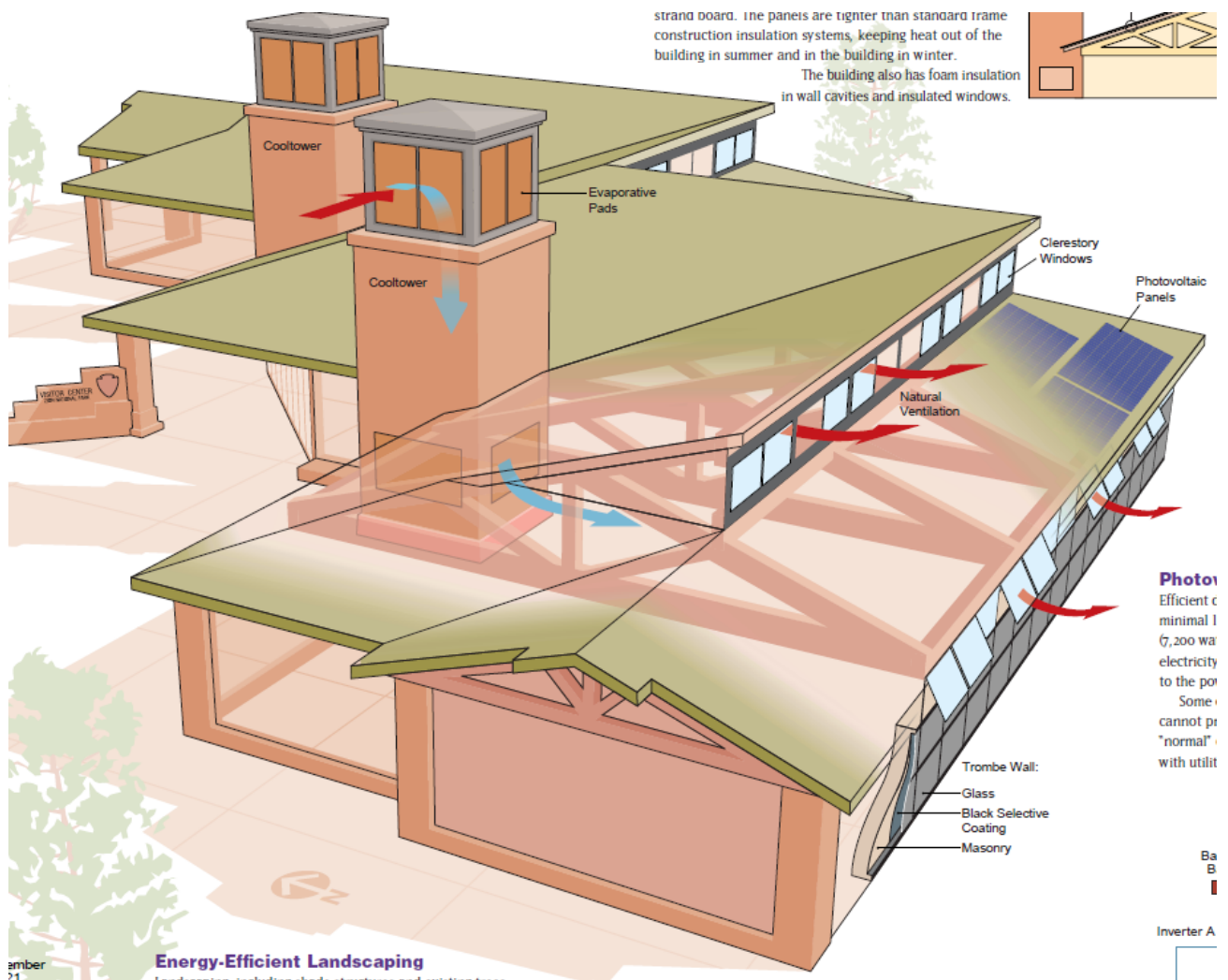


Slika 9 Projekcija ulaska sunčeve svjetlosti zimi i ljeti [17]

Zgrada za grijanje koristi sustav sa Trombeovim zidom te njime osigurava većinu potreba za grijanjem. Sunčeva toplina ostaje zarobljena između staklenih stijena i crnog premaza. Površinska temperatura unutar Trombeova zida nerijetko dostiže i 38°C te zagrijava zidani zid koji zatim tijekom dana i noći ispušta toplinu u prostor. [17]



Slika 10 Presjek Trombeovog zida [19]



Slika 11 Shematski prikaz centra za posjetitelje [17]

U sljedećoj tablici prikazani su konstrukcijski elementi koji su korišteni za izgradnju ovog centra za posjetitelje te su navedena termalna svojstva tih elemenata.

Tablica 2 Konstrukcijski elementi i termalna svojstva [19]

Envelope Component	Constructions (outside to inside)	$R_{\text{effective}}$ hr-ft <sup>2</sup> ·°F/Btu (m <sup>2</sup> ·K/W)
<b>Walls</b>		
<b>Trombe Walls</b>	5/32-in. low-iron patterned Trombe wall glazing, 2.5-in. air gap, 8-in., grout-filled CMU.	2.3 (0.41)
<b>Visitor Center Exterior Walls</b>	Wood siding, 1/2-in. rigid insulation board, 6-in. metal stud framing with foam-in-place insulation, 1/2-in. plywood backing, 5/8-in. Gyp board.	16.5 (2.91)
<b>Comfort Station Walls</b>	Wood siding, 1-1/2-in. rigid insulation board, 8-in. CMU with foam insulation cell inserts	6.6 (1.2)
<b>Windows/Doors</b>		
<b>South/East Glass</b>	Double-pane, 1-in. insulating glass with low-e coating on surface 2. Aluminum frames are thermally broken. SHGC = 0.44 <sup>1</sup>	2.3 (0.41)
<b>North/West Glass</b>	Double-pane heat mirror, 1-in. insulating glass with thermally broken aluminum frames. SHGC = 0.37.	2.7 (0.48)
<b>Doors</b>	Non-store-front doors are insulated steel	11 (1.94)
<b>Roofs</b>		
<b>Typical Roof</b>	Wood shingles, 1/2-in. sheathing, 2-in. x 4-in. furring, 8-1/4-in. insulated roof panels, 1 x 6-ft wood ceiling.	30.9 (5.45)
<b>Floors</b>		
<b>All Perimeter Footings</b>	1-1/2-in. rigid insulation, 12-in. concrete footing,	8.3 (1.46)
<b>Slab</b>	4-in. concrete floor slab.	0.44 (0.08)
<b>Perimeter of Slab</b>	1-1/2-in. rigid insulation, 6-in. slab. Horizontal insulation 4 ft from perimeter (See Figure 4-5)	7.6 (1.34)

<sup>1</sup> SHGC was supposed to be 0.55, but glass was not as specified.

## **2.5. Usporedba sustava pasivnog solarnog grijanja i konvencionalnih sustava grijanja**

Pasivni solarni sustavi grijanja i konvencionalni sustavi grijanja predstavljaju različite pristupe u načinu zagrijavanja prostora, svaki sa sebi svojstvenim prednostima i nedostacima.

Pasivni solarni sustavi grijanja koriste sunčevu energiju za zagrijavanje prostora bez potrebe za dodatnim mehaničkim sustavima. Ključnu ulogu imaju dizajn zgrade, orijentacija, materijali te izolacija. Komponente ovih sustava uključuju prozore, podove, zidove i krovove koji akumuliraju, skladište i distribuiraju solarnu energiju. Ovakvi sustavi su ekološki prihvatljivi jer ne emitiraju stakleničke plinove u okolinu. Operativni troškovi su niski, a dobro dizajnirane zgrade mogu u velikoj mjeri smanjiti potrebu za dodatnim grijanjem. Nadalje, ovi sustavi imaju manje pokretnih dijelova, što smanjuje rizik od kvarova i produljuje im vijek trajanja.

Međutim, pasivni solarni sustavi grijanja mogu biti skuplji u fazi projektiranja i izgradnje. Njihova efikasnost ovisi o geografskom položaju, klimi i orijentaciji zgrade, a zahtijevaju pažljivo planiranje i dizajn kako bi se maksimalno iskoristila solarna energija.

S druge strane, konvencionalni sustavi grijanja koriste fosilna goriva (plin, nafta), drvenu masu ili električnu energiju za zagrijavanje prostora. Ovi sustavi se sastoje od kotlova, peći, radijatora, podnog grijanja i ventilatora. Prednosti konvencionalnih sustava uključuju pouzdanost u isporuci topline bez obzira na vremenske uvjete te fleksibilnost primjene u bilo kojem klimatskom području i za bilo koju vrstu zgrada. Instalacija je relativno brza, a sustavi se mogu lako nadograditi.

Nedostaci konvencionalnih sustava grijanja uključuju varijabilne i često visoke troškove goriva, emisiju stakleničkih plinova i zagađenje okoliša te potrebu za redovnim održavanjem i zamjenom dijelova.

U usporedbi ekološkog utjecaja, pasivni solarni sustavi grijanja imaju minimalan ekološki otisak jer koriste obnovljive izvore energije, dok konvencionalni sustavi grijanja imaju veći ekološki utjecaj zbog emisije CO<sub>2</sub> i korištenja neobnovljivih izvora energije. Fleksibilnost je

veća kod konvencionalnih sustava grijanja jer se mogu primijeniti u različitim uvjetima i zgradama, dok su pasivni solarni sustavi ograničeni specifičnim uvjetima dizajna i lokacije.

Odabir između pasivnog solarnog grijanja i konvencionalnih sustava grijanja ovisi o specifičnim potrebama, lokaciji, budžetu i ekološkoj svijesti investitora. Idealno rješenje najčešće je kombinacija oba sustava kako bi se maksimizirale prednosti i minimizirali nedostaci.



