

# Dinamika paraboličnih kolektora solarne termoelektrane

---

**Primorac, Matej Vinko**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2023**

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

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:459771>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-12-20**

*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

**Matej Vinko Primorac**

Zagreb, 2023.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Doc dr. sc. Ante Marušić

Student:

Matej Vinko Primorac

Zagreb, 2023.

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

Zahvaljujem se doc dr. sc. Anti Marušiću na podršci tijekom cjelokupne izrade završnog rada, na odvojenom vremenu, korisnim savjetima i stručnoj pomoći.

Matej Vinko Primorac



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



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

Sveučilište u Zagrebu	
Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: 602 – 04 / 23 – 6 / 1	
Ur.broj: 15 - 1703 - 23 -	

## ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Primorac Matej Vinko** JMBAG: **0035221355**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Dinamika paraboličnog kolektora solarne termoelektrane**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Parabolic trough collector dynamics**

Opis zadatka:

Iako predstavljaju samo 2% ukupnih instaliranih kapaciteta za proizvodnju električne energije iz energije Sunca, solarne termoelektrane (*eng. Concentrated solar power – CSP*) dobivaju sve veći značaj zahvaljujući jednostavnoj integraciji sa spremnicima energije. Solarne termoelektrane zagrijavaju medij za transport topline koncentracijom solarnog zračenja pomoću paraboličnih kolektora ili heliostata. Zagrijani medij potom se koristi kao izvor topline u generatoru pare dok ostatak postrojenja odgovara klasičnom parno-turbinskom postrojenju. S obzirom na česte promjene intenziteta solarnog zračenja i veliku tromost sustava komponente elektrane izložene su značajnim temperaturnim gradientima, dok regulacija temperature medija za transport topline može biti izazovna. Iz navedenih razloga dinamičke značajke paraboličnih kolektora potrebno je detaljno ispitati, prvo simulacijski, a potom i eksperimentalno. U okviru ovog rada potrebno je:

- 1) izvesti matematički model rada polja paraboličnih kolektora elektrane nazivne snage 50 MWe, temeljen na dostupnim parametrima komercijalnog kolektora;
- 2) simulacijom matematičkog modela prikazati promjene temperature medija za transport topline tijekom jutarnjeg puštanja polja u pogon;
- 3) ispitati ponašanje kolektorskog polja u uvjetima djelomične i kratkotrajne naoblake.

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

Zadatak zadan:

30. 11. 2022.

Datum predaje rada:

1. rok: 20. 2. 2023.  
2. rok (izvanredni): 10. 7. 2023.  
3. rok: 18. 9. 2023.

Predvideni datumi obrane:

1. rok: 27. 2. – 3. 3. 2023.  
2. rok (izvanredni): 14. 7. 2023.  
3. rok: 25. 9. – 29. 9. 2023.

Zadatak zadao:

Doc. dr. sc. Ante Marušić

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Vladimir Soldo

**SADRŽAJ**

SADRŽAJ .....	I
POPIS SLIKA .....	II
POPIS TABLICA.....	III
POPIS OZNAKA .....	IV
SAŽETAK.....	VI
SUMMARY .....	VII
1. UVOD.....	1
1.1. Solarna energija kao obnovljivi izvor .....	1
1.2. Povijest solarne energije .....	2
2. KONCENTRIRANA SOLARNA ENERGIJA (CSP) .....	4
2.1. Općenito .....	4
2.2. Tipovi postrojenja .....	5
3. PARABOLIČNE KONCENTRIRANE SOLARNE PANELE.....	7
3.1. Princip rada .....	7
3.2. Predmetni model kolektora .....	8
3.3. Pretpostavke matematičkog modela.....	12
3.4. Sunčevo zračenje.....	13
4. MATEMATIČKI MODEL.....	17
4.1. Energetska bilanca prijemnika paraboličnog kolektora .....	17
4.1.1. Energetska bilanca HTF-a.....	18
4.1.2. Energetska bilanca apsorbera.....	19
4.1.3. Energetska bilanca staklene ovojnice .....	20
4.2. Izračuni koeficijenata prijelaza topline .....	21
4.2.1. Konvekcija između HTF-a i apsorbera .....	21
4.2.2. Konvekcija između apsorbera i vakuuma te između vakuuma i staklene ovojnice	22
4.2.3. Konvekcija između staklene ovojnice i okoliša.....	22
4.3. Izračuni apsorpcije sunčevog zračenja.....	23
4.3.1. Apsorpcija sunčevog zračenja apsorbera .....	23
4.3.2. Apsorpcija sunčevog zračenja apsorbera .....	24
5. REZULTATI .....	25
5.1. Koncentracija DNI-a .....	25
5.2. Utjecaj protoka na temperaturu HTF-a .....	25
5.3. Izvedba jutarnjeg puštanja solarnog polja u pogon.....	26
5.4. Utjecaj djelomične ili kratkotrajne naoblake .....	27
6. ZAKLJUČAK.....	31
LITERATURA.....	32
PRILOZI.....	33

**POPIS SLIKA**

<b>Slika 1.</b>	<b>Arhimedova zraka smrti [3] .....</b>	<b>3</b>
<b>Slika 2.</b>	<b>Pojednostavljena shema elektrane na koncentriranu solarnu energiju s toplinskim spremnikom [4].....</b>	<b>4</b>
<b>Slika 3</b>	<b>Globalno godišnje izravno normalno zračenje u kWh/m<sup>2</sup>/g [4] .....</b>	<b>5</b>
<b>Slika 4.</b>	<b>Solarno polje paraboličnih kolektora [6] .....</b>	<b>8</b>
<b>Slika 5.</b>	<b>Shematski prikaz presjeka prijemnika paraboličnog kolektora.....</b>	<b>9</b>
<b>Slika 6.</b>	<b>Prijemnik Schott PTR-70 [7] .....</b>	<b>10</b>
<b>Slika 7.</b>	<b>Pretpostavljeni temperaturni profil apsorbera .....</b>	<b>12</b>
<b>Slika 8.</b>	<b>Pojednostavljenje temperaturnog profila staklene ovojnice .....</b>	<b>13</b>
<b>Slika 9.</b>	<b>Prikaz upadnog kuta [13] .....</b>	<b>15</b>
<b>Slika 10.</b>	<b>Energetska bilanca prijemnika .....</b>	<b>17</b>
<b>Slika 11.</b>	<b>Prikaz DNI-a za ljetni i zimski solistacij .....</b>	<b>25</b>
<b>Slika 12.</b>	<b>Utjecaj protoka na temperaturu HTF-a.....</b>	<b>26</b>
<b>Slika 13</b>	<b>Puštanje u pogon tokom jutarnjih sati .....</b>	<b>27</b>
<b>Slika 14</b>	<b>Prikaz DNI-a s dodanom umjetnom naoblakom .....</b>	<b>28</b>
<b>Slika 15.</b>	<b>Detaljniji prikaz trenutačne 12 minutne naoblake.....</b>	<b>29</b>
<b>Slika 16.</b>	<b>Prikaz utjecaja 12 minutne naoblake na temperaturu radnog medija .....</b>	<b>29</b>
<b>Slika 17.</b>	<b>Detaljniji prikaz trenutačne 2 minutne naoblake.....</b>	<b>30</b>
<b>Slika 18.</b>	<b>Prikaz utjecaja 2 minutne naoblake na temperaturu radnog medija .....</b>	<b>30</b>

---

## POPIS TABLICA

<b>Tablica 1. Popis karakteristika prijemnika SCHOTT PTR-70 [7] i kolektora Eurotrough-150 [5] .....</b>	<b>11</b>
<b>Tablica 2. Definicije toplinskog toka sustava.....</b>	<b>17</b>



**POPIS OZNAKA**

Oznaka	Jedinica	Opis
$C_c$	$\frac{W}{(m^2)(100K)^4}$	Konstanta zračenja crnog tijela
$c$	$\frac{J}{kgK}$	Specifični toplinski kapacitet
$D$	m	promjer
$Gr$	/	Grashofova značajka
$g$	$\frac{m^2}{s}$	Standardno ubrzanje slobodnog pada
$k$	$\frac{W}{m^2K}$	Koeficijent prolaza topline
$L$	m	Ukupna duljina svih kolektora zajedno
$Nu$	/	Nusseltova značajka
$Pr$	/	Prandtlova značajka
$\dot{Q}$	W	Toplinski tok
$R$	m	polumjer
$Ra$	/	Rayleighova značajka
$Re$	/	Reynoldsova značajka
$w$	$\frac{m}{s}$	Brzina

**Grčki simboli**

$\alpha$	$\frac{W}{m^2K}$	Koeficijent prijelaza topline
$\beta$	$K^{-1}$	Toplinska izobarna širljivost tekućine
$\varepsilon$	/	Emisijski faktor
$\eta$	$\frac{kg}{ms}$	Dinamička žilavost
$\lambda$	$\frac{W}{mK}$	Toplinska provodnost tvari
$\nu$	$\frac{m^2}{s}$	Kinematička žilavost
$\rho$	$\frac{kg}{s}$	gustoća
$\sigma$	$\frac{W}{m^2K^4}$	Stefan-Boltzmannova konstanta
$\omega$	/	Vidni faktor kod obuhvaćenog tijela

**Indeksi**

$amb$	/	Okoliš
$g$	/	Stijenka staklena ovojnica
$htf$	/	Radni medij
$i$	/	Izlaz
$kond$	/	Kondukcija ili provođenje
$konv$	/	Konvekcija ili komešanje
$rad$	/	Zračenje ili radijacija

<i>s</i>	/	Stijenka apsorbera
<i>sky</i>	/	Nebo
<i>sol</i>	/	Apsorbirano sunčevo zračenje
<i>u</i>	/	Unutarnji
<i>ul</i>	/	Ulaz
<i>v</i>	/	Vanjski
<i>vak</i>	/	Vakuum
<i>zr</i>	/	Zračenje

---

**SAŽETAK**

Ovaj izvještaj opisuje stvaranje, verifikaciju i primjenu modela prijenosa topline koji je implementiran u softverskom paketu Simulink. Model procjenjuje performanse linearnog prijemnika u paraboličnom kolektoru za solarnu energiju. Izvještaj obuhvaća uključivanje jednadžbi prijenosa topline, termodinamičkih jednadžbi, optičkih svojstava i relevantnih parametara unutar modela. Također, obrađuje pretpostavke i ograničenja modela, kao i specifično ponašanje koje model pokazuje. U okviru modela, analiziran je utjecaj masenog protoka radnog medija kroz linearni prijemnik na njegovu temperaturu. Izvedena je simulacija puštanja u pogon tijekom jutarnjih sati kako bi se prikazalo vrijeme potrebno za zagrijavanje radnog medija na optimalnu temperaturu. Također, istražen je utjecaj naoblake na rad solarnog polja.

Ključne riječi: solarno polje, parabolični kolektor, DNI, prijemnik, 1D modeliranje toplinskih modela.

---

**SUMMARY**

This report presents the creation, verification, and application of a heat transfer model incorporated within Simulink. The model assesses the performance of a linear receiver in a parabolic trough solar collector. The report covers the inclusion of heat transfer equations, thermodynamic equations, optical properties, and relevant parameters within the model. Additionally, it addresses the assumptions and limitations of the model, as well as specific behaviors exhibited by the model. Within the model, the impact of the mass flow rate of the working fluid through the linear receiver on its temperature was analyzed. A simulation of the start-up during the morning hours was conducted to illustrate the time required to heat the working fluid to the optimal temperature. Additionally, the influence of cloud cover on the performance of the solar field was investigated.

Key words: solar field, parabolic trough collector, DNI, receiver, Thermal 1D transient modelling

## 1. UVOD

### 1.1. Solarna energija kao obnovljivi izvor

Tijekom proteklih 150 godina moderna se civilizacija sve više oslanjala na fosilna goriva kao što su ugljen, nafta i prirodni plin. Ti su resursi ograničeni i njihova je dugoročna dostupnost prirodno ograničena. Još bitnije, njihovim izgaranjem u atmosferu se oslobađaju staklenički plinovi, glavni uzrok globalnog zatopljenja. Zabrinutost oko klimatskih promjena, energetske sigurnosti i iscrpljivanja konvencionalnih izvora energije dovela je do velikog broja istraživanja o korištenju obnovljivih izvora energije za proizvodnju električne energije, uz minimalno zagađenje. Obnovljiva energija u svim svojim oblicima, općenito ima manji utjecaj na okoliš od fosilnih goriva i prirodno je obnovljiva te kao takva nudi priliku za neograničenu opskrbu energijom. Obnovljivi izvori energije doprinose trima glavnim područjima svjetskih primarnih energetskih potreba: proizvodnji električne energije, grijanju i hlađenju te transportu.

