

# Razvoj godišnjeg simulacijskog modela solarne dizalice topline

---

Čehok, Antonio

Master's thesis / Diplomski rad

2023

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Metallurgy / Sveučilište u Zagrebu, Metalurški fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:115:364413>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-13**



Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Metallurgy University of Zagreb - Repository of Faculty of Metallurgy University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
METALURŠKI FAKULTET

Antonio Čehok

DIPLOMSKI RAD

Sisak, ožujak 2023.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
METALURŠKI FAKULTET

Antonio Čehok

RAZVOJ GODIŠNJEG SIMULACIJSKOG MODELA SOLARNE  
DIZALICE TOPLINE

DIPLOMSKI RAD

Mentor: izv. prof. dr. sc. Jakov Baleta

Članovi povjerenstva za ocjenu i obranu diplomskog rada:

Predsjednik: prof. dr. sc. Ivan Brnardić

Član: izv. prof. dr. sc. Jakov Baleta

Član: izv. prof. dr. sc. Robert Pezer

Zamjenski član: doc. dr. sc. Tin Brlić

Sisak, ožujak 2023.

Ovaj rad izrađen je unutar projekta Razvoj sustava za ispitivanje višefaznih strujanja i izgaranja s ciljem povećanja istraživačkih aktivnosti znanstvenog i poslovnog sektora, KK.01.1.1.04.0070., sufinanciranog od strane Europske unije, sredstvima Europskog fonda za regionalni razvoj, Operativni program Konkurentnost i kohezija 2014.-2020.



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
METALURŠKI FAKULTET

UNIVERSITY OF ZAGREB  
FACULTY OF METALLURGY

IME: Antonio  
PREZIME: Čehok  
MATIČNI BROJ: M-107/20

Na temelju članka 19. stavak 2. Etičkog kodeksa Sveučilišta u Zagrebu dajem sljedeću

## IZJAVU O IZVORNOSTI

Izjavljujem da je moj ~~završni~~ / diplomski / ~~doktorski~~ rad pod naslovom:

Razvoj godišnjeg simulacijskog modela solarne dizalice topline

izvorni rezultat mojeg rada te da se u izradi istoga nisam koristio drugim izvorima osim onih koji su u njemu navedeni.

Sisak, 28.02.2023

(vlastoručni potpis)

*Izrazi koji se koriste u ovoj Izjavi, a imaju rodno značenje, koriste se neutralno i odnose se jednako i na ženski i na muški rod.*

## **Zahvala**

*Zahvaljujem se mentoru izv. prof. dr. sc. Jakovu Baleti na velikoj pomoći, utrošenom vremenu i strpljenju prilikom izrade ovog rada.*

*Također se zahvaljujem prijateljima, roditeljima te baki i teti na velikoj podršci prilikom svih godina studija.*

*Za kraj, posebne zahvale idu bratu Leonardu (strojaru/programeru), na svim savjetima i nebrojenim pomoćima pri računalnim problemima tijekom studija.*

## SAŽETAK

### RAZVOJ GODIŠNJEG SIMULACIJSKOG MODELA SOLARNE DIZALICE TOPLINE

Neprestani rast energenata uzrokovan sve većom potražnjom te svjetskim krizama dovodi do stalne potražnje za alternativnim tehnologijama grijanja. Najpoželjniji su obnovljivi izvori energije zbog neograničenih količina te minimalnih utjecaja na okoliš i zdravlje ljudi. Tema ovog rada odnosi se na postavljanje simulacijskog modela solarne dizalice topline kako bi se dobio uvid u ponašanje i učinkovitost sustava solarne dizalice topline pri realnim uvjetima. Nakon postavljene simulacije napravljena je validacija sustava na stvarnim mjerenjima mobilne solarne dizalice topline. Prikazana je usporedba rada modela za dva grada s različitim klimatskim uvjetima. Napravljena je godišnja simulacija s vremenskim korakom od 1 sata. Simulacijski model je uspoređen s konvencionalnim sustavima grijanja te je dan uvid u troškove i isplativost ugradnje sustava. Prema simulacijskom modelu za Zagreb sustav se pokazuje neisplativ u odnosu na ostale izvore grijanja, dok su za Split dobivene vrijednosti manje godišnje potrošnje u odnosu prema ostalim izvorima. Razlog tome su vrijednosti veće vrijednosti godišnje ozračenosti.

**Ključne riječi:** solarna dizalica topline, simulacijski model, potrošnja vode, insolacija

## SUMMARY

### DEVELOPMENT OF THE ANNUAL SIMULATION MODEL OF A SOLAR ASSISTED HEAT PUMP

The continuous growth of energy consumption caused by increasing demand and global crises leads to a constant demand for alternative heating technologies. The most desirable sources of energy are renewable sources due to their unlimited quantities and minimal impact on the environment and human health. The topic of present paper concerns the development of the simulation model of a solar assisted heat pump to gain insight into the behaviour and efficiency under real conditions. After setting up the simulation, the system was validated with actual measurements of a mobile solar heat pump. A comparison of the model's performance was shown for two cities with different climatic conditions. An annual simulation was made with a time step of 1 hour. The simulation model was compared to conventional heating systems, and insights into the costs and cost-effectiveness of installing the system were given. According to the simulation model, the system is not cost-effective compared to other heating sources for Zagreb, while for Split, lower annual consumption values were obtained compared to other sources. The reason for this is higher annual radiation values.

**Key words:** solar assisted heat pump, simulation model, water consumption, insolation

## Sadržaj

POPIS SLIKA .....	I
POPIS TABLICA.....	II
POPIS OZNAKA .....	III
1. UVOD .....	1
1.1.  Europske uredbe .....	2
1.2.  Solarna energija .....	3
2.  DIZALICA TOPLINE .....	7
2.1.  Princip rada.....	8
2.2.  Podjela dizalica topline prema toplinskom izvoru .....	10
2.2.1.  Geotermalne dizalice topline.....	10
2.2.2.  Dizalice topline sa zrakom kao toplinskim izvorom.....	11
2.2.3.  Solarne dizalice topline .....	12
2.2.3.1.  Posredne dizalice topline .....	12
2.2.3.2.  Dizalice topline s direktnim isparavanjem radne tvari.....	13
3.  OSNOVNI PRORAČUN SOLARNE DIZALICE TOPLINE .....	14
4.  MATEMATIČKI MODEL SOLARNE DIZALICE TOPLINE .....	18
5.  VALIDACIJA RAZVIJENOG MODELA .....	22
6.  REZULTATI I DISKUSIJA .....	23
6.1.  Usporedba izvora grijanja i analiza troškova .....	29
7.  ZAKLJUČAK.....	32
LITERATURA.....	33
ŽIVOTOPIS .....	36



## POPIS SLIKA

Slika 1. Povijesno kretanje cijena nafte i plina [1].....	1
Slika 2. Prikaz svjetske upotrebe primarne energije [1].....	2
Slika 3. Potencijalno smanjenje emisija do 2050. godine [8] .....	3
Slika 4. Prikaz ozračenosti horizontalne podloge za područje RH [14].....	4
Slika 5. Sustav prikupljanja energije solarnim kolektorima [17].....	5
Slika 6. Prikaz insolacije i stupanj dana grijanja za različite svjetske gradove [19].....	6
Slika 7. Godišnji prikaz instaliranih dizalica topline [20].....	7
Slika 8. Potencijal smanjenja emisija korištenjem dizalice topline u sustavima grijanja [20]...	8
Slika 9. Shematski prikaz dizalice topline [21].....	8
Slika 10. Carnotov ljevokretni proces, idealni i realni [22, 23] .....	9
Slika 11. Prikaz izračuna toplinskog učinka [24].....	10
Slika 12. Dizalica topline zrak - zrak [27].....	11
Slika 13. Dizalica topline zrak – voda [20].....	11
Slika 14. Serijski sustav [23].....	12
Slika 15. Paralelni sustav [29].....	12
Slika 16. Proces direktnog isparavanja radne tvari [28].....	13
Slika 17. Prototip mobilne solarne dizalice topline s direktnim isparavanjem radne tvari [25] .....	14
Slika 18. Kružni proces solarne dizalice topline u T,s dijagramu [25] .....	15
Slika 19. Kružni proces solarne dizalice topline u log p,h dijagramu [25] .....	15
Slika 20. Atmosfersko i upadno zračenje na nagnutu površinu za Split.....	19
Slika 21. Atmosfersko i upadno zračenje na nagnutu površinu za Zagreb .....	19
Slika 22. Prosječne mjesečne temperature Zagreba i Splita.....	19
Slika 23. Usporedba simulacije i eksperimentalnih mjerenja [25].....	22
Slika 24. Vremenski podaci za 15.01 (Zagreb).....	23
Slika 25. Rezultati simulacije za 15.01.2021 (Zagreb) .....	23
Slika 26. Vremenski podaci za 15.07.2021 (Zagreb).....	24
Slika 27. Rezultati simulacije za 15.07.2021 (Zagreb) .....	24
Slika 28. Vremenski podaci za 15.01.2021(Split).....	25
Slika 29. Rezultati simulacije za 15.01.2021 (Split).....	25
Slika 30. Rezultati simulacije za 15.07.2021 (Split).....	26
Slika 31. Vremenski podaci za 15.07.2021 (Split).....	26
Slika 32. Mjesečni prikaz dobivene energije (Zagreb) .....	27
Slika 33. Mjesečni prikaz dobivene energije (Split) .....	27
Slika 34. Pregled potrebe za pomoćnim grijačem tijekom siječnja u Zagrebu .....	28
Slika 35. Pregled potrebe za pomoćnim grijačem tijekom siječnja u Splitu.....	29

**POPIS TABLICA**

Tablica 1. Početni parametri za proračun solarne dizalice topline.....	14
Tablica 2. Vrijednosti radne tvari R134a u radnim točkama .....	15
Tablica 3. Vrijednosti modela dobivene proračunom .....	16
Tablica 4. Dimenzije spremnika tople vode.....	21
Tablica 5. Sumarni godišnji podaci za Zagreb .....	27
Tablica 6. Sumarni godišnji podaci za Split.....	28
Tablica 7. Troškovi ugradnje sustava solarne dizalice topline.....	30
Tablica 8. usporedba godišnjih troškova za Split.....	31

## POPIS OZNAKA

Oznaka	jedinica	opis
<b>Latinska slova</b>		
A	m <sup>2</sup>	površina kolektora
S <sub>hor</sub>	Wh/m <sup>2</sup>	solarno zračenje na vodoravnu površinu
S <sub>zr</sub>	Wh/m <sup>2</sup>	mjereno satno ozračenje
T <sub>kol</sub>	°C	srednja temperatura na kolektoru
T <sub>ok</sub>	°C	temperatura okoliša
Q <sub>kol</sub>	kWh	prikupljena energija na kolektoru
Q <sub>kond</sub>	kWh	energija dovedena do kondenzatora
P	kWh	snaga kompresora
Q <sub>acum</sub>	kWh	akumulirana energija u spremniku
Q <sub>air</sub>	kWh	konvekcija
W <sub>sp</sub>	kWh	potrošnja tople vode
V	m <sup>3</sup>	volumen spremnika
Q <sub>g</sub>	kWh	toplinski gubici
d <sub>v</sub>	m	vanjski promjer
d <sub>u</sub>	m	unutarnji promjer
L	m	duljina cijevi
A <sub>c</sub>	m <sup>2</sup>	površina cijevi
q <sub>h</sub>	kWh	satna vrijednost gubitka topline
<b>Grčka slova</b>		
δ	°	nagib Zemlje
α <sub>s</sub>	°	položaj Sunca
β	°	nagnutost kolektora
η <sub>kol</sub>	-	učinkovitost kolektora
θ <sub>w</sub>	°C	temperatura vode u spremniku
α	W/m <sup>2</sup> K	koeficijent prijenosa topline
λ	W/(mK)	toplinska vodljivost
Δθ <sub>w</sub>	°C	satna promjena temperature
Φ	kW	ogrjevni učinak
ε	-	toplinski množitelj

**POPIS KRATICA**

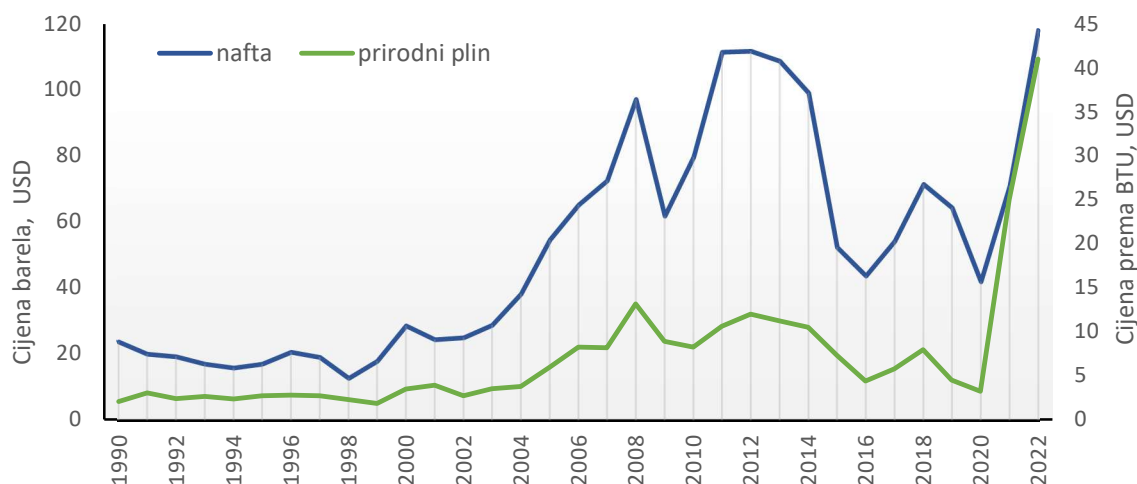
**HDD** – Heating Degree Days

**COP** – Coefficient of Performance

## 1. UVOD

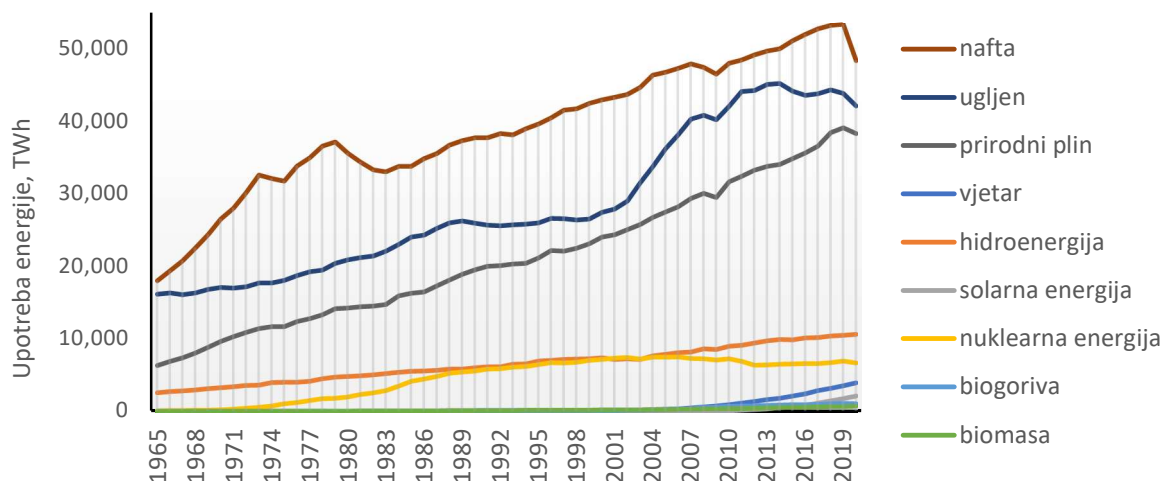
Pronalazak adekvatnog i u svakom trenutku dostupnog te ekonomski i ekološki opravdanog načina grijanja oduvijek je bio izazov za čovjeka. Za učinkovitu ugradnju ogrjevnog sustava u stambene ili poslovne prostore potreban je odabir ogrjevne instalacije koji je ekonomski isplativ i energetski učinkovit s obzirom na lokaciju postavljanja, vanjske uvjete i mogućnosti ugradnje. Pored instalacijskih uređaja također bitnu stavku predstavlja i sam odabir goriva. Ključni faktori su dostupnost, potrebne količine, trenutna i buduća tržišna vrijednost te ekološki učinci prisutni prilikom upotrebe.