### 3. POSTAVKA ZADATKA

Kao praktični dio rada napravljen je model koji simulira opisani način pasivnog solarnog grijanja, te su na njemu provedena mjerenja temperature koja će biti prikazana u nastavku ovoga rada.

Za izradu modela korištena je kartonska kutija, stiropor, dva komada stakla te komad mramora. Dimenzije korištenih materijala nalaze se u tablici ispod.

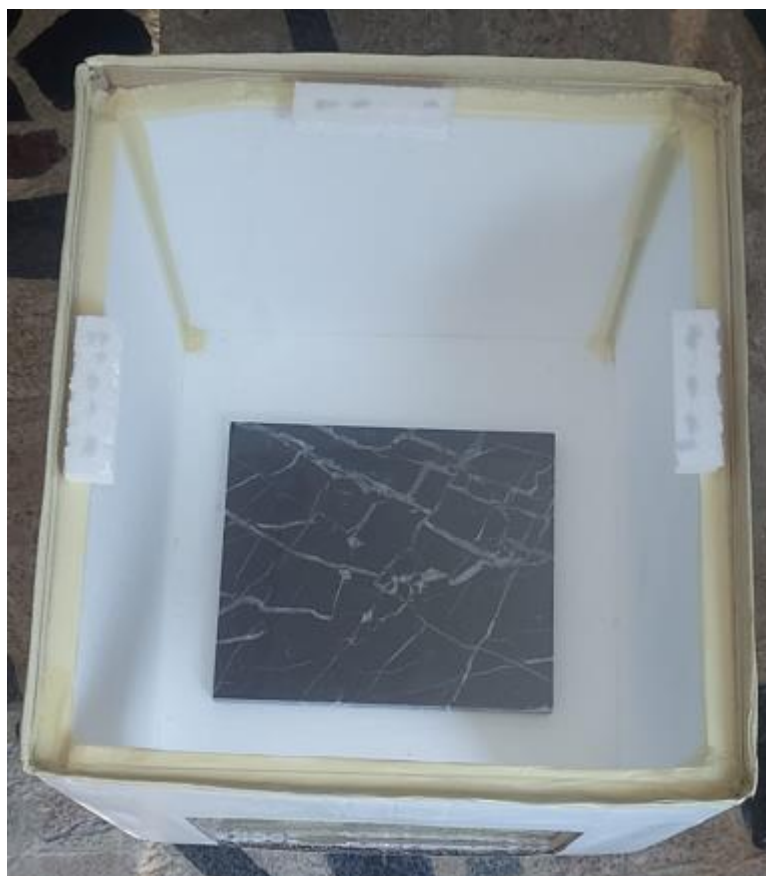
Tablica 3 Materijal i dimenzije

MATERIJAL	DIMENZIJE	MJERNA JEDINICA
Kartonska kutija	500x550x520	mm
Staklo	480x530x2 350x260x2	mm
Stiropor	20	mm
Mramor	320x280x20	mm
Samoljepljiva traka	/	/

Eksperiment je zamišljen na način da se kartonsku kutiju s unutarnje strane izolira stiroporom kako bi što bolje održavala toplinu te da se s jedne strane izreže dio u koji se postavlja staklo. Kako bi sunčeve zrake maksimalno dopirale do mramora koji se nalazi u središtu donje površine, staklo na prednjoj površini je postavljeno u visini mramora te je i gornja strana kutije zamijenjena staklom.



Slika 12 Prikaz prednje strane eksperimenta



Slika 13 Gornja strana eksperimenta

Temperatura mramora mjerena je u 4 unaprijed određene točke vidljive na sljedećoj slici. Budući da je cilj rada provjeriti učinkovitost grijanja tijekom zimskih mjeseci, prikazani model je izlagan suncu samo dva puta dnevno, ujutro od 08:00 do 09:00 te od 18:00 do 19:00, odnosno u razdobljima u kojima vrijednosti temperatura ne premašuju temperature koje su moguće zimi. Prilikom mjerenja temperature određeni su i stupnjevi upada sunčevih zraka na površinu te oni iznose  $27,76^\circ$  u 08:00,  $34,41^\circ$  u 09:00,  $27,21^\circ$  u 18:00 te  $15,52^\circ$  u 19:00.

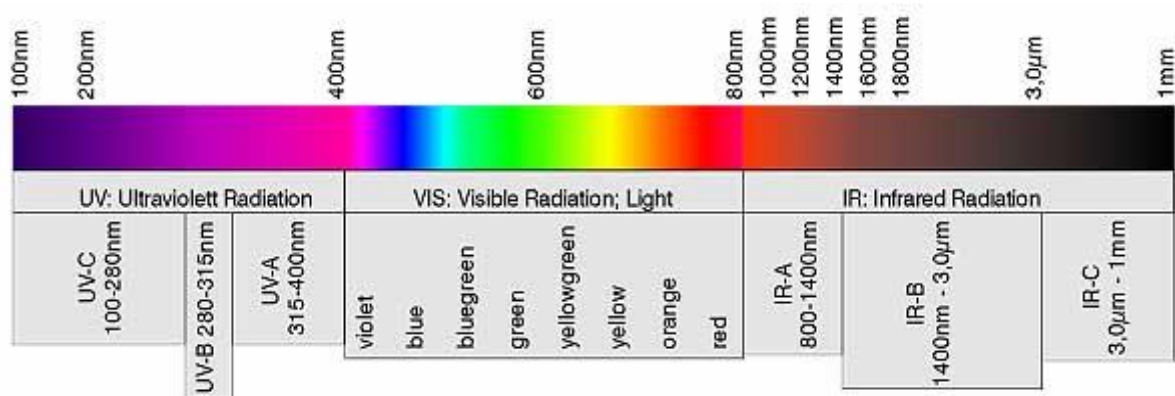


Slika 14 Prikaz ispitnog mramora i točaka mjerenja

## 4. PRAKTIČNI DIO RADA

### 4.1. Infracrveno zračenje

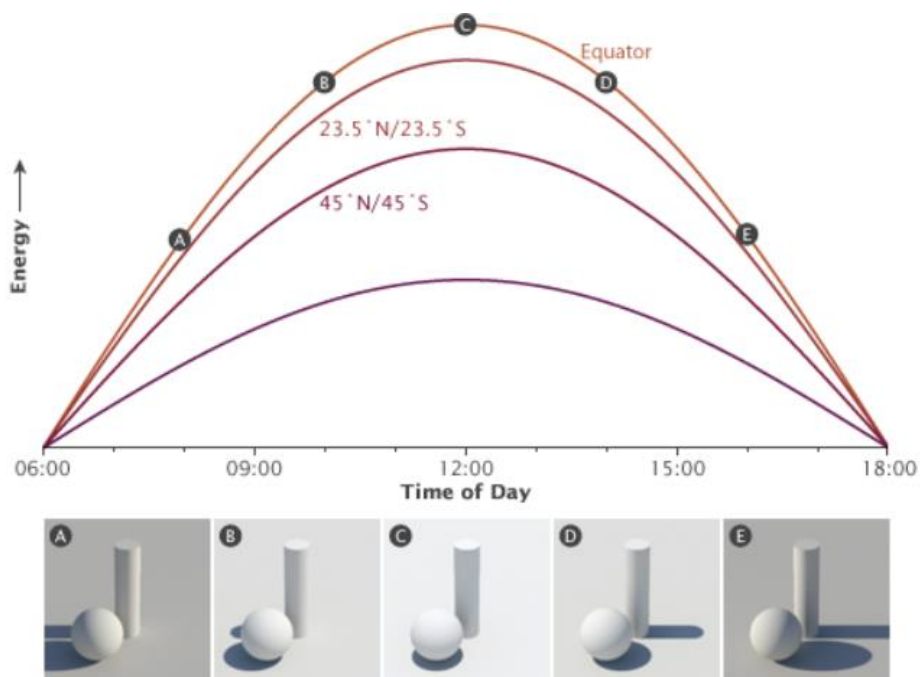
Infracrveno zračenje dio je elektromagnetskog spektra. Ljudsko oko ga ne može vidjeti ali ga ljudi mogu osjetiti u vidu topline. Infracrveno zračenje prema normi DIN 5031 je zračenje koje pokriva područje valnih duljina iznad 800 nm te je podijeljeno na IR-A, IR-B i IR-C područje, kao što je vidljivo na sljedećoj slici.



Slika 15 Prikaz područja infracrvenog zračenja [24]

Kako navodi NASA infracrveno zračenje otkrio je 1800. godine britanski astronom William Herchel. U eksperimentu za mjerenje razlike u temperaturi između boja u vidljivom spektru, postavio je termometre na put svjetlosti unutar svake boje vidljivog spektra. Promatrao je porast temperature od plave do crvene, a neposredno iza crvenog kraja vidljivog spektra iščitao je još veće vrijednosti temperature. [25]

Distribucija infracrvenog zračenja na površini Zemlje varira sezonski zbog promjena u kutu sunčevih zraka, duljini dana, temperaturama i vegetaciji. Najveća količina infracrvenog zračenja događa se tijekom ljeta kada su sunčeve zrake najintenzivnije, dok je najmanja količina zračenja tijekom zime. Osim sezonskih promjena na količinu infracrvenog zračenja utječu i atmosferski uvjeti te geografski položaj.

