

# Odabir rješenja i dimenzioniranje sustava solarnog daljinskog grijanja

---

**Capan, Tihomir**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2020**

*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:235:254794>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-09-09**

*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **DIPLOMSKI RAD**

**Tihomir Capan**

Zagreb, 2020.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **DIPLOMSKI RAD**

Mentor:

Prof.dr.sc. Damir Dović

Student:

Tihomir Čapan

Zagreb, 2020.

*Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija, rada na projektu KeepWarm te navedenu literaturu.*

*Zahvaljujem se prof.dr.sc. Damiru Doviću na savjetima i pomoći pri izradi diplomskog rada.*

*Zahvaljujem se projektu KeepWarm sufinanciranom iz programa za istraživanje, razvoj i inovacije Obzor 2020. (broj ugovora o sufinanciranju 784966) u sklopu kojega je izrađen ovaj diplomski rad.*

*Posebno se zahvaljujem svojoj obitelji i prijateljima koji su vjerovali u mene i pružali mi podršku tijekom studiranja.*

*Tihomir Capan*



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



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

|  |        |
|--|--------|
| Sveučilište u Zagrebu<br>Fakultet strojarstva i brodogradnje |        |
| Datum  | Prilog |
| Klasa:   |        |
| Ur. broj:  |        |

## DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Tihomir Capan** Mat. br.: 0035195006

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Odabir rješenja i dimenzioniranje sustava solarnog daljinskog grijanja**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Design and sizing of solar district heating system**

Opis zadatka:

U ovom radu potrebno je dati rješenje sustava solarnog daljinskog grijanja odabranog potrošača u klimatskom području Zagreba.

Temeljem provedenih proračuna i simulacija rada sustava, potrebno je odrediti:

- vrstu i površinu solarnih kolektora
- nagib solarnih kolektora prema horizontali
- međusobni razmak solarnih kolektora
- zapreminu spremnika tople vode

Za odabrano rješenje sustava, analizirati učinkovitost prikupljanja energije Sunca za slučaj kad je izmjenjivač pomoćnog izvora topline smješten u spremniku tople vode i izvan njega.

Sustav solarnog daljinskog grijanja je potrebno tako dimenzionirati da period povrata investicije u predmetni sustav bude najkraći.

Proračun potreba za toplinskom energijom u sustavu solarnog daljinskog grijanja provesti prema normama HRN EN 15316-4-3:2017 i HRN EN 15316-5:2017 koristeći satnu metodu za sve mjesece u godini.

Rezultate proračuna usporediti s onima dobivenim računalnim programom EnergyPRO®.

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

Zadatak zadan:  
16. siječnja 2020.

Datum predaje rada:  
19. ožujka 2020.

Predviđeni datum obrane:  
23. – 27.3.2020.

Zadatak zadao:

Predsjednica Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Đamir Dović

Prof. dr. sc. Tanja Jurčević Lulić

## SADRŽAJ

|   |      |
|---|------|
| SADRŽAJ .....   | I    |
| POPIS SLIKA .....   | I    |
| POPIS TABLICA .....   | III  |
| POPIS OZNAKA .....  | IV   |
| SAŽETAK .....   | VIII |
| SUMMARY .....   | IX   |
| 1. UVOD .....   | 1    |
| 1.1. Trendovi u korištenju solarnih toplinskih sustava u Europi .....                 | 1    |
| 1.2. Trendovi u korištenju solarne toplinske energije u Republici Hrvatskoj .....     | 2    |
| 2. SOLARNI TOPLINSKI SUSTAVI U DALJINSKOM GRIJANJU .....                              | 4    |
| 2.1. Integracija solarne energije u sustave daljinskog grijanja .....                 | 4    |
| 2.2. Pozicioniranje solarnih kolektora u mrežu daljinskog grijanja .....              | 4    |
| 2.3. Osnovne komponente sustava solarnog daljinskog grijanja .....                    | 7    |
| 2.3.1. Solarni kolektor .....   | 7    |
| 2.3.2. Toplinski spremnik .....   | 8    |
| 2.3.3. Izmjenjivači topline, pumpe, regulacijski sustav i ostala oprema .....         | 9    |
| 3. MODELIRANJE SOLARNOG TOPLINSKOG SUSTAVA .....                                      | 10   |
| 3.1. Ulazni podaci i ograničenja – tehnički dio .....                                 | 12   |
| 3.1.1. Sunčevo zračenje i vanjska temperatura .....                                   | 12   |
| 3.1.2. Pilot sustav daljinskog grijanja .....   | 13   |
| 3.2. Modeliranje sunčevog zračenja na nagnutu plohu uz zasjenjenje .....              | 15   |
| 3.2.1. Direktno zračenje .....  | 15   |
| 3.2.2. Difuzno zračenje .....   | 17   |
| 3.2.3. Reflektirano zračenje .....  | 19   |
| 3.3. Odabir kolektora i dimenzioniranje solarnog kolektorskog polja .....             | 21   |
| 3.3.1. Kolektor MT – Power 4 .....  | 22   |
| 3.4. Modeliranje prikupljanja energije u kolektorskom polju – EN 15316-4-3 [15] ..... | 23   |
| 3.4.1. Inicijalni proračuni .....   | 24   |
| 3.4.2. Iterativni proračun prikupljanja energije u solarnom kolektorskom polju .....  | 25   |
| 3.5. Modeliranje bivalentnog spremnika topline .....                                  | 27   |
| 3.5.1. Određivanje kapaciteta – volumena spremnika topline .....                      | 27   |
| 3.5.2. HRN EN 15316 – 5 [16] .....  | 27   |
| 3.6. EnergyPRO [19] .....   | 33   |

---

|   |    |
|---|----|
| 3.6.1. Model solarnog kolektorskog polja .....  | 33 |
| 3.6.2. Model toplinskog spremnika .....   | 34 |
| 3.6.3. Kotao .....  | 34 |
| 3.6.4. Strategija upravljanja energetske sustavom .....   | 34 |
| 3.6.5. Model solarnog toplinskog sustava u daljinskom grijanju .....  | 35 |
| 3.7. Proračun ekonomskih pokazatelja .....  | 36 |
| 3.7.1. Investicijski troškovi .....   | 36 |
| 3.7.2. Proračun prihoda, rashoda i bilanci .....  | 37 |
| 4. REZULTATI .....  | 38 |
| 4.1. Rezultati proračuna ukupne dozračene energije na površinu kolektora .....                              | 38 |
| 4.2. Određivanje volumena spremnika – odabir solarnog toplinskog sustava s najmanjim periodom povrata ..... | 40 |
| 4.3. Tehničke karakteristike odabranog sustava .....  | 42 |
| 4.4. Dinamika solarnog toplinskog sustava .....   | 43 |
| 4.4.1. Model s grijačem unutar spremnika .....  | 43 |
| 4.4.2. Model s grijačem izvan spremnika .....   | 46 |
| 4.5. Usporedba rezultata proračuna prema modelu s pomoćnim grijačem izvan i unutar spremnika .....          | 46 |
| 4.5.1. Usporedba minimalnog volumena spremnika .....  | 50 |
| 4.6. Rasprava rezultata dobivenih modelom i moguća poboljšanja .....  | 51 |
| 4.7. Usporedba rezultata s računalnim programom EnergyPRO .....   | 51 |
| 5. ZAKLJUČAK .....  | 53 |
| LITERATURA .....  | 55 |
| PRILOZI .....   | 56 |