Tržišna vrijednost u današnje vrijeme predstavlja primarni faktor prilikom odabira goriva uzimajući u obzir krizu uzrokovanu novonastalom ratnom situacijom na istoku Europe, koja je značajno utjecala na porast cijena fosilnih goriva i dovela u neizvjesnost njihovu pristupačnost i isplativost primjene. Pored takvih nepredvidivih situacija prisutan je i konstantan rast potrebne energije uzrokovan povećanjem globalne populacije i porastom životnog standarda [1]. Ograničenost i neobnovljivost zaliha može dovesti do značajnih varijacija u njihovim tržišnim cijenama. Cijene fosilnih goriva trenutno dosežu rekordne vrijednosti, kao što je vidljivo na slici 1. Ovo dovodi u pitanje budućnost njihove primjene kao primarnog izvora goriva za ogrjevne sustave te stavlja u fokus primjenu nove vrste ekonomski isplativijeg goriva.



Slika 1. Povijesno kretanje cijena nafte i plina [1]

Na slici 2. dan je prikaz svjetske upotrebe energije za različite energetske izvore u zadnjih nekoliko desetljeća te se može vidjeti da su tri najzastupljenija izvora (nafta, ugljen i prirodni plin) neobnovljivi izvori energije.



Slika 2. Prikaz svjetske upotrebe primarne energije [1]

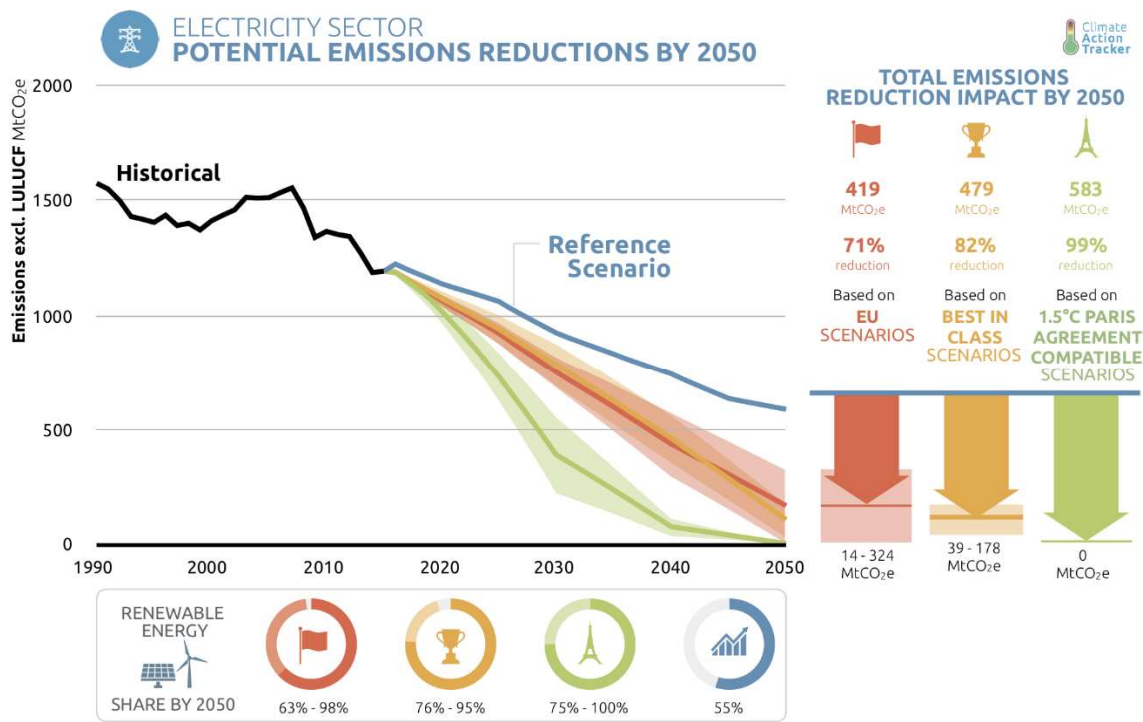
Pored sve veće cijene fosilnih goriva dodatni značajni negativni faktor su štetni utjecaji na atmosferu i samog čovjeka uzrokovani ispuštanjem štetnih emisija, primarno CO<sub>2</sub>. Svi navedeni negativni faktori neobnovljivih izvora dovoljan su poticaj za sve veću primjenu obnovljivih izvora.

Već unutar prošlog stoljeća počinje potraga za novijim tehnologijama zbog ubrzanog gospodarskog razvoja i značajnih energetske kriza unutar Europe i Svijeta. Tadašnji glavni alternativni izvor energije postaju nuklearne elektrane [2]. U početnim fazama upotrebe pokazale su se kao idealno rješenje zbog svoje visoke efikasnosti, niže cijene goriva u odnosu na termoelektrane i većeg kapaciteta [3]. Glavni nedostaci tehnologije bili su visoki troškovi investicije, dugo vrijeme izgradnje i upuštanja u pogon te opasnost od mogućih katastrofa s katastrofalnim posljedicama [4]. Kao primjer su navedeni katastrofa u Černobilu (1986.) i Fukushima (2011.) [3, 4]. Unutar nekih zemalja dolazi do značajnog smanjenja upotrebe ovog oblika energije [5, 6], što daje izazov pronalaska adekvatne zamjene izvora energije.

### 1.1. Europske uredbe

Oko 40% ukupne upotrebe energije na razini Europske unije otpada na stambeni sektor, zajedno s preko 30% svih ukupnih emisija CO<sub>2</sub> [6]. U cilju energetske unaprjeđenja za stambene sektore na razini Europske unije donesena je Direktiva 2010/31/EU Europskog parlamenta i vijeća o energetske učinkovitosti zgrada [6] prema kojoj se nalaže da, počevši od 2021. godine svaka novoizgrađena stambena zgrada mora biti zgrada gotovo nulte energije (eng. *nearly Zero-Energy Building* - *nZEB*). Takve zgrade imale bi visoku energetske efikasnost, a sami cilj izvedbe bio bi postizanje CO<sub>2</sub> neutralnosti do 2050. godine. Glavni izvor energije takvih građevina bili bi obnovljivi izvori, poput Sunca, vjetera i geotermalne energije, a koristili bi se za sustav grijanja, hlađenja, ventilacije i cjelokupnu opskrbu električnom energijom. Druga velika direktiva je Pariški sporazum donesen 2016. godine [7]. Tim sporazumom nastoji se globalni porast temperature održati ispod 2°C u odnosu na predindustrijsko doba. Pariški sporazum predstavlja dodatak na dotadašnju Europsku direktivu u smislu strožih zahtjeva za smanjenjem emisija stakleničkih plinova i potrošnje energije te postizanja klimatske neutralnosti do 2050. godine. Smanjenje emisija odvijalo bi se uređenjem tri glavna sektora odgovorna za njihovo nastajanje: proizvodnja električne energije, transportni i stambeni sektor. Kako bi se ograničio porast temperature ispod 2°C predstavljen je plan smanjenja emisija do 2050. godine (slika 3.) za proizvodnju električne energije. Na slici 3. plavom linijom prikazano

je referentno stanje emisija s udjelom obnovljivih izvora energije od oko 50%. Crvenom linijom dan je prikaz smanjenja emisija s trenutno vrijedećim Europskim direktivama i primjenu obnovljivih izvora u udjelu od 63 – 98%. Uz pravilnu i pravovremenu primjenu planiranog smanjenja emisija, do 2050. godine postigao bi se najbolji scenarij, odnosno klimatska neutralnost, što je prikazano zelenom linijom.

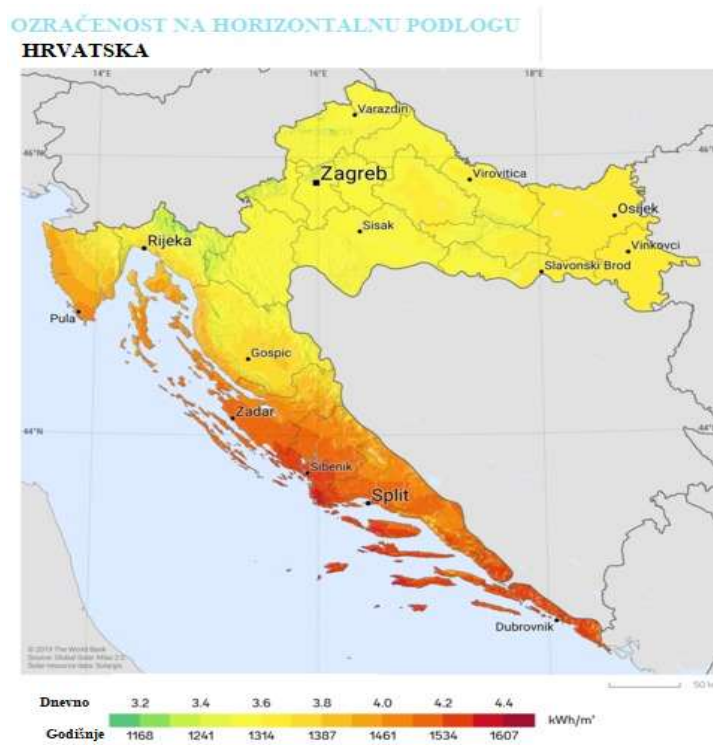


Slika 3. Potencijalno smanjenje emisija do 2050. godine [8]

Za ostvarenje planiranog smanjenja emisija za transportni sustav, planiran je prestanak proizvodnje vozila s unutrašnjim izgaranjem do 2030. godine [9]. Za stambeni sektor predviđano smanjenje emisija je 52-62% do 2030. godine te 76-87% do 2050. godine. Kako bi se postigao zadani cilj smanjenja emitiranog CO<sub>2</sub> primjenjuje se sve veći udio čišće tehnologije. Čista tehnologija predstavlja sve tehnološke procese prilikom kojih dolazi do minimalizacije štetnih učinaka na okoliš. Čiste tehnologije primarno se odnose na primjenu reciklaže te upotrebu obnovljivih izvora energije u procesima. U obnovljive izvore energije pripadaju solarna energija, energija vjetrova, hidroenergija, geotermalna energija i biomasa.

## 1.2. Solarna energija

Sunce se sastoji od 80% vodika, oko 20% helija i nešto manje od 0,1% ostalih elemenata. Izvor energije Sunca su razni fuzijski procesi [10], prilikom kojih se oslobađa velika količina energije koja se zračenjem prenosi do Zemlje. Količina primljenog zračenja na Zemlju razlikuje se ovisno o nagibu Zemlje u odnosu na Sunce [11] te predstavlja ogromni, još uvijek neiskorišteni potencijal konstantnog izvora energije [12]. Na slici 4. prikazane su srednje dnevne i godišnje vrijednosti zračenja za Hrvatsku u razdoblju od 1994. do 2018. godine.



Slika 4. Prikaz ozračenosti horizontalne podloge za područje RH [14]

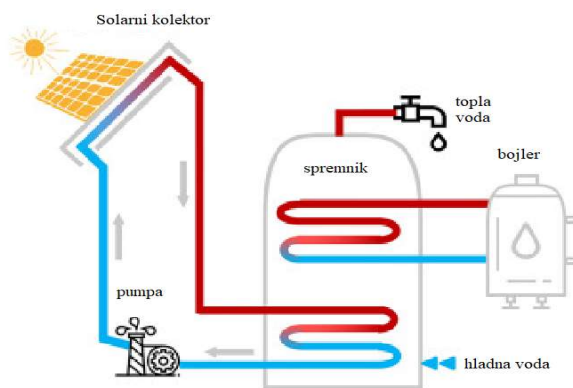
S razvitkom tehnologije postiže se pretvorba Sunčevog zračenja u druge upotrebljive oblike energije, poput električne energije koja se može koristiti za različite namjene, npr. grijanje ili hlađenje prostora. U odnosu na fosilna goriva, solarna energija predstavlja znatno čišći oblik energije bez rizika prilikom proizvodnje. Dugoročno gledano, solarna energija pokazuje visoku isplativost zbog svojeg praktično neiscrpnog potencijala, sve nižih početnih investicija dugotrajnosti opreme i malih troškova održavanja [13].

Osnovni dijelovi solarnog toplinskog sustava su:

- solarni kolektor;
- radni medij (voda, zrak, smjesa glikola i vode);
- cijevni sustav za transport radnog medija;
- spremnik vode.

Sustav solarnog zagrijavanja potrošne tople vode apsorbira sunčevo zračenje pomoću kolektora te ga pretvara u toplinsku energiju. Toplinska energija prenosi se na radni medij koji se pomoću cijevnog sustava transportira do odgovarajućeg spremnika te predaje toplinu vodi koju želimo zagrijati (slika 5.) [14].

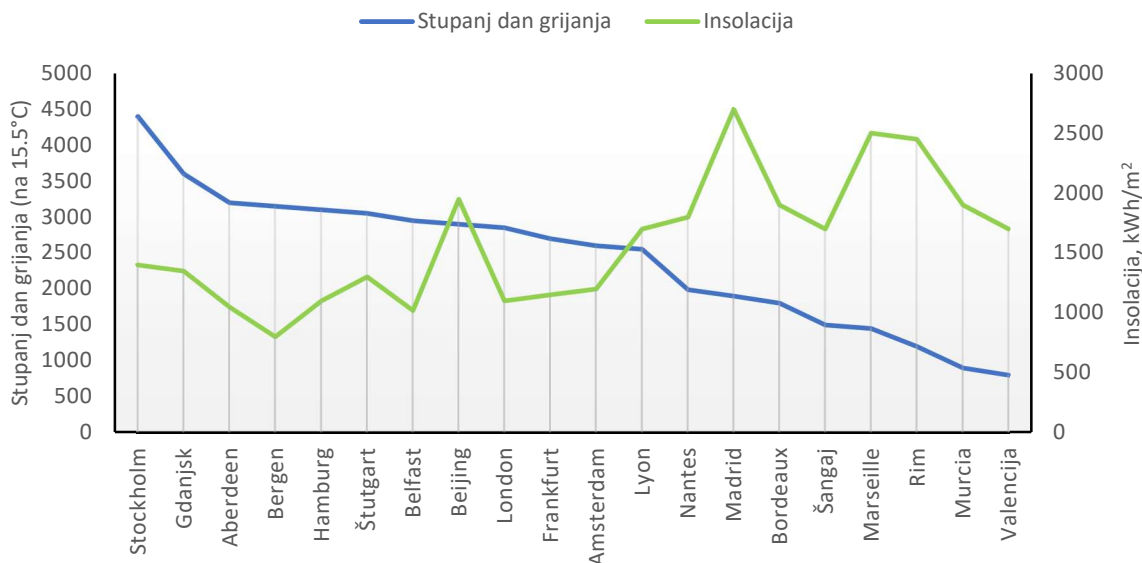




Slika 5. Sustav prikupljanja energije solarnim kolektorima [17]

U standardnom sustavu prikupljanja energije za grijanje prostora ili tople vode primjenjuje se ostakljeni kolektor. Glavna prednost ostakljenog kolektora u odnosu na neostakljene kolektore je veća učinkovitost izazvana manjim gubicima energije u okoliš [15]. Određeni dio solarnog zračenja reflektira se od ostakljenog sustava i nikada ne dolazi do apsorbira. Do dodatnih gubitka dolazi uslijed konvekcije, prilikom koje se određeni dio topline odvede u okoliš prije nego što se uspije prenijeti na radni medij, što je potrebno izbjeći prilikom konstruiranja solarnog sustava [14]. Glavni izazov ovog načina prikupljanja i pretvorbe energije je ovisnost o insolaciji. Za pravilnu funkciju sustava potrebno je održavanje rada sustava u određenom temperaturnom rasponu.