Solarna tehnologija čini gotovo 4% globalne proizvodnje električne energije i ostaje treća najveća tehnologija obnovljive električne energije, iza hidroenergije i vjetra [1]. Sunce nije samo centar našeg Sunčevog sustava, već i najveći izvor energije u njemu. Ona potječe od nuklearnih reakcija u sunčevom središtu. Radi se o reakciji fuzije vodikovih atoma iz koje nastaje helij, uz oslobađanje velike količine energije. Ta se energija širi u svemir zračenjem pa tako jednim dijelom dolazi i do Zemlje. Prema raspoloživim zalihama vodika može se izračunati da će Sunce zračiti još otprilike 5 milijardi godina, stoga Sunce predstavlja praktički neiscrpan izvor energije. Zemlja svaki dan prima puno veću količinu energije od one koja je potreba da zadovolji sve naše potrebe. Ovu ogromnu količinu energije koju svakodnevno primamo, nazivamo insolacijom, i ona premašuje više od 100 milijuna puta ukupne količine energije koju potrošimo u jednoj godini. [2]

Dakle, obilje sunčeve svjetlosti koja dopire do Zemljine površine može se i treba pretvoriti u električnu energiju fotonaponskim ćelijama ili koncentriranim solarnim sustavima, što predstavlja svestran i jednostavan izvor energije koji može napajati sve, od malih elektroničkih uređaja do čitavih zajednica.

## 1.2. Povijest solarne energije

Sunce igra vitalnu ulogu u životu na Zemlji. Sve su kulture to prepoznale i slavile od davnina. Kroz povijest, ljudi su poštovali Sunce, često ga antropomorfizirajući i tretirajući ga kao boga. Štoviše, Sunčevo zračenje se od davnina koristi kao važan resurs za razne izume. Najstariji i najpoznatiji način prikupljanja korisne energije Sunca je paljenje vatre uz pomoć zakrivljenog zrcala, kojim su se služili stari Kinezi, Grci i Rimljani. Kako kaže stara legenda, grčki je znanstvenik Arhimed, uz pomoć brončanog štita fokusirao sunčeve zrake kako bi zapalio rimske drvene brodove, tzv. „*Arhimedova zraka smrti*“. Tijekom povijesti, prilikom gradnje kuća i stambenih prostora, praksa je bila postavljati prozore na južnu stranu kako bi se prostorije obasjavale većim intenzitetom sunčeve svjetlosti te zadržavale toplinu unutar prostora. Jedan od najvećih genija renesanse, Leonardo da Vinci, već je u to vrijeme bio svjestan ekoloških problema, budući da ga je zabrinjavalo uništavanje ogromnih šuma na Zemlji. Stoga je proveo nekoliko istraživanja o korištenju solarne energije za grijanje. Predložio je prvu industrijsku primjenu konveksnog zrcala za koncentraciju solarne energije kako bi se koristilo za zagrijavanje vode. Također je predložio tehnologiju za zavari vanje bakra pomoću koncentrirane sunčeve radijacije te tehnička rješenja za grijanje kupališnih prostora ili pogon tekstilnih strojeva. Tijekom 19. stoljeća tehnologija se razvila do razine gdje je postalo moguće izravno pretvarati solarnu energiju u druge oblike, uglavnom u niskotlačnu paru koja je bila potrebna za široko rasprostranjene parne strojeve. Jedan od začetnika upotrebe solarne energije bio je Augustin Bernard Mouchot, koji je napravio prvi motor na solarni pogon. Mouchot se proslavio izlaganjem svojeg rada na Pariškoj izložbi 1878., koristeći solarnu energiju za pogon motora za pravljenje leda i posluživanje sladoleda na solarnu energiju posjetiteljima. Godine 1912. američki solarni pionir Frank Schuman izgradio je prvu svjetsku solarnu termoelektranu u tvornici vodenih pumpi u Maadiju u Egiptu. Tijekom posljednjih 50 godina, dizajnirano je i izgrađeno mnogo varijanti kolektora za fokusiranje sunčevih zraka. Korištene su dvije osnovne tehnologije: s centralnim i distribuiranim prijammnicima. Prva komercijalna koncentrirana solarna elektrana na svijetu, Planta Solar 10, postavljena je u blizini Seville u Španjolskoj 2004. godine. Daljnji razvoj tehnologije i materijala omogućio je sve veću upotrebu solarnih tehnologija. [3]



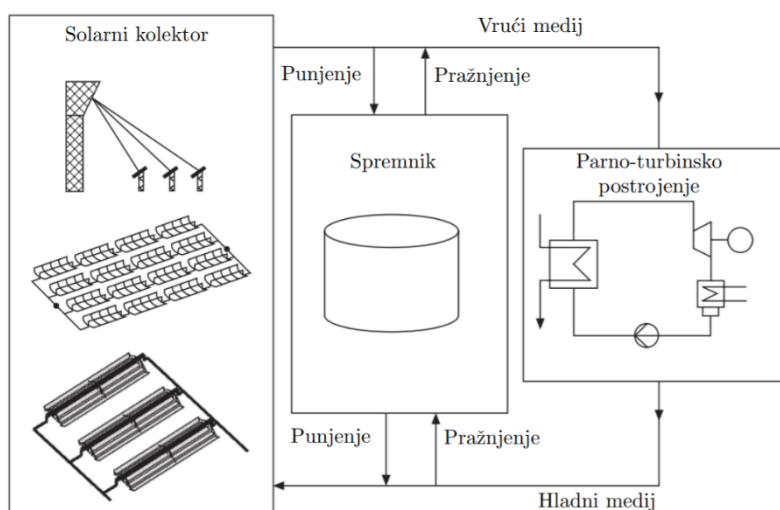
**Slika 1.** Arhimedova zraka smrti [3]

## 2. KONCENTRIRANA SOLARNA ENERGIJA (CSP)

### 2.1. Općenito

Sustavi koncentriranja solarne energije (eng. *Concentrating Solar Power - CSP*) predstavljaju skupinu tehnologija obnovljivih izvora energije koje proizvode električnu energiju iz sunca. Za razliku od fotonaponskih (eng. *Photovoltaics - PV*) sustava, koji koriste poluvodiče za izravno pretvaranje sunčeve svjetlosti u električnu energiju, CSP sustavi koriste zrcala ili leće za koncentriranje sunčeve svjetlosti na prijemnike, koji zatim prenose toplinsku energiju na radni medij te u konačnici nastaje električna energija. Iako su svojstva koncentriranog sunčevog zračenja odavno poznata, komercijalna primjena CSP tehnologije započela je osamdesetih godina prošlog stoljeća. Prvo veliko solarno termalno postrojenje izgrađeno je u Kaliforniji. [3]

Koncentriranje sunčevog zračenja tehnologija je koja se danas primjenjuje u većini CSP elektrana, koristi zrcala za zagrijavanje tekućine za prijenos topline (eng. *Heat Transfer Fluid - HTF*), koja prolaskom kroz skup izmjenjivača, zagrijava napojnu vodu i stvara paru. Proizvedena para dio je Rankine-ovog procesa, te u ulozu radnog medija prolazi kroz turbine generirajući mehaničku te posredno i električnu energiju, kao u konvencionalnim termoelekttranama. Prednost CSP-a je korištenje sunčeve energije kao izvora topline, umjesto energije dobivene izgaranjem fosilnih goriva ili nuklearnih reakcija. Shematski dijagram uređaja prikazan je na Slika 2.

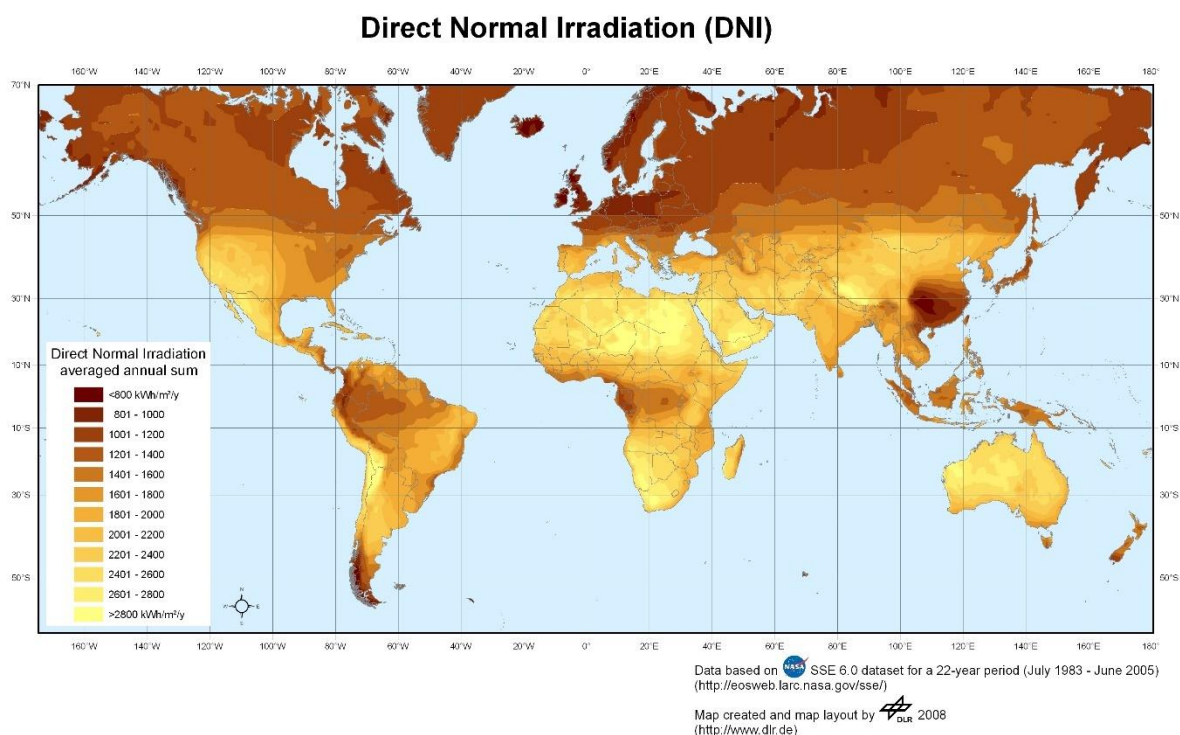


**Slika 2. Pojednostavljena shema elektrane na koncentriranu solarnu energiju s toplinskim spremnikom [4]**



Jedna od najvećih prednosti CSP elektrana naspram fotonaponskih modula je mogućnost jednostavne i ekonomične instalacije sustava za skladištenje energije tj. topline (toplinski spremnici). Oni omogućavaju proizvodnju električne energije čak i po oblačnom nebu kao i nakon zalaska sunca. Time se povećava proizvodni kapacitet CSP elektrana, i što je još bitnije, omogućava proizvodnja električne energije s minimalnim fluktuacijama. Rezultat toga je održavanje stabilne radne snage, kompatibilnost s postojećom infrastrukturom elektroenergetske mreže, odnosno proizvodnja struje prilagođena potrošačima što doprinosi kompetitivnosti postrojenja na tržištu električne energije. S druge strane, parno turbinski ciklus elektrane temeljen je na već zreloj tehnologiji te se u budućnosti ne može očekivati značajno smanjenje investicijskih i pogonskih troškova u tom spektru.

Kako CSP postrojenja zahtijevaju direktno zračenje sunca (barem 2000 kWh po m<sup>2</sup> godišnje [4]) geografska pozicija elektrana jedna je od ključnih čimbenika. Geografska lokacija pogodna za njenu primjenu su u području od oko 40° južno i sjeverno od ekvatora kao što možemo vidjeti na Slika 3.



**Slika 3** Globalno godišnje izravno normalno zračenje u kWh/m<sup>2</sup>/g [4]

## 2.2. Tipovi postrojenja

Osnovni princip CSP sustava je fokusiranje velike količine sunčeve svjetlosti na malo područje, čime se generiraju visoke temperature. CSP postrojenja se mogu podijeliti u dvije skupine,

ovisno o tome koncentriraju li solarni kolektori sunčeve zrake u jednu točku ili duž žarišne linije. Linijsko usmjereni sustavi su parabolički kolektori (eng. *parabolic trough collectors* - *PTC*) i linearni Fresnel kolektori, koji imaju jedno-osne sustave za praćenja sunca. Točkasto usmjereni sustavi su solarni tanjur (eng. *solar dish*) i sustavi heliostata sa solarnim tornjem (eng. *solar tower*), koji imaju mogućnost dvo-osnog praćenja.