## POPIS SLIKA

|           |  |    |
|-----------|--|----|
| Slika 1.  | Primjena solarne toplinske energije u svijetu .....                            | 2  |
| Slika 2.  | Integracija solarnih kolektora u sustav daljinskog grijanja.....               | 5  |
| Slika 3.  | Hidrauličko povezivanje solarnih kolektora u sustav daljinskog grijanja .....  | 6  |
| Slika 4.  | Usporedba učinkovitosti različitih vrsti solarnih kolektora .....              | 7  |
| Slika 5.  | Načini povezivanja solarnih kolektora.....                                     | 8  |
| Slika 6.  | Shematski prikaz modela solarnog toplinskog sustava.....                       | 10 |
| Slika 7.  | Model solarnog toplinskog sustava s grijačem unutar spremnika .....            | 11 |
| Slika 8.  | Model solarnog toplinskog sustava s pomoćnim grijačem izvan spremnika.....     | 11 |
| Slika 9.  | Dinamika ulaznih parametara - sunčevo zračenje i temperatura okolišnog zraka . | 13 |
| Slika 10. | Potrebe za toplinskom energijom u sustavu daljinskog grijanja.....             | 14 |
| Slika 11. | Skica uz proračun direktnog zračenja [19] .....                                | 16 |
| Slika 12. | Skica uz proračun difuznog zračenja [19].....                                  | 19 |
| Slika 13. | Mogući rasporedi solarnih kolektora .....                                      | 22 |
| Slika 14. | Solarni kolektor TVP MT Power 4 .....  | 22 |
| Slika 15. | Tijek proračuna solarnog kolektora .....                                       | 24 |
| Slika 16. | Redoslijed koraka u proračunu toplinskog spremnika .....                       | 28 |
| Slika 17. | Shematski prikaz proračuna temperature u spremniku .....                       | 30 |
| Slika 18. | EnergyPRO model solarnog toplinskog sustava u daljinskom grijanju.....         | 35 |
| Slika 19. | Kretanje specifičnih cijena solarnih kolektora i toplinskih spremnika .....    | 37 |
| Slika 20. | Veza između broja redova, površine i širine prolaza između redova .....        | 38 |
| Slika 21. | Godišnja energija sunčevog zračenja na nagnutu površinu .....                  | 39 |
| Slika 22. | Usporedba dozračene energije po jedinici površine .....                        | 39 |
| Slika 23. | Određivanje minimalnog volumena spremnika za $A=588 \text{ m}^2$ .....         | 40 |
| Slika 24. | Periodi povrata prema modelu s položenim kolektorima .....                     | 41 |
| Slika 25. | Periodi povrata prema modelu s uspravnim kolektorima .....                     | 41 |
| Slika 26. | Energetski tokovi i temperature u sustavu - ljetni period .....                | 44 |
| Slika 27. | Detaljniji prikaz energetskih tokova i temperatura u spremniku .....           | 44 |



---

|           |   |    |
|-----------|---|----|
| Slika 28. | Energetski tokovi i temperature u sustavu - prijelazni period .....           | 45 |
| Slika 29. | Temperature u spremniku i prikupljena energija u kolektoru - zimski dan ..... | 45 |
| Slika 30. | Energetski tokovi i temperature u sustavu – ljetni period.....                | 46 |
| Slika 31. | Usporedba energetske tokova i temperatura - ljetni period .....               | 48 |
| Slika 32. | Usporedba energetske tokova i temperatura - zimski period.....                | 48 |
| Slika 33. | Usporedba srednjih temperatura u kolektoru i učinkovitosti .....              | 49 |
| Slika 34. | Napunjenost spremnika.....  | 50 |
| Slika 35. | Usporedba minimalnih volumena spremnika .....                                 | 50 |

**POPIS TABLICA**

|             |  |    |
|-------------|--|----|
| Tablica 1.  | Sažeti prikaz karakteristika solarnog toplinskog sustava u Vukovaru .....      | 3  |
| Tablica 2.  | Karakteristike toplinskih spremnika.....                                       | 9  |
| Tablica 3.  | Osnovni tehnički parametri postojećeg sustava daljinskog grijanja .....        | 14 |
| Tablica 4.  | Izrazi za određivanje veze između indeksa prozračnosti i difuznog zračenja.... | 18 |
| Tablica 5.  | Karakteristike odabranog solarnog kolektora.....                               | 23 |
| Tablica 6.  | Konstante korištene u proračunu solarnog kolektorskog polja .....              | 25 |
| Tablica 7.  | Konstante korištene u proračunu toplinskog spremnika .....                     | 33 |
| Tablica 8.  | Ulazni parametri za model solarnog toplinskog sustava – EnergyPRO.....         | 35 |
| Tablica 9.  | Rezultati proračuna - solarni toplinski sustavi .....                          | 42 |
| Tablica 10. | Tehničke karakteristike odabranog rješenja .....                               | 43 |
| Tablica 11. | Usporedba rezultata proračuna prema oba modela .....                           | 47 |
| Tablica 12. | Usporedba rezultata s računalnim programom EnergyPRO .....                     | 52 |