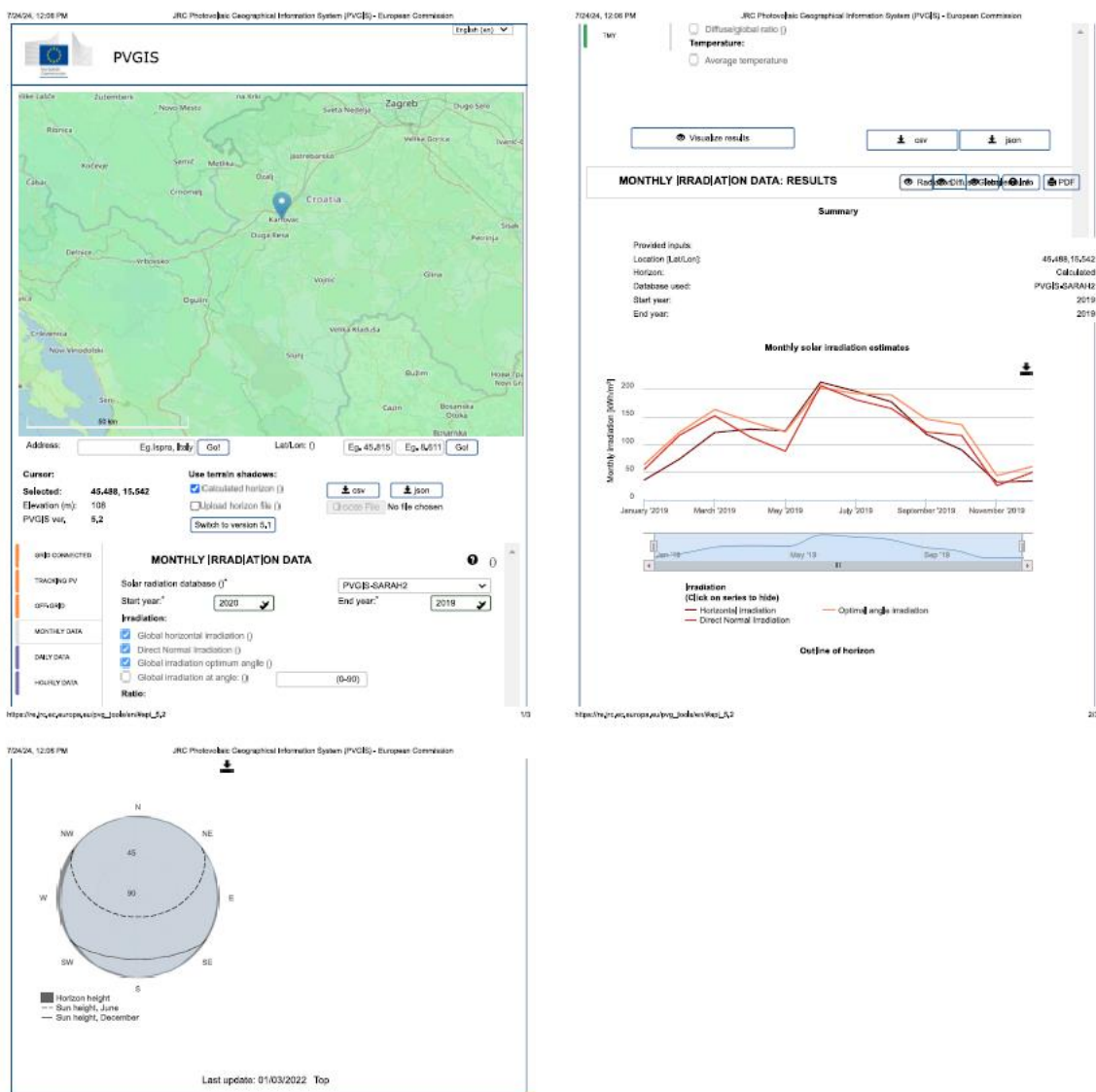


Slika 16 Količina infracrvenog zračenja u ovisnosti o geografskom položaju i vremenu [26]

Kao što je vidljivo na prethodnoj slici, vrijeme utječe na kut upada sunčevih zraka te na intenzitet svjetlosti. Prikazan je slučaj ekvinočija, kada Sunce izlazi u 06:00. Jačina infracrvenog zračenja raste kako se vrijeme približava 12:00 sati, kada je Sunce direktno iznad određenog područja, te jačina pada s prolaskom vremena od 12:00 nadalje. Zatim, iz slike je vidljivo kako se intenzitet infracrvenog zračenja smanjuje što se više udaljava od ekvatora, pa tako tropi koji se nalaze između  $0^\circ$  i  $23,5^\circ$  primaju 90% zračenja u odnosu na ekvator, srednje geografske širine ( $45^\circ$ ) otprilike 70%, a Arktički i Antarktički krug svega 40%.

Prema prethodno navedenoj raspodjeli Hrvatska se nalazi u području srednje geografske širine. Zbog svoje klimatološke raznolikosti odabra su 3 grada koja će predstavljati regije s različitim klimatskim uvjetima, pa je tako za središnju Hrvatsku odabran Karlovac, za Primorje Krk te za Dalmaciju odabran Split.

U sljedećim tablicama prikazani su podaci od 2018. do 2020. godine za navedene gradove. Podaci su preuzeti sa interaktivnog alata Europske Unije nazvanog PHOTOVOLTAIC GEOGRAPHICAL INFORMATION SYSTEM.



Slika 17 Photovoltaic geographical information system [27]

U tablicama su navedeni sljedeći podaci:

- GHI – global horizontal irradiation – mjesečni zbroj energije sunčeva zračenja na kvadratnom metru horizontalne ravnine [kWh/m<sup>2</sup>];
- DNI – direct normal irradiation – mjesečni zbroj energije sunčeva zračenja koja pogađa jedan kvadratni metar ravnine uvijek okrenute u smjeru Sunca, uključujući samo zračenje koje dolazi izravno sa Sunca [kWh/m<sup>2</sup>];
- OAI – optimal angle irradiation – mjesečni zbroj energije sunčeva zračenja koja pogađa jedan kvadratni metar pod kutom koji daje maksimalnu moguću vrijednost zračenja [kWh/m<sup>2</sup>];

Tablica 4 Mjesečni podaci za Karlovac – 2018. – 2020.

KARLOVAC									
	2018.			2019.			2020.		
kWh/m <sup>2</sup>	GHI	DNI	OAI	GHI	DNI	OAI	GHI	DNI	OAI
<b>Siječanj</b>	39,39	59,4	67,04	36,21	55,55	64,44	53,07	109,44	110,16
<b>Veljača</b>	33,86	13,85	38,08	74,29	117,04	122,5	69,96	102,49	113,85
<b>Ožujak</b>	85,78	75,34	105,11	121,94	152,24	163,45	107,71	118,95	141,15
<b>Travanj</b>	157,48	158,97	177,57	127,94	114,59	141,07	180,57	207,44	208,01
<b>Svibanj</b>	183,72	152,37	186,08	125,23	87,96	123,34	169,06	140,39	167,5
<b>Lipanj</b>	175,42	145,32	170,77	212,93	208,36	202,37	185,35	162,3	173,94
<b>Srpanj</b>	191,89	169,89	190,14	196,36	182,16	192,23	207,48	200,33	199,96
<b>Kolovoz</b>	177,93	176,37	193,74	177,35	165,78	189,92	165,67	158,63	177,99
<b>Rujan</b>	127,83	144,77	160,07	118,7	122,81	146,18	129,65	131,47	159,51
<b>Listopad</b>	81,28	94,17	114,6	90,59	116,88	136,15	71,84	77,43	100,78
<b>Studenj</b>	34,09	28,99	46,89	32,13	25,9	43,89	36,08	41,85	56,7
<b>Prosinac</b>	36,82	51,81	63,14	34,15	49,78	60,58	24,43	19,31	34,33



Tablica 5 Mjesečni podaci za Krk – 2018. – 2020.

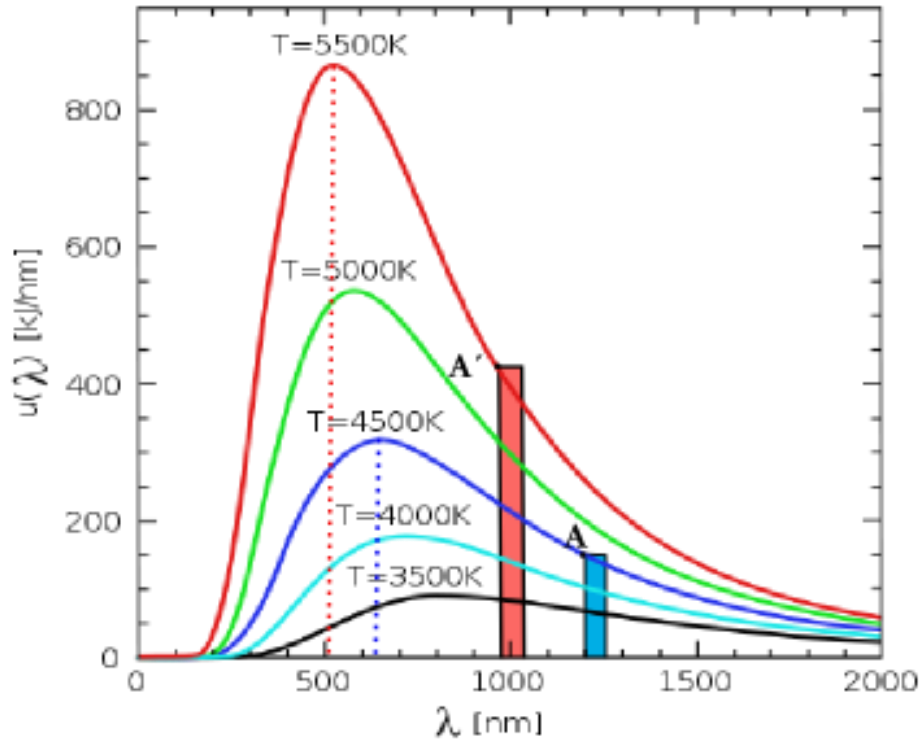
KRK									
	2018.			2019.			2020.		
kWh/m <sup>2</sup>	GHI	DNI	GIA	GHI	DNI	GIA	GHI	DNI	GIA
<b>Siječanj</b>	39,89	63,17	69,63	47,9	85,71	91,58	58,03	133,44	125,14
<b>Veljača</b>	56,68	73,39	85,02	76,84	127,37	129,52	72,31	110,28	117,41
<b>Ožujak</b>	88,1	83,99	108,85	126,87	167,04	171,59	126,26	159,02	169,03
<b>Travanj</b>	158,19	170,14	177,25	137,62	125,66	151,07	176,83	208,04	203,89
<b>Svibanj</b>	190,93	180,13	191,75	140,44	110,59	139,14	184,03	169,68	181,86
<b>Lipanj</b>	208,82	205,03	199,2	223,92	235,5	211,0	205,78	194,12	194,7
<b>Srpanj</b>	206,73	194,07	203,91	211,05	207,91	205,35	225,83	236,61	218,69
<b>Kolovoz</b>	191,17	206,34	207,3	190,99	201,96	206,04	176,87	178,87	190,72
<b>Rujan</b>	144,48	175,75	183,27	133,63	149,1	165,74	135,87	156,4	168,67
<b>Listopad</b>	88,13	111,32	128,13	92,57	115,34	135,98	76,12	89,85	110,28
<b>Studen</b>	46,08	58,96	74,2	37,72	40,9	57,54	58,33	99,68	108,29
<b>Prosinac</b>	36,42	61,88	68,22	38,17	76,02	78,64	30,92	47,31	56,05