Ukoliko nisu zadovoljeni uvjeti dovoljnog Sunčevog zračenja, solarni sustav radit će sa znatno manjom efikasnosti ili uopće neće raditi. Količina Sunčevog zračenja može znatno varirati ovisno o dijelu svijeta (slika 6.). Tako procijenjena količina zračenja za Bergen iznosi 850 kWh/m<sup>2</sup>, dok za Valenciu iznosi oko 1700 kWh/m<sup>2</sup> [16]. Pored količine zračenja, na slici su dani podaci za HDD (eng. *Heating degree days*) koji označavaju stupanj dan za grijanje, gledajući razliku između vanjske i unutarnje projektne temperature. HDD je mjera postavljena za definiranje količine energije potrebne za zagrijavanje stambenih prostora. Računa se prema dobivenim stupanj danima za određeno područje. U računicu ulaze dani u kojima je dnevna temperatura manja od prosječne zadane (u navedenom primjeru iznosi 15.5°C). Tako osim količine zračenja varira i količina potrebne energije za grijanje koja se u nedovoljno sunčanim lokacijama ne može nadoknaditi [16].



Slika 6. Prikaz insolacije i stupanj dana grijanja za različite svjetske gradove [19]

Nedostatak solarnog sustava također nastaje i u vjetrovitim područjima s niskom prosječnom temperaturom okoliša. Pri takvim uvjetima onemogućeno je korištenje vode kao radnog medija zbog mogućnosti smrzavanja unutar kolektora te pojave oštećenja i havarija. Taj problem riješen je zamjenom vode s CO<sub>2</sub> koji se pokazao kao idealni radni medij zbog svoje netoksičnosti, nezapaljivosti te niske temperature ledišta.

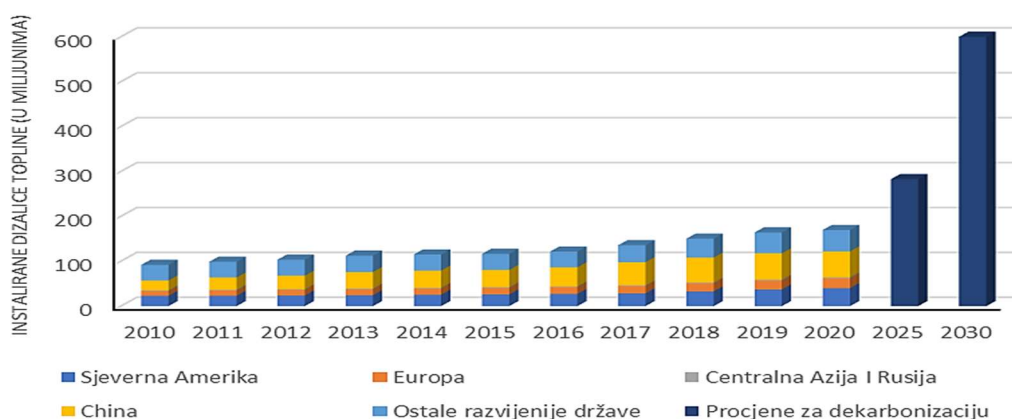
Solarna energija može se koristiti i kao izvor energije u sustavima s dizalicom topline, čime se mogu eliminirati prethodno nabrojani nedostaci solarnih kolektorskih sustava, iako treba imati na umu veće investicijske troškove. Svrha ovog rada je izrada godišnjeg simulacijskog modela eksperimentalnog pilot postrojenja mobilne solarne dizalice topline s direktnim isparavanjem radne tvari koja služi za pripremu potrošne tople vode četveročlane obitelji na lokacijama gradova Zagreba i Splita kao predstavnika dviju glavnih klimatskih regija Republike Hrvatske. Solarna dizalica topline je uspoređena s ostalim konvencionalnim načinima pripreme potrošne tople vode, električnim grijačem, plinskim kotlom i kotlom na ekstra lako loživo ulje. Ostatak rada je organiziran kako slijedi; nakon razrade teoretskih osnova dizalice topline, predstavljen je osnovni proračun spomenute solarne dizalice topline te su dani osnovni izrazi matematičkog modela korištenog za simulacije. Zatim je napravljena validacija modela na mjerenim podacima te se pristupilo godišnjoj analizi rada sustava s tako validiranim modelom. Konačno, izračunate su uštede u odnosu na klasične sustave potrošne tople vode te je na temelju dobivenih rezultata donesen zaključak o opravdanosti primjene ovog pilot postrojenja.

## 2. DIZALICA TOPLINE

Prema Europskim direktivama [6, 7], obnovljivi izvori energije su predloženi kao izvor za grijanje u svrhu smanjenja emisija. Dizalice topline su uređaji kod kojih se odvija proces odvođenja topline sa spremnika niže temperature na spremnik više temperature. Takav proces visoke efikasnosti znatno doprinosi uštedi energije i postizanju maksimalne iskoristivosti. Dizalice topline koriste minimalnu količinu energije kako bi se ostvario prijenos topline od toplinskog izvora (zrak, voda, tlo i Sunčeva energija) do prostora koji želimo zagrijati. Osnovna prednost dizalica topline u odnosu na tradicionalne direktne sustave grijanja je veća učinkovitost te nema ispuštanja emisija ugljikovog dioksida na lokaciji dizalica topline.

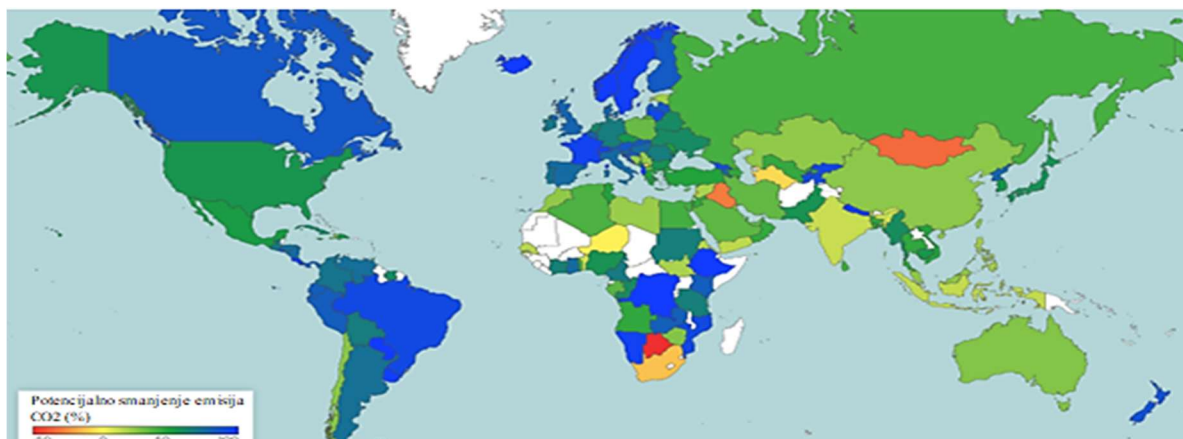
Tijekom posljednjih godina dolazi do znatnog povećanja korištenja dizalica topline te je vidljivo kako u 2020. godini broj instaliranih uređaja prelazi iznos od 150 milijuna (slika 7). Iako taj broj trenutno pokriva samo oko 7% ukupnih potreba za grijanjem, vidi se trend rasta i sve veća potražnja za novijim tehnologijama.

Na slici 7. su također dani procijenjeni podaci instaliranih dizalica topline koji bi bili potrebni za postizanje dekarbonizacije sustava grijanja [17]. Prema tim podacima dano je da bi potreban iznos instaliranih dizalica topline trebao biti preko 250 milijuna do 2025. godine, a preko 600 milijuna na svjetskoj razini do 2030. kako bi se ostvario planirani cilj potpune neutralizacije emitiranog CO<sub>2</sub> do 2050. godine.



Slika 7. Godišnji prikaz instaliranih dizalica topline [20]

Na slici 8. prikazano je potencijalno smanjenje emisija s upotrebom dizalica topline kao primarnog izvora grijanja. Tako je na globalnoj razini moguće upotrebom dizalica topline zadovoljiti velik udio svjetskih potreba za grijanjem. Pri takvoj primjeni ogrjevnog sustava jedini izvor emisija bio bi iz potrebne električne energije ukoliko se i njihov izvor ne bi u potpunosti sveo na obnovljive resurse [17].



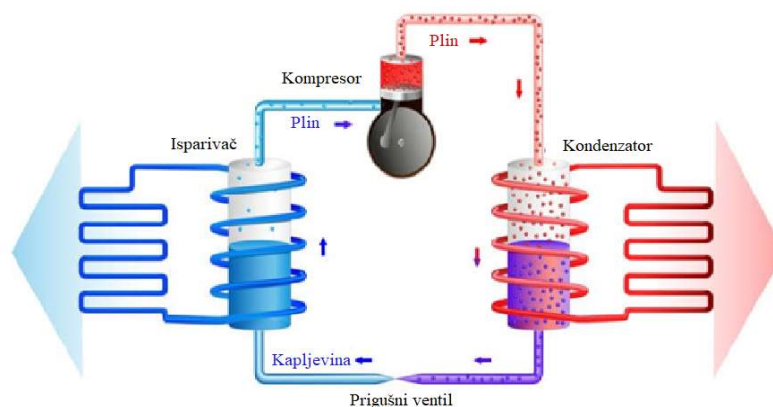
Slika 8. Potencijal smanjenja emisija korištenjem dizalice topline u sustavima grijanja [20]

## 2.1. Princip rada

Kompresorske dizalice topline predstavljaju mehaničke uređaje pomoću kojih se temperatura s tijela niže temperature može prenijeti na tijelo više temperature. Uzimajući u obzir drugi zakon termodinamike, takav proces sam po sebi nije moguć bez dodatnog ulaganja rada. Unutar procesa koristi se električna energija pomoću koje se pokreće kompresijski uređaj.

Glavni dijelovi dizalice topline prikazani na slici Slika 9 su:

- isparivač;
- kompresor;
- kondenzator;
- prigušni ventil;
- radni medij.



Slika 9. Shematski prikaz dizalice topline [21]

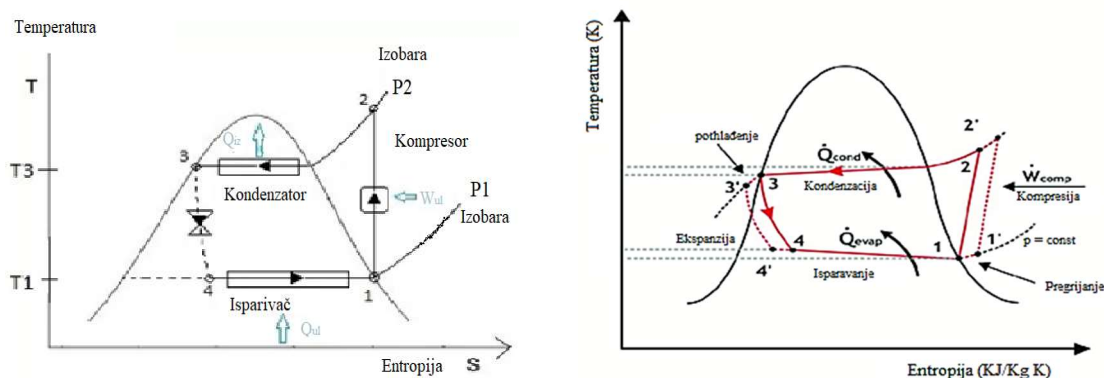
Proces rada dizalice topline objasniti će se na primjeru Carnotovog ljevokretnog procesa (slika 10). Proces je sastavljen od četiri promjene stanja radne tvari: izentropska kompresija radne tvari (1-2), izobarno-izotermno odvođenje topline spremniku više temperature pri kondenzaciji (2-3), izentropska ekspanzija (3-4) te izobarno-izotermno dovođenje topline prilikom isparavanja radne tvari (4-1).

Proces započinje u točki 1. gdje radni medij uzima toplinu iz toplinskog izvora, spremnika niže temperature i ostvaruje se njegovo isparavanje. Dolazi do stvaranja zasićene pare koju usisava kompresijski uređaj, gdje se radni medij izentropski komprimira na viši tlak, pri čemu se

također povećava i njegova temperatura (stanje 2). Od stanja 2 do stanja 3 odvija se proces kondenzacije, odnosno odvođenje topline s radnog medija na spremnik više temperature. Proces se teoretski odvija pri konstantnom tlaku i temperaturi. Od stanja 3 do stanja 4 radni medij se dovodi do prigušnog ventila, gdje dolazi do pada temperature i tlaka s tlaka kondenziranja na tlak isparavanja, pri čemu je entalpija prije i poslije prigušivanja jednaka. Unutar isparivača radni medij ponovno preuzima toplinu od okoline, dolazi do isparavanja te se cjelokupni proces ponavlja.

Objašnjeni proces odnosi se na idealni Carnotov proces uz sljedeće pretpostavke:

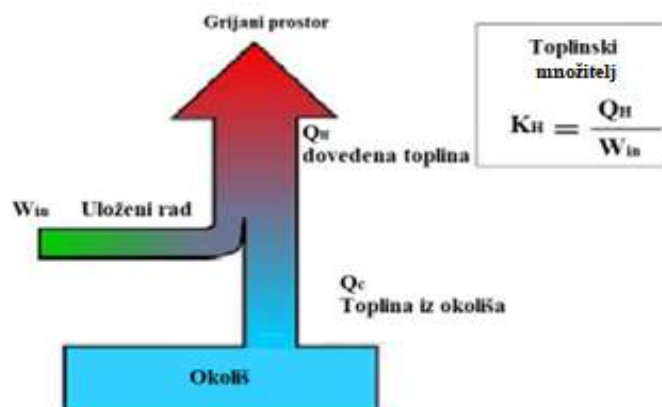
- nepovrativosti procesa u isparivaču, kondenzatoru i kompresoru su zanemarive;
- radni medij prolazi kroz izmjenjivače topline bez pada tlaka;
- kompresijski proces je izentropski;
- zanemarivi su gubici topline prema okolini.



Slika 10. Carnotov ljevokretni proces, idealni i realni [22, 23]

U realnom procesu postoje značajne promjene u odnosu na idealni. Radni medij se u realnom procesu nalazi u pregrijanom području (slika 10). S takvim procesom postiže se potpuno uklanjanje kapljevite faze i sprječava njezino dovođenje do kompresora. Uklanjanjem kapljevite faze sprječava se nastajanje hidrauličkog udara do kojeg može doći unutar kompresora prilikom kompresije dvofazne radne tvari zbog nestlačivosti kapljevite faze. Proces komprimiranja radnog medija nije izentropski, već postoji određeno trenje prilikom odvijanja procesa te dolazi do porasta entropije 1'-2'.

Radni medij u stanju 2' više je temperature nego u idealnom procesu zbog većeg uloženog rada uzrokovanog nastalim trenjem prilikom kompresije. Od stanja 2' do stanja 3' odvija se proces kondenzacije, odnosno odvođenje topline s radnog medija na spremnik više temperature. U procesu odvođenja topline uz latentnu toplinu dodatno se postiže i pothlađenje kondenzata odvođenjem osjetne topline, stanje 3'. To je namjerno izazvani proces u cilju povećanja rashladnog učinka isparivača. Od stanja 3' do stanja 4' odvija se prigušivanje radnog medija uz smanjenje tlaka i temperature. Od stanja 4' do stanja 1' radni medij se odvodi do isparivača, preuzima toplinu od spremnika niže temperature, pregrijava se te se cjelokupni ciklus ponavlja. Ono što čini bitnu razliku između idealnog i realnog procesa je njihova učinkovitost. Za realne procese zbog pojava trenja, pregrijavanja i pothlađenja radnog medija postiže se znatno manja učinkovitost od idealnih.