## POPIS OZNAKA

| Oznaka            | Jedinica      | Opis  |
|-------------------|---------------|---|
| $A_G$             | $m^2$         | Referentna površina kolektora   |
| $A_I$             | -             | Indeks anizotropije   |
| $A_{sol}$         | $m^2$         | Ukupna površina svih kolektora u sustavu                              |
| $A_{sol,mod}$     | $m^2$         | Površina solarnog kolektora   |
| $B$               | €/god         | Godišnja bilanca  |
| $a_1$             | $W/(m^2 K)$   | Koeficijent gubitka topline prvog reda                                |
| $a_2$             | $W/(m^2 K^2)$ | Koeficijent gubitka topline drugog reda                               |
| $c_{ctrl,1}$      | $W/m^2$       | Faktor snage regulacijskog sustava                                    |
| $c_{ls,1}$        | $W/K$         | Faktor gubitka topline solarnog kolektora prvog reda                  |
| $c_{ls,2}$        | $W/Km^2$      | Faktor gubitka topline solarnog kolektora drugog reda                 |
| $c_p$             | $kJ/kgK$      | Specifični toplinski kapacitet vode                                   |
| $c_{sp,1}$        | $W$           | Faktor snage crpke prvog reda   |
| $c_{sp,2}$        | $W/m^2$       | Faktor snage crpke drugog reda  |
| $c_{sto,1}$       | -             | Faktor za izračun toplinskih gubitaka spremnika - prvi                |
| $c_{sto,2}$       | -             | Faktor za izračun toplinskih gubitaka spremnika - drugi               |
| $c_{sto,3}$       | -             | Faktor za izračun toplinskih gubitaka spremnika - treći               |
| $c_{sto,4}$       | -             | Faktor za izračun toplinskih gubitaka spremnika - četvrti             |
| $c_{sto,5}$       | -             | Faktor za izračun toplinskih gubitaka spremnika - peti                |
| $c_w$             | $kWh/kgK$     | Specifični toplinski kapacitet vode                                   |
| $d_r$             | $m$           | Razmak između redova kolektora u ravnini tla                          |
| $d_{r\omega}$     | $m$           | Udaljenost između redova svedena na ravninu satnog kuta               |
| $E$               | €/god         | Ukupni iznos godišnjih troškova                                       |
| $E_{el}$          | €/god         | Ukupni godišnji trošak za električnu energiju                         |
| $e_e$             | €/MWh         | Specifična cijena topline   |
| $e_q$             | €/MWh         | Specifična cijena električne energije                                 |
| $f_{sto,bac,acc}$ | -             | Faktor prilagodbe toplinskih gubitaka u ovisnosti o vremenskom koraku |
| $f_{sto,dis,ls}$  | -             | Faktor toplinskih gubitaka toplovoda                                  |
| $G_s$             | $W/m^2$       | Sunčeva konstanta   |
| $h$               | $mm$          | Visina kolektora  |
| $h_\omega$        | $m$           | Duljina projekcije duljine kolektora na ravninu satnog kuta           |
| $h_{gr,\omega}$   | $m$           | Duljina projekcije duljine kolektora na tlo                           |
| $H_{ex}$          | $W/K$         | Koeficijent prolaza topline izmjenjivača                              |

|                     |                       |  |
|---------------------|-----------------------|--|
| $H_{sol,loop}$      | W/K                   | Koeficijent toplinskih gubitaka cjevovoda solarnog kruga                   |
| $H_{sto,ls}$        | W/K                   | Koeficijent toplinskih gubitaka toplinskog spremnika                       |
| $I_h$               | W/m <sup>2</sup>      | Globalno sunčevo zračenje na horizontalnu plohu                            |
| $I_0$               | W/m <sup>2</sup>      | Ekstraterestičko zračenje  |
| $I_b$               | W/m <sup>2</sup>      | Direktno zračenje na horizontalnu plohu                                    |
| $I_d$               | W/m <sup>2</sup>      | Difuzno zračenje na horizontalnu plohu                                     |
| $I_{diff}$          | W/m <sup>2</sup>      | Difuzno sunčevo zračenje na nagnutu plohu                                  |
| $I_{dirr}$          | W/m <sup>2</sup>      | Direktno sunčevo zračenje na nagnutu plohu                                 |
| $I_{ref}$           | W/m <sup>2</sup>      | Reflektirano sunčevo zračenje na nagnutu plohu                             |
| $I_{sol,h}$         | W/m <sup>2</sup>      | Globalno sunčevo zračenje na nagnutu plohu u i-tom satu                    |
| $I_T$               | W/m <sup>2</sup>      | Globalno sunčevo zračenje na nagnutu plohu                                 |
| $K_{hem(50^\circ)}$ | -                     | Faktor polukružne promjene kuta upadnog zračenja                           |
| $k_T$               | -                     | Indeks prozračnosti atmosfere  |
| $l$                 | mm                    | Duljina kolektora  |
| $l_{s\omega}$       | m                     | Duljina sjene na površini kolektora  |
| $m_{col}$           | kg/(sm <sup>2</sup> ) | Maseni protok fluida kroz kolektor sveden na korisnu površinu kolektora    |
| $m_{col,h}$         | kg/s                  | Maseni protok fluida kroz kolektor   |
| $m_i$               | kg                    | Masa vode u i-tom segmentu   |
| $n$                 | -                     | Redni broj dana u godini   |
| $N_{cr}$            | -                     | Broj kolektora u jednom redu   |
| $N_r$               | -                     | Ukupni broj redova kolektora   |
| $N_{sol,mod}$       | -                     | Ukupni broj solarnih kolektora   |
| $P_{n,design}$      | kW                    | Nazivna snaga izmjenjivača topline   |
| $P_{sol,ctrl}$      | W                     | Snaga regulacijskog sustava u solarnom krugu                               |
| $P_{sol,pmp}$       | W                     | Snaga pumpe solarnog kruga   |
| $Q_b$               | kWh                   | Dodatna toplinska energija plinskog kotla                                  |
| $Q_{b,sol}$         | MWh                   | Toplinska energija kotla na prirodni plin u scenariju sa solarnim sustavom |
| $Q_{sto,h,bh}$      | kWh                   | Toplinska energija pomoćnog grijača  |
| $Q_{dh,max}$        | kWh                   | Maksimalni iznos toplinske energije kojeg je moguće iskoristiti            |
| $Q_{ex}$            | kWh                   | Toplinska energija izmijenjena u izmjenjivaču topline                      |
| $Q_{ng}$            | MWh                   | Toplinska energija kotla na prirodni plin u scenariju bez solarnog sustava |
| $Q_s$               | MWh                   | Ukupna ušteda toplinske energije   |
| $Q_{sto,Hvol,i}$    | kWh                   | Toplinska energija uskladištena u i-ti segment spremnika                   |
| $Q_{sol,gen,h,i}$   | kWh                   | Toplinska energija solarnih kolektora pri vršnoj učinkovitosti             |