Parabolični svjetlosni kolektori su jedni od najzrelijih i najkorištenijih CSP tehnologija. Sastoje se od dugih zakrivljenih ogledala, postavljenih u obliku parabole kako bi koncentrirala sunčevu svjetlost na apsorbirajuću cijev, koja se proteže duž žarišne linije kolektora. Trenutno se najviše postavljaju i najviše ih ima u SAD-u i u Španjolskoj. Detaljnija analiza paraboličnih kolektora nalazi se u odlomku 3.1. *Princip rada*.

Linearni Fresnelovi reflektori su značajno manje zastupljeni u komercijalnoj primjeni te koriste dugačka ravna ogledala, kako bi koncentrirali sunčevu svjetlost na linearni prijemnik, slično paraboličnim svjetlosnim kolektorima. Kod ove izvedbe voda isparava u kolektorskim cijevima što pojednostavljuje termički ciklus. Također, njihova konstrukcija ogledala omogućuje manje složenu strukturu i niže troškove u usporedbi s paraboličnim svjetlosnim kolektorima. Temperatura radnog medija kreće se između 100°C - 450°C [5]

Solarni tornjevi koriste pokretna ogledala, nazvana heliostati, koja prate sunčevo zračenje te ga fokusiraju prema centralnom prijemniku smještenom na vrhu tornja gdje dolazi do značajnog povećanja temperature radnog fluida između 800 °C i 1000 °C. Prijemnik apsorbira sunčevo zračenje koje je fokusirano 600 do 100 puta i prenosi sunčevu energiju na radni medij. Medij za prijenos topline najčešće je solarna sol. [5]

Solarni tanjur koristi zdjelasto oblikovani reflektor koji fokusira sunčevu svjetlost na središnji apsorber. Prijemnik apsorbira solarnu energiju, povećavajući temperaturu radnog medija do 2000 °C, te ju prenosi na toplinski stroj, poput Stirlingova stroja ili stroja s Braytonovim ciklusom, koji pretvara toplinsku energiju u mehaničku energiju, a potom u električnu energiju. Iako je efikasniji od solarnog tornja, ovakav sustav danas teško pronalazi komercijalnu primjenu. [5]

### 3. PARABOLIČNE KONCENTRIRANE SOLARNE PANELE

#### 3.1. Princip rada

Parabolični kolektori CSP-a uspješno su implementirani u raznim dijelovima svijeta, posebno u područjima s visokom solarnom insolacijom. Ovi sustavi često se primjenjuju u solarnim elektranama, gdje se više kolektora raspoređuje u redove, tvoreći solarno polje (Slika 4). Broj kolektora može varirati ovisno o željenoj izlaznoj snazi, pri čemu neke elektrane mogu sadržavati stotine ili čak tisuće pojedinačnih kolektora.

Elektrana s paraboličnim kolektorima proizvodi električnu energiju koristeći koncentrirano sunčevo zračenje kao izvor topline za svoj energetski ciklus. Redovi linearnih paraboličnih zrcala s jedno-osnim praćenjem čine solarno polje koje koncentrira zrake zračenja na prijemnike (poznate i kao elementi za prikupljanje topline) smještene duž fokalne linije svakog paraboličnog kolektora. Radni medij (HTF) koji cirkulira kroz prijemnike zagrijava se konvekcijom od suncem zagrijanih stijenki apsorbera. Nakon zagrijavanja od strane solarnog polja, HTF putuje do bloka za proizvodnju energije gdje stvara paru u nizu izmjenjivača topline. Energija u pari se pretvara u električnu energiju u Rankine-ovom ciklusu s parnom turbinom. Nakon zagrijavanja pare, HTF se vraća u solarno polje.

U mom istraživanju odabrano je solarno polje s 4 skupa kolektora, svaki dužine 150 m (po uzoru na Eurotrough-150). Iz razloga što je zadana elektrana s 50 MW nominalne snage, s pretpostavljenom iskoristivošću od 40%, potrebno je izvest matematički model za solarno polje koje proizvodi 125 MW toplinske snage.

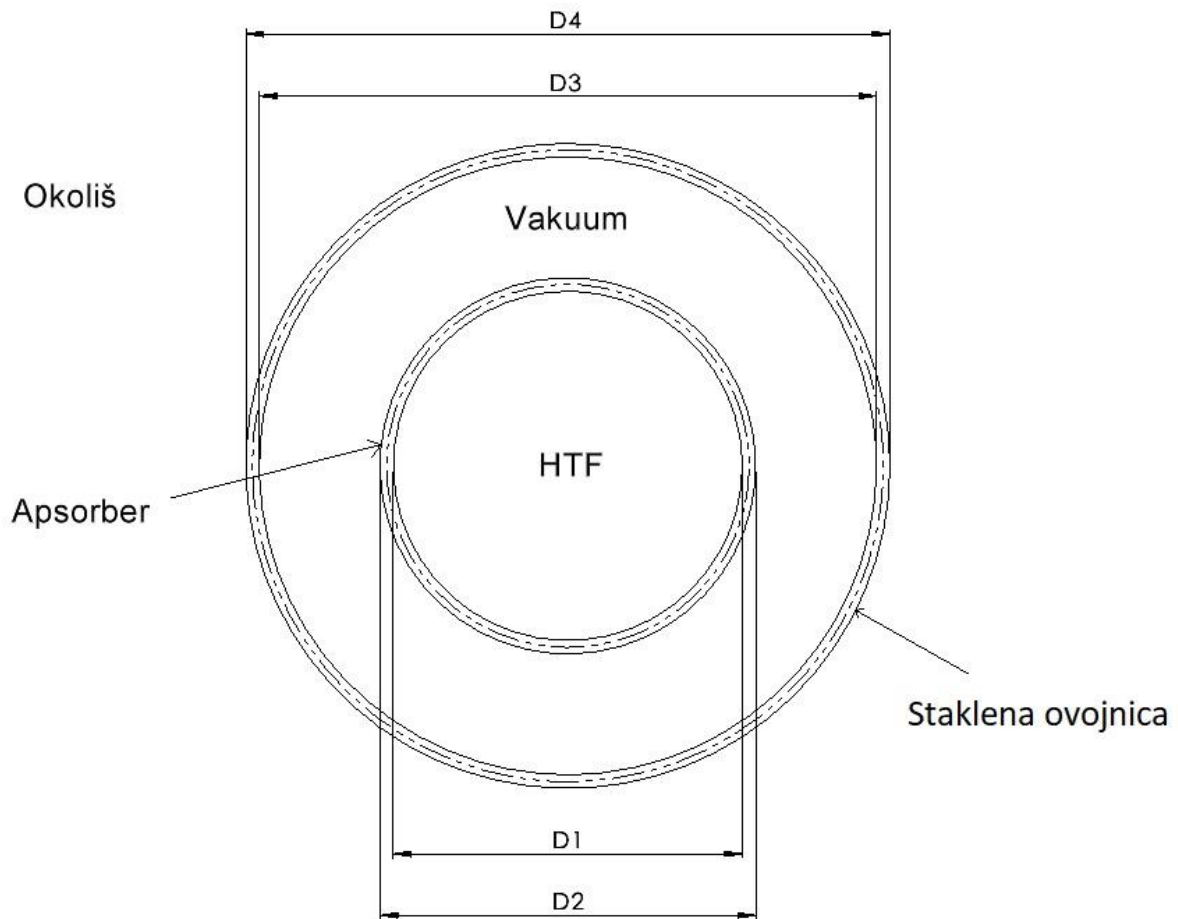
Današnja tehnologija omogućuje da parabolični kolektori pružaju korisnu toplinsku energiju do 398 °C. Glavno ograničenje maksimalne temperature nametnuto je termalnim uljem koje se trenutno koristi kao radna tekućina, jer se brzo degradira iznad 398 °C. Međutim, istraživanja novih tekućina obećavaju više temperature blizu 500 °C. [5]



**Slika 4. Solarno polje paraboličnih kolektora [6]**

### **3.2. Predmetni model kolektora**

Na Slika 5 prikazan je presjek prijemnika paraboličnog kolektora. Kolektori se izrađuju savijanjem reflektirajuće površine u parabolični oblik. Radni medij (HTF) cirkulira kroz metalni crni cijevni apsorber koji je smješten duž žarišne linije prijemnika. Staklena ovojnica okružuje apsorber te se u prostoru između njih nalazi vakuum, kako bi se smanjili konvektivni gubici topline radnog medija. Model prijemnika temelji se na ravnoteži energije u svakom dijelu staklene ovojnice, apsorberske cijevi i tekućine, stoga se moraju znati različiti koeficijenti prijenosa topline.



**Slika 5. Shematski prikaz presjeka prijemnika paraboličnog kolektora**

Kako bi se bolje opisala dinamika termohidrauličkih procesa svaki prijemnik diskretiziran je na 3 dijela. Energetska jednačba iskazana je za svaki dio i svaki element kolektora (fluid za prijenos topline (HTF), apsorbera i staklene ovojnice) te uključuje sve prisutne mehanizame prijenosa topline (kondukcije/konvekcije/zračenja). Dobivene diferencijalne jednačbe implementirane su u softverski paket Simulink te riješene korištenjem Runge Kutta metode.

Za vrstu prijemnika odabran je Schott PTR-70 (Slika 6) iz razloga što je jedan od najefikasnijih prijemnika na tržištu. Pokazuje optičku izvedbu 6 % iznad industrijskog standarda te su mu gubitci topline manji od 250 W/m pri radnim temperaturama (400 °C). [7]



**Slika 6. Prijemnik Schott PTR-70 [7]**

Parabolični kolektor modeliran je po uzoru na Eurotrough-150, iz razloga što su najčešće korišteni u CSP elektranama. Karakteristike odabranog prijemnika i kolektora mogu se vidjeti u Tablica 1. Therminol VP-1 odabran je kao HTF budući da ima veliku toplinsku stabilnost i nisku viskoznost. Nadalje, njegove performanse su konstantne u rasponu od 12°C do 400°C. [8] Važno je napomenuti da su u ovom radu svojstva HTF-a, vakuuma te okoliša uvjetovana isključivo temperaturom, te su dobivene pomoću alata CoolProp [9]. Veličine poput temperature okoliša ( $T_{amb}$ ) te izravnog normalnog zračenja (DNI) preuzete su iz izvora [10]. Vrijednosti su uzete za tipičnu meteorološku godinu. Tipična meteorološka godina (eng *Typical meteorological year -TMY*) je skup odabranih vremenskih podataka za određenu lokaciju, uz prikaz satnih vrijednosti sunčevog zračenja i meteoroloških elemenata za jednogodišnje razdoblje. Vrijednosti se generiraju iz baze podataka u trajanju puno duljem od godinu dana, u ovom primjeru od 2005. do 2020. Tipična meteorološka godina posebno je odabrana tako da prikazuje raspon vremenskih pojava za dotičnu lokaciju, a da pritom daje i godišnje prosjeke koji su u skladu s višegodišnjim prosjecima za dotičnu lokaciju.

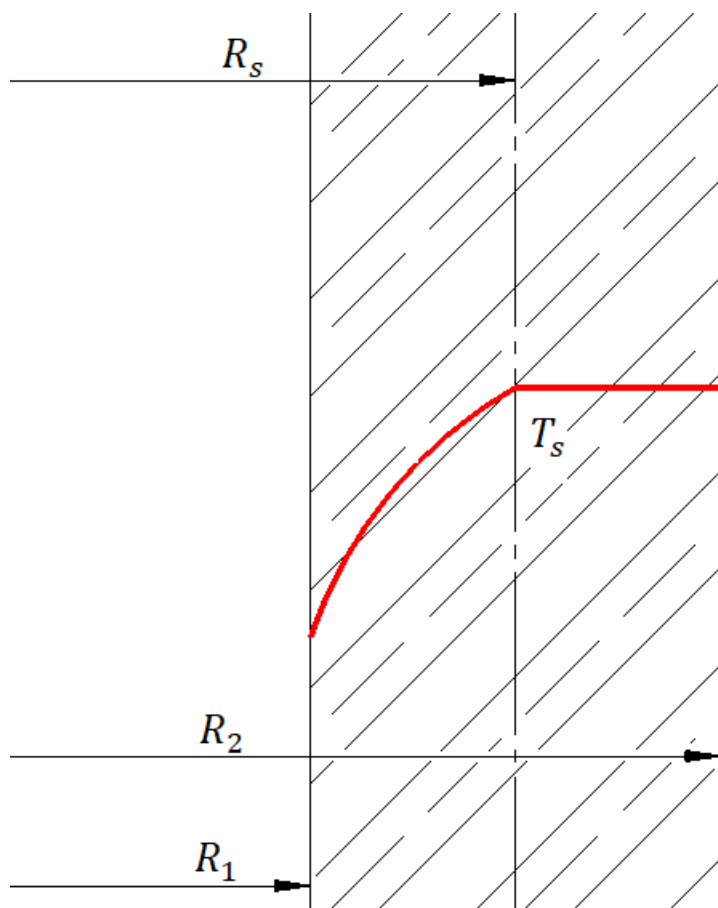
**Tablica 1. Popis karakteristika prijemnika SCHOTT PTR-70 [7] i kolektora Eurotrough-150 [5]**