Tablica 6 Mjesečni podaci za Split – 2018. – 2020.

SPLIT									
	2018.			2019.			2020.		
kWh/m <sup>2</sup>	GHI	DNI	GIA	GHI	DNI	GIA	GHI	DNI	GIA
<b>Siječanj</b>	54,67	99,47	102,21	53,98	97,77	102,32	66,62	144,96	137,75
<b>Veljača</b>	64,33	86,68	98,66	84,08	134,49	137,42	86,55	131,58	138,66
<b>Ožujak</b>	97,31	86,28	118,33	134,26	165,62	177,0	130,3	155,0	171,21
<b>Travanj</b>	166,65	175,55	184,94	156,09	147,22	171,16	180,26	203,76	203,77
<b>Svibanj</b>	205,49	195,54	203,78	157,68	127,47	153,08	176,04	157,15	171,06
<b>Lipanj</b>	206,68	190,53	193,5	224,2	225,58	209,39	206,99	191,1	192,89
<b>Srpanj</b>	225,48	227,49	216,64	220,56	223,62	210,36	222,0	223,53	211,34
<b>Kolovoz</b>	196,79	203,52	210,89	204,05	218,2	217,45	187,04	184,44	197,94
<b>Rujan</b>	150,59	174,8	187,82	143,18	157,23	176,45	140,7	151,67	170,74
<b>Listopad</b>	98,61	123,84	143,58	107,82	138,09	159,62	90,52	103,13	128,84
<b>Studen</b>	56,79	80,02	95,55	45,16	51,86	59,47	65,23	103,91	115,71
<b>Prosinac</b>	42,15	66,65	77,58	45,62	83,01	89,83	39,42	72,38	61,75

## 4.2. Wienov i Stefan – Boltzmannov zakon

Wienov zakon je zakon koji određuje na kojoj valnoj duljini intenzitet zračenja emitiranog od „crnog tijela“ ( idealno tijelo koje emitira i apsorbira sve frekvencije svjetla) doseže svoju maksimalnu točku. Nakon te točke, intenzitet se smanjuje kako temperatura raste.



Slika 18 Krivulja zračenja crnog tijela

Izražava se kao:

$$\lambda_{max} \times T = Cw \quad (5)$$

pri čemu je  $\lambda$  valna duljina izražena u metrima,  $T$  temperatura izražena u Kelvinima te  $Cw$  Wienova konstanta koja iznosi  $2,89 \cdot 10^{-3} \text{ mK}$ .

Wienov zakon samo pomaže odrediti na kojoj valnoj duljini zračenje crnog tijela ima vrhunac. Za određivanje ukupne energije emitirane iz crnog tijela mora se koristiti Stefan – Boltzmannov zakon.

Stefan – Boltzmannov zakon je zakon koji izražava ukupnu snagu po jedinici površine koju zrači „crno tijelo“. Ovaj zakon objašnjava koliko snage Sunce odaje s obzirom na svoju temperaturu te također predviđa koliko topline Zemlja emitira u svemir.

Stefan – Boltzmannov zakon izražava se formulom:

$$\frac{P}{A} = e\sigma T^4 \quad (6)$$

pri čemu je P snaga, A površina,  $e$  intenzitet zračenja, T temperatura izražena u Kelvinima i  $\sigma$  Stefan – Boltzmannova konstanta koja iznosi  $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Wm}^2\text{K}^{-4}$ .

### 4.3. Refleksija, transmisija i apsorpcija zračenja

Refleksija je proces kojim se elektromagnetsko zračenje odbija od neke površine i vraća natrag u prostor. Koliko će zračenja biti reflektirano ovisi o svojstvima površine, boji površine i kutu upadanja zračenja.

Postoje tri vrste refleksije:

- Zrcalna refleksija – javlja se na glatkim površinama, gdje se zračenje reflektira pod jednakim kutom pod kojim je i upalo;
- Difuzna refleksija – javlja se na hrapavim ili nepravilnim površinama, gdje se zračenje reflektira u mnogo različitih smjerova;
- Kombinirana refleksija – spoj prethodno opisanih vrsta;

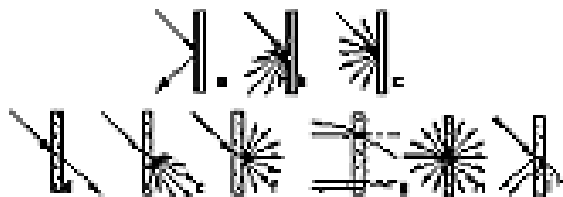
Koeficijent refleksije, reflektancija, je omjer od neke površine reflektiranog i na tu površinu upadnog toka zračenja. [31]

$$R = \frac{I_R}{I_0} \quad (7)$$

Transmisija je proces prolaska elektromagnetskog zračenja kroz medij. Poput refleksije postoje tri vrste transmisije te su one prikazane na sljedećoj slici.

Koeficijent transmisije, transmitancija, je omjer kroz neku površinu transmitiranog i na tu površinu upadnog toka zračenja. [31]

$$T = \frac{I_T}{I_0} \quad (8)$$



Slika 19 Vrste refleksije i transmisije [30]

Apsorpcija je proces transformacije snage zračenja u neku drugu vrstu energije, najčešće u toplinu, pomoću interakcije s materijom.

Na količinu apsorpcije zračenja utječu boja materijala, tamni materijali apsorbiraju više zračenja od svijetlih materijala, svojstva materijala, različiti materijali imaju sposobnost apsorpcije za različite valne duljine te debljina materijala, deblji materijali mogu apsorbirati više zračenja nego tanji materijali.

Koeficijent apsorpcije, apsorptancija, je omjer kroz neku površinu apsorbiranog i na tu površinu upadnog toka zračenja.

$$A = \frac{I_A}{I_0} \quad (9)$$

#### 4.4. Toplinski kapacitet mramora

Toplinski kapacitet je fizikalna veličina koja opisuje količinu topline potrebnu da se temperatura tijela promijeni za određeni iznos, odnosno to je mjera sposobnosti materijala da apsorbira toplinu. Određuje se formulama:

$$C = \frac{Q}{\Delta T} \quad (10)$$

$$\Delta T = T_{kraj} - T_{početak} \quad (11)$$

Specifični toplinski kapacitet ( $c$ ) je količina topline potrebna da se jedan kilogram materijala zagrije za jedan Kelvin, mjerna jedinica za specifični toplinski kapacitet je J/(kgK) te se računa putem formule:

$$c = \frac{Q}{m \cdot \Delta T} \quad (12)$$

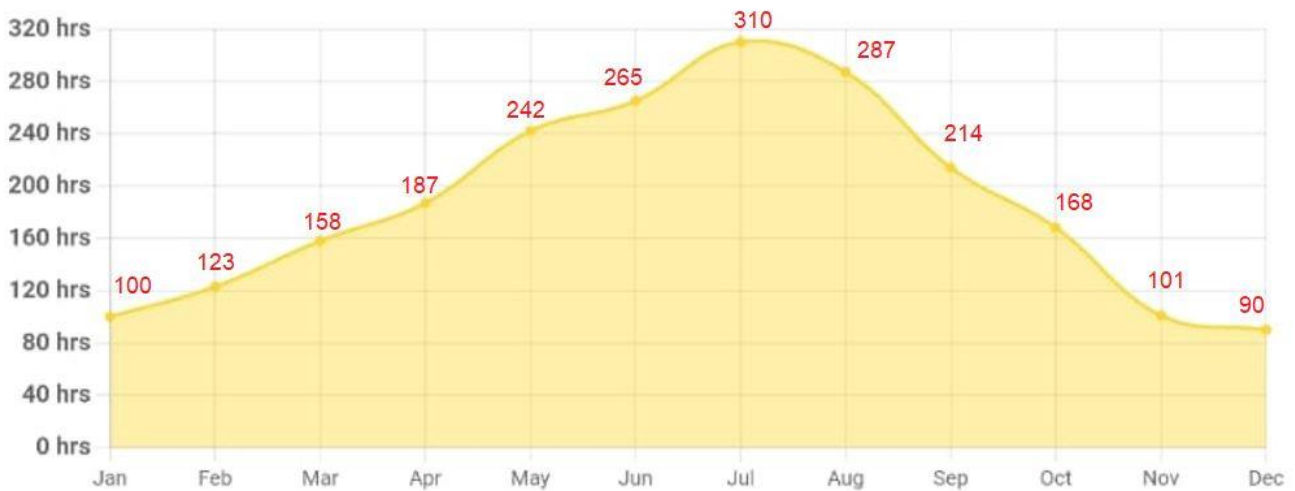
Vrijednost specifičnog toplinskog kapaciteta crnog mramora je 1000 J/(kgK) no ona može varirati ovisno o kemijskim i fizikalnim svojstvima pojedinog mramora.