Slika 11. Prikaz izračuna toplinskog učinka [24]

Dizalice topline mogu služiti kao rashladni uređaji, ogrjevni uređaji te kao rashladno-ogrjevni uređaji. U funkciji rashladnih uređaja njihova je funkcija prenošenje topline iz hlađenog prostora u okolinu. Ogrjevni sustav ima ulogu preuzimanja topline iz vanjskog sustava do radne tvari te dovođenja topline do grijanog prostora. Rashladno-ogrjevni sustav koristi njihovu kombinaciju.

Najvažniji parametar kod opisivanja učinkovitosti dizalica topline je toplinski množitelj, odnosno (eng. *Coefficient of Performance - COP*), objašnjen slikom 11. COP je omjer dovedene topline predane grijanom prostoru  $Q_H$ , i uloženog rada na kompresoru  $W_{in}$ . Uzmimo za primjer da toplina dovedena u grijani prostor iznosi 3 kWh, a uloženi rad iznosi 1 kWh. S tim omjerom dobili bi vrijednost COP-a od 3, što bi označavalo da smo za 1 kWh električne energije dobili 3 kWh toplinske energije. Vrijednost učinka dizalice topline može varirati ovisno o sezonalnosti i vrsti dizalice topline. Minimalno preporučena vrijednost COP-a iznosi 2.5, a prosječna vrijednost može iznositi 3.5 – 5 [18]. Za rashladni sustav faktor hlađenja  $K_C$  računa se kao omjer odvedene energije ( $Q_C$ ) iz sustava i uloženog rada ( $W_{in}$ ) potrebnog za odvođenje topline [19]. Uz pomoć četveroputnog povratnog ventila omogućena je dvojna upotreba dizalica topline u režimu grijanja i hlađenja [26]. Tako se postiže da unutarnji prostor, koji je npr. prije služio kao kondenzator, zamjeni ulogu s vanjskim prostorom i postane isparivač te predaje svoju toplinu vanjskom prostoru. Povratni ventil koristi klizni mehanizam kojim se regulira proces ovisno o željenom učinku. Klizni mehanizam spojen je na elektromagnet koji se regulira pomoću termostata. Utjecajem elektromagneta i stvaranjem diferencijalnog tlaka uz pomoć kompresora postiže se pomicanje kliznog elementa zvanog „kanu“ čime se ostvaruje izmjena protoka radne tvari.

## 2.2. Podjela dizalica topline prema toplinskom izvoru

Postoji više vrsta dizalica topline prema toplinskom izvoru iz kojeg radni medij preuzima toplinu: geotermalne, zračne i solarne.

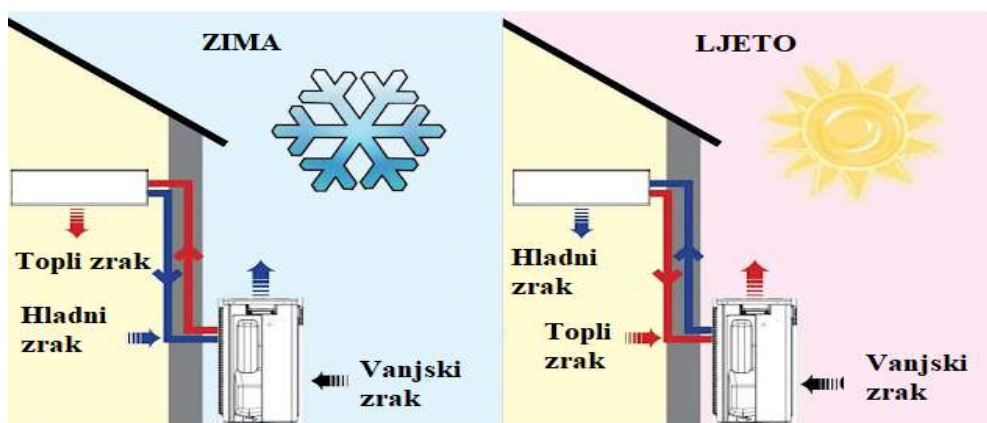
### 2.2.1. Geotermalne dizalice topline

Geotermalne dizalice topline koriste toplinu pohranjenu u tlu. Velika prednost ovog sustava je njegova visoka efikasnost neovisno o vanjskim utjecajima. Glavni nedostaci ove metode su složenost ugradnje i visoki troškovi.



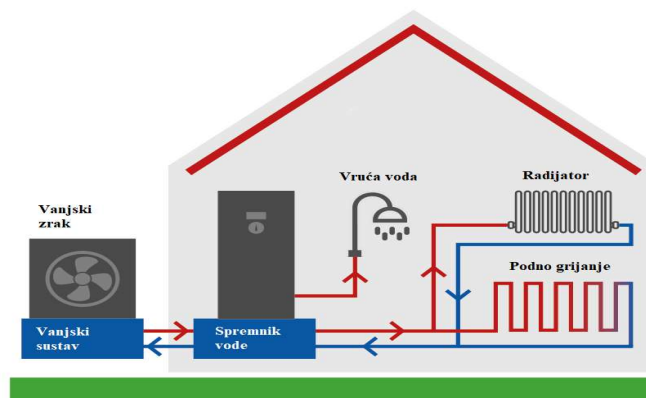
### 2.2.2. Dizalice topline sa zrakom kao toplinskim izvorom

Ova vrsta dizalica topline trenutno je najraširenija vrsta dizalica topline u svijetu zbog jednostavnosti i niskih troškova ugradnje. Komponente sustava su isparivač, kondenzator, ventilator (za efikasnije dovođenje topline do radne tvari), kompresor i prigušni ventil. Postoje dvije vrste dizalica topline sa zrakom kao toplinskim izvorom: sustavi zrak – zrak i zrak – voda. U sustavu zrak – zrak toplina preuzeta iz okoliša dovodi se do jedne ili više unutarnjih jedinica pomoću kojih se zagrijava zrak u prostoru (slika 12). Tijekom ljetnog razdoblja dizalica topline zrak – zrak može se koristiti i kao rashladni uređaj. U tom slučaju mijenjaju se uloge vanjske i unutarnje jedinice, prilikom čega vanjska jedinica postaje kondenzator.



Slika 12. Dizalica topline zrak - zrak [27]

U sustavu dizalice topline zrak – voda toplina iz radnog medija dovodi se do spremnika vode te ju zagrijava. Zagrijana voda može se primijeniti za ogrjevni sustav (radijatori ili podno grijanje) i za ostale potrebe kućanstva (slika 13) [20].



Slika 13. Dizalica topline zrak – voda [20]

Nedostatak ove tehnologije dolazi do izražaja prilikom niskih vanjskih temperatura i visoke vlage u zraku kada dolazi do smrzavanja zavojnice na vanjskom spremniku, čime se smanjuje efektivni učinak dizalice topline zbog potrebne energije za provedbu procesa odleđivanja [21].

### 2.2.3. Solarne dizalice topline

Solarne dizalice topline predstavljaju kombinirani sustav solarne energije i dizalice topline s kojim se poboljšavaju učinci prijašnje navedenih sustava. Primarno poboljšana stavka je postignuta veća temperatura na isparivaču, čime se smanjuje rad kompresora i postiže veći efektivni učinak procesa. U slučaju solarnih dizalica topline smanjena je temperatura radne tvari u kolektoru u odnosu na klasični sustav solarnih kolektora, čime se postiže i njihova veća efikasnost. Solarne dizalice topline nadalje možemo podijeliti na posredne dizalice topline i dizalice topline s direktnim isparavanjem radne tvari.

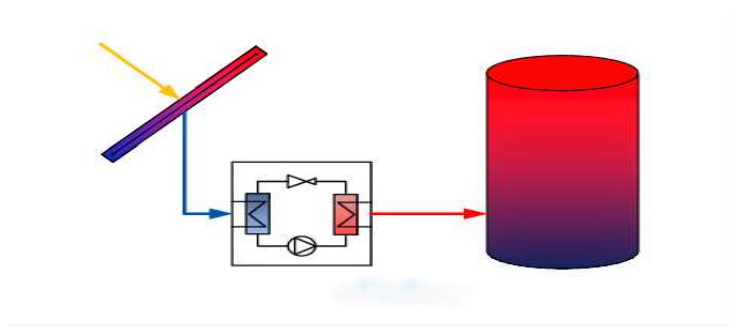
#### 2.2.3.1. Posredne dizalice topline

U sustavu posrednih dizalica topline medij koji kruži sustavom nije radna tvar, već posredni prijenosnik. Kao prijenosnik se može koristiti voda ili zrak.

Posredne dizalice topline mogu se podijeliti u tri različite kategorije:

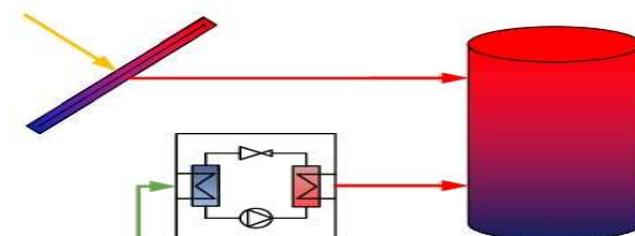
- serijski sustav;
- paralelni sustav;
- kombinirani sustav.

Kod serijskog sustava prijenosnik se zagrijava unutar kolektora te predaje radnoj tvari toplinu koju radna tvar zatim predaje spremniku tople vode. U takvim sustavima omogućeno je njihovo funkcioniranje i prilikom manje sunčanih dana (slika 14) [22].



Slika 14. Serijski sustav [23]

U paralelnom sustavu kolektor i dizalica topline djeluju sinergijski. Prilikom dana s visokom insolacijom opskrbljivač energije je sami kolektor. U danima manje insolacije i kada nisu ispunjeni uvjeti za dovoljno opskrbljivanje energijom solarnim sustavima, uključuje se dizalica topline i nadoknađuje nedostatak prikupljene energije unutar kolektora (slika 15). Velika prednost ovakvog sustava je mogućnost prestanka rada dizalice topline ukoliko su postignuti energetske zahtjevi uz pomoć kolektora.

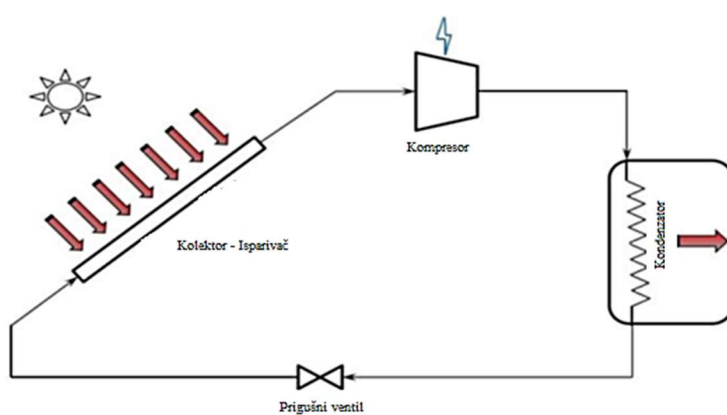


Slika 15. Paralelni sustav [29]



### 2.2.3.2. Dizalice topline s direktnim isparavanjem radne tvari

Kod dizalica topline s direktnim isparavanjem radne tvari ne koristi se posredni medij, poput vode ili zraka, već se unutar procesa koristi radna tvar. Proces je sastavljen kombinacijom dizalice topline i solarnog kolektora koji u ovom slučaju služi kao isparivač radne tvari. Unutar ovakvog procesa površina kolektora je neostakljena radi omogućavanja dodatnog prijenosa topline konvekcijom. Također, ukoliko se koristi neostakljeni kolektor moguć je i obrnut proces, odnosno moguće je postići da dizalica topline također služi kao rashladni sustav. Radna tvar se direktno isparava koristeći apsorbiranu sunčevu energiju ili koristeći toplinu samog okoliša u nedostatku insolacije. Isparena radna tvar zatim se komprimira unutar kompresora, dovodi se do kondenzatora gdje predaje toplinu sustavu za grijanje tople vode te se nakon toga odvodi do prigušnog ventila. Radnoj tvari na prigušnom ventilu smanjuju tlak i temperatura te se ona pretvara u mješavinu kapljevite i plinovite faze. Zatim se radna tvar vraća nazad do kolektora, čim se završava puni ciklus kružnog procesa (slika 20).



Slika 16. Proces direktnog isparavanja radne tvari [28]

U odnosu na posredne solarne dizalice topline, dizalice topline s direktnim isparivanjem tvari imaju brojne prednosti. Tako se kod direktnog isparavanja postižu više temperature isparavanja, manji gubici energije u kolektorima, viša učinkovitost, veći životni vijek kolektora, zbog nižih temperatura u kolektoru manji su i gubici energije, spriječena je mogućnost zamrzavanja cijevi i kolektora te se izbjegava njihova korozija. Sustav se sastoji od manjeg broja ugradbenih elemenata što smanjuje kompleksnost postavljanja, cijenu ugradnje i kasnijeg održavanja [24]. Izazov sustava direktnog isparavanja radne tvari je kontrola temperature. Iako postoji veća učinkovitost u odnosu na posredne uređaje u vidu smanjenja broja prijenosa topline, mora se poštivati određena razlika temperature između isparivača i okolišne temperature kako bi se postigla maksimalna učinkovitost. Tako se nastoji održati temperaturna razlika do  $10^{\circ}\text{C}$  između isparivača i okoliša. Veće temperaturne razlike uzrokuju manju učinkovitost sustava. Bitna stavka je i određivanje veličine solarnog kolektora u sustavu. Postavljanje određene veličine je bitno zbog količine apsorbirane energije koja mora biti usklađena s jačinom kompresora. Kvalitetno ujednačavanje isparivača i kompresora smanjuje energetske gubitke prilikom odvijanja procesa [24].

### 3. OSNOVNI PRORAČUN SOLARNE DIZALICE TOPLINE

U ovome poglavlju opisuju se osnovni parametri korišteni prilikom razvoja godišnjeg simulacijskog modela solarne dizalice topline s direktnim isparavanjem radne tvari unutar kolektora, odnosno isparivača. Postavlja se model solarne dizalice topline s neostakljenim kolektorom i direktnim isparavanjem radne tvari, odnosno kolektor je u ovome slučaju i isparivač radne tvari koja kruži kroz sustav. Radi se o razvijenom prototipu mobilne solarne dizalice topline s direktnim isparavanjem radne tvari prikazanom na slici 17.



Slika 17. Prototip mobilne solarne dizalice topline s direktnim isparavanjem radne tvari [25]

Model solarne dizalice topline postavlja se prema zahtijevanoj temperaturi vode u akumulacijskom spremniku te zadanim izvorima topline, odnosno ozračenju te temperaturi okolišnog zraka. Zahtijevani temperaturni interval vode u spremniku iznosi 50 – 55°C. Prema zadanom intervalu određuje se temperatura kondenzacije od 60°C.

Za preliminarni proračun koristi se temperatura isparavanja od 12°C, iako stvarne vrijednosti mogu znatno varirati u ovisnosti o vanjskim uvjetima, ozračenosti kolektora i ostalim faktorima koji mogu utjecati na izmjenu topline unutar kolektora. Za temperaturu pregrijanja, odnosno pothlađenja korištene su preporučene vrijednosti od 6°C, odnosno 4°C.

Parametri korišteni za osnovni proračun solarne dizalice topline dani su u tablici 1.