POPIS KARAKTERISTIKA	VRIJEDNOST
Tip prijemnika	Schott PTR-70
Unutarnji promjer apsorbera (D1)	0.066 (m)
Vanjski promjer apsorbera (D2)	0.07 (m)
Unutarnji promjer staklene ovojnice (D3)	0.114 (m)
Vanjski promjer staklene ovojnice (D4)	0.12 (m)
Materijal apsorbera	304L
Vrsta HTF-a	THERMINOL VP-1
Toplinska provodnost apsorbera ( $\lambda_s$ )	$0.0153T_s+14.8$ (W/mK) [11]
Gustoća apsorbera ( $\rho_s$ )	8020 (kg/m <sup>3</sup> )
Specifični toplinski kapacitet apsorbera ( $c_s$ )	500 (J/kgK)
Toplinska provodnost staklene ovojnice ( $\lambda_g$ )	1.1 (W/mK)
Gustoća staklene ovojnice ( $\rho_g$ )	2230 (kg/m <sup>3</sup> )
Specifični toplinski kapacitet staklene ovojnice ( $c_g$ )	1090 (kg/m <sup>3</sup> )
Emisijski faktor apsorbera ( $\varepsilon_s$ )	$0.062+2 \cdot 10^{-7} T_s^2$ [13]
Emisijski faktor staklene ovojnice ( $\varepsilon_g$ )	0.89
Tip kolektora	Eurotrough-150
Dužina pojedinačnog kolektora (l)	147.5 m
Broj kolektora	6
Propusnost staklene ovojnice ( $\tau_g$ )	0.95
Apsorpcija staklene ovojnice	0.02 [12]
Apsorpcija apsorbera	0.95
Optička učinkovitost ( $\eta_{opt}$ )	0.75

### 3.3. Pretpostavke matematičkog modela

Za provođenje matematičkog modela uvedene su određene pretpostavke i pojednostavljenja:

- 1) 1-dimenzionalni tok energije;
- 2) HTF se smatra nestlačivim stoga su svojstva uvjetovana temperaturom;
- 3) Tlak u vakuumiranoj ovojnici iznosi 0.1 Pa;
- 4) Pretpostavljeni temperaturni profil apsorblera je opisan Slika 7. Izjednačavanjem temperature stijenke na polumjeru  $R_1$  s temperaturom stijenke na polumjeru  $R_s$ , omogućen je pojednostavljeni zapis diferencijalnih jednačbi s minimalnom pogreškom;
- 5) Koeficijent prijelaza topline vakuuma ( $\alpha_{vak}$ ) smatra se jednakim za konvekciju od apsorblera do vakuuma i za konvekciju od vakuuma do staklene ovojnice;
- 6) Brzina vjeta u okolišu je manja od 0.1 m/s tokom cijele godine;

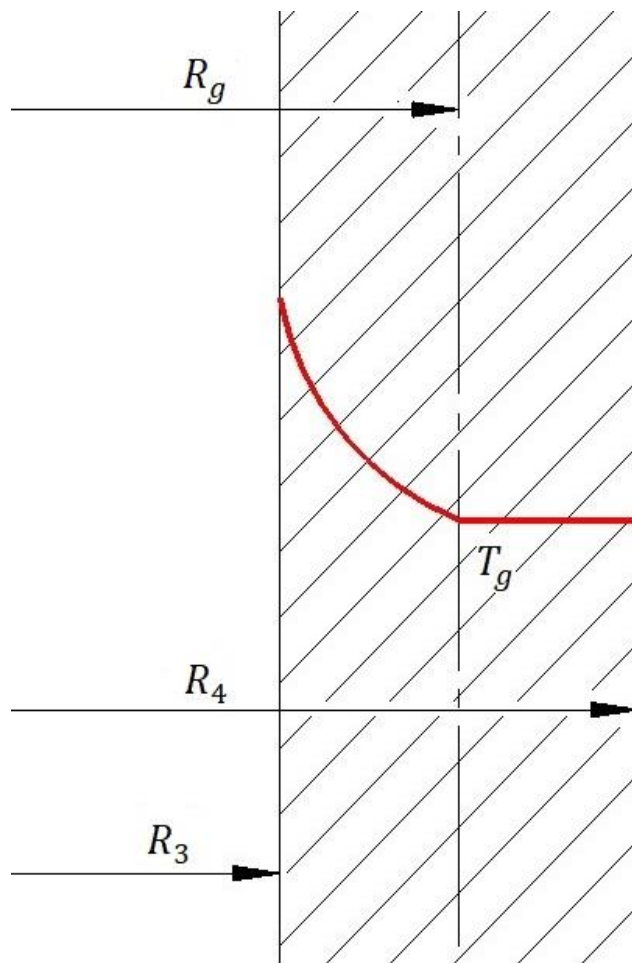


Slika 7. Pretpostavljeni temperaturni profil apsorblera



7) Pretpostavljeni temperaturni profil staklene ovojnice prikazan je Slika 8.

Izjednačavanjem temperature stijenke na polumjeru  $R_g$  s temperaturom stijenke staklene ovojnice na polumjeru  $R_2$ , omogućen je pojednostavljeni zapis diferencijalnih jednažbi s minimalnom pogreškom;



Slika 8. Pojednostavljenje temperaturnog profila staklene ovojnice

8) pretpostavljeno je da su azimutni kut kolektora ( $\gamma_{col}$ ) i kut nagiba kolektora ( $\theta_{col}$ ) jednaki 0.

### 3.4. Sunčevo zračenje

Količina sunčevog zračenja koja dopire do određene lokacije na Zemlji određena je zemljopisnim koordinatama, atmosferskim prilikama, godišnjim dobom, njenom reflektivnošću i oblikom površine. Kombinacija refleksije, apsorpcije i raspršenja rezultira velikim zračenjem na većini lokacija na Zemlji. Sunčevo zračenje do Zemlje dolazi u dva različita oblika kao direktno i difuzno.

Direktno zračenje je onaj dio Sunčevog zračenja koji netaknut dopire pravocrtno od Sunca do Zemljine površine.

Difuzno zračenje do nas ne dolazi direktno, nego mu se na putu promjeni smjer ili spektralni sastav. Zbog difuznog zračenja nije potpuni mrak kad su na nebu oblaci.

Globalno (totalno) zračenje mjereno na nekom području na Zemlji je ukupna količina zračenja koja pada na horizontalnu plohu. Predstavlja zbroj direktnog i difuznog. Direktno zračenje čini glavnu komponentu globalnog zračenja, ima najveći energetske doprinos,

$$G_{uk} = G_b + G_d \quad [7] \quad (3-1)$$

Energija sunčevog zračenja koja dopire do površine Zemlje ovisi o prvom redu o broju sunčanih sati, dok trajanje zračenja ovisi o geografskoj širini i o godišnjem dobu. U sklopu ovog rada promatra se utjecaj direktnog Sunčeva zračenja na površini kolektora, dok se utjecaj difuznog zanemaruje zbog već spomenute dominantnosti direktnog zračenja u ukupnom iznosu zračenja. Intenzitet Sunčevog zračenja na plohu postavljenu okomito na dolazeće sunčeve zrake odnosno izravno normalno zračenje (DNI) može se odrediti pomoću izraza:

$$DNI = G_b \cos(\theta_z) \quad [7] \quad (3-2)$$

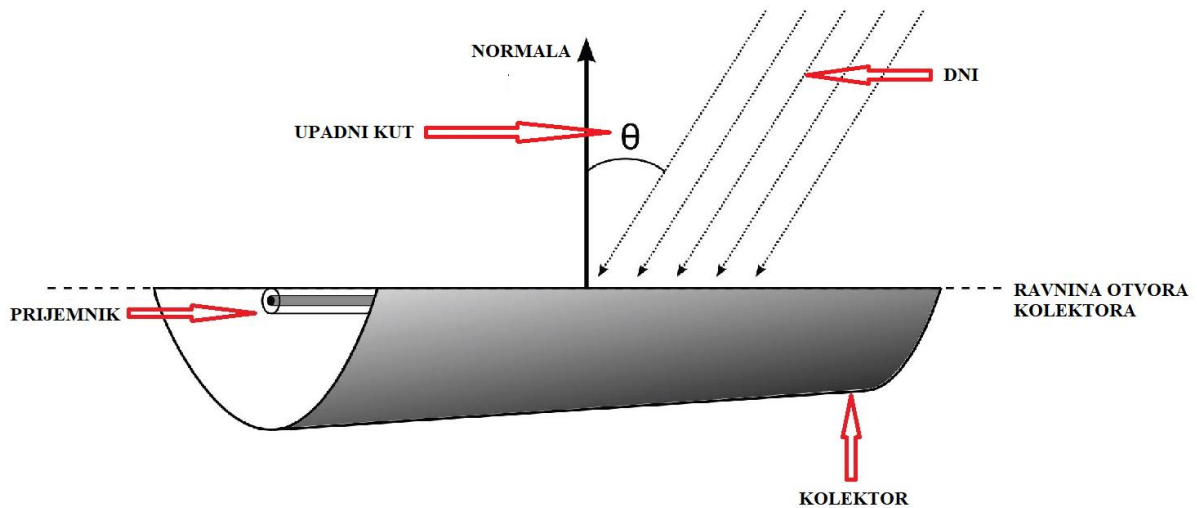
Gdje je  $\theta_z$  solarni zenitni kut te je definiran jednadžbom (3-10).

CSP postrojenja pretvaraju izravno normalno zračenje (DNI) od Sunca u toplinsku energiju i na kraju u električnu energiju ili neki drugi koristan proizvod.

Da bismo odredili tok koji pada na prijamnik, moramo uzeti u obzir konstantne optičke gubitke i promjenjive optičke gubitke koji se mijenjaju sa solarnim položajem. Ukupno zračenje na polje kolektora je funkcija ekvivalentne površine kolektora u solarnom polju, jačina DNI-a i kut pod kojim zračenje pada na ekvivalentnu površinu kolektora. Ekvivalentna površina kolektora odnosi se na ukupnu reflektivnu površinu kolektora koja se projektira na ravninu otvora kolektora. Ovo se područje razlikuje od zakrivljene reflektirajuće površine.

Kada DNI nije u smjeru normale ravnine otvora kolektora, dolazi do gubitaka koji su ovisni o veličini upadnog kuta. Što je veći kut, to su veći gubici. Upadni kut  $\theta$ , prikazan na Slika 9.

Prikaz upadnog kuta , jednak je razlici u kutovima između normale na ravninu otvora kolektora i DNI-a Slika 9.



**Slika 9. Prikaz upadnog kuta [13]**

Upadni kut je funkcija položaja Sunca i kuta praćenja kolektora. Da bismo pronašli Sunčev položaj za određeno postrojenje, potrebno nam je znati geografsku širinu  $\varphi$  i geografsku dužinu  $\psi$ .

U odabranom modelu postrojenje je postavljeno u Zagrebu čije su koordinate:

$$\varphi = 45.8154$$

$$\psi = 15.9666$$

te vremenska zona : GMT +2

Prvo računamo solarno vrijeme  $t_{sol}$  iz sljedećeg niza jedandžbi:

$$B = (dan - 1) \frac{360}{365} \quad (3-3)$$

$$EOT = 9.2[0.000075 + 0.001868 \cos(B) - 0.032077 \sin(B) - 0.014615 \cos(2B) - 0.04089 \sin(2B)] \quad (3-4)$$

$$shift = 15zona - \psi \quad (3-5)$$

$$t_{sol} = hour + \frac{shift}{15} + \frac{EOT}{60} \quad (3-6)$$

Gdje je:

EOT = jednadžba vremena koja određuje odstupanje lokalnog vremena od sunčevog vremena u obliku funkcije dana u godini.

Shift = predstavlja fiksni vremenski pomak u minutama zbog razlike između standardne geografske dužine za vremensku zonu i geografske dužine na mjestu interesa.