|                        |                    |  |
|------------------------|--------------------|--|
| $Q_{sol,loop,ls,h,i}$  | kWh                | Toplinski gubitci u solanom kolektorskom polju   |
| $Q_{sol,loop,out,h,i}$ | kWh                | Toplinska energija na izlazu iz solarnog kruga   |
| $Q_{sol,out,h}$        | kWh                | Toplina koju kolektor predaje u toplovod solarnog kruga  |
| $Q_{sto,ls,vol,i}$     | kWh                | Toplinski gubitci segmenta spremnika   |
| $Q_{sto,ls}$           | kWh                | Toplinski gubitci čitavog spremnika  |
| $Q_{sto,t}$            | kWh                | Ukupna uskladištena energija u spremniku   |
| $Q_{t+1,i}$            | kWh                | Toplinska energija u trenutku t+1  |
| $R_b$                  | -                  | Omjer direktnog zračenja na nagnutu i horizontalnu površinu  |
| $R_d$                  | -                  | Omjer difuznog zračenja na nagnutu i horizontalnu površinu   |
| $R_{d,sh}$             | -                  | Omjer direktnog zračenja na nagnutu i horizontalnu površinu uz učinak zasjenjenja                              |
| $R_{r,b}$              | -                  | Omjer reflektiranog direktnog zračenja na nagnutu i horizontalnu površinu                                      |
| $R_{r,d}$              | -                  | Omjer reflektiranog difuznog zračenja na nagnutu i horizontalnu površinu                                       |
| $r_{p-1,b}$            | -                  | Omjer duljine sjene i visine kolektora   |
| $r_{p-1,d}$            | -                  | Omjer kutova koji ograničavaju dio horizonta s kojeg zračenje dopire do kolektora za redove u sjeni i prvi red |
| $S$                    | €/god              | Ukupni iznos godišnje uštede   |
| $s_v$                  | -                  | Kut koji ograničava dio horizonta s kojeg zračenje dopire do kolektora   |
| $s'_\omega$            | °                  | Nagib kolektora u odnosu na ravninu tla  |
| $Sh_{frac}$            | %                  | Udio ukupne površine kolektora u sjeni   |
| $t_{ci}$               | h                  | Vremenski korak  |
| $T_h^*$                | m <sup>2</sup> K/W | Reducirana temperaturna razlika u kolektoru  |
| $V_{sto}$              | m <sup>3</sup>     | Volumen spremnika  |
| $V_{sto,use,w}$        | m <sup>3</sup>     | Volumen vode koja se uzima za potrebe daljinskog grijanja  |
| $V_{sto,vol,i}$        | m <sup>3</sup>     | Volumen segmenta spremnika   |
| $w$                    | mm                 | Širina kolektora   |
| $W_{sol,aux}$          | kWh                | Energija potrebna za pogon pumpi i regulacijskog kruga   |
| $\alpha$               | °                  | Kut između linije horizonta i središta sunčevog diska  |
| $\beta$                | °                  | Kut nagiba kolektora   |
| $\beta_{gr}$           | °                  | Kut nagiba tla   |
| $\beta_{gr\omega}$     | °                  | Kut nagiba tla u ravnini satnog kuta   |
| $\gamma_{gr}$          | °                  | Orijentacija tla u odnosu na jug   |
| $\gamma_{surf}$        | °                  | Orijentacija površine kolektora u odnosu na jug  |
| $\delta$               | °                  | Kut nagiba zemljine osi prema ravnini orbite   |
| $\phi$                 | °                  | Geografska širina  |
| $\eta_0$               | -                  | Vršna učinkovitost solarnog kolektora  |
| $\eta_{col,h,i}$       | -                  | Učinkovitost solarnog kolektora  |

|                                   |                   |  |
|-----------------------------------|-------------------|--|
| $\theta$                          | °                 | Zenitni kut  |
| $\theta_z$                        | °                 | Kut između sunčevih zraka i vertikale  |
| $\Delta m_t$                      | kg                | Promjena mase  |
| $\Delta \mathcal{G}_{m,design}$   | °C                | Srednja logaritamska temperaturna razlika na izmjenjivaču                    |
| $\Delta \mathcal{G}_{ex}$         | °C                | Razlika temperature na izmjenjivaču  |
| $\Delta \mathcal{G}_{ex,out}$     | °C                | Razlika temperature na izlazu iz izmjenjivača                                |
| $\Delta \mathcal{G}_{sto,vol,i}$  | °C                | Razlika temperature segmenta spremnika                                       |
| $\mathcal{G}_1$                   | °C                | Temperatura struje na ulazu  |
| $\mathcal{G}_2$                   | °C                | Temperatura struje na izlazu   |
| $\mathcal{G}_{col,avg,h,i}$       | °C                | Srednja temperatura fluida u kolektoru                                       |
| $\mathcal{G}_{e,h,i}$             | °C                | Temperatura zraka u dodiru s toplinskim spremnikom                           |
| $\mathcal{G}_{sol,amb,h}$         | °C                | Temperatura okolišnog zraka  |
| $\mathcal{G}_{sol,loop,in,h,i}$   | °C                | Ulazna temperatura u kolektor u satu i-tom vremenskom koraku                 |
| $\mathcal{G}_{sol,loop,in,h-1,i}$ | °C                | Ulazna temperatura u kolektor u koraku koji prethodi i-tom vremenskom koraku |
| $\mathcal{G}_{sol,loop,out}$      | °C                | Temperatura na izlazu iz kolektora   |
| $\mathcal{G}_{sto,set}$           | °C                | Postavna temperatura u spremniku   |
| $\mathcal{G}_{sto,vol,i}$         | °C                | Temperatura i-tog segmenta spremnika   |
| $\mathcal{G}_{sto,vol,i-1}$       | °C                | Temperatura segmenta spremnika ispod i-tog segmenta                          |
| $\mathcal{G}_{t,i}$               | °C                | Temperatura vode u i-tom vremenskom trenutku                                 |
| $\mathcal{G}_{t+1,i}$             | °C                | Temperatura vode u trenutku i+1  |
| $\mathcal{G}_{t-1,i}$             | °C                | Temperatura vode u trenutku i-1  |
| $\mathcal{G}_{w,cold}$            | °C                | Temperatura povrata sustava daljinskog grijanja                              |
| $\rho_w$                          | kg/m <sup>3</sup> | Gustoća vode   |

## SAŽETAK

Za ostvarivanje klimatsko-energetskih ciljeva Europske unije nužno je kontinuirano poboljšavati učinkovitost energetskih sustava i integrirati obnovljive izvore energije. U tom kontekstu sektor grijanja i hlađenja predstavlja veliki potencijal pri čemu se značajniji napredak očekuje u sustavima daljinskog grijanja. U ovom trenutku u Republici Hrvatskoj se u najvećem broju sustava daljinskog grijanja koriste fosilna goriva, a od obnovljivih izvora napredak je postignut u primjeni biomase, dok je primjena solarne topline ograničena na samo jedan sustav. U isto vrijeme solarna se toplina u značajnijoj mjeri iskorištava u kućanstvima, ugostiteljskim objektima i procesnoj industriji.