Tablica 1. Početni parametri za proračun solarne dizalice topline

$\vartheta_i$ , °C	12
$\vartheta_k$ , °C	60
$\vartheta_{preg}$ , °C	18
$\vartheta_{poth}$ , °C	56
$\Phi_{kol}$ , kW	1.5

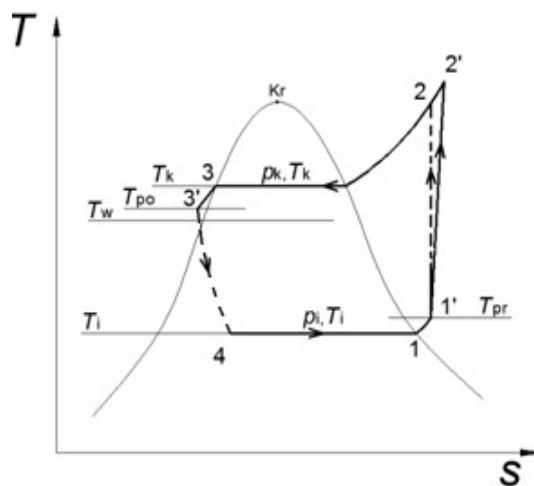
Gdje su:

$\vartheta_i$  temperatura isparavanja [°C]

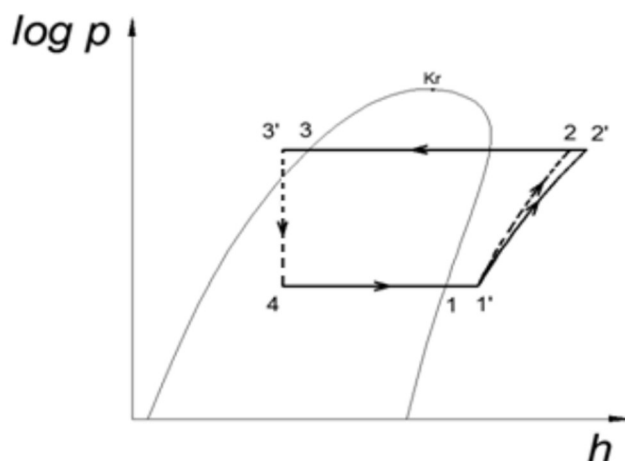
$\vartheta_k$  temperatura kondenzacije [°C]

- $\vartheta_{preg}$  temperatura pregrijanja [°C]  
 $\vartheta_{poth}$  temperatura pothlađenja kondenzata [°C]  
 $\Phi_{kol}$  srednja vrijednost učinka kolektora [kW]

Na slikama 18 i 19 prikazane su veličine stanja za radne točke unutar procesa.



Slika 18. Kružni proces solarne dizalice topline u  $T,s$  dijagramu [25]



Slika 19. Kružni proces solarne dizalice topline u  $\log p,h$  dijagramu [25]

Tablica 2. Vrijednosti radne tvari R134a u radnim točkama

Radna točka	$\vartheta_i$ [°C]	$p$ [bar]	$h$ [kJ/kg]	$s$ [kJ/(kg·K)]
1	12	4.43	405.43	1.7212
1'	18	4.43	410	1.74
2	70	16.818	439.69	1.74
2'	76	16.818	447.1	
3	60	16.818	287.5	
3'	55	16.818	279.47	
4	12	4.43	279.47	

Gdje su oznake za navedene vrijednosti:

$p$  = tlak [bar]

$h$  = specifična entalpija [kJ/kg]

$s$  = specifična entropija [kJ/(kg·K)]

Kao radni medij solarne dizalice topline koristi se radna tvar R134a. Radi se o tvari kemijskog sastava  $\text{CH}_2\text{FCF}_3$  (1,1,1,2-Tetrafluoroetan prema IUPAC-ovoj strukturi) koja pripada skupini halogenih ugljikovodika. Ima nisku temperaturu isparavanja ( $-26,3^\circ\text{C}$ ). R134a se primjenjuje radi minimalnih štetnih utjecaja na ozonski omotač te radi niskih tlakova kondenzacije, međutim treba istaknuti njegov visok potencijal globalnog zatopljenja.

Nakon definiranih početnih vrijednosti temperatura radne tvari i relevantnih vrijednosti fizikalnih svojstava u tim točkama, sljedeći korak je proračun masenog protoka radne tvari kako bi se mogla odrediti snaga kompresora te učinkovitost dizalice topline u zadanim uvjetima.

Proračun protoka mase radne tvari R134a:

$$q_{mRT} = \frac{\Phi_o}{h_{1'} - h_4} = 0.0115 \text{ [kg/s]} \quad (1)$$

Snaga kompresora računa se prema:

$$P_{komp} = q_{mRT} \cdot (h_2 - h_{1'}) = 341 \text{ [W]} \quad (2)$$

Entalpija i temperatura u točki 2' računaju se prema:

$$h_{2'} = h_1 + \frac{P_{komp}}{q_{mRT}} \left[ \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right] \quad (3)$$

Ogrjevni učinak kondenzatora dobiven je iz izračunatih entalpija i protočne mase radne tvari:

$$\Phi_K = q_{mRT} \cdot (h_{2'} - h_{3'}) \quad (4)$$

$$\Phi_K = q_{mRT} \cdot (h_{2'} - h_{3'}) = 0,0115 \cdot (447,1 - 279,47) = 1.93 \text{ kW}$$

Toplinski množitelj (COP), dobiven iz omjera ogrjevnog učinka kondenzatora i stvarne snage kompresora:

$$\varepsilon_{gr} = \frac{\Phi_K}{P_{komp}} \quad (5)$$

U tablici 3 dani su podaci za izračunate početne vrijednosti modela.

Tablica 3. Vrijednosti modela dobivene proračunom

$q_{mRT}$ [kg/s] / [kg/h]	0.0115/41.4
$P_{komp}$ [W]	341
$h_{2'}$ [kJ/kg]	447.1
$\vartheta_{2'}$ [ $^\circ\text{C}$ ]	76

$\Phi_K$ [kW]	1.93
$\varepsilon_{gr}$	5.66

#### 4. MATEMATIČKI MODEL SOLARNE DIZALICE TOPLINE

Numerička simulacija godišnjeg modela solarne dizalice topline započinje postavljanjem početnih parametara potrebnih za izračun simulacije. Osnovni proračun izrađen je prema godišnjim i satnim vrijednostima okoliša (temperatura i insolacija), preuzetim sa stranice NASA - Power data access viewer, za gradove Zagreb i Split za 2021. godinu [26].

Iz mjerenih satnih vrijednosti insolacije potrebno je izračunati količinu zračenja dospjelu na površinu solarnog kolektora. Simulacija modela dizalice topline rađena je uz pomoć tabličnog kalkulatora Microsoft Excel. Na ozračenost, osim vremenskih uvjeta (naoblaka, vlaga, vjetar), utječe i kut između položaja Sunca i postavljenog modula kolektora. Kada se kolektor i položaj Sunca nalaze pod kutem od 90° postiže se maksimalna vrijednost dozračene energije. Međutim, kako se mijenja položaj Sunca kroz godinu, tako se mijenja i vrijednost te energije.

Prvi korak je postavljanje kuta deklinacije Sunca koji se računa prema formuli:

$$\delta = 23.45^\circ * \sin\left[\frac{360}{365} * (284 + d)\right] \quad (6)$$

gdje vrijednost od 23.45° predstavlja kut nagiba Zemljine osi, a oznaka  $d$  dan unutar godine. Prema dobivenom nagibu i geografskoj širini mjernog mjesta računa se položaj Sunca ( $\alpha_s$ ):

$$\alpha_s = 90^\circ - \Phi + \delta \quad (7)$$

Iz položaja Sunca postavlja se vrijednost Sunčevog zračenja na vodoravnu površinu ( $S_{hor}$ ):

$$S_{hor} = S_{ozr} \sin \alpha_s \quad (8)$$

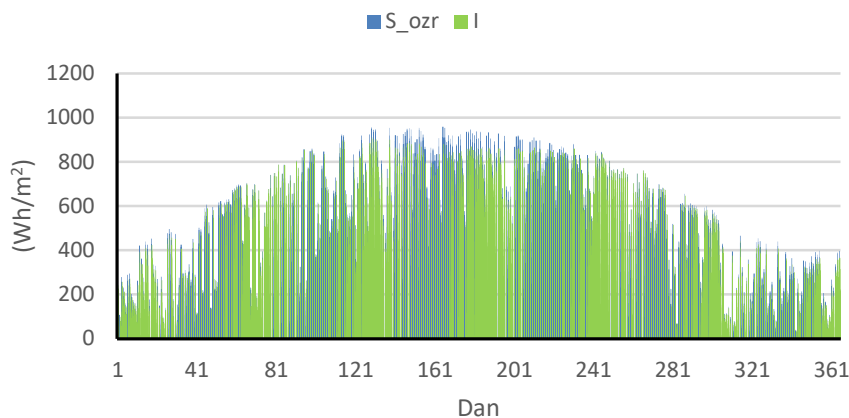
$S_{ozr}$  – mjerena satna insolacija (Wh/m<sup>2</sup>)

Upadna energija na nagnutu površinu:

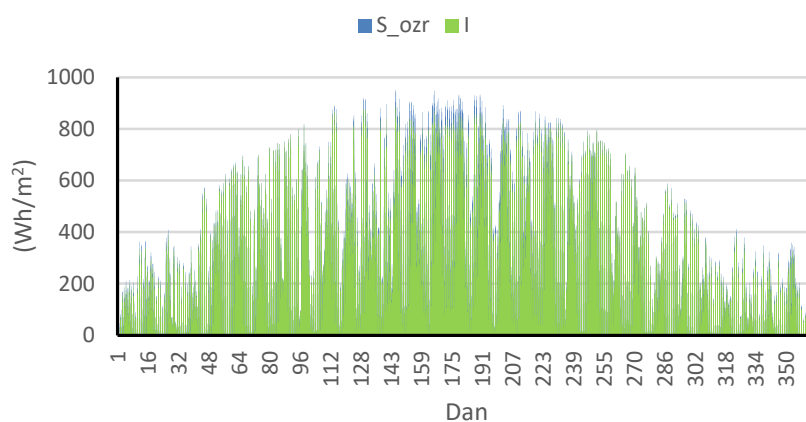
$$I_{sol} = \frac{S_{hor} * \sin(\alpha_s + \beta)}{\sin \alpha_s} \quad (9)$$

$\beta$  – nagnutost kolektora

Nagnutost kolektora postavlja se prema geografskoj širini mjernog mjesta, odnosno za Zagreb to iznosi 45.8° i Split 43°C. Na slikama 20 i 21 za gradove Zagreb i Split dani su godišnji prikazi atmosferskog i upadnog zračenja na nagnutu površinu.



Slika 20. Atmosfersko i upadno zračenje na nagnutu površinu za Split



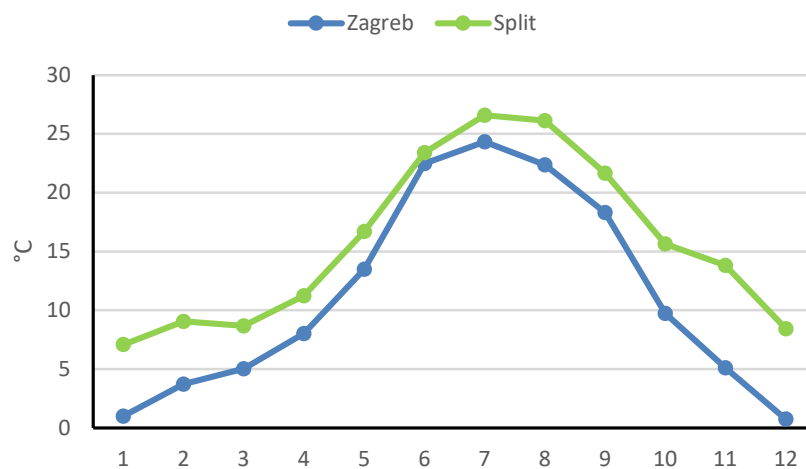
Slika 21. Atmosfersko i upadno zračenje na nagnutu površinu za Zagreb

Tako su izračunate godišnje količine atmosferskog i upadnog zračenja:

Zagreb – 1,391/ 1,333 (kWh/m<sup>2</sup>)

Split – 1,587/ 1,522 (kWh/m<sup>2</sup>)

Sljedeća slika daje usporedni prikaz prosječnih mjesečnih temperatura Zagreba i Splita.



Slika 22. Prosječne mjesečne temperature Zagreba i Splita

Prema poznatim vrijednostima satne temperature i upadnog zračenja računa se učinkovitost kolektora prema formuli [25]:

$$\eta_{kol} = 0.8438 - A \left( \frac{T_{kol,sr} - T_{ok,sr}}{I_{sol}} \right) - B \left( \frac{T_{kol,sr} - T_{ok,sr}}{I_{sol}} \right)^2 \quad (10)$$

gdje su:

$T_{kol,sr}$  [°C] – srednja temperatura radne tvari u kolektoru (12°C za ovaj proračun)

$T_{ok,sr}$  [°C] – mjerena srednja satna temperatura zraka

Koeficijenti A i B dobivaju se analizom ispitivanja ponašanja kolektora unutar nekoliko karakterističnih radnih točaka. Za pločasti kolektor modela CPK7210N tvrtke Centrometal d.o.o. njihove korištene vrijednosti iznose:

A = 4.1989

B = 1.2491.

Prema dobivenoj trenutnoj učinkovitosti kolektora, njegovoj površini i satnoj vrijednosti insolacije, računa se prikupljena energija na pločastim kolektorima tijekom jednog sata:

$$Q_{kol} = \eta_{kol} \cdot I_{sol} \cdot A_{kol} \cdot t [\text{kWh}] \quad (11)$$

$A_{kol}$  [m<sup>2</sup>] – površina pločastog kolektora (1.9 m<sup>2</sup>)

Toplina predana u kondenzatoru predstavlja sumu apsorbirane topline na kolektoru i rada kompresora :

$$Q_{kon} = Q_{kol} + W_{comp}, [\text{kWh}] \quad (12)$$

gdje rad kompresora iznosi 300 Wh. Razlog odabira niže snage, nego je dobiveno proračunom u prethodnom poglavlju, leži u činjenici da je pojednostavljeno uzeta niža konstantna snaga kompresora tijekom cijele godine uz pretpostavku da je to srednja vrijednost snage tijekom godine koja je u eksperimentalnim mjerenjima varirala od 150 skoro 500 W. Ovakvo pojednostavljenje, osim što bitno olakšava proračun, ne predstavlja značajnu grešku na razini vremenskog horizonta od jedne godine.

Satna vrijednost akumulirane topline u spremniku vode računa se prema:

$$Q_{acum} = Q_{kon} - Q_{sp} + Q_p [\text{kWh}] \quad (13)$$

$Q_{sp}$  – energija koja se odnosi iz spremnika potrošnjom tople vode

$Q_p$  – električna energija pomoćnog grijača potrebna za eventualno dogrijavanje vode kada temperatura u spremniku padne ispod 38°C

Za potrošnju tople vode korištene su četiri satne vrijednosti za svaki dan (model rađen za kućanstvo sa četveročlanom obitelji). Pretpostavljene potrošnje postavljene su u 7, 8, 20 i 21 sat uz dnevnu potrošnju od 50 l tople vode po ukućanu.

Energija koja se odnosi iz spremnika potrošnjom tople vode:



$$Q_{sp} = \frac{50 * c_{H2O}}{3600000 * (T_{w1} - T_{w0})} [kWh] \quad (14)$$

$c_{H2O}$  – Specifični toplinski kapacitet vode [J/(kg K)]

Temperatura vode u spremniku računa se prema formuli:

$$\vartheta_w = \frac{Q_{acum} * 3600000}{c_{H2O} * V} - q_g t \quad (15)$$

V – Volumen spremnika vode [l]

$q_g$  – toplinski gubici spremnika vode prema okolini °C/h

Prvi korak u proračunu toplinskih gubitaka spremnika je definiranje gustoće toplinskog toka kroz stijenku. Parametri spremnika korišteni za proračun navedeni su u tablici 4.