Također je potreban dan odnosno sat za koji nas zanima upadni kut. Solarno vrijeme je pretvoreno u satni kut ( $\omega$ ) u sljedećem izrazu:

$$\omega = 15(t_{sol} - 12) \quad (3-7)$$

Budući da na položaj Sunca utječe nagib Zemljine osi, kut deklinacije  $\delta$  također mora biti izračunat:

$$\delta = 23.45^\circ \sin \left[ 360 \frac{(dan + 284)}{365} \right] \quad (3-8)$$

Nakon toga su izračunati kut solarne elevacije ( $\theta_e$ ), kut solarnog azimuta ( $\gamma_{sol}$ ) te solarni zenitni kut ( $\theta_z$ )

$$\theta_e = \sin^{-1}(\sin(\delta) \sin(\phi) + \cos(\phi) \cos(\delta) \cos(\omega)) \quad (3-9)$$

$$\theta_z = 90^\circ - \theta_e \quad (3-10)$$

$$\gamma_{sol} = \cos^{-1} \left( \frac{\cos(\theta_z) \sin(\phi) - \sin(\delta)}{\sin(\theta_z) \cos(\phi)} \right) \quad (3-11)$$

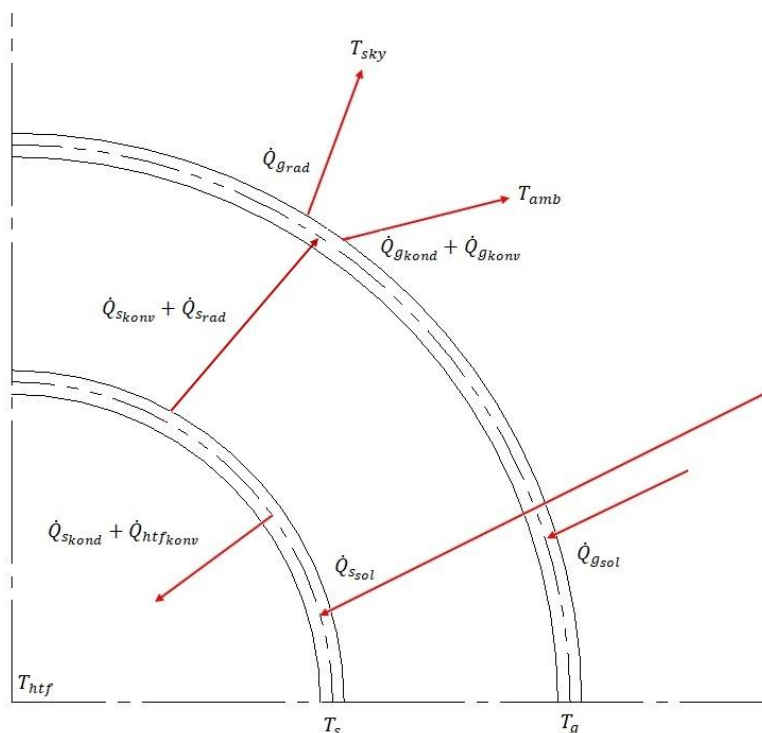
Parabolični kolektor sposoban je za jedno-osno praćenje Sunca oko uzdužne osi. Uzdužna os može biti orijentirana u bilo kojem smjeru kompasa, iako se obično usmjerava ili na sjever-jug ili na smjer Istok-Zapad. U promatranom modelu uzdužna os je usmjerena u smjeru sjever-jug. Također određeno je da su azimutni kut kolektora ( $\gamma_{col}$ ) i kut nagiba kolektora ( $\theta_{col}$ ) jednaki 0. Svi potrebni podatci za izračun upadnog kuta  $\theta$  su dobiveni:

$$\theta = \cos^{-1} \sqrt{1 - \frac{[\cos(\theta_e - \theta_{col}) - \cos(\theta_{col}) \cos(\theta_e)(1 - \cos(\gamma_{sol} - \gamma_{col}))]^2}{[13]}} \quad (3-12)$$

## 4. MATEMATIČKI MODEL

### 4.1. Energetska bilanca prijemnika paraboličnog kolektora

Model izvedbe prijemnika paraboličnog kolektora temelji se na energetskej bilanci HTF-a, apsorbera i staklene ovojnice. Energetska ravnoteža uključuje sve jednadžbe i korelacije potrebne za predviđanje članova u energetskej bilanci, koji ovise o izravnom normalnom sunčevom zračenju koje pada na prijemnik, optičkim i toplinskim gubitcima prijemnika, uvjetima okoline te pokazuje najvažniji aspekt modela, dobitak topline u HTF-u. Na Slika 10. je prikazana ukupna energetska bilanca prijemnika,



Slika 10. Energetska bilanca prijemnika

dok Tablica 2. prikazuje definiciju svakog toplinskog toka sustava.

Tablica 2. Definicije toplinskog toka sustava

Toplinski tok [W]	Način prijenosa toplina	Put prijenosa toplina	
		od	do
$\dot{Q}_{Ssol}$	Zračenje	Direktno sunčevo zračenje	Vanjske stijenke apsorbera (D2)
$\dot{Q}_{gsol}$	Zračenje	Direktno sunčevo zračenje	Vanjske stijenke staklene ovojnice (D4)

$\dot{Q}_{skond}$	Kondukcija	Središte stijenke apsorbera (Ds)	Unutarnje stijenke apsorbera (D1)
$\dot{Q}_{htfkonv}$	Konvekcija	Unutarnje stijenke apsorbera (D1)	HTF
$\dot{Q}_{skonv}$	Konvekcija	Vanjske stijenke apsorbera (D2)	Unutarnje stijenke staklene ovojnice (D3)
$\dot{Q}_{srad}$	Zračenje	Vanjske stijenke apsorbera (D2)	Unutarnje stijenke staklene ovojnice (D3)
$\dot{Q}_{gkond}$	Kondukcija	Središte stijenke staklene ovojnice (Dg)	Vanjske stijenke staklene ovojnice (D4)
$\dot{Q}_{gkonv}$	Konvekcija	Vanjske stijenke staklene ovojnice (D4)	Okoliša
$\dot{Q}_{grad}$	Zračenje	Vanjske stijenke staklene ovojnice (D4)	Nebo

Napomena: pod  $\dot{Q}_{skonv}$  se ubraja konvektivni prijelaz s vanjske stijenke apsorbera na vakuum, kondukcija kroz vakuum te konvektivni prijelaz od vakuuma do unutarnje stijenke staklene ovojnice.

#### 4.1.1. Energetska bilanca HTF-a

$$\frac{dE}{dt} = e_{ul} - e_i \quad (4-1)$$

$$m_{htf} c_{htf} \frac{dT_{htf}}{dt} = \dot{Q}_{htful} - \dot{Q}_{htfi} + \dot{Q}_{skond} + \dot{Q}_{htfkonv} \quad (4-2)$$

$$\frac{L}{n} \rho_{htf} A_{htf} c_{htf} \frac{dT_{htf}}{dt} = q_m c_{htf} T_{htful} - q_m c_{htf} T_{htfi} + k_{slu} A_{su} (T_s - T_{htf}) \quad (4-3)$$

$$\frac{dT_{htf}}{dt} = \frac{n}{L \rho_{htf} A_{htf} c_{htf}} \left( q_m c_{htf} T_{htful} - q_m c_{htf} T_{htfi} + k_{slu} A_{su} (T_s - T_{htf}) \right) \quad (4-4)$$

gdje je  $k_{stu}$  koeficijent prolaza topline sveden na unutrašnju površinu apsorbera  $A_{su} = 2R_1\pi L$ , te je prikazan jednadžbom (4-5).  $k_{stu}$  obuhvaća konvekciju s unutarnje stijenke apsorbera na HTF i kondukciju kroz polovicu debljine stijenke apsorbera.

$$k_{stu} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{htf}} + \frac{R_1}{\lambda_s} \ln \frac{R_s}{R_1}} \quad (4-5)$$

#### 4.1.2. Energetska bilanca apsorbera

$$\frac{dE}{dt} = e_{ul} - e_i \quad (4-6)$$

$$m_s c_s \frac{dT_s}{dt} = \dot{Q}_{sol} - \dot{Q}_{skond} - \dot{Q}_{htfkonnv} - \dot{Q}_{skonv} - \dot{Q}_{srad} \quad (4-7)$$

$$\begin{aligned} \frac{L}{n} A_s \rho_s c_s \frac{dT_s}{dt} = & \dot{Q}_{sol} - k_{stu} A_{su} (T_s - T_{htf}) - k_{sdv} A_{sv} (T_s - T_g) \\ & - A_{sv} \frac{C_c}{\frac{1}{\varepsilon_s} + \omega \left( \frac{1}{\varepsilon_g} - 1 \right)} \left[ \left( \frac{T_s}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_g}{100} \right)^4 \right] \end{aligned} \quad (4-8)$$

$$\begin{aligned} \frac{dT_s}{dt} = \frac{n}{L A_s \rho_s c_s} & \left\{ \dot{Q}_{sol} - k_{stu} A_{su} (T_s - T_{htf}) - k_{sdv} A_{sv} (T_s - T_g) \right. \\ & \left. - A_{sv} \frac{C_c}{\frac{1}{\varepsilon_s} + \omega \left( \frac{1}{\varepsilon_g} - 1 \right)} \left[ \left( \frac{T_s}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_g}{100} \right)^4 \right] \right\} \end{aligned} \quad (4-9)$$

gdje je  $k_{sdv}$  koeficijent prolaza topline sveden na vanjsku površinu apsorbera  $A_{sv} = 2R_1\pi L$ , te je prikazan jednadžbom (4-10).  $k_{sdv}$  obuhvaća konvekciju s vanjske stijenke apsorbera na vakuum, kondukciju kroz čitavu debljinu vakuuma, konvektivni prijelaz s vakuuma na unutarnju stijenku staklene ovojnice te kondukciju kroz polovicu debljine stijenke staklene ovojnice.

$$k_{sdv} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{vak}} + \frac{R_2}{\lambda_{vak}} \ln \left( \frac{R_3}{R_2} \right) + \frac{R_2}{R_3 \alpha_{vak}} + \frac{R_2}{\lambda_g} \ln \left( \frac{R_g}{R_3} \right)} \quad (4-10)$$

### 4.1.3. Energetska bilanca staklene ovojnice

$$\frac{dE}{dt} = e_{ul} - e_i \quad (4-11)$$

$$m_g c_g \frac{dT_g}{dt} = \dot{Q}_{g_{sol}} + \dot{Q}_{s_{konv}} + \dot{Q}_{s_{rad}} - \dot{Q}_{g_{kond}} - \dot{Q}_{g_{konv}} - \dot{Q}_{g_{rad}} \quad (4-12)$$

$$\begin{aligned} \frac{L}{n} A_g \rho_g c_g \frac{dT_g}{dt} &= \dot{Q}_{g_{sol}} + k_{s_{dv}} A_{s_v} (T_s - T_g) \\ &+ A_{s_v} \frac{C_c}{\frac{1}{\varepsilon_s} + \frac{D_s}{D_g} \left( \frac{1}{\varepsilon_g} - 1 \right)} \left[ \left( \frac{T_s}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_g}{100} \right)^4 \right] \\ &- k_{g_v} A_{g_v} (T_g - T_{amb}) \end{aligned} \quad (4-13)$$

$$\begin{aligned} \frac{dT_g}{dt} &= \frac{n}{L A_g \rho_g c_g} \left\{ \dot{Q}_{g_{sol}} + k_{s_{dv}} A_{s_v} (T_s - T_g) \right. \\ &+ A_{s_v} \frac{C_c}{\frac{1}{\varepsilon_s} + \frac{D_s}{D_g} \left( \frac{1}{\varepsilon_g} - 1 \right)} \left[ \left( \frac{T_s}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_g}{100} \right)^4 \right] \\ &\left. - k_{g_v} A_{g_v} (T_g - T_{amb}) \right\} \end{aligned} \quad (4-14)$$

gdje je  $k_{g_v}$  koeficijent prijelaza topline sveden na vanjsku površinu staklene ovojnice  $A_{g_v} = 2R_4\pi L$ , te je prikazan jednadžbom (4-15)  $k_{g_v}$  obuhvaća konvektivni prijelaz s vanjske stijenke stakla na okoliš te zračenje s vanjske stijenke do  $T_{sky}$ .

$$k_{g_v} = \frac{1}{\frac{1}{(\alpha_{uk})}} = \frac{1}{\frac{1}{(\alpha_{amb} + \alpha_{zr})}} \quad (4-15)$$

$\alpha_{zr}$  predstavlja koeficijent prijelaza topline zračenjem te je njegov izračun prikazan izrazom (4-16). Budući da su koeficijenti  $\alpha_{zr}$  i  $\alpha_{amb}$  svedeni na istu površinu i istu razliku temperatura moguće ih je jednostavno algebarski zbrojiti, čime se dobiva sveukupni koeficijent prijelaza topline  $\alpha_{uk}$ .



$$\alpha_{zr} = \varepsilon_g C_c \frac{\left[ \left( \frac{T_g}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{sky}}{100} \right)^4 \right]}{T_g - T_{amb}} \quad (4-16)$$