## 4.5. Proračun

Kako bi se vidjela bolja razlika u učinkovitosti opisanog načina grijanja za proračun su odabrane različite lokacije s različitim klimama na području Republike Hrvatske. Određeni su gradovi, Karlovac (središnja Hrvatska), Krk (Primorje) i Split (Dalmacija) te su u nastavku prikazani dijagrami prosječnih sunčanih sati tijekom godine u tim gradovima.



Slika 20 Prosječni mjesečni broj sunčanih sati za Karlovac



Slika 21 Prosječni mjesečni broj sunčanih sati za Krk



Slika 22 Prosječni mjesečni broj sunčanih sati za Split

Budući da se opisivani sustav pasivnog grijanja prvenstveno koristi kao sustav koji će dogrijavati prostor u proračunu će se koristiti vrijednosti za veljaču, ožujak, travanj, rujan i listopad.

Aproksimirana površina poda koji služi za provedbu proračuna je 100 m<sup>2</sup>.

U sljedećoj tablici prikazane su vrijednosti koje su dobivene u provedenom eksperimentu.

S obzirom da su mjerenja provedena u ljetnim mjesecima prikazane vrijednosti predstavljaju prosječne vrijednosti koje bi se tijekom mjeseci dogrijavanja mogle ostvariti tijekom cjelodnevnog izlaganja materijala sunčevom zračenju.



Tablica 7 Izmjerene vrijednosti temperatura

Datum mjerjenja	Vrijeme mjerjenja	INFRACRVENO MJERENJE				KONTAKTNO MJERENJE			
		T1	T2	T3	T4	T1	T2	T3	T4
12.07.2024	8:00	26,9	27,4	27,7	27,4	27,0	27,0	27,0	27,0
	8:30	38,4	38,1	40,2	38,9	35,0	35,0	36,0	36,0
	9:00	45,6	46,3	46,1	43,9	43,0	44,0	44,0	42,0
	18:00	27,4	28,1	27,9	27,3	26,0	27,0	26,0	26,0
	18:30	31,3	31,9	32,0	31,2	29,0	30,0	30,0	30,0
	19:00	44,6	43,8	44,5	42,7	40,0	40,0	40,0	40,0
13.07.2024	8:00	28,2	28,5	28,3	27,6	27,0	27,0	27,0	27,0
	8:30	41,3	41,8	40,7	38,2	36,0	36,0	37,0	37,0
	9:00	52,5	52,0	49,3	45,8	45,0	43,0	43,0	43,0
	18:00	28,3	29,0	28,7	28,5	29,0	29,0	29,0	29,0
	18:30	30,9	30,7	30,4	31,2	30,0	30,0	30,0	30,0
	19:00	32,0	32,3	31,9	32,9	31,0	32,0	31,0	32,0
14.07.2024	8:00	27,5	27,4	27,2	27,3	27,0	26,0	27,0	27,0
	8:30	36,1	34,3	34,4	34,0	33,0	33,0	33,0	33,0
	9:00	46,9	46,1	42,6	41,9	40,0	41,0	41,0	40,0
	18:00	30,5	31,2	30,7	30,9	32,0	32,0	31,0	31,0
	18:30	45,9	44,2	42,4	43,9	41,0	41,0	41,0	42,0
	19:00	48,2	48,2	45,8	47,8	44,0	44,0	43,0	44,0
15.07.2024	8:00	27,2	27,5	27,3	27,6	26,0	26,0	26,0	26,0
	8:30	42,3	41,3	40,7	39,7	37,0	37,0	37,0	37,0
	9:00	53,4	54,0	48,7	46,7	42,0	42,0	41,0	42,0
	18:00	27,4	28,8	28,1	28,5	32,0	31,0	30,0	29,0
	18:30	43,5	41,7	40,1	42,2	38,0	38,0	38,0	39,0
	19:00	47,4	45,8	44,5	46,4	40,0	40,0	40,0	40,0
16.07.2024	8:00	27,0	26,8	27,2	27,1	27,0	27,0	27,0	27,0
	8:30	43,1	41,0	40,5	41,9	36,0	35,0	36,0	37,0
	9:00	54,0	53,3	51,4	48,8	42,0	43,0	41,0	42,0
	18:00	27,8	28,0	28,0	28,5	30,0	29,0	29,0	28,0
	18:30	39,1	40,3	36,8	41,9	37,0	37,0	37,0	37,0
	19:00	43,4	45,1	42,7	46,3	41,0	41,0	41,0	42,0
17.07.2024	8:00	28,0	27,5	27,8	27,8	28,0	28,0	27,0	27,0
	8:30	40,5	39,0	38,2	38,4	36,0	36,0	36,0	37,0
	9:00	50,2	48,3	48,3	44,8	42,0	43,0	43,0	43,0
	18:00	27,0	27,7	27,8	26,9	30,0	28,0	28,0	28,0
	18:30	32,8	32,4	31,5	32,4	32,0	32,0	32,0	32,0
	19:00	38,7	38,3	37,1	38,8	36,0	37,0	37,0	38,0
18.07.2024	8:00	26,9	27,3	26,7	26,8	26,0	26,0	26,0	26,0
	8:30	32,9	32,2	31,9	31,4	30,0	30,0	31,0	31,0
	9:00	41,4	38,8	39,5	37,2	36,0	36,0	37,0	37,0
	18:00	28,1	27,6	27,3	27,4	27,0	27,0	27,0	27,0
	18:30	32,7	31,4	30,9	31,2	31,0	31,0	31,0	31,0
	19:00	40,4	40,1	39,7	39,9	38,0	38,0	37,0	37,0

Na temelju tih mjerenja dobiveni su rezultati prikazani u sljedećoj tablici.

Tablica 8 Rezultati proračuna

	T1 irc	T2 irc	T3 irc	T4 irc	T1 kont	T2 kont	T3 kont	T4 kont		
Q = m*c*ΔT kWh	28,05	28,35	27,6	24,75	24	25,5	25,5	22,5	09:00 - 08:00	12.07.2024.
	25,8	23,55	24,9	23,1	21	19,5	21	21	19:00 - 18:00	
	36,45	35,25	31,5	27,3	27	24	24	24	09:00 - 08:00	13.07.2024.
	5,55	4,95	4,8	6,6	3	4,5	3	4,5	19:00 - 18:00	
	29,1	28,05	23,1	21,9	19,5	22,5	21	19,5	09:00 - 08:00	14.07.2024.
	26,55	25,5	22,65	25,35	18	18	18	19,5	19:00 - 18:00	
	39,3	39,75	32,1	28,65	24	24	22,5	24	09:00 - 08:00	15.07.2024.
	30	25,5	24,6	26,85	12	13,5	15	16,5	19:00 - 18:00	
	40,5	39,75	36,3	32,55	22,5	24	21	22,5	09:00 - 08:00	16.07.2024.
	23,4	25,65	22,05	26,7	16,5	18	18	21	19:00 - 18:00	
	33,3	31,2	30,75	25,5	21	22,5	24	24	09:00 - 08:00	17.07.2024.
	17,55	15,9	13,95	17,85	9	13,5	13,5	15	19:00 - 18:00	
	21,75	17,25	19,2	15,6	15	15	16,5	16,5	09:00 - 08:00	18.07.2024.
	18,45	18,75	18,6	18,75	16,5	16,5	15	15	19:00 - 18:00	

Parametri korišteni za ovaj proračun su sljedeći: masa poda ( $m = 5400 \text{ kg}$ ), specifični toplinski kapacitet mramora ( $c = 1000 \text{ J/kgK}$ ) te razlika u izmjerenim temperaturama ( $\Delta T$ ). Rješenja prikazana u tablici su u kilovat satima.

Kako bi se prikazale mjesečne vrijednosti energije koju je moguće akumulirati proveden je i proračun sa mjesečnom globalnom horizontalnom radijacijom i površinom koju je potrebno zagrijavati. Taj proračun je proveden za 3 godine, 2018., 2019. i 2020. godinu te su rezultati prikazani u sljedećim tablicama.