Tablica 4. Dimenzije spremnika tople vode

Vanjski promjer	$d_v$ [m]	0.6
Unutarnji promjer	$d_u$ [m]	0.5
Koef. prijenosa topline na vanjskoj strani spremnika	$\alpha$ [W/(m <sup>2</sup> K)]	10
Visina spremnika	L [m]	1.5
Toplinska provodnost izolacije	$\lambda$ [W/(m K)]	45

Pretpostavlja se stacionarno 1D provođenje topline kroz višeslojnu stijenku cijevi. Toplinski tok kroz stijenku računa se prema izrazu:

$$q_g = \frac{\vartheta_1 - \vartheta_2}{\frac{r_v}{r_u * \alpha} + \frac{r_v}{\lambda} * \ln \frac{r_v}{r_u} + \frac{1}{\alpha}} \quad (16)$$

Sljedeći korak je računanje ploštine vanjske površine spremnika prema jednadžbi:

$$A_c = d * \pi * L [m^2] \quad (17)$$

Konačni izračun gubitka topline spremnika računa se prema izrazu:

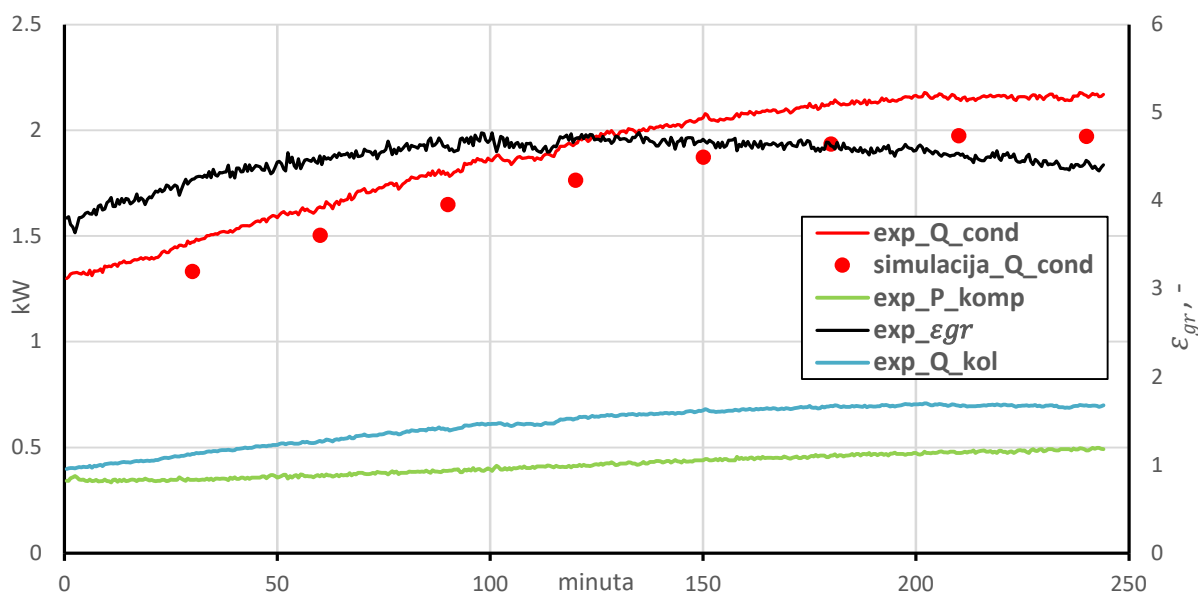
$$q_g = 5.7143 * 10^{-3} * (\vartheta_w - 20) [°C/h]$$

Na kraju valja istaknuti kako se tijekom sati sa slabijom insolacijom/nizim okolišnim temperaturama i s većom potrošnjom vode, aktivira električni pomoćni grijač ukoliko temperatura vode u spremniku padne ispod 38°C. Taj grijač dogrijava vodu u spremniku do temperature od 60°C u vremenskom razdoblju od jednog sata.

## 5. VALIDACIJA RAZVIJENOG MODELA

Prethodno opisani simulacijski model potrebno je validirati na eksperimentalnim podacima kako bismo se uvjerali u njegovu valjanost prije nego ga upotrijebimo za godišnju simulaciju sustava. Eksperimentalni podaci preuzeti su iz reference [25] te se odnose na 4 sata rada.

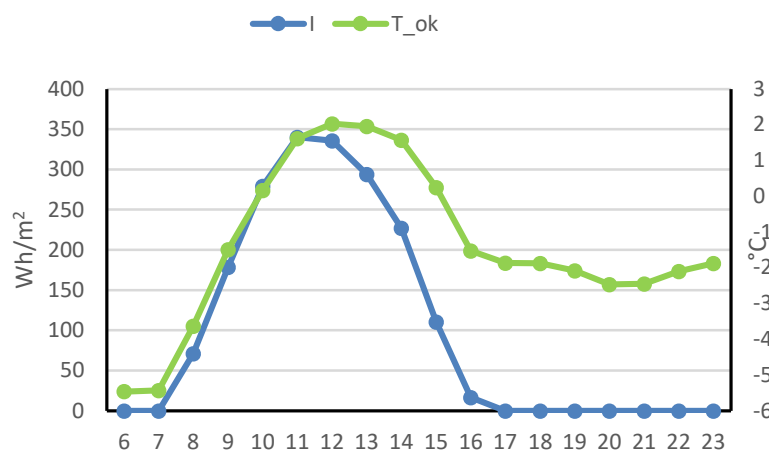
Sa slike 23 vidljivo je da u eksperimentu ozračenje kolektora kontinuirano raste, što zajedno s porastom temperature u spremniku (a time i temperature u kondenzatoru) uzrokuje i lagani porast snage kompresora s početnih 350 na 500 W pri kraju mjerenja. Stoga se stabilizacijom ozračenja nakon 150. minute mjerenja COP počinje također ujednačavati, budući je porasla snaga kompresora. Potrebno je napomenuti kako je, zbog upitne točnosti mjerenja iz eksperimenta, kao sirovi ulazni podatak uzeto ozračenje kolektora i snaga kompresora, dok je na temelju tih podataka izračunat  $Q_{\text{cond}}$  i COP u eksperimentu. Simulacijski model razvijen u ovom radu prati trend eksperimentalnih rezultata sa zadovoljavajućom točnosti, a konstantno odstupanje od cijelog mjerenja se može objasniti prethodno spomenutom pretpostavkom o izabranoj nižoj snazi kompresora. Može se zaključiti kako je razvijen simulacijski model dovoljno točan i pogodan za daljnju analizu koja je ujedno i glavna svrha ovog rada.



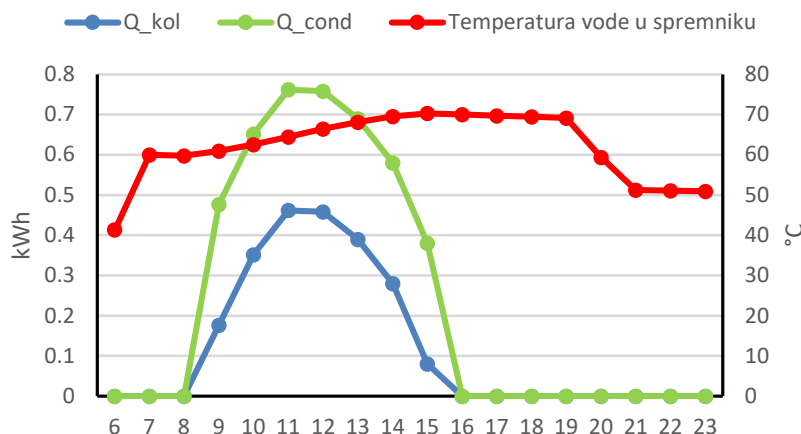
Slika 23. Usporedba simulacije i eksperimentalnih mjerenja [25]

## 6. REZULTATI I DISKUSIJA

Nakon provedene simulacije dobivene su godišnje vrijednosti solarne dizalice topline, korištene pri različitim vremenskim uvjetima. Za rad sustava određen je temperaturni interval od 38 – 60 °C za pomoćni sustav i 95 °C za dizalicu topline u kojem se održava voda unutar spremnika (prethodno određeno 300l). U trenucima kada nema dovoljne ozračenosti i temperatura vode u spremniku padne ispod 38 °C postavljen je pomoćni sustav kojim se računa i dodaje potrebna energija u periodu od jednog sata kako bi se od trenutne temperature voda dovela do razine od 60 °C.



Slika 24. Vremenski podaci za 15.01 (Zagreb)

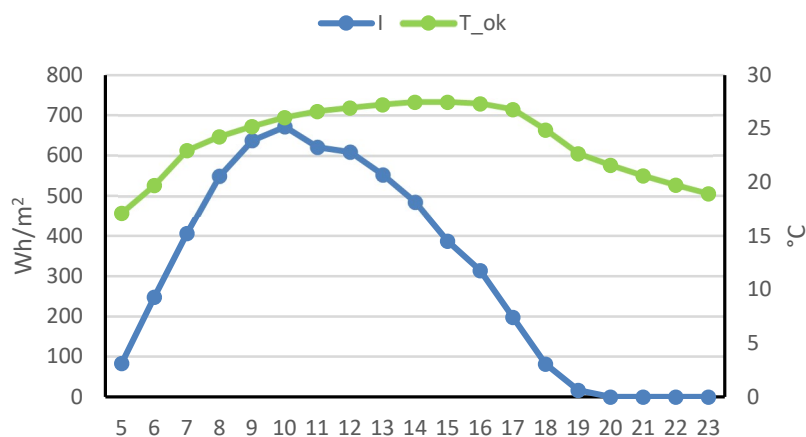


Slika 25. Rezultati simulacije za 15.01.2021 (Zagreb)

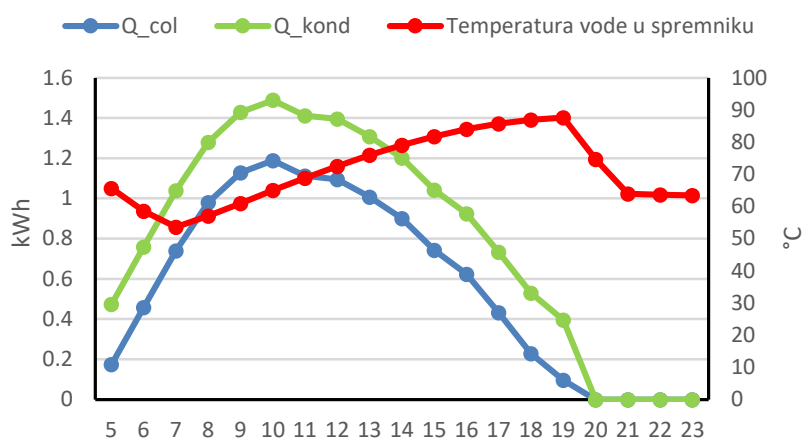
Radi lakšeg razumijevanja obrađenih podataka i različitih uvjeta rada dizalice topline, u nastavku teksta dan je prikaz karakterističnog ljetnog i zimskog dana za mjerene gradove. Na slikama 24 i 25 prikazani su vremenski podaci i podaci simulacije za Zagreb za 15.01.2021. Prema slici 25 može se vidjeti nagli rast temperature vode od 6 do 7 sati uzrokovano uključivanjem pomoćnog sustava. U 8 sati iako je prisutna insolacija od 70 Wh/m<sup>2</sup>, zbog niske temperature okoliša ne ostvaruje se potrebna energija za pokretanje sustava. Dolazi do paljenja pomoćnog sustava radi pada temperature vode ispod 38 °C uzrokovano nedovoljnom količinom insolacije tijekom prethodnog dana te definiranim satnim vrijednostima potrošnje vode. U

razdoblju od 9 do 16 sati sustav samostalno zagrijava vodu do 70 °C. Od 16 do 19 sati nema više dovoljne insolacije na kolektoru, nema dovedene dodatne energije do kondenzatora, ali nema ni dodatne potrošnje vode, stoga razina vode ostaje na 70 °C.

U 20 i 21 sat prethodno definirane dnevne potrošnje vode smanjuju temperaturu vode na 50 °C. Ukupna energija dobivena dizalicom topline iznosi 4.3 kWh, dok energija dovedena iz pomoćnog sustava iznosi 7.9 kWh. Prosječna vrijednost toplinskog množitelja iznosi 2.0.



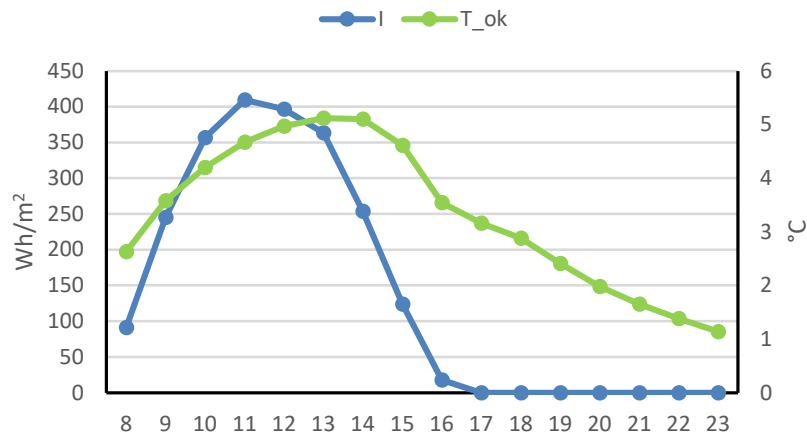
Slika 26. Vremenski podaci za 15.07.2021 (Zagreb)



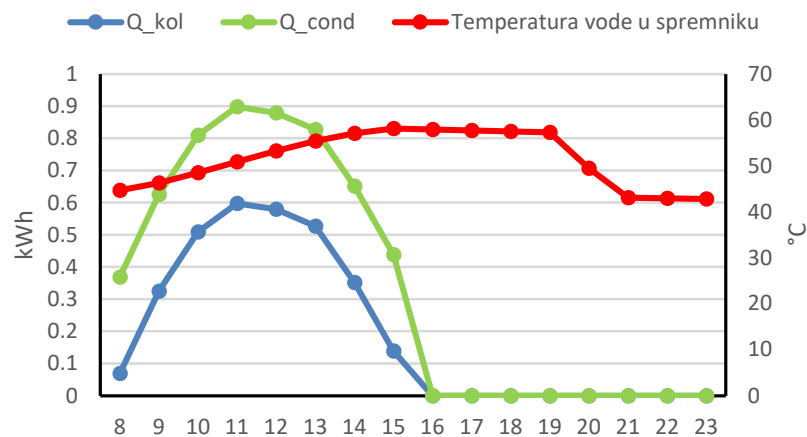
Slika 27. Rezultati simulacije za 15.07.2021 (Zagreb)

U slučaju analize za 15.07. (slika 27) radi dovoljnih količina insolacije prilikom prethodnog dana, temperatura vode na početku dana iznosi 60 °C. Prvo paljenje sustava zabilježeno je u 5 sati zbog dovoljne insolacije i temperature okoliša. U 6 i 7 sati vidljiv je pad temperature vode uzrokovan definiranim potrošnjama vode, ali zbog rada dizalice topline, temperatura vode održava se iznad 50 °C. U rasponu 8 – 19 sati uz rad dizalice topline temperatura vode u spremniku podiže se do 90 °C, kada počinje pad uzrokovan potrošnjama vode te na kraju dana temperatura vode se ponovno vraća na 60 °C. Ukupna količina dovedene energije iznosi 14.5 kWh dok je prosječna vrijednost toplinskog množitelja 3.4. Za mjereni dan nije bilo potrebe za uključivanjem pomoćnog sustava.

Vremenske vrijednosti i vrijednosti simulacije karakterističnog dana za grad Split dani su na slikama 28 i 29.