Dok je  $C_c = 5.67 \frac{W}{(m^2)(100K)^4}$

## 4.2. Izračuni koeficijenta prijelaza topline

### 4.2.1. Konvekcija između HTF-a i apsorbera

Izraz koeficijenta prijelaza topline HTF-a ( $\alpha_{htf}$ ) je

$$\alpha_{htf} = \frac{Nu_{htf} \lambda_{htf}}{D_1} \quad (4-17)$$

gdje  $Nu_{htf}$  označuje Nusseltov broj za prisilnu konvekciju te je definiran prema Gnielinski korelaciji [14]

$$Nu_{htf} = \frac{\left( \frac{f}{8} \right) (Re_{htf} - 1000) Pr_{htf}}{1 + 12.7 \left( \frac{f}{8} \right)^{\frac{1}{2}} \left( Pr_{htf}^{\frac{2}{3}} - 1 \right)} \quad (4-18)$$

$$f = [1.82 \log_{10}(Re_{htf}) - 1.64]^{-2} \quad (4-19)$$

$$Re_{htf} = \frac{w_{htf} D_1}{\nu_{htf}} \quad (4-20)$$

$$Pr_{htf} = \frac{\eta_{htf} c_{htf}}{\lambda_{htf}} \quad (4-21)$$

Brzina radnog medija ( $w_{htf}$ ) uvjetovana je masenom protoku ( $q_m$ ), gustoći HTF-a ( $\rho_{htf}$ ) i poprečnom presjeku apsorbera kroz koji prolazi radni medij.

$$w_{htf} = \frac{q_m}{\rho_{htf} A_{htf}} \quad (4-22)$$

$$A_{htf} = \frac{D_1^2}{4} \pi \quad (4-23)$$

Svojstva HTF-a  $\rho_{htf}$ ,  $\nu_{htf}$ ,  $c_{htf}$ ,  $\lambda_{htf}$  uzimaju se za temperaturu  $T_{htf,m}$

$$T_{htfm} = \frac{T_{htful} + T_{htfiz}}{2} \quad (4-24)$$

$$\eta_{htf} = \rho_{htf} v_{htf} \quad (4-25)$$

#### 4.2.2. Konvekcija između apsorbera i vakuuma te između vakuuma i staklene ovojnice

Za određivanje koeficijenta prijelaza topline vakuuma ( $\alpha_{vak}$ ) važno je napomenuti već naglašenu pretpostavku koja potvrđuje jednakost koeficijenta u oba slučaja konvekcije vakuuma (prijelaz s apsorbera na vakuum te prijelaz s vakuuma na staklenu cijev). Također, pretpostavili smo da tlak u vakuumu iznosi 0.1 Pa te uzimamo u obzir slobodnu konvekciju.

Sređeni izraz [13] za izračun koeficijenta prijelaza vakuuma ( $\alpha_{vak}$ ) je

$$\alpha_{vak} = \frac{2.425}{\pi D_s} \frac{\lambda_{vak}}{\left(1 + \left(\frac{D_s}{D_g}\right)^{0.6}\right)^{1.25}} \left(\frac{Pr_{vak} Ra_{vak}}{0.861 + Pr_{vak}}\right)^{0.25} \quad (4-26)$$

$$Gr_{vak} = \frac{g \beta_{vak} (T_s - T_g) D_s^3}{\nu_{vak}^2} \quad (4-27)$$

$$Pr = \frac{\eta_{vak} c_{vak}}{\lambda_{vak}} \quad (4-28)$$

$$Ra_{vak} = Gr_{vak} Pr_{vak} \quad (4-29)$$

gdje se svojstva vakuuma  $\rho_{vak} \nu_{vak} c_{vak} \lambda_{vak}$  uzimaju za temperaturu  $T_{vak}$

$$T_{vak} = \frac{T_s + T_g}{2} \quad (4-30)$$

$$\eta_{vak} = \nu_{vak} \rho_{vak} \quad (4-31)$$

$$\beta_{vak} = \frac{1}{T_{vak}} \quad (4-32)$$

#### 4.2.3. Konvekcija između staklene ovojnice i okoliša

Izraz za izračun koeficijenta prijelaza topline ( $\alpha_{amb}$ ) je

$$\alpha_{amb} = \frac{Nu_{amb}\lambda_{amb}}{D_g} \quad (4-33)$$

gdje  $Nu_{amb}$  označuje Nusseltov broj za slobodnu konvekciju jer je pretpostavljeno da brzina vjetra u okolišu tokom cijele godine manja 0.1 m/s te je definiran prema Churchill i Chu korelaciji [15]

$$Nu_{amb} = \left\{ 0.6 + 0.387Ra_{amb}^{1.6} \left[ 1 + \left( \frac{0.559}{Pr_{amb}} \right)^{\frac{9}{16}} \right]^{\frac{-8}{27}} \right\}^2 \quad (4-34)$$

$$Gr_{amb} = \frac{g\beta_{amb}(T_g - T_{amb})D_g^3}{\nu_{amb}^2} \quad (4-35)$$

$$Pr_{amb} = \frac{\eta_{amb}c_{amb}}{\lambda_{amb}} \quad (4-36)$$

gdje se svojstva okoliša  $\rho_{amb}\nu_{amb}c_{amb}\lambda_{amb}$  uzimaju za temperaturu  $T_{amb_m}$

$$T_{amb_m} = \frac{T_g + T_{amb}}{2} \quad (4-37)$$

$$\eta_{amb} = \rho_{amb}\nu_{amb} \quad (4-38)$$

### 4.3. Izračuni apsorpcije sunčevog zračenja

#### 4.3.1. Apsorpcija sunčevog zračenja apsorbera

Izračun apsorbitiranog sunčevog zračenja apsorbera ovojnice glasi:

$$\dot{Q}_{sol} = DNI \cos(\theta) A_{col} \eta_{opt} IAM \quad (4-39)$$

Gdje je:

$\eta_{opt}$  je optička učinkovitost pri normalnom upadu. Ovaj pojam uključuje refleksiju kolektora, propusnost staklene ovojnice, apsorpciju apsorbera i učinke prljavštine, geometrije i sjenčanja.

$A_{col}$  je ekvivalentna površina kolektora

IAM je je modifikator upadnog kuta. IAM je funkcija upadnog kuta i optičke kvalitete kolektora, te se računa prema izrazu

---

$$IAM = \min \left( 1, \frac{\cos(\theta) + 0.000884\theta - 0.0000537\theta^2}{\cos(\theta)} \right) \quad [16] \quad (4-40)$$

#### 4.3.2. Apsorpcija sunčevog zračenja apsorbera

Izračun apsorbiranog sunčevog zračenja stijenke apsorbera glasi:

$$\dot{Q}_{g_{sol}} = DNI \cos(\theta) A_{col} \frac{\eta_{opt}}{\tau_g a_s} a_g \quad (4-41)$$

Gdje je:

$\tau_g$  je propusnost staklene ovojnice

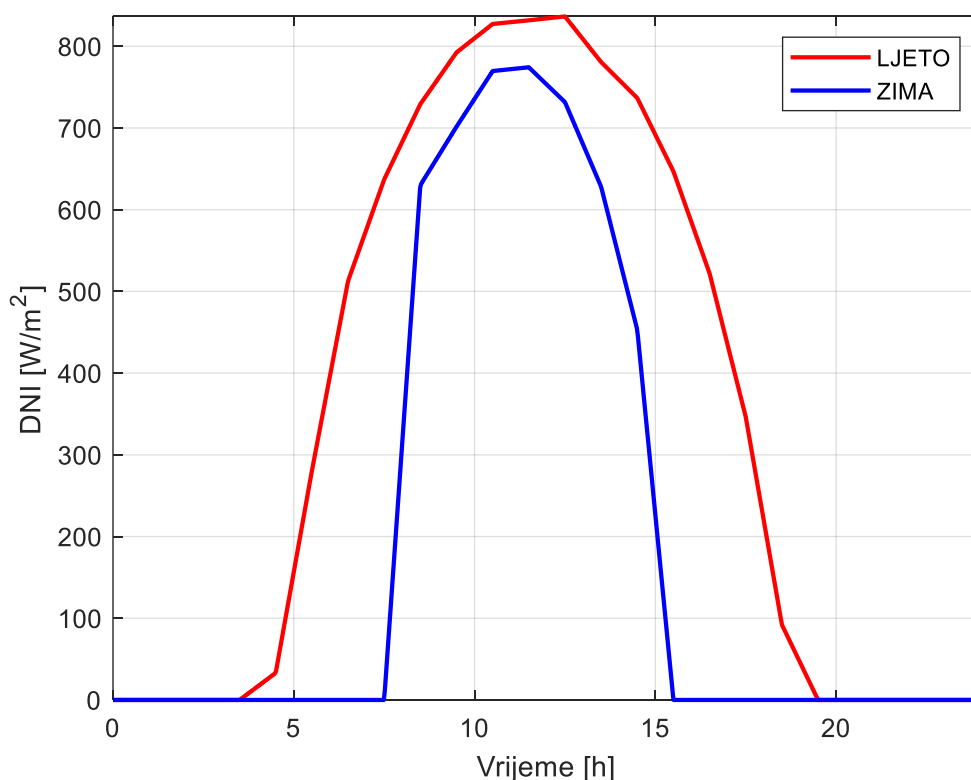
$a_g$  je apsorpcija staklene ovojnice

$a_s$  je apsorpcija apsorbera

## 5. REZULTATI

### 5.1. Koncentracija DNI-a

Varijacije DNI intenziteta po satu na odabranom mjestu elektrane u Zagrebu, prikazane su za dva tipična dana u godini. Ukupno imamo četiri tipična dana u godini koji su reprezentativni za svaku sezonu: proljetni ekvinocij 21. ožujka, ljetni solsticij 21. lipnja, jesenski ekvinocij 21. rujna, te zimski solsticij 21. prosinca. U prosjeku, ljetni solsticij je najsunčaniji dan, dok je zimski solsticij najmanje sunčan dan, u smislu intenziteta DNI i sunčanih sati. Rezultati prikazani na Slika 11 pokazuju da je ljetni maksimalni DNI od 830 W/m<sup>2</sup> zabilježen 21. lipnja dok je zimski maksimum od skoro 750 W/m<sup>2</sup> zabilježen 21. prosinca. U Zagrebu, sunčeve zraka padaju na Zemlju ukupno 15 sati 21. lipnja, dok 21. prosinca Sunce obasjava područje Zagreba 8 sati. Možemo zaključiti da je prednost ljetnog doba po broju sunčanih sati.

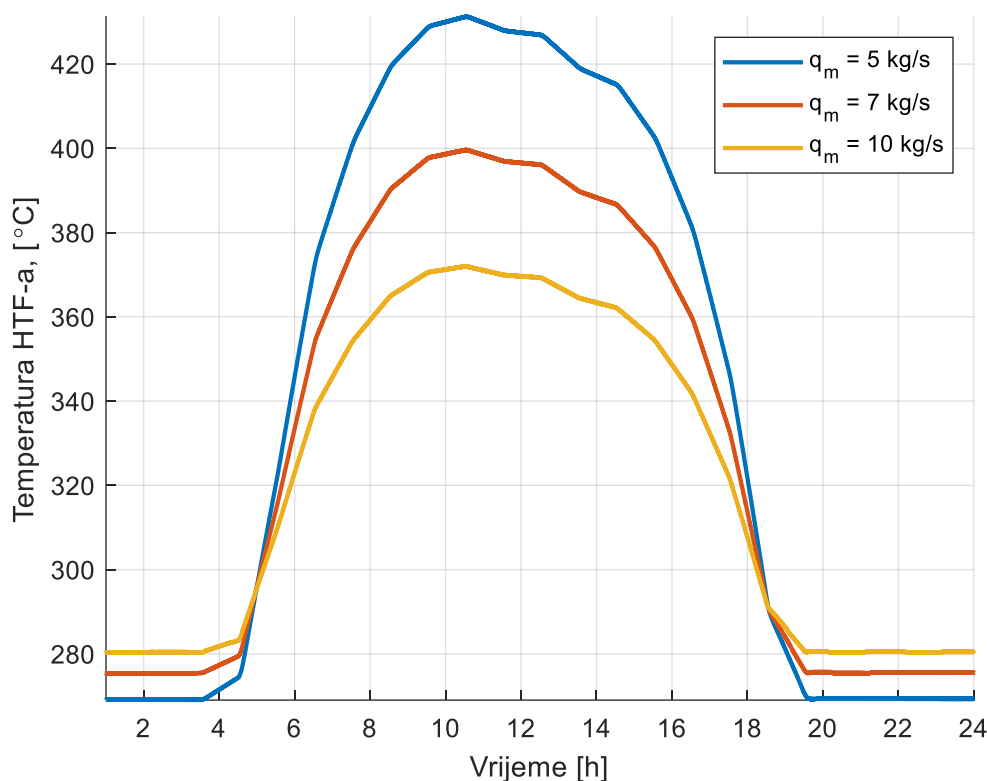


Slika 11. Prikaz DNI-a za ljetni i zimski solsticij

### 5.2. Utjecaj protoka na temperaturu HTF-a

U simulacijama koje su provedene, variranje količine masenog protoka kroz sklop kolektorskog elementa značajno je utjecalo na temperaturu radnog medija. Također, važno je napomenuti da regulacija masenog protoka nije izvršena zbog svoje kompleksnosti i jer je izvan opsega ovog