Tablica 9 Proračun za 2018. godinu

Qs = GHI*A kWh	Karlovac	Krk	Split	
	3386	5668	6433	veljača
	8578	8810	9731	ožujak
	15748	15819	16665	travanj
	12783	14448	15059	rujan
	8128	8813	9861	listopad

Tablica 10 Proračun za 2019. godinu

Qs = GHI*A kWh	Karlovac	Krk	Split	
	7429	7684	8408	veljača
	12194	12687	13426	ožujak
	12794	13762	15609	travanj
	11870	13363	14318	rujan
	9059	9257	10782	listopad

Tablica 11 Proračun za 2020. godinu

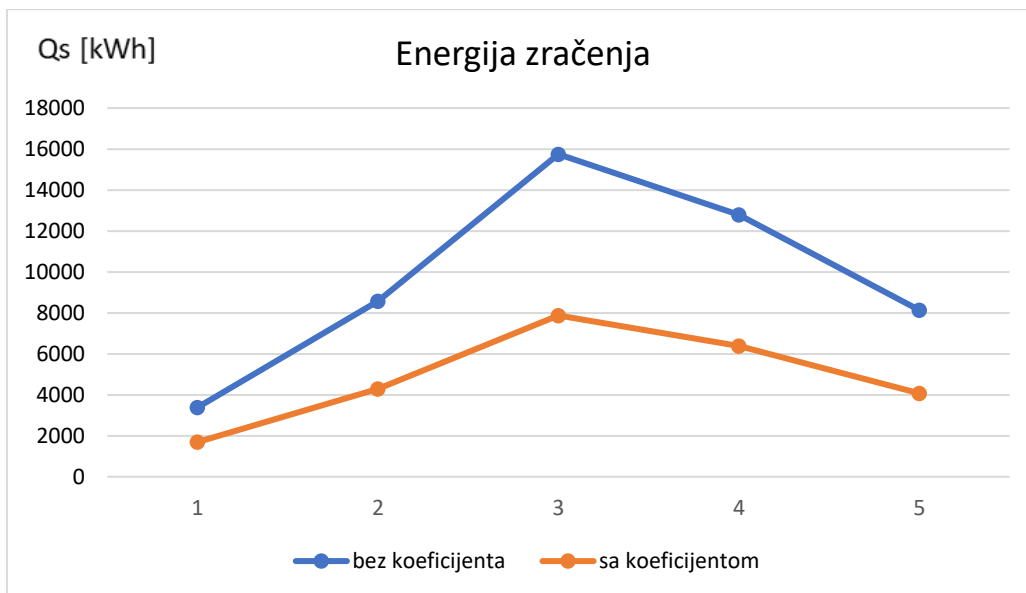
Qs = GHI*A kWh	Karlovac	Krk	Split	
	6996	7231	8655	veljača
	10771	12626	13030	ožujak
	18057	17683	18026	travanj
	12965	13587	14070	rujan
	7184	7612	9052	listopad

## 5. ANALIZA PRAKTIČNOG DIJELA

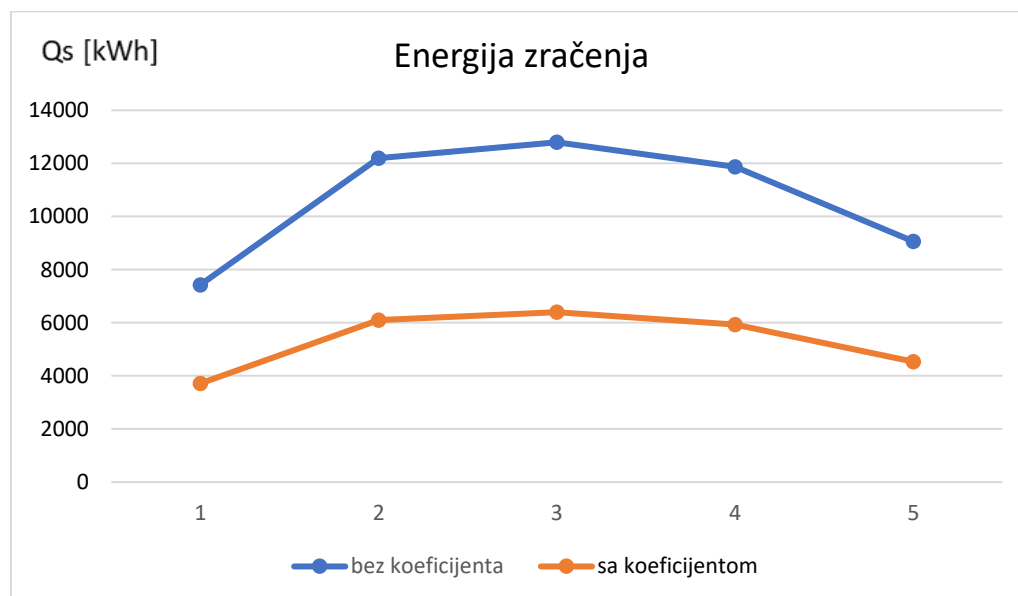
Proračun koji obuhvaća izmjerene temperature mramora izloženog sunčevu zračenju temelji se na razlici u krajnjim i početnim temperaturama mramora te ukupnoj masi mramora koji se nalazi na unaprijed određenoj površini i specifičnom toplinskom kapacitetu korištenog mramora. Iz tablice koja prikazuje mjerenja vidljivo je kako mramor postiže povoljne temperature kako na površini tako i u unutrašnjosti mase. Kako bi se te temperature mogle prikazati kao povoljne i dovoljne za zagrijavanje prostora za usporedbu se uzimaju temperature klasičnog podnog grijanja koje na površini grijanog tijela iznose oko 29°C. Nadalje u smislu otpuštanja prihvaćene energije, vrijednosti prikazane u tablici 8, u prostor koji je potrebno zagrijati može se zaključiti kako će tako zagrijani mramor ispuštati više energije ili kroz duži vremenski period ovisno o početnim temperaturama prostora, u odnosu na klasične temperature podnog grijanja.

Drugi provedeni proračun prikazuje koliko je maksimalno energije moguće generirati na unaprijed određenoj površini koja iznosi 100 m<sup>2</sup> tijekom mjeseci tokom kojih je potrebno dogrijavati prostor. Taj proračun je izveden za tri različite lokacije s različitim klimama i različitim intenzitetima i količinom sunčeva zračenja. Iz tablica 9, 10, i 11 vidljivo je kako te vrijednosti mogu dosta varirati, od 3000 do 17000 kilovat sati, ovisno o lokaciji i samim vremenskim prilikama koje utječu na količinu i jačinu sunčevog zračenja. Nadalje iz dobivenih iznosa vidljivo je kako je sustav iskoristiv za dogrijavanje, ali ne i potpuno samostalno grijanje prostora jer rezultati za veljaču i listopad koji su stavljani kao granični imaju najmanje vrijednosti te je moguće zaključiti kako bi u zimskim mjesecima u kojima je potrebno više energije te vrijednosti bile još niže i ne bi zadovoljavale potrebe za grijanjem.

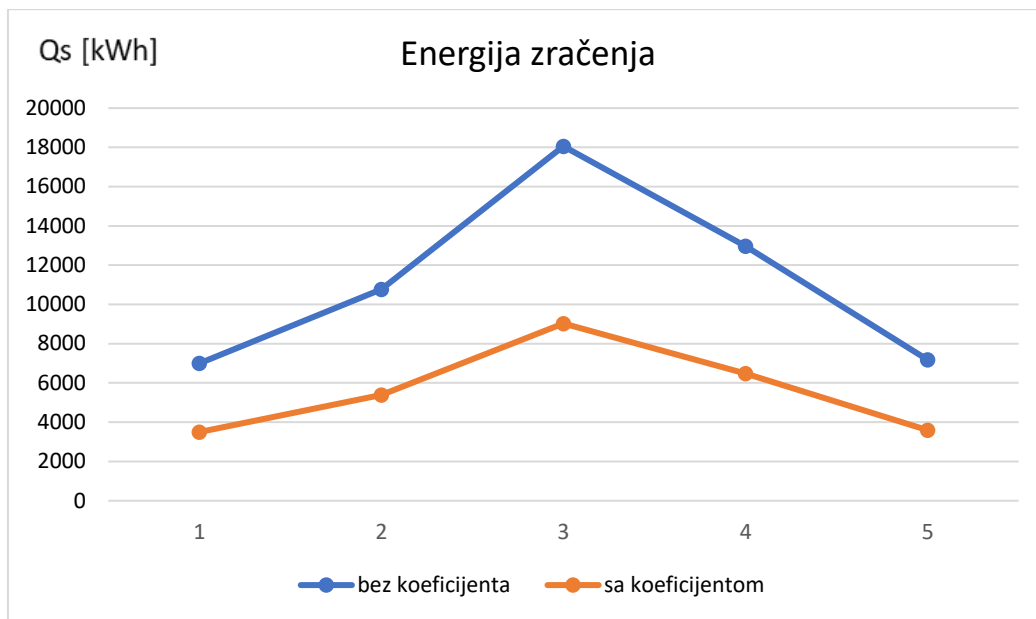
Svi prikazani proračuni provedeni su sa približno idealnim podacima i maksimalnim vrijednostima. Kako bi se dobili što točniji rezultati potrebno je uzeti u obzir i refleksijski i apsorpcijski učinak stakla budući da se danas koriste stakla koja imaju zaštitne premaze koji smanjuju ulazak sunčeve svjetlosti i do 50%.