U ovom radu razmotrena je integracija solarnog toplinskog sustava u sustav daljinskog grijanja manjeg kapaciteta u klimatskom području grada Zagreba. Izrađen je model koji se sastoji od proračuna sunčevog zračenja na nagnutu plohu te modela kolektora i toplinskog spremnika sukladno normama HRN EN 15 316-4-3:2017 i HRN EN 15 316-5:2017. Koristeći podatke o vremenskim uvjetima, prostornim i tehničkim ograničenjima, toplinskim potrebama i tehničkim karakteristikama komponenti odabrano je rješenje s najkraćim periodom povrata. Prema proračunu odabrano je rješenje s 280 vakuumskih pločastih solarnih kolektora ukupne površine 548,8 m<sup>2</sup> te s toplinskim spremnikom zapremine 45 m<sup>3</sup>. Kolektori su postavljeni uspravno pod kutom od 30° u odnosu na horizontalu pri čemu razmak između redova iznosi 4,54 m. Ukupna godišnja količina prikupljene energije iznosi 414,69 MWh čime se pokriva 14,05% toplinskih potreba sustava daljinskog grijanja. Prosječna učinkovitost solarnih kolektora u opisanom slučaju iznosi 0,5293, a jednostavni period povrata investicije iznosi 18,39 godina.

Usporedbom rezultata dobivenih prema modelu s izmjenjivačem topline pomoćnog izvora smještenog unutar odnosno izvan spremnika primijećene su razlike u ostvarenim temperaturama u spremniku kao i prikupljenoj energiji u karakterističnim periodima tijekom godine, no na godišnjoj razini razlika u iznosu prikupljene toplinske energije je manja od 1%. Osnovni razlozi tome su relativno mali nagib krivulje učinkovitosti solarnog kolektora, visoka temperatura povrata koja sprječava pojavu većih temperaturnih razlika po visini spremnika i mala potreba u ljetnim mjesecima. Usporedba rezultata s programom *EnergyPRO* također je rezultirala malim razlikama u iznosu prikupljene energije na godišnjoj razini.

Ključne riječi: solarni kolektor, solarni toplinski sustav, toplinski spremnik, daljinsko grijanje HRN EN 15316-4-3:2017, HRN EN 15316-5:2017

## SUMMARY

In order to achieve the EU's climate and energy goals, it is essential to continuously improve the efficiency of energy systems and to integrate renewable energy sources. In this context, the heating and cooling sector presents great potential, with significant progress expected in district heating systems. At present, fossil fuels are used in most district heating systems in Croatia, and while progress has been made in the use of biomass, the use of solar heat is limited to only one district heating system. At the same time, solar heat is used to a greater extent in households, hospitality and process industry.

In this thesis the integration of the solar thermal system into a low capacity district heating system in the Zagreb climate zone is discussed. A model consisting of a calculation of solar radiation on an inclined surface, and models of solar collectors and heat storage tank in accordance with the standards HRN EN 15 316-4-3: 2017 and HRN EN 15 316-5: 2017 have been developed. Based on the known data on weather conditions, space and technical constraints, thermal needs and technical characteristics of the components, the solution with the most favourable payback period was selected.

According to the results of the calculation, a solution with a total of 280 vacuum plate solar collectors with a total area of 548.8 m<sup>2</sup> and with storage tank 45 m<sup>3</sup> in capacity was selected. The collectors are mounted upright at an angle of 30° to the horizontal, with row spacing of 4.54 m. The total annual amount of collected heat equals 414.69 MWh, which covers 14.05% of the district heating systems' heat demand. The average efficiency of solar collectors in the case described is 0.5293, and the simple return on the investment equals 18.39 years.

Comparison of the results obtained by the model with the auxiliary heat exchanger located inside or outside the tank revealed differences in the achieved temperatures in the tank as well as the energy collected during the characteristic periods during the year. However, the difference in the amount of heat collected on an annual basis is very small (<1%). The main reasons for this are the slight slope of the curve of vacuum plate solar collectors, high return temperature which prevents high temperature difference in the storage and low heat demand in the summer period. Comparison of the results with the *EnergyPRO* also resulted in small differences in the amount of energy collected annually.

Keywords: solar thermal collector, solar thermal system, heat storage, district heating, HRN EN 15316-4-3:2017, HRN EN 15316-5:2017



## 1. UVOD

Europska Unija globalni je predvodnik u borbi protiv klimatskih promjena koji intenzivno ulaže u obnovljive izvore energije i dekarbonizaciju energetskog sektora. S obzirom na to da udio energije koja se troši za grijanje i hlađenje iznosi 50% ukupne potrošnje nužno je posebnu pažnju posvetiti spomenutom sektoru. Sukladno tome europska unija definirala je cilj – stvaranje održivog modela grijanja i hlađenja u Europskoj Uniji koji se temelji na visokoj energetskoj učinkovitosti i korištenju toplinske i rashladne energije iz obnovljivih izvora ili kogeneracijskih postrojenja te otpadne topline. [1]

Dosadašnji napori rezultirali su udjelom obnovljivih izvora energije u sektoru grijanja i hlađenja od 19%. Najveći udio obnovljive energije odnosi se na decentraliziranu upotrebu biomase, a udio solarne energije iznosi vrlo malih 1%. [2]

Sustavima daljinskog grijanja dobavlja se 9% ukupne finalne energije za grijanje i hlađenje. U novije vrijeme sustavi daljinskog grijanja stavljeni su u fokus Europske regulative s obzirom na to da zbog nedovoljne učinkovitosti predstavljaju veliki potencijal za smanjenje emisija ugljikovog dioksida, povećanje energetske učinkovitosti i razvoj zelene ekonomije. Povećanje učinkovitosti planira se ostvariti ulaganjima u obnovu ovojnice zgrada kako bi se smanjila potrošnja toplinske energije, revitalizaciju toplovoda kako bi se smanjili toplinski gubici i uvođenje obnovljivih izvora energije s ciljem smanjenja emisija stakleničkih plinova. [1,3]