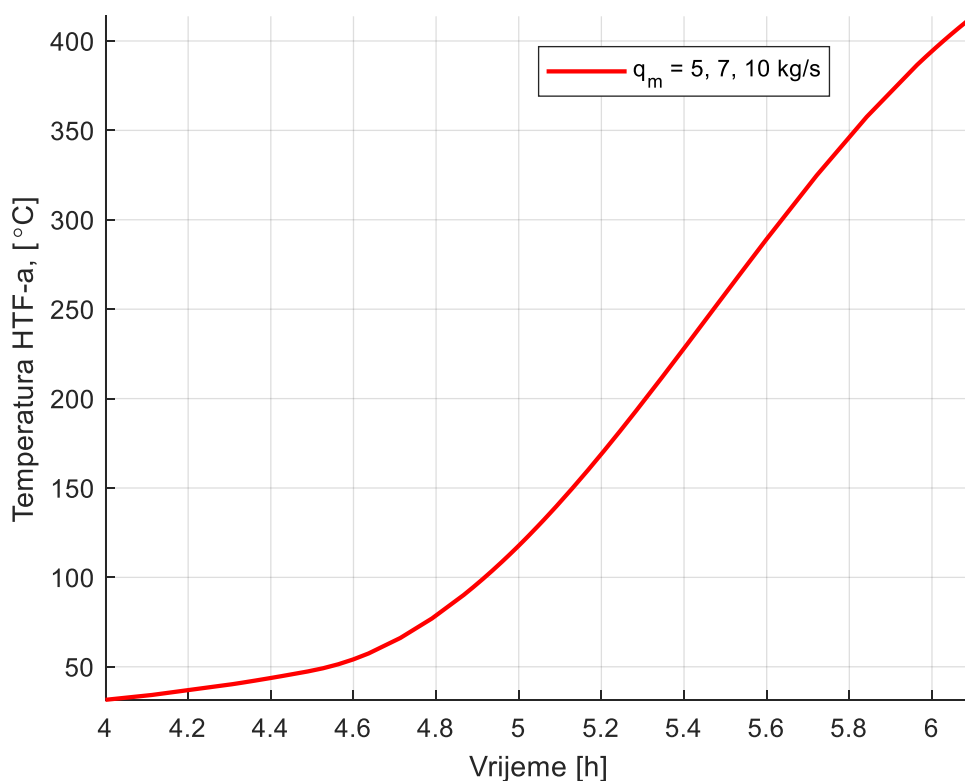
zadatka. Ta regulacija bi znatno utjecala na rezultate, čime bi se postrojenje približilo stvarnom okruženju. Na slici Slika 12. možemo zaključiti da se povećanjem protoka smanjuje temperatura radnog medija, odnosno da se on manje zagrijava pri prolasku kroz prijemnik odabranog sunčevog polja. Dotični primjer je simuliran za 21. lipnja, koji predstavlja najsunčaniji dan. Glavna zadaća samog solarnog polja je zagrijavanje fluida za prijenos topline na optimalnu temperaturu od 393,15 K, čime radni medij zagrijava paru u Rankin jedinici i nakon hlađenja se vraća u solarno polje. Iz primjera možemo vidjeti da se ova temperatura postiže približno kada je  $q_m = 5$  kg/s. Smanjenjem protoka dobivamo previsoku temperaturu za odabrano prijenosno ulje, odnosno ulje za prijenos topline se pregrijava. Smanjenjem protoka od optimalnog protoka dobivamo značajno veće temperature prijenosnika topline ali i značajno manju učinkovitost sustava jer dolazi do višestrukog rasta toplinskih gubitaka (prvenstveno zračenjem). Povećanje protoka vodi pak ka premalim temperaturama koje narušavaju iskoristivost Rankineovog ciklusa i iziskuju značajno veću potrošnju energije pumpi.



Slika 12. Utjecaj protoka na temperaturu HTF-a

### 5.3. Izvedba jutarnjeg puštanja solarnog polja u pogon

Jedan od ključnih ciljeva mog završnog rada bio je simulirati puštanje solarnog polja u pogon tijekom jutarnjih sati. Jedan od izazova pri puštanju pogona u jutarnjim satima je niska temperatura ulaznog radnog medija. Zbog toga je potrebno određeno vrijeme za zagrijavanje HTF-a (toplinski prijenosni fluid) na željenu optimalnu temperaturu od 393 K, što je prikazano na Slika 13. Zagrijavanje se postiže tako da radni medij izlazi iz solarnog polja i zaobilazi parno-turbinsko postrojenje, vraćajući se na početak skupa kolektorskih elemenata. Taj proces se ponavlja sve dok se ne postigne optimalna temperatura HTF-a. Kao što je vidljivo na Slika 11, u ljetnim uvjetima, poput 21. lipnja, sunce izlazi u 4 sata ujutro. Tada počinje izravno sunčevo zračenje na kolektore, što rezultira zagrijavanjem termalnog ulja u simulaciji sve do 6 sati ujutro. Dakle, ukupno zagrijavanje traje 2 sata, nakon čega se generira para u Rankinovom ciklusu. Važno je napomenuti da promjena protoka ne utječe na brzinu zagrijavanja radnog fluida. Odnosno, utjecaj je toliko minimalan da se može zanemariti.

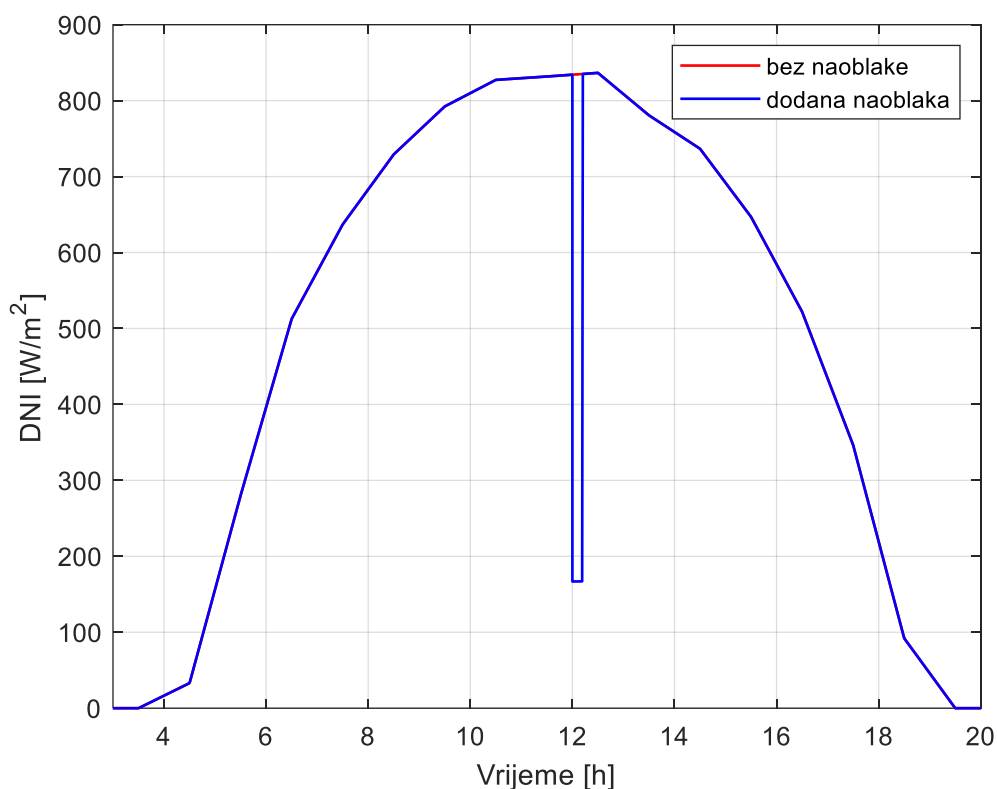


**Slika 13 Puštanje u pogon tokom jutarnjih sati**

#### 5.4. Utjecaj djelomične ili kratkotrajne naoblake

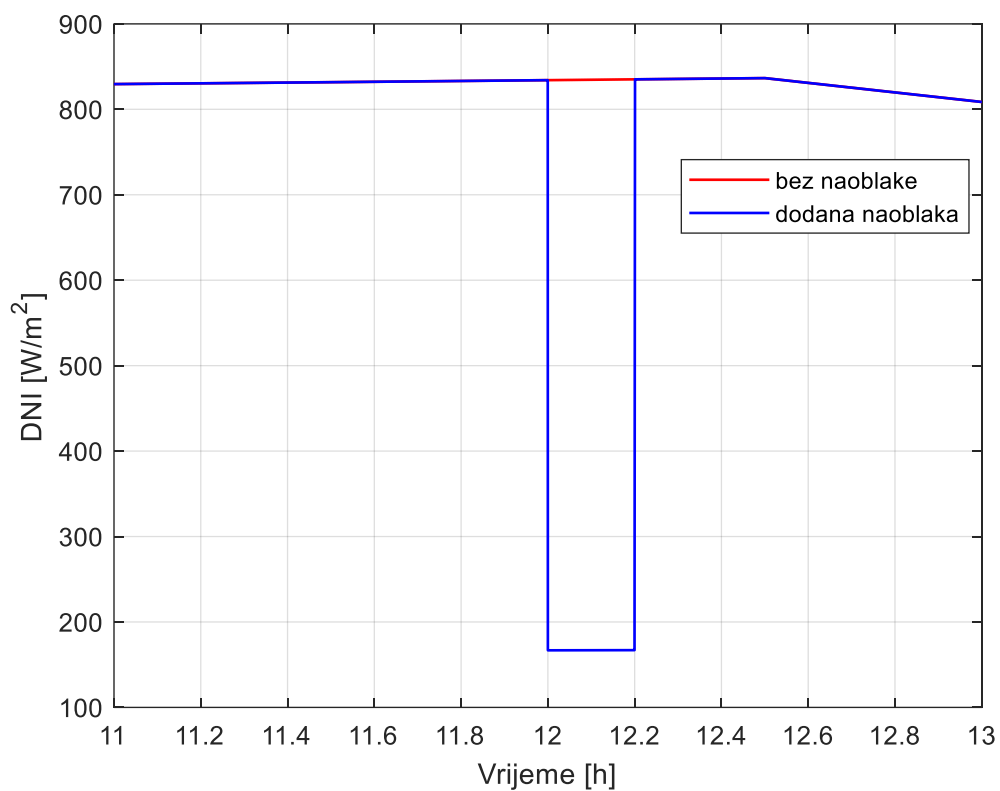
Još jedan ključni zadatak u mom istraživanju je prikazati utjecaj djelomičnog ili kratkotrajnog naoblačenja na sustav. Taj utjecaj je prikazan kroz upotrebu umjetne naoblake koja predstavlja trenutno smanjenje izravnog normalnog zračenja (DNI) za 80%. Simulacija ove naoblake je

prikazana za 21. lipnja, kao što je prikazano na Slika 14. Ako detaljnije pogledamo tu simulaciju na Slika 15, primijetiti ćemo da je trajanje naoblake 12 minuta. Glavni cilj ove simulacije je prikazati kako oblaci ili naoblačenje utječu na temperaturu radnog medija te istaknuti inerciju sustava. Kao što možemo vidjeti na Slika 16, trenutačna pojava naoblake nije izazvala trenutačnu promjenu temperature. Umjesto toga, primijetili smo inerciju u hlađenju i ponovnom zagrijavanju radnog medija, pri čemu je bilo potrebno više od 25 minuta da se radni medij ponovno vrati na optimalnu temperaturu. Na Slika 17 vidimo slučaj s 2 minute umjetne naoblake, koji prema Slika 18 pokazuje da je trebalo radnom mediju nešto više od 12 minuta do povratka na optimalnu temperaturu