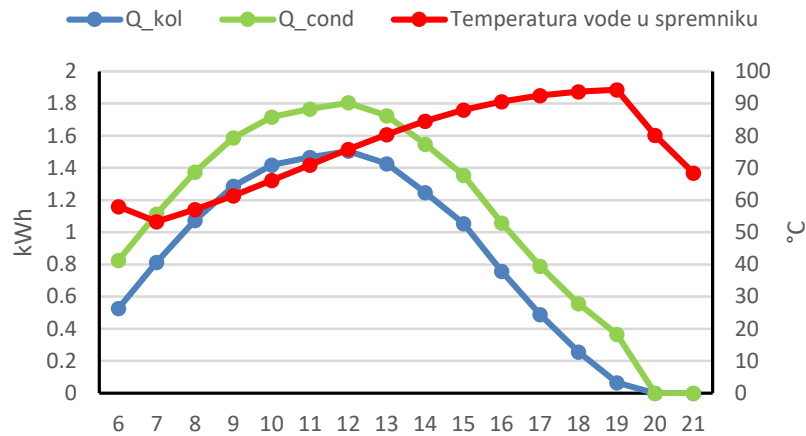
Slika 28. Vremenski podaci za 15.01.2021 (Split)



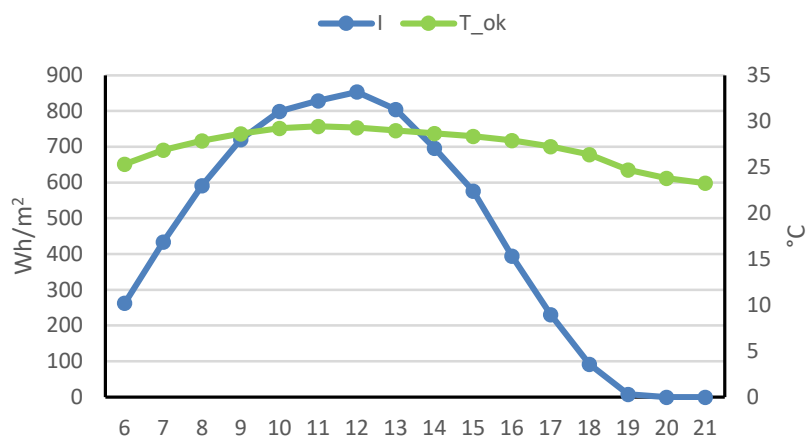
Slika 29. Rezultati simulacije za 15.01.2021 (Split)

Prema slici 29 vidljivo je kako, nakon dvije vrijednosti potrošnje vode u 8 sati, temperatura spremnika vode započinje na razini iznad 40 °C. To je pokazatelj prisutnosti dovoljne insolacije tijekom prethodnog dana te nije bilo potrebe za paljenjem pomoćnog sustava. Dizalica topline u rasponu 8 – 16 sati postiže temperaturu vode preko 50 °C. Nakon definiranih vrijednosti potrošnje vode na kraju dana temperatura vode iznosi 40 °C. Ukupna dovedena količina energije iznosi 5.5 kWh, a toplinski množitelj 2.3.

Rezultati simulacije za datum 15.07.2021. godine (slike 30 i 31) za grad Split prikazuju u 7 sati nakon potrošnje, temperaturu vode iznad 50 °C. Tijekom dana, u rasponu 8 – 19 sati temperatura vode raste do 95 stupnjeva kada se dizalica topline gasi, ali i prestaje insolacija sustava. U 20 i 21 sat slijede dvije vrijednosti potrošnje vode, ali dan završava sa visokom temperaturom vode, na 70 °C.



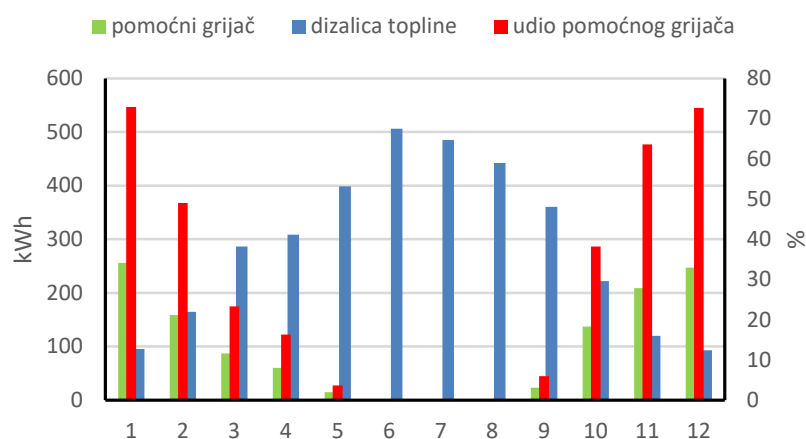
Slika 30. Rezultati simulacije za 15.07.2021 (Split)



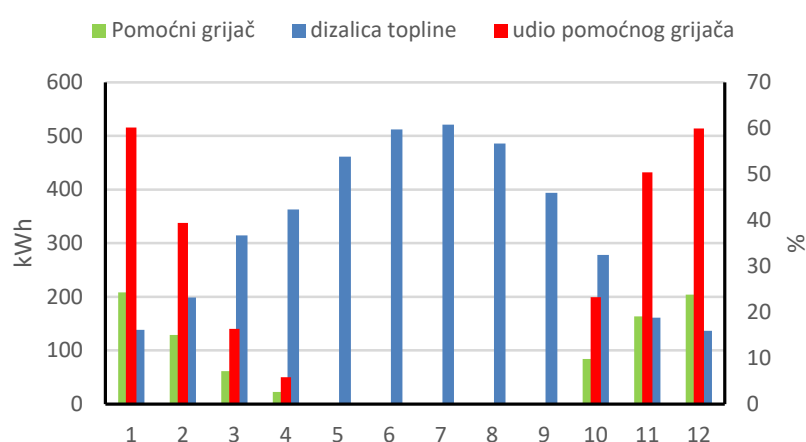
Slika 31. Vremenski podaci za 15.07.2021 (Split)

Na slikama 32 i 33 dane su mjesečne količine energije dobivene od dizalice topline u usporedbi s energijom dobivenom iz pomoćnog sustava. Za Zagreb su vidljive znatne potrebe za dodatnom energijom u 1. i 12. mjesecu, preko 70 %, te preko 50 % za 2. i 11. mjesec. Za 6. – 8. mjesec nema potrebe za pomoćnim grijačem.

Za Split su također značajne potrebe za dodatnom energijom tijekom 1. i 12. mjeseca, preko 60 % te tijekom 11. mjeseca, preko 50 %. U razdoblju 5. – 9. mjeseca nema potrebe za paljenjem pomoćnog sustava.



Slika 32. Mjesečni prikaz dobivene energije (Zagreb)



Slika 33. Mjesečni prikaz dobivene energije (Split)

U tablicama 5 i 6 prikazani su sumarni podaci godišnje simulacije za Zagreb i Split.

Tablica 5. Sumarni godišnji podaci za Zagreb

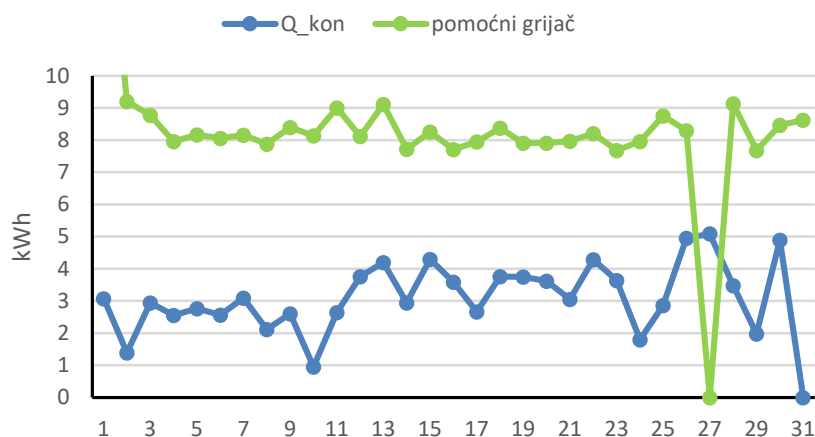
Mjesec	Insolacija [kWh/m <sup>2</sup> ]	Dizalica topline [kWh]	Pomoćni grijač, [kWh]	Ukupna energija [kWh]	Toplinski množitelj
1	34	95	256	352	1.16
2	64	165	159	324	1.44
3	123	286	87	373	1.84
4	126	309	60	369	1.91
5	156	398	15	413	2.18
6	203	506	0	506	2.70
7	177	485	0	485	2.53
8	166	442	0	442	2.39
9	137	360	23	383	2.14
10	77	222	137	359	1.56
11	37	120	209	329	1.23
12	32	93	247	340	1.15
<b>Ukupno</b>	<b>1332</b>	<b>3481</b>	<b>1193</b>	<b>4675</b>	<b>-</b>

Tablica 6. Sumarni godišnji podaci za Split

Mjesec	Insolacija [kWh/m <sup>2</sup> ]	Dizalica topline [kWh]	Pomoćni grijač, [kWh]	Ukupna energija [kWh]	Toplinski množitelj
1	43	138	208	346	1.27
2	73	199	129	328	1.56
3	133	314	61	376	1.93
4	151	362	23	385	2.13
5	189	461	0	461	2.45
6	205	512	0	512	2.73
7	204	521	0	521	2.71
8	189	485	0	485	2.59
9	154	394	0	394	2.29
10	99	278	84	362	1.78
11	42	161	164	325	1.34
12	41	136	204	340	1.27
<b>Ukupno</b>	<b>1523</b>	<b>3961</b>	<b>873</b>	<b>4835</b>	-

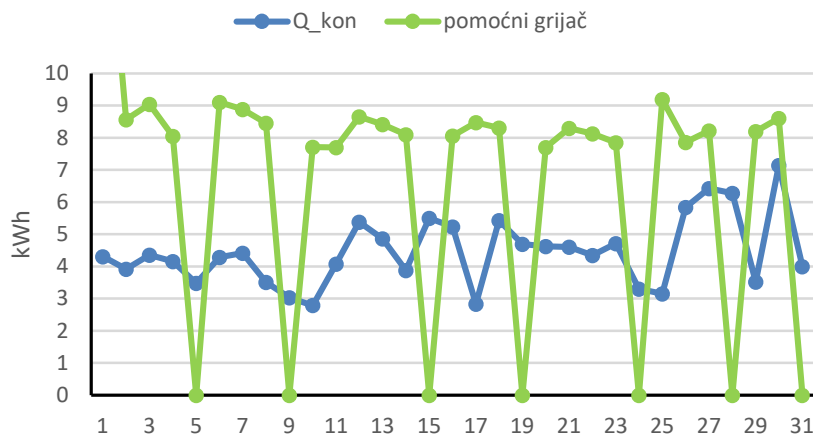
Na slikama 34 i 35 prikazani su dnevni podaci dovedene energije s dizalicom topline i energije dovedene s pomoćnim grijačem za siječanj. Prema prikazanim rezultatima može se vidjeti kako je za solarnu dizalicu topline u Zagrebu prisutna gotovo svakodnevna potreba za uključivanjem pomoćnog grijača kako bi se mogla održati tražena temperatura vode, dok vrijednost energije dovedene samostalno iz sustava varira između 1 i 5 kWh.

Za Split je vidljiva nešto povoljnija situacija, ali je i u ovom slučaju prisutna značajna potreba za dodatnom energijom, preko 20 dana. Vrijednosti dnevne energije dovedene sa dizalicom topline kreću se između 3 do maksimalnih 7 kWh.



Slika 34. Pregled potrebe za pomoćnim grijačem tijekom siječnja u Zagrebu





Slika 35. Pregled potrebe za pomoćnim grijačem tijekom siječnja u Splitu

### 6.1. Usporedba izvora grijanja i analiza troškova

Usporedba solarne dizalice topline prema konvencionalnim vrstama grijanja vode postavljena je prema godišnjoj količini energije (izražene u kWh) potrebnoj za održavanje tražene razine tople vode. Kao primjer korišten je godišnji model solarne dizalice topline rađene za grad Zagreb. Godišnja dobivena energija sustava iznosi 4,675 kWh. godišnji rad kompresora je 2,472 kWh dok Energija dobivena iz pomoćnog sustava iznosi 1,193 kWh.

Troškovi dizalice topline dobiveni su umnoškom rada kompresora sa postavljenom cijenom električne energije od 0.15 €/kWh [27].

$$\begin{aligned} \text{trošak}_{\text{kompresor}} &= P_{\text{kompresor}} * \text{cijena energije} \\ \text{trošak}_{\text{kompresor}} &= 370.80 \text{ €} \end{aligned}$$

Na godišnji trošak dodana je energija iz pomoćnog sustava (električni bojler) čija efikasnost iznosi 100% pa je potrebna energija iznosi:

$$\begin{aligned} \text{ukupni trošak} &= \text{trošak}_{\text{kompresor}} + \text{pomoćni sustav} \\ \text{ukupni trošak} &= 549.75 \text{ €} \end{aligned}$$

Za električni sustav grijanja vode ukupna količina potrebne energije pomnožena je sa cijenom električne energije:

$$\begin{aligned} \text{električni sustav} &= 4675 * 0.15 \\ \text{električni sustav} &= 701.25 \text{ €} \end{aligned}$$

Plinski sustav grijanja ima pretpostavljenu efikasnost od 90 % [28] i cijenu od 0.0668 €/kWh [29] pa trošak sustava iznosi:

$$\begin{aligned} \text{plinski sustav} &= 4,675 * 1.11 * 0.0668 \\ \text{plinski sustav} &= 346.64 \text{ €} \end{aligned}$$

Sustav grijanja vode na lož ulje ima efikasnost od 80 % [30] pa se količina utrošene energije računa prema:

$$\begin{aligned} \text{lož ulje} &= 4,675 * 1.25 \\ \text{lož ulje} &= 5,843.75 \text{ kWh} \end{aligned}$$

Po 1l lož ulja dobije se 10.35 kWh energije [31] pa potrebna godišnja količina lož ulja iznosi:

$$\text{količina lož ulja} = \frac{5,843.75}{10.35}$$

$$\text{količina lož ulja} = 564.61l$$

Cijena 1l lož ulja iznosi 0,95 € [32] pa ukupni godišnji trošak iznosi:

$$\text{Lož ulje}_{\text{ukupno}} = 536.38 \text{ €}$$

U tablici 7 prikazani su troškovi pojedine komponente dizalice topline

Tablica 7. Troškovi ugradnje sustava solarne dizalice topline

Ekspanzijski ventil [33]	262 €
Kompresor [34]	226 €
Kondenzator [35]	462 €
Isparivač/kolektor [36]	2,012 €
<b>Ukupno</b>	<b>2,962 €</b>

Prema prikazanim podacima vidljivo je kako u ovome trenutku solarna dizalica topline u odnosu na izvore grijanja (plin, lož ulje) zbog visokih troškova ulaganja i viših godišnjih troškova nije isplativa.

U usporedbi sa električnom energijom godišnja ušteda dizalice topline iznosi:

$$\begin{aligned} \text{Ušteda} &= 701.25\text{€} - 549.75\text{€} \\ \text{Ušteda} &= 151.5 \text{ €} \end{aligned}$$

Kako bi se moglo prikazati vrijeme povrata u odnosu na električnu energiju potrebno je napraviti omjer ulaganja u sustav prema godišnjim uštedama:

$$\text{Vrijeme povrata} = \frac{2,962 \text{ €}}{151.5 \text{ €}}$$

$$\text{Vrijeme povrata} = 20 \text{ godina}$$

Na isti način provedena je usporedba troškova pripreme potrošnje tople vode za Split, a čiji su rezultati prikazani u tablici 8. Za godišnju simulaciju dobivena je vrijednost od 4835 kWh energije potrebne za pripremu tople vode. U ovome slučaju sustav je isplativiji nego za Zagreb zbog većih količina insolacije i većeg toplinskog množitelja.