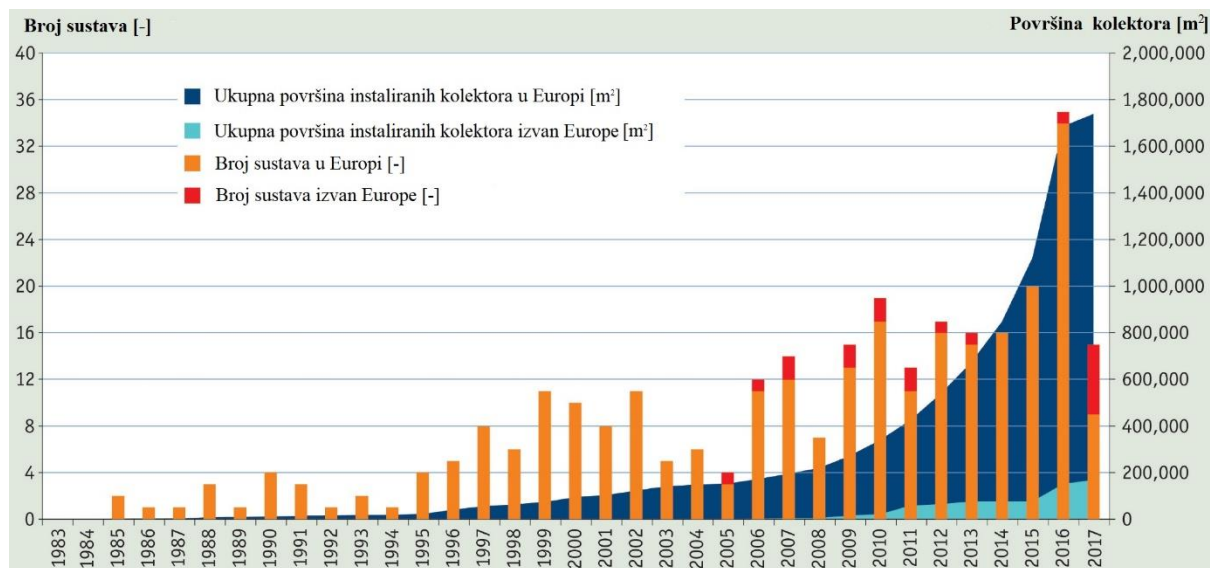
U sustave daljinskog grijanja moguće je integrirati neke od obnovljivih izvora energije kao što su energija biomase, solarna, geotermalna i električna energija. Tradicionalno najveći udio zauzima energija iz biomase, a u geološki pogodnim područjima značajnu ulogu ima i geotermalna energija. Nadalje, u sustave daljinskog grijanja integriraju se solarni toplinski sustavi i dizalice topline. Visoki investicijski troškovi u spomenute tehnologije rezultirali su njihovom ograničenom primjenom u zemljama sjeverne i zapadne Europe u kojima su tržišni uvjeti za proizvođače znatno povoljniji. Usprkos tome trendovi na Europskoj razini su pozitivni te su prvi solarni toplinski sustavi pušteni u pogon i u zemljama južne Europe. [4]

### 1.1. Trendovi u korištenju solarnih toplinskih sustava u Europi

Solarni kolektori odavno su poznati, a značajnijoj mjeri se koriste već nekoliko desetljeća. Primjenu su pronašli u kućanstvima za pripremu potrošne tople vode, osobito u ljetnim mjesecima. Nadalje, solarni kolektori primjenjuju se i u ugostiteljskim objektima i industriji gdje postoji potreba za toplom vodom. Budući da se učinkovitost kolektora smanjuje porastom

temperature radnog medija primjena kolektora bila je ograničena na niže temperaturne režime. U novije vrijeme razvijaju se kolektori koje karakterizira znatno bolja učinkovitost i pri višim temperaturnim režimima te kolektori pronalaze primjenu i u sustavima daljinskog grijanja, pripreme tehnološke vode na većim temperaturama pa čak i pripreme niskotlačne pare. [5,6]

Razvoj solarnih toplinskih sustava u daljinskom grijanju započeo je na sjeveru Europe, točnije u Švedskoj i Danskoj osamdesetih godina prošlog stoljeća. Zahvaljujući visokoj prodajnoj cijeni topline i/ili subvencijama izgrađen je veći broj solarnih toplinskih sustava koji su integrirani u sustave daljinskog grijanja. Nadalje, u međuvremenu je izgrađen i veći broj komercijalno isplativih postrojenja značajnih kapaciteta od kojih neka uključuju i sezonske spremnike toplinske energije. Površina spomenutih kolektorskih polja varira u rasponu od nekoliko stotina kvadrata pa sve do 150.000 m<sup>2</sup>, što odgovara nazivnoj snazi od 110.000 kW. Prema podacima registra *Solar District Heating* u Europi je trenutačno više od 195 solarnih toplinskih postrojenja povezanih na sustave daljinskog i područnog grijanja od čega se najveći broj nalazi u Danskoj, Švedskoj, Njemačkoj, Španjolskoj i Austriji. Slika 1. ilustrira trend povećanja broja solarnih toplinskih sustava u daljinskom grijanju u periodu od 1985. do 2017. godine. [4],[7]



Slika 1. Primjena solarne toplinske energije u svijetu

## 1.2. Trendovi u korištenju solarne toplinske energije u Republici Hrvatskoj

U Republici Hrvatskoj solarni kolektori najčešće se koriste u domaćinstvima te u ugostiteljskim objektima, osobito u primorskom dijelu kojeg karakterizira bolja ozračenost u odnosu na kontinent. U industriji je primjena solarnih toplinskih kolektora nešto skromnija, no postoji određeni broj sustava u pogonu, najčešće u procesnoj industriji. [8]

U sustavima daljinskog grijanja primjena solarne energije još uvijek nije razvijena. Prvi i jedini solarni toplinski sustav u daljinskom grijanju pušten je u pogon u Vukovaru u 2019. godini. Sustav se sastoji od 160 solarnih kolektora ukupne površine 401,6 m<sup>2</sup> što odgovara nazivnoj snazi kolektorskog polja od 260,8 kW. Sustav je spojen na povratni vod daljinskog grijanja putem pločastog izmjenjivača, a primarno služi za zagrijavanje vode u sustavu u ljetnim mjesecima. Prema trenutnim tržišnim uvjetima očekivani period povrata investicije je između 6 i 8 godina. Osim spomenutog projekta, u ovome trenutku se analizira isplativost izgradnje manjih solarnih toplinskih sustava u daljinskom grijanju u nekoliko gradova u kontinentalnoj Hrvatskoj. Tablica 1. sažeto prikazuje osnovne tehničke i financijske karakteristike solarnog toplinskog sustava u Vukovaru. [9]

Tablica 1. Sažeti prikaz karakteristika solarnog toplinskog sustava u Vukovaru

| Opis  | Vrijednost [mjerna jedinica]                    |
|---|---|
| Ukupan broj kolektora                       | 160   |
| Ukupna površina kolektora                   | 401,6 [m <sup>2</sup> ]                         |
| Nazivna snaga sustava pri ispitnim uvjetima | 260,8 [kW]                                      |
| Vrsta kolektora                             | Pločasti  |
| Lokacija postavljanja kolektora             | Tlo   |
| Model kolektora                             | Weishaupt WTS-F2 K6                             |
| Integracija u sustav daljinskog grijanja    | Pločastim izmjenjivačem topline na povratni vod |
| Ukupni iznos investicije                    | ~1.000.000,00 [kn]                              |
| Specifični iznos investicije                | 332,01 [€/m <sup>2</sup> ]                      |
| Očekivani period povrata                    | 6-8 [god]                                       |