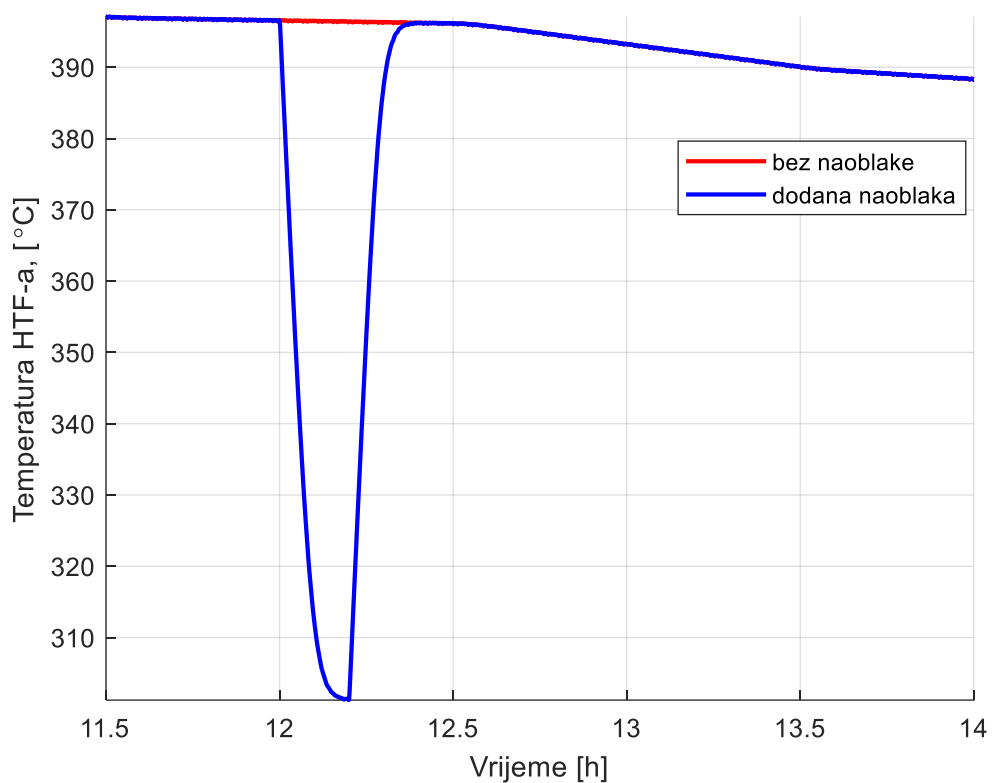


**Slika 14** Prikaz DNI-a s dodanom umjetnom naoblakom

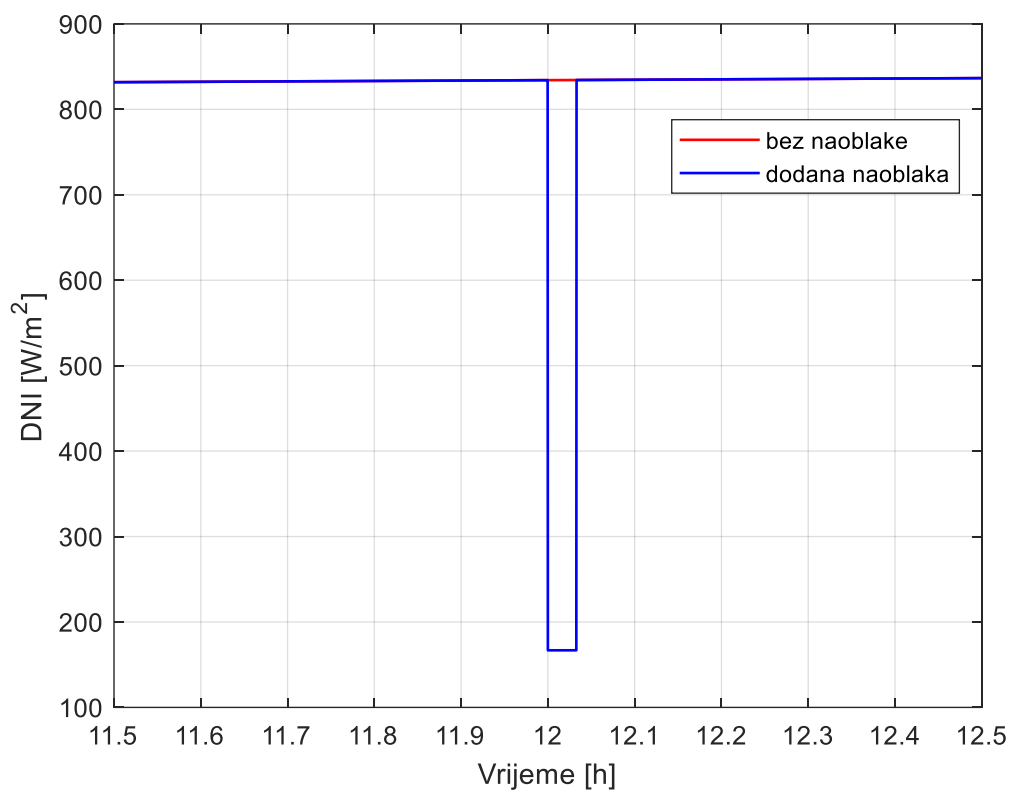




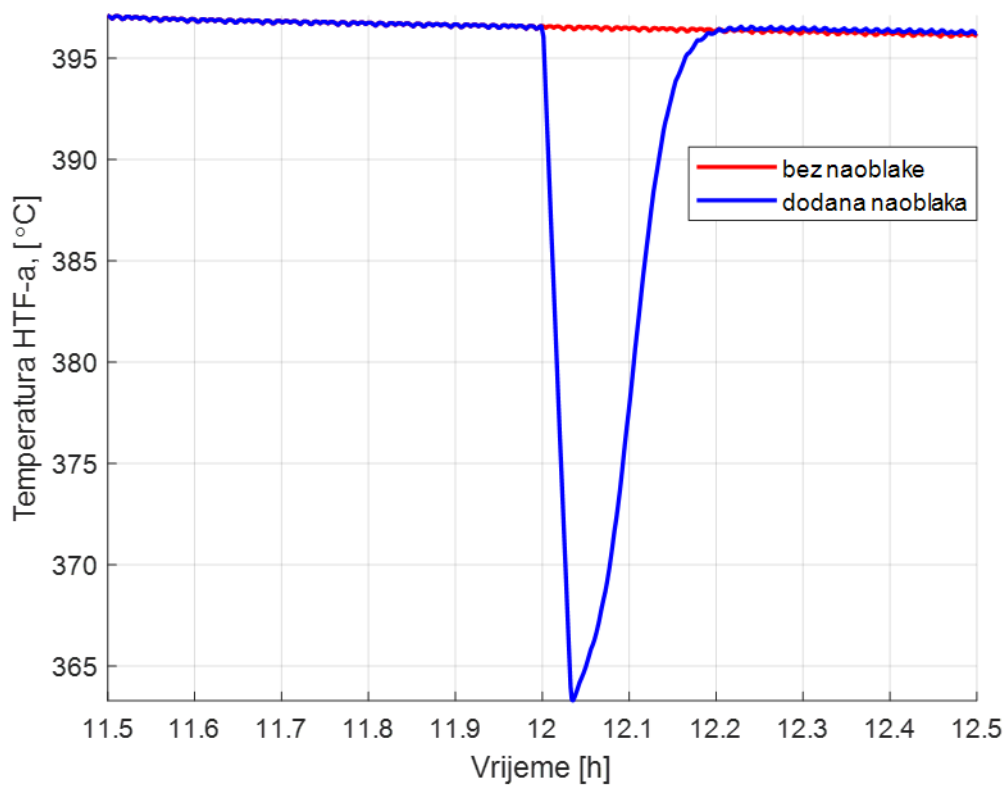
**Slika 15. Detaljniji prikaz trenutačne 12 minutne naoblake**



**Slika 16. Prikaz utjecaja 12 minutne naoblake na temperaturu radnog medija**



**Slika 17. Detaljniji prikaz trenutačne 2 minutne naoblake**



**Slika 18. Prikaz utjecaja 2 minutne naoblake na temperaturu radnog medija**

## 6. ZAKLJUČAK

U ovom istraživanju je izvršena simulacija proizvodnog paraboličnog kolektora koja je implementirana u softverskom paketu Simulink. Kao tip prijemnika odabran je Schott PTR-70, dok je model sklopa kolektorskih elemenata modeliran prema Eurotrough-150. Samo solarno polje je modelirano kao red od četiri spojena kolektorska elementa, koji su diskretizirani na tri dijela. Analiza se temelji na detaljnom matematičkom modelu koji koristi Runge Kutt metodu i 1D prijelazno modeliranje kako bi opisao ravnotežu prijenosa topline u prijemniku. U dinamičkom odzivu kolektorskog polja, nastojali smo postići optimalnu temperaturu radnog medija od 393 K. Međutim, zbog nedostatka složene regulacije protoka, temperatura radnog medija odstupa od optimalnog raspona. Kroz simulaciju smo dokazali utjecaj protoka radnog medija na njegovu temperaturu, pri čemu smanjenjem protoka rezultira većom temperaturom. Također, kao jedan od postavljenih ciljeva, prikazali smo promjenu temperature medija tijekom puštanja u jutarnjim satima, što je rezultiralo duljim zagrijavanjem radi hlađenja radnog medija tijekom noćnih sati. Na kraju, pokazali smo da naoblaka ima značajan utjecaj, smanjujući temperaturu radnog medija, te smo isto tako istaknuli tromost sustava u brzom hlađenju i zagrijavanju. Uvođenjem faktora kao što su gubici u cjevovodima, prisilna konvekcija u okolišu i implementacija regulacije protoka, postigli bismo rezultate koji su bliži stvarnom radu postrojenja.

**LITERATURA**

- [1] M. Roser, »Our World In Data,« [Mrežno]. Available: Our World In Data.
- [2] »Alternative Energy Tutorials,« [Mrežno]. Available: <https://www.alternative-energy-tutorials.com/solar-power/solar-radiation.html>.
- [3] L. Szabo, »The History of Using Solar Energy,« Technical University of Cluj-Napoca, Cluj-Napoca, 2017.
- [4] M. Molnar, »Simulacija pogona visoko-temperaturnog spremnika latentne topline,« 2019.
- [5] C. S. Franz Trieb, »Global Potential of Concentrating solar Power,« Berlin, 2009.
- [6] W. S. Keith Lovegrove, u *Concentrating solar power technology*, Woodhead Publishing, 2012.
- [7] SOLEL, 2009. [Mrežno]. Available: [chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgclefindmkaj/https://www.ariae.org/sites/default/files/2017-05/12.solar\\_fuel\\_clean\\_planet.pdf](chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgclefindmkaj/https://www.ariae.org/sites/default/files/2017-05/12.solar_fuel_clean_planet.pdf).
- [8] S. solar. [Mrežno]. Available: [chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgclefindmkaj/https://d3pcsg2wj9izr.cloudfront.net/files/31497/download/461508/1-schott\\_ptr70\\_4th\\_generation\\_brochure.pdf](chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgclefindmkaj/https://d3pcsg2wj9izr.cloudfront.net/files/31497/download/461508/1-schott_ptr70_4th_generation_brochure.pdf).
- [9] Therminol. [Mrežno]. Available: <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgclefindmkaj/https://rodun-int.com/wp-content/uploads/2021/09/TDS-Therminol-VP1-Rodun-Int-GB.pdf>.
- [10] I. H. a. W. J. a. Q. S. a. L. V. Bell, »Pure and Pseudo-pure Fluid Thermophysical Property Evaluation and the Open-Source Thermophysical Property Library CoolProp,« *Industrial & Engineering Chemistry Research*, svez. 53, pp. 2498--2508, 2014.
- [11] PVGIS. [Mrežno]. Available: [https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg\\_tools/en/](https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/).
- [12] Kalogirou, »A detailed thermal model of a parabolic trough collector receiver,« 2005.
- [13] Y. S. D. D. P. Touloukian, »Thermophysical Properties of Matter - The TPRC Data Series. Volume 8. Thermal Radiative Properties - Nonmetallic Solids,« 1972.
- [14] M. J. W. a. P. Gilman, »Technical Manual for the SAM Physical Trough Model,« NREL, 2011.
- [15] »Nuclear power,« [Mrežno]. Available: <https://www.nuclear-power.com/nuclear-engineering/heat-transfer/convection-convective-heat-transfer/gnielinski-equation/>.
- [16] A. Galović, TERMODINAMIKA 2, Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2022.
- [17] R. Forristall, »Heat Transfer Analysis and Modeling of a Parabolic Trough Solar Receiver Implemented in Engineering Equation Solver,« NREL, 2003.
- [18] K. Burkholder, »Heat loss testing of Schott's 2008 PTR70 parabolic trough receiver,« 2009.
- [19] Matko, »BROD I SUNCE,« [Mrežno]. Available: <https://www.index.hr/sport>.

---

**PRILOZI**

I. CD-R disc

II. Tehnička dokumentacija