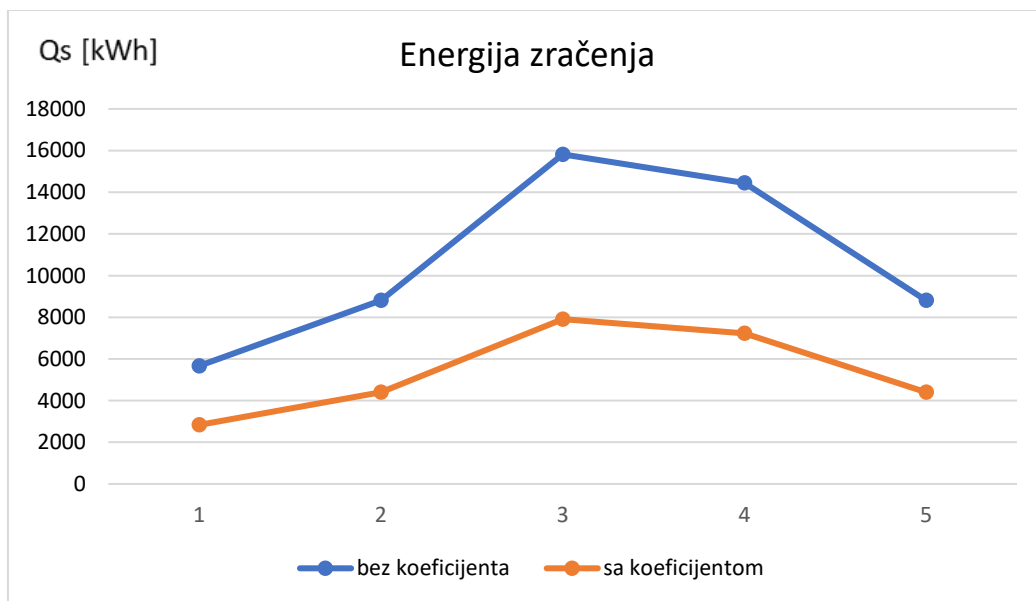
Slika 23 Grafički prikaz rezultata za Karlovac 2018. godine



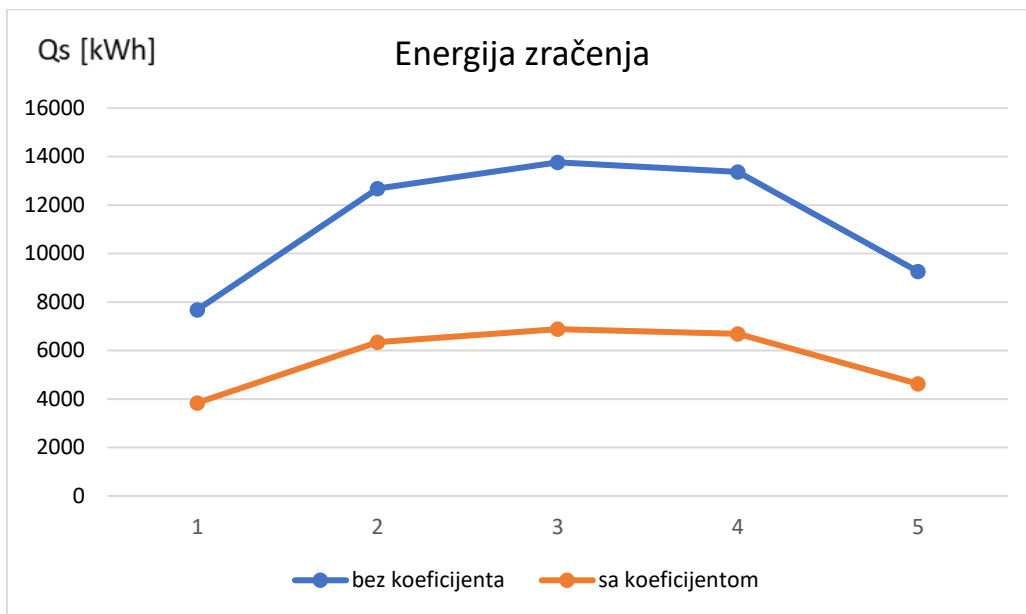
Slika 24 Grafički prikaz rezultata za Karlovac 2019. godine



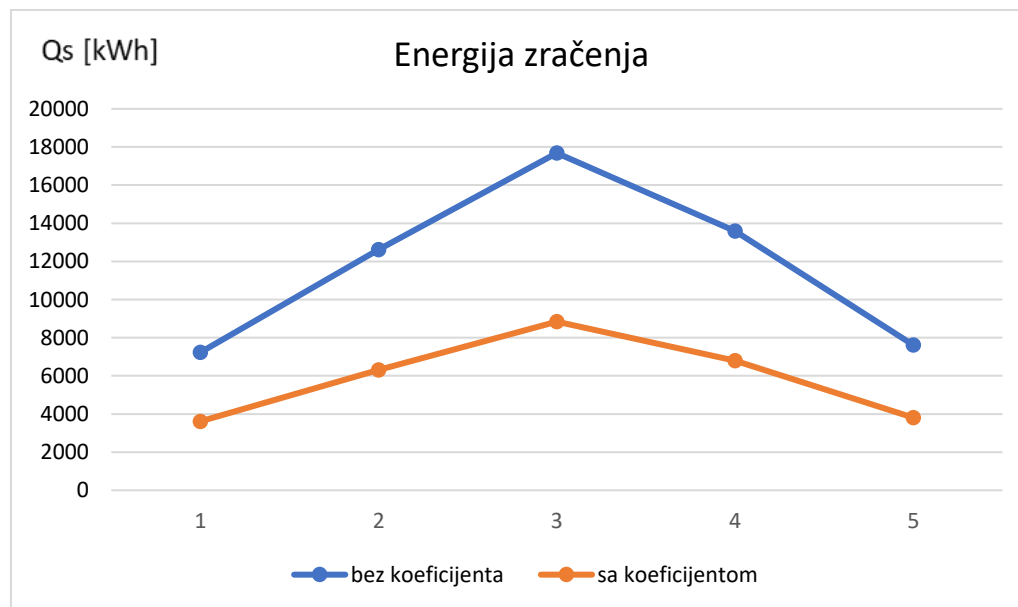
Slika 25 Grafički prikaz rezultata za Karlovac 2020. godine



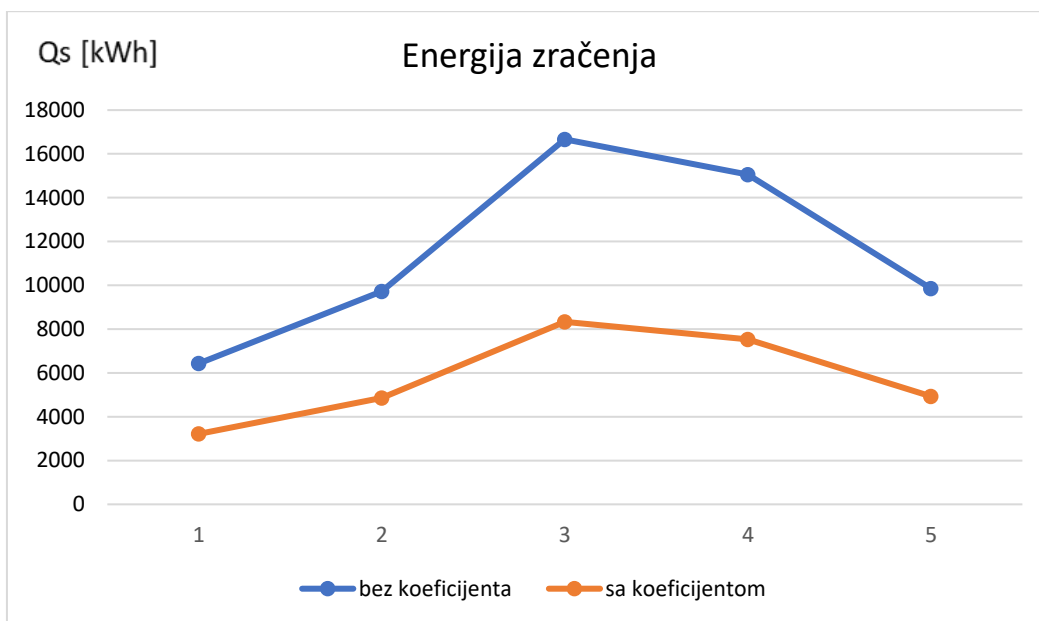
Slika 26 Grafički prikaz rezultata za Krk 2018. godine



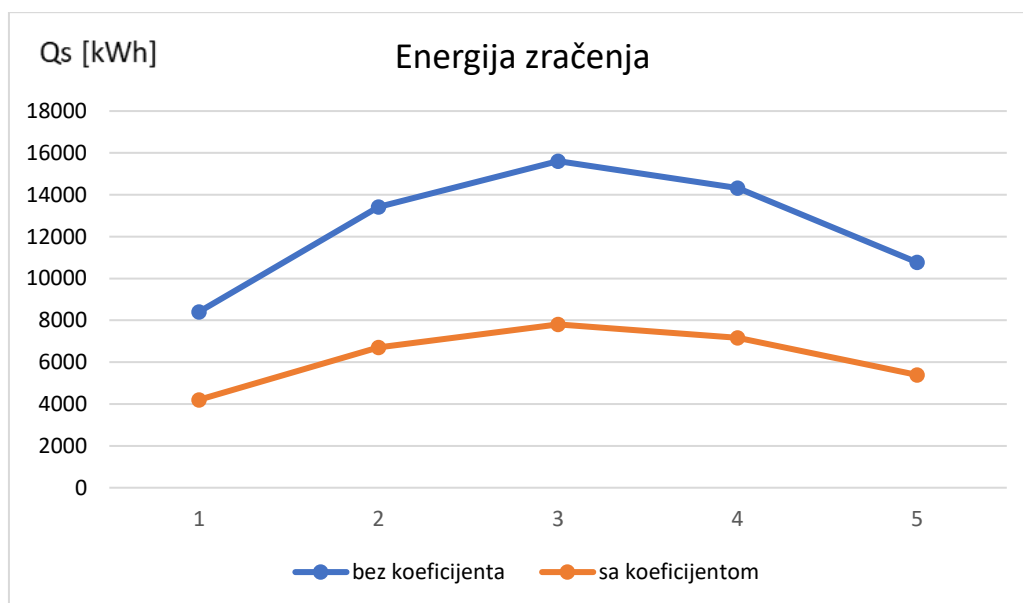
Slika 27 Grafički prikaz rezultata za Krk 2019. godine