## **2. SOLARNI TOPLINSKI SUSTAVI U DALJINSKOM GRIJANJU**

### **2.1. Integracija solarne energije u sustave daljinskog grijanja**

U načelu rada se solarni toplinski sustavi u daljinskom grijanju ne razlikuju značajno od solarnih toplinskih sustava u kućanstvu ili industriji. Međutim, solarne toplinske sustave u daljinskom grijanju karakteriziraju viši temperaturni režim te veći instalirani kapacitet koji se ostvaruje postavljanjem većeg broja kolektora. Kolektorska polja manjeg kapaciteta postavljaju se na krovove ili tlo dok se polja većih kapaciteta postavljaju na tlo. Nadalje, kapacitet toplinskog spremnika također je znatno veći, a posebno kod sustava s visokim udjelom solarne toplinske energije kod kojih je potrebno sezonsko skladištenje toplinske energije. [10]

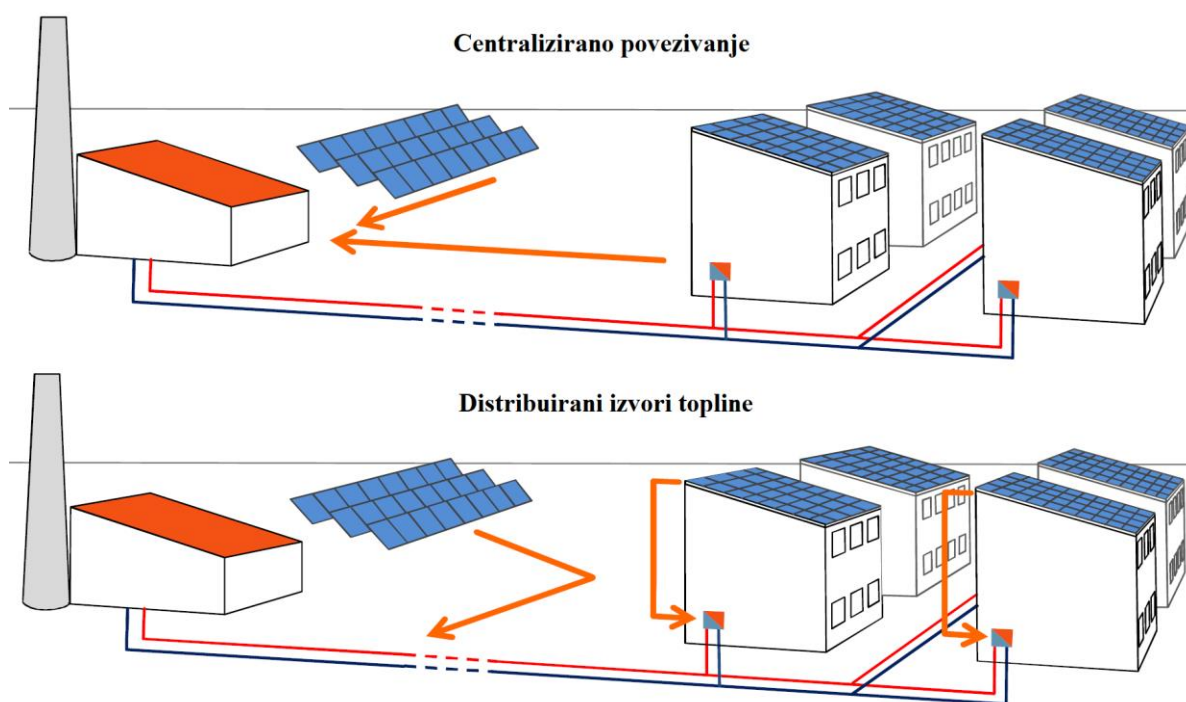
S obzirom na specifičnosti pojedinih konfiguracija moguće je podijeliti solarne toplinske sustave u daljinskom grijanju na nekoliko kategorija. Osnovne podjele temelje se na razlikama u veličini sustava, načinu proizvodnje toplinske energije, vrsti (veličini) toplinskog spremnika te pozicioniranju solarnih kolektora u mrežu daljinskog grijanja.

Ovisno o udjelu energije prikupljene u kolektorima sustave možemo podijeliti na one s vrlo niskim ili niskim udjelom solarne energije u kojima se maksimalno 20 do 30% energije isporučuje solarnim kolektorima te na sustave s visokim udjelom energije iz solarnih kolektora u kojima je spomenuti udio veći od 20% (30%). U sustavima s vrlo niskim udjelom energije iz solarnih kolektora (do 5%) nije potrebna izgradnja toplinskog spremnika te se solarno kolektorsko polje spaja na mrežu daljinskog grijanja preko izmjenjivača topline. Za ostvarivanje nešto većih udjela potrebno je u sustav ugraditi toplinski spremnik manjeg kapaciteta koji služi za skladištenje toplinske energije, osobito u ljetnim mjesecima kada je proizvodnja kolektora maksimalna, a potrebe za toplinskom energijom su minimalne. Ostvarivanje viših udjela energije iz solarnih kolektora moguće je isključivo uz izgradnju sezonskih spremnika topline velikog kapaciteta. [10]

### **2.2. Pozicioniranje solarnih kolektora u mrežu daljinskog grijanja**

Solarni kolektori se na sustave daljinskog grijanja mogu povezati na nekoliko načina pri čemu svaka od mogućnosti za sobom povlači određene prednosti i nedostatke te je pri izboru konačnog rješenja potrebno razmotriti cjelokupni sustav daljinskog grijanja kao i postojeće sustave za pretvorbu energije.