Tablica 8. usporedba godišnjih troškova za Split

	Dizalica topline	El. Energija	Prirodni plin	Lož ulje
Godišnji trošak	328.25 €	725.24 €	358.5 €	554.73 €
Godišnja ušteda	-	397 €	30.25 €	226.73 €
Vrijeme povrata	-	7.5 godina	98 godina	13 godina

Završno je napravljena usporedba godišnjih emisija CO<sub>2</sub> svakog od navedenih izvora grijanja za grad Zagreb. Za električnu energiju se koristi emisijski faktor od 0.132 kg CO<sub>2</sub>/ kWh [37]. Tako za dizalicu topline se koristi:

$$\begin{aligned} \text{emisije CO}_2 &= 0.132 * (2472 + 1193) \\ \text{emisije CO}_2 &= 483.78 \text{ kg} \end{aligned}$$

Za električnu energiju iznosi:

$$\begin{aligned} \text{emisije CO}_2 &= 4675 * 0.132 \\ \text{emisije CO}_2 &= 617.1 \text{ kg} \end{aligned}$$

Za prirodni plin emisijski faktor iznosi 0.203 kg CO<sub>2</sub> /kWh [38] pa je godišnji iznos:

$$\begin{aligned} \text{emisije CO}_2 &= 5,377 \text{ kWh} * 0.203 \\ \text{emisije CO}_2 &= 1091 \text{ kg} \end{aligned}$$

Lož ulje ima emisijski faktor od 2.96 kg CO<sub>2</sub> po litri [38] pa je konačni izračun:

$$\begin{aligned} \text{emisije CO}_2 &= 2.96 * 542 \text{ l} \\ \text{emisije CO}_2 &= 1604 \text{ kg} \end{aligned}$$

## 7. ZAKLJUČAK

U radu su prikazane godišnje vrijednosti solarnog zračenja za dva mjerena grada, Zagreb i Split. Prema mjerenim vrijednostima izrađeni su matematički godišnji modeli solarne dizalice topline kako bi se prikazala i usporedila učinkovitost rada sustava prilikom različitih uvjeta. Unutar modela definirani su temperaturni uvjeti vode unutar zagrijavanog spremnika prema kojem se bazira rad dizalice topline, odnosno uključivanju i isključivanju sustava. Kako bi se što realnije prikazala stvarna dinamika korištenja, u sustav su uključene definirane satne vrijednosti potrošnje vode.

Radi boljeg razumijevanja ponašanja sustava, dan je prikaz karakterističnog dana gdje su za dva grada dane izračunate satne vrijednosti simulacije za jedan ljetni i jedan zimski dan te je prikazana usporedba rada sustava prema dnevnim vrijednostima za jedan mjesec. Uspoređeni su mjesečni omjeri energije dovedene unutar sustava dizalice topline prema uloženom radu te prikazane potrebe za dodatnom energijom. Također je dana usporedba troškova grijanja solarne dizalice topline naprema konvencionalnim sustavima te razdoblje povrata kako bi se dala procjena isplativosti projekta. Završno je napravljena usporedba godišnjih emisija CO<sub>2</sub> kako bi se osim isplativosti sustava prikazali učinci pojedinog sustava na okoliš.

Prema rezultatima simulacije može se vidjeti bitna razlika u efikasnosti među sustavima ovisno o geografskom položaju i vremenskim uvjetima. Primjetne su značajne razlike u količini dovedene energije sustavu, temperaturnom rasponu grijane vode u spremniku te potrebama za dodatnom energijom iz pomoćnog sustava. Prema prikazanim mjesečnim vrijednostima vidljive razlike u mogućnostima samostalnog održavanja razine tople vode prema mjerenim gradovima. U usporedbi sa konvencionalnim sustavima grijanja, sa ekološkog aspekta, solarne dizalice topline predstavljaju prihvatljiviju alternativu u odnosu na ostale izvore grijanja.

U usporedbi ekonomske isplativosti sustavi solarne dizalice topline, za dva promatrana grada dobivene su različite vrijednosti isplativosti ugradnje sustava. Za sustav rađen za Zagreb izračunate su godišnje potrošnje veće u odnosu prema ostalim izvorima te, uz visoke troškove instalacije, sustav nije isplativ. Za Split su izračunate niže vrijednosti godišnje potrošnje u odnosu na ostale izvore, ali zbog visokih troškova početne instalacije potrebno je određeno razdoblje kako bi se ostvario povrat novca uloženog u instalaciju sustava.

**LITERATURA**

- [1] H. Ritchie, „Energy mix - Our World in Data“, *Our World in Data*, 2019. <https://ourworldindata.org/energy-mix#:~:text=Globally we get the largest,than 80%25 of energy consumption.> (pristupljeno 26. ožujak 2022.).
- [2] B. Zohuri i P. McDaniel, „Nuclear power plant history from past to present and future“, u *Introduction to Energy Essentials*, Elsevier, 2021, str. 43–84. doi: 10.1016/B978-0-323-90152-9.00002-5.
- [3] Nuclear Energy Agency, „The Security of Energy Supply and the Contribution of Nuclear Energy“, 2010. [Na internetu]. Dostupno na: <http://www.oecd-neo.org/pub/secure-energy/>
- [4] „Safety of Nuclear Reactors - World Nuclear Association“. <https://world-nuclear.org/information-library/safety-and-security/safety-of-plants/safety-of-nuclear-power-reactors.aspx> (pristupljeno 02. srpanj 2022.).
- [5] „Germany to Keep Last Three Nuclear-Power Plants Running in Policy U-Turn - WSJ“. <https://www.wsj.com/articles/germany-to-keep-last-three-nuclear-power-plants-running-in-policy-u-turn-11660661914> (pristupljeno 23. kolovoz 2022.).
- [6] „Direktiva 2010/31/EU Europskog Parlamenta i vijeća od 19. svibnja 2010. o energetske učinkovitosti zgrada“, 2010.
- [7] J. Delbeke, A. Runge-Metzger, Y. Slingenberg, i J. Werksman, „The paris agreement“, *Toward a Clim. Eur. Curbing Trend*, str. 24–45, 2019, doi: 10.4324/9789276082569-2.
- [8] „Climate Action Tracker - Scaling up climate action in the European Union | Climate Action Tracker“. <https://climateactiontracker.org/publications/scalingupeu/> (pristupljeno 05. ožujak 2023.).
- [9] „Commission welcomes European Parliament adoption of key files of the Clean Energy for All Europeans package“. [https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/IP\\_18\\_6383](https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/IP_18_6383) (pristupljeno 31. ožujak 2022.).
- [10] C. Lineweaver i J. Robles, „Comparing the Chemical Compositions of the Sun and Earth“, *ASP Conf. Ser.*, sv. 420, str. 83–86, 2009.
- [11] X. Luo i ostali, „Solar water heating system“, *Handb. Energy Syst. Green Build.*, str. 145–194, 2018, doi: 10.1007/978-3-662-49120-1\_32.
- [12] „The Sun as an Energy Resouce“. <https://www.volker-quaschnig.de/articles/fundamentals1/index.php> (pristupljeno 01. travanj 2022.).
- [13] A. K. Azad, *Advances in Clean Energy Technologies*. London, 2020. doi: 10.1016/C2019-0-01802-X.
- [14] V. Quaschnig, *Renewable Energy and Climate Change*, Second. Berlin: Wiley-IEEE Press, 2010. doi: 10.1002/9781119994381.
- [15] J. H. Kim i J. T. Kim, „Comparison of electrical and thermal performances of glazed and unglazed PVT collectors“, *Int. J. Photoenergy*, sv. 2012, str. 1–7, 2012, doi: 10.1155/2012/957847.
- [16] S. Poppi, N. Sommerfeldt, C. Bales, H. Madani, i P. Lundqvist, „Techno-economic review of solar heat pump systems for residential heating applications“, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, sv. 81, str. 22–32, sij. 2018, doi: 10.1016/j.rser.2017.07.041.
- [17] „Heat Pumps – Analysis - IEA“. <https://www.iea.org/reports/heat-pumps> (pristupljeno 06. travanj 2022.).
- [18] „Commission Regulation (EU) 2016/2281 of 30 November 2016 implementing Directive 2009/125/EC of the European Parliament and of the Council establishing a framework for the setting of ecodesign requirements for energy-related products, with regard to ecodes“, 2016.

- [19] J. Hanania, K. Stenhouse, i J. Donev, „Coefficient of performance - Energy Education“, *Energy Education*. [https://energyeducation.ca/encyclopedia/Coefficient\\_of\\_performance](https://energyeducation.ca/encyclopedia/Coefficient_of_performance) (pristupljeno 09. travanj 2022.).
- [20] „What is Heat Pump ? How does it Work ?“ <http://www.mepskills.com/2020/04/what-is-heat-pump-how-does-it-work.html> (pristupljeno 30. kolovoz 2022.).
- [21] S. Maddah, M. Goodarzi, i M. R. Safaei, „Comparative study of the performance of air and geothermal sources of heat pumps cycle operating with various refrigerants and vapor injection“, *Alexandria Eng. J.*, sv. 59, izd. 6, str. 4037–4047, pros. 2020, doi: 10.1016/j.aej.2020.07.009.
- [22] C. Huan i ostali, „Performance analysis of a combined solar-assisted heat pump heating system in Xi’an, China“, *Energies*, sv. 12, izd. 13, 2019, doi: 10.3390/en12132515.
- [23] D. Jonas, D. Theis, J. Meiers, i G. Frey, „Model-based analysis of solar thermal and heat pump systems using TRNSYS“, *ISES Sol. World Congr. 2017 - IEA SHC Int. Conf. Sol. Heat. Cool. Build. Ind. 2017, Proc.*, str. 2216–2227, 2017, doi: 10.18086/swc.2017.33.05.
- [24] M. R. Islam i S. Krishnan, *Numerical simulation of direct expansion solar-assisted heat pump water heater using carbon dioxide as refrigerant*, sv. 1552117. Fargo, North Dakota, 2013.
- [25] B. Čutić, T., Pasanec, J., „Razvoj solarne dizalice topline s direktnim isparavanjem radne tvari“.
- [26] „POWER | Data Access Viewer“. <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/> (pristupljeno 15. veljača 2023.).
- [27] „HEP ELEKTRA d.o.o. - Tarifne stavke (cijene)“. <https://www.hep.hr/elektra/kucanstvo/tarifne-stavke-cijene/1547> (pristupljeno 25. veljača 2023.).
- [28] „ENERGY STAR Certified Water Heaters | EPA ENERGY STAR“. [https://www.energystar.gov/productfinder/product/certified-water-heaters/results?formId=3ec80daf-6eab-4e1a-9946-3f09aaf9b90c&scrollTo=600&search\\_text=&type\\_filter=Gas-fired+Storage+Residential-duty+Commercial&fuel\\_filter=&brand\\_name\\_isopen=0&input\\_rate\\_thousand\\_btu\\_per\\_hour\\_isopen=0&markets\\_filter=United+States&zip\\_code\\_filter=&product\\_types=Select+a+Product+Category&sort\\_by=uniform\\_energy\\_factor\\_ufef&sort\\_direction=desc&currentZipCode=47000&page\\_number=0&lastpage=0](https://www.energystar.gov/productfinder/product/certified-water-heaters/results?formId=3ec80daf-6eab-4e1a-9946-3f09aaf9b90c&scrollTo=600&search_text=&type_filter=Gas-fired+Storage+Residential-duty+Commercial&fuel_filter=&brand_name_isopen=0&input_rate_thousand_btu_per_hour_isopen=0&markets_filter=United+States&zip_code_filter=&product_types=Select+a+Product+Category&sort_by=uniform_energy_factor_ufef&sort_direction=desc&currentZipCode=47000&page_number=0&lastpage=0) (pristupljeno 04. ožujak 2023.).
- [29] „HEP Plin d.o.o. - Cijene plina za kućanstva“. <https://www.hep.hr/plin/cijene-plina-i-usluga/cijene-plina/cijene-plina-za-kucanstva/1620> (pristupljeno 25. veljača 2023.).
- [30] „Home heating oil - it is a great value!“ <https://www.regionenergy.com/resource-center/home-heating-oil-it-is-a-great-value> (pristupljeno 04. ožujak 2023.).
- [31] „Guide to Heating Oil - Understand Heating Fuels | Crown Oil“. <https://www.crownoil.co.uk/guides/heating-oil-guide/> (pristupljeno 25. veljača 2023.).
- [32] „Cijene goriva u Hrvatskoj | Najnovije cijene“. <https://cijene-goriva.com.hr/> (pristupljeno 25. veljača 2023.).
- [33] „PD619095 - Thermal Expansion Valve“. <https://www.hvacpartsshop.com/pd619095-thermal-expansion-valve/> (pristupljeno 26. veljača 2023.).
- [34] „Compressor SECOP / DANFOSS SC15GH HBP R134a 220-240V 50-60Hz 104L8561“. <https://www.prokes-auto.com/compressor-secop-danfoss-sc15gh-hbp-r134a-220-240v-50-60hz-104l8561/> (pristupljeno 26. veljača 2023.).
- [35] „300 Liter Stainless Steel Combined Dhw Tank & Buffer Tank Water Heating Heat

- Pump Water Tank - Buy Heat Pump Water Tank,Buffer Tank,Dhw Tank Product on Alibaba.com“. [https://www.alibaba.com/product-detail/300-liter-Stainless-Steel-Combined-DHW\\_1600627943263.html?spm=a2700.details.0.0.1c5df4a2OL4Fw0](https://www.alibaba.com/product-detail/300-liter-Stainless-Steel-Combined-DHW_1600627943263.html?spm=a2700.details.0.0.1c5df4a2OL4Fw0) (pristupljeno 26. veljača 2023.).
- [36] „30 Tube Solar Thermal Collector | Ice Solar - Hot Water and Heating“. <https://www.icesolar.co.nz/product/30-tube-solar-thermal-collector/> (pristupljeno 26. veljača 2023.).
- [37] <https://www.hep.hr/opskrba/trziste-elektricne-energije/trziste/izvori-energije/1385> (pristupljeno: 15. veljače 2023.)
- [38] <https://www.carbonindependent.org/15.html> (pristupljeno: 25.02.2023.)

## ŽIVOTOPIS

### Profil

Ime: Antonio Čehok  
Adresa: Slavonska ulica 53a  
44000 Sisak  
Datum rođenja: 15.08.1996  
Nacionalnost: Hrvat  
Vozačka dozvola: B kategorija

### Kontakt

TELEFONSKI BROJ: 0976318466  
E-POŠTA: [antoniocehok1@gmail.com](mailto:antoniocehok1@gmail.com)  
Jezici: Engleski, Talijanski

### OBRAZOVANJE

Sveučilište u Zagrebu – Metalurški fakultet  
2016 – 2023

### RADNO ISKUSTVO

Jamnica Šibenik | Unaprjeđenje prodaje - Lipanj 2022 – listopad 2022  
Gospodarenje otpadom Sisak | Terenski posao  
Rujan 2021. godine – Prosinac 2021. godine  
Terenski posao podijele spremnika za recikliranje  
Hep Sisak | Očitavanje brojila - Kolovoz 2020. godine  
Zavod za vještačenje, profesionalnu rehabilitaciju i zapošljavanje osoba s invaliditetom (ZOSI)  
| Arhiva - Siječanj 2020. godine – Lipanj 2020. godine - Arhivski i administracijski poslovi  
Veletabak Sisak | Skladišni posao - Studeni 2019 – Prosinac 2019  
Bauwelt Sisak | Skladišni posao - Listopad 2016 – siječanj 2017

### VJEŠTINE

Microsoft office paket  
Programi za crtanje i projektiranje: SolidWorks, AutoCad