Slika 28 Grafički prikaz rezultata za Krk 2020. godine

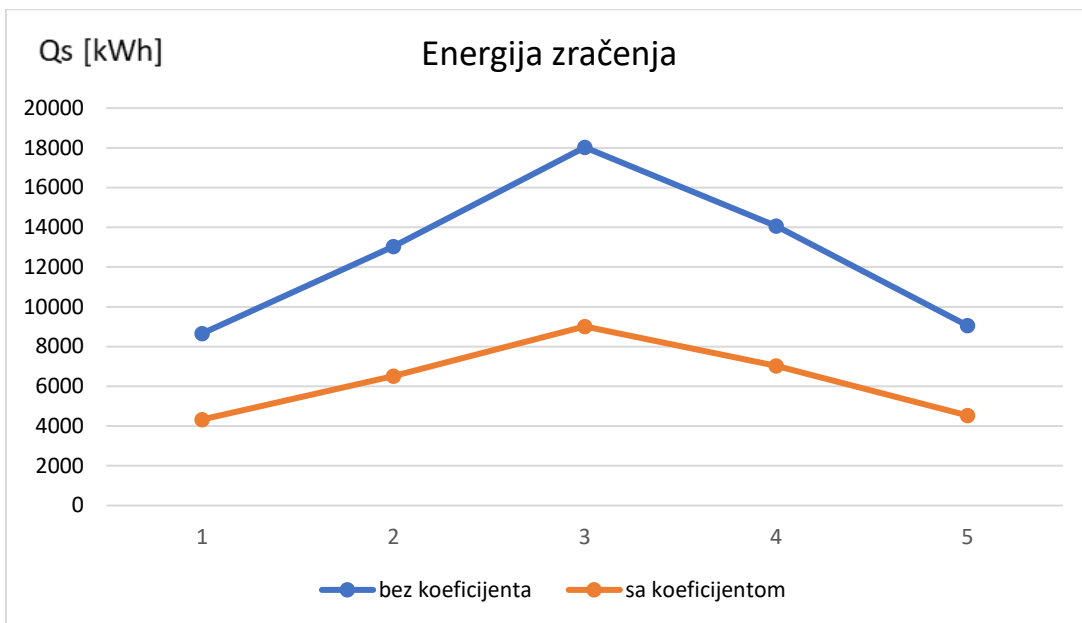


Slika 29 Grafički prikaz rezultata za Split 2018. godine



Slika 30 Grafički prikaz rezultata za Split 2019. godine





Slika 31 Grafički prikaz rezultata za Split 2020. godine

Prethodno prikazani grafikoni ukazuju na to koliki utjecaj ima koeficijent refleksije te prikazuju odnos rezultata proračuna kada se uzima i ne uzima u obzir taj koeficijent.

## 6. ZAKLJUČAK

Ovaj diplomski rad istražuje učinkovitost sustava pasivnog solarnog grijanja mramornog poda kroz staklene klizne plohe kao ključnog elementa u dizajnu pasivnih solarnih kuća. Rezultati eksperimenta i provedenih proračuna ukazuju kako ovakav sustav pasivnog grijanja ima veliki potencijal za smanjenje energetske potrošnje i poboljšanja udobnosti stanovanja, što je vrlo važno u kontekstu globalnih ciljeva smanjenja emisija stakleničkih plinova i povećanja energetske učinkovitosti u građevinskom sektoru.

Sustav pasivnog solarnog grijanja poda pomoću staklenih kliznih ploha omogućava direktan ulazak sunčevog zračenja u unutrašnjost kuće, gdje se energija pohranjuje u materijalima s visokim toplinskim kapacitetom, u prikazanom slučaju mramoru. Ta prikupljena energija se zatim postepeno oslobađa tijekom dana i noći kako bi održala temperaturu prostora stabilnom.

Integracijom ovakvog ili sličnih sustava pasivnog grijanja moguće je značajno smanjiti potrebu za konvencionalnim sustavima, što dalje rezultira nižom potrošnjom energije i smanjenjem operativnih troškova. Ti sustavi su dugoročno održivi jer koriste prirodne resurse te ne zahtijevaju složeno održavanje što dodatno smanjuje troškove i njihov utjecaj na okoliš.

Iako su rezultati provedenog eksperimenta i izrađenih proračuna ohrabrujući i ukazuju kako je opisivani sustav učinkovit on i dalje nije samodostatan za zagrijavanje prostora već je najbolje upotrebljiv kao sustav koji će dogrijavati prostor uz još neki sustav grijanja jer ovisi o puno različitih faktora, poput svojstava stakla, klime, vremenskih prilika, orijentacije i lokacije kuće. Budući da se danas koriste različite vrste stakala sa različitim premazima koji posjeduju različita svojstva, kako bi se što točnije moglo predvidjeti koliko je sustav učinkovit potrebno je uzeti u obzir i svojstva stakla koja se koriste na građevini s takvim sustavom.

Zaključno, ovaj diplomski rad pruža solidnu osnovu za daljnji razvoj i primjenu pasivnih solarnih sustava te njihovu integraciju s nekim drugim obnovljivim izvorima energije.

## LITERATURA

- [1] [https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:c51fe6d1-5da2-11ec-9c6c-01aa75ed71a1.0004.02/DOC\\_1&format=PDF](https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:c51fe6d1-5da2-11ec-9c6c-01aa75ed71a1.0004.02/DOC_1&format=PDF), pristupljeno 16.06.2024.
- [2] <https://www.mdpi.com/1996-1073/17/5/1006>, pristupljeno 16.06.2024.
- [3] <https://www.mdpi.com/2076-3417/11/1/376>, pristupljeno 16.06.2024.
- [4] <https://www.arcjournals.org/pdfs/ijcrce/v2-i5/3.pdf#:~:text=URL%3A%20https%3A%2F%2Fwww.arcjournals.org%2Fpdfs%2Fijcrce%2Fv2>, pristupljeno 17.06.2024.
- [5] [https://mdpi-res.com/d\\_attachment/applsci/applsci-11-00376/article\\_deploy/applsci-11-0037v3.pdf?version=1609896437#:~:text=URL%3A%20https%3A%2F%2Fmdpi](https://mdpi-res.com/d_attachment/applsci/applsci-11-00376/article_deploy/applsci-11-0037v3.pdf?version=1609896437#:~:text=URL%3A%20https%3A%2F%2Fmdpi), pristupljeno 18.06.2024.
- [6] <https://wbdg.org/resources/passive-solar-heating>, pristupljeno 18.06.2024.
- [7] <https://www.e-education.psu.edu/egee102/node/2098>, pristupljeno 20.06.2024.
- [8] <https://theconstructor.org/building/thermal-mass-passive-solar-building/562355/>, pristupljeno 20.06.2024.
- [9] <https://www.britannica.com/science/marble-rock>, pristupljeno 21.06.2024.
- [10] <https://marble.com/>, pristupljeno 21.06.2024.
- [11] <https://www.stonecontact.com/>, pristupljeno 21.06.2024.
- [12] <https://www.otm.sg/complete-list-of-glass-properties#Uvalue>, pristupljeno 23.06.2024.
- [13] [https://web.mit.edu/parmstr/Public/NRCan/CanBldgDigests/cbd060\\_e.html](https://web.mit.edu/parmstr/Public/NRCan/CanBldgDigests/cbd060_e.html), pristupljeno 23.06.2024.
- [14] <https://www.otm.sg/complete-list-of-glass-properties#Uvalue>, pristupljeno 24.06.2024.
- [15] [https://www.inforse.org/asia/M\\_III\\_passive.htm](https://www.inforse.org/asia/M_III_passive.htm), pristupljeno 24.06.2024.
- [16] <https://architectuul.com/architecture/heliotrop-rotating-house>, pristupljeno 24.06.2024.
- [17] <https://www.nrel.gov/docs/fy00osti/29315.pdf>, pristupljeno 24.06.2024.
- [18] <https://medium.com/@wilsonramosbusiness/the-advantages-and-disadvantages-of-passive-solar-energy-12e8be33f5bc>, pristupljeno 24.06.2024.
- [19] <https://www.solaripedia.com/files/653.pdf>, pristupljeno 27.06.2024.
- [20] Kraut, B.: Strojarski priručnik, Sajema d.o.o., Zagreb, 2009.

- [21] Bošnjaković, F.: Nauka o toplini, Svezak I, II i III, Graphis, Zagreb, 2012.
- [22] <https://weather-and-climate.com/average-monthly-hours-Sunshine.karlovac-karlovac-county-hr,Croatia>, pristupljeno 20.07.2024.
- [23] <https://www.weather-atlas.com/en/croatia/karlovac-climate>, pristupljeno 22.07.2024.
- [24] <https://light-measurement.com/wavelength-range/>, pristupljeno 22.07.2024.
- [25] [https://science.nasa.gov/ems/07\\_infraredwaves](https://science.nasa.gov/ems/07_infraredwaves), pristupljeno 22.07.2024.
- [26] <https://earthobservatory.nasa.gov/features/EnergyBalance/page2.php>, pristupljeno 23.07.2024.
- [27] [https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg\\_tools/en/#api\\_5.2](https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/#api_5.2), pristupljeno 24.07.2024.
- [28] [https://energyeducation.ca/encyclopedia/Main\\_Page](https://energyeducation.ca/encyclopedia/Main_Page), pristupljeno 24.07.2024.
- [29] [https://phy.grf.unizg.hr/media/download\\_gallery/10\\_11\\_interakcija%20svjetlosti%20i%20materije.pdf](https://phy.grf.unizg.hr/media/download_gallery/10_11_interakcija%20svjetlosti%20i%20materije.pdf), pristupljeno 24.07.2024.
- [30] <https://light-measurement.com/reflection-absorption/>, pristupljeno 25.07.2024.
- [31] [https://phy.grf.unizg.hr/media/download\\_gallery/10\\_1](https://phy.grf.unizg.hr/media/download_gallery/10_1), pristupljeno 25.07.2024.
- [32] <https://edutorij-admin-api.carnet.hr/storage/extracted/15cf791a-4c97-4f29-84d9-17c1b47ceccc/kemija-2/m01/j02/index.html>, pristupljeno 25.07.2024.