Kolektorska polja većeg kapaciteta najčešće se nalaze u blizini postojećeg postrojenja pri čemu govorimo o centraliziranoj integraciji koja je znatno jednostavnija u odnosu na decentraliziranu. Neposredna blizina kolektorskog polja znatno olakšava nadziranje, upravljanje i održavanje sustava. S druge strane, kolektorsko polje je moguće povezati na sustav daljinskog grijanja na prikladnim lokacijama duž distribucijske mreže što omogućuje malim distribuiranim proizvodnim postrojenjima na zgradama i sl. da u povoljnim vremenskim uvjetima isporučuju toplinsku energiju u mrežu. Ovaj način integracije znatno je nepovoljniji za operatera mreže te zahtijeva pomnije planiranje prilikom integracije. Slika 2. prikazuje opisane načine integracije solarne energije u sustavima daljinskog grijanja. [10,11]



Slika 2. Integracija solarnih kolektora u sustav daljinskog grijanja

Osim lokacije najznačajniji čimbenik koji izravno utječe na učinkovitost solarnog toplinskog sustava u daljinskom grijanju je i način hidrauličkog povezivanja na mrežu daljinskog grijanja. Načinom spajanja određeni su temperaturni režim kolektora, odnosno ulazna, a u nekim slučajevima i izlazna temperatura te visina dobave pumpe. Izbor odgovarajućeg rješenja često predstavlja kompromis između efikasnosti solarnog kolektorskog polja i postojećeg postrojenja, a moguće varijante integracije solarnog kolektorskog polja su:

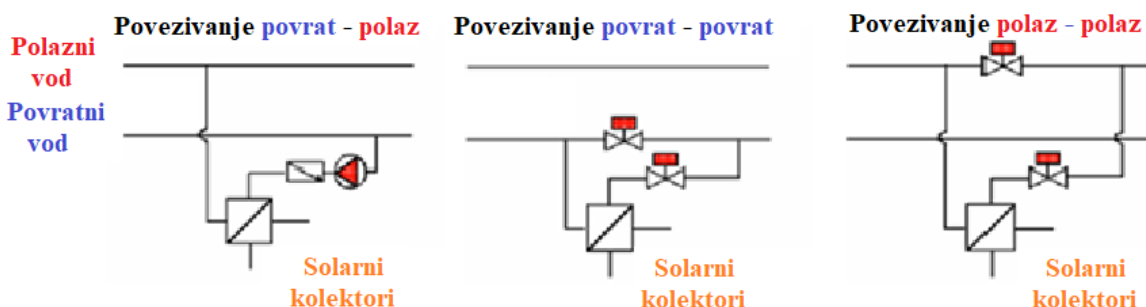
- Povezivanje po modelu povrat – polaz
- Povezivanje po modelu povrat – povrat
- Povezivanje po modelu polaz – polaz

Kod povezivanja solarnog kolektorskog polja po modelu povrat – polaz voda iz povratnog voda zagrijava se energijom iz solarnog kruga na temperaturu polaznog voda daljinskog grijanja te se ubacuje u polazni vod daljinskog grijanja. Napojna pumpa kruga daljinskog grijanja kojom se isporučuje spomenuti medij u ovom slučaju mora svladati razliku tlaka između povratnog i polaznog voda. Nadalje, nema promjene temperature povratnog voda s obzirom da se samo dio ogrjevnog medija izdvaja i izmjenjuje toplinu sa solarnim kolektorima, a preostali medij prolazi kroz postrojenje kao i u slučaju kada kolektori nisu spojeni na sustav.

Spajanje po modelu povrat – povrat najpovoljniji je način za učinkovito prikupljanje energije u kolektorima jer se ovim modelom u kolektoru ostvaruju niže temperature u odnosu na prethodno opisani model. Nadalje, napojnom pumpom potrebno je nadoknaditi samo pad tlaka u izmjenjivaču topline. Kako bi se regulirali protoci prema izmjenjivaču solarnog kruga potrebno je ugraditi regulacijski ventil u povratni vod daljinskog grijanja što predstavlja otpor kojeg je potrebno svladati napojnom pumpom. Nadalje, u ovom slučaju moguće će očekivati pad učinkovitosti ostalih generatora topline zbog povećane temperature povrata koja može uzrokovati mali pad učinkovitosti izmjene topline u generatoru.

Spajanje po modelu polaz – polaz posljednji je način spajanja kolektora u sustav daljinskog grijanja koji rezultira visokim temperaturama u kolektorima te niskom efikasnošću. U praksi se ovaj način spajanja zbog spomenute nedovoljne učinkovitosti niti ne koristi.

Slika 3. prikazuje opisane načine hidrauličkog povezivanja izvora topline, odnosno solarnih toplinskih sustava na sustav daljinskog grijanja. [10]



Slika 3. Hidrauličko povezivanje solarnih kolektora u sustav daljinskog grijanja

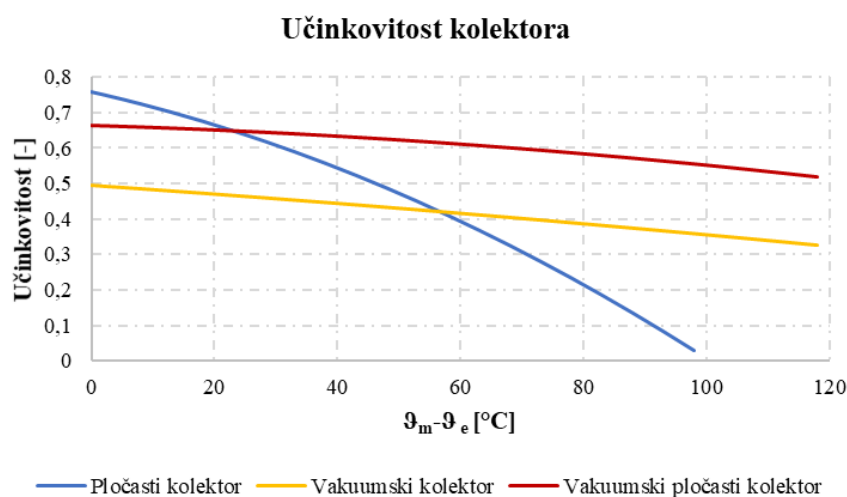
## 2.3. Osnovne komponente sustava solarnog daljinskog grijanja

### 2.3.1. Solarni kolektor

Solarni kolektor predstavlja osnovnu komponentu solarnog toplinskog sustava čija je zadaća što efikasnije prikupljanje sunčeve energije. Tijekom godina razvijana su dva osnovna modela solarnih kolektora – pločasti i vakuumski. Nadalje, relativno nedavno se na tržištu pojavio i vakuumski pločasti kolektor kojeg karakterizira visoka učinkovitost na relativno visokim temperaturama ( $>100^{\circ}\text{C}$ ) medija u kolektoru.

U sunčanim toplovodnim sustavima najčešće se koriste pločasti kolektori, a u posljednje vrijeme sve češće i vakuumski. Unatoč boljoj učinkovitosti vakuumskih kolektora pri većim razlikama temperatura radnog medija i okoline, investitori se često odlučuju za ugradnju pločastih kolektora zbog znatno manjih investicijskih troškova. Pri integraciji solarnih toplinskih kolektora u sustave daljinskog grijanja prednost imaju vakuumski kolektori zbog znatno bolje učinkovitosti pri višim temperaturnim režimima koja na dugi period pokazuje ekonomsku opravdanost. [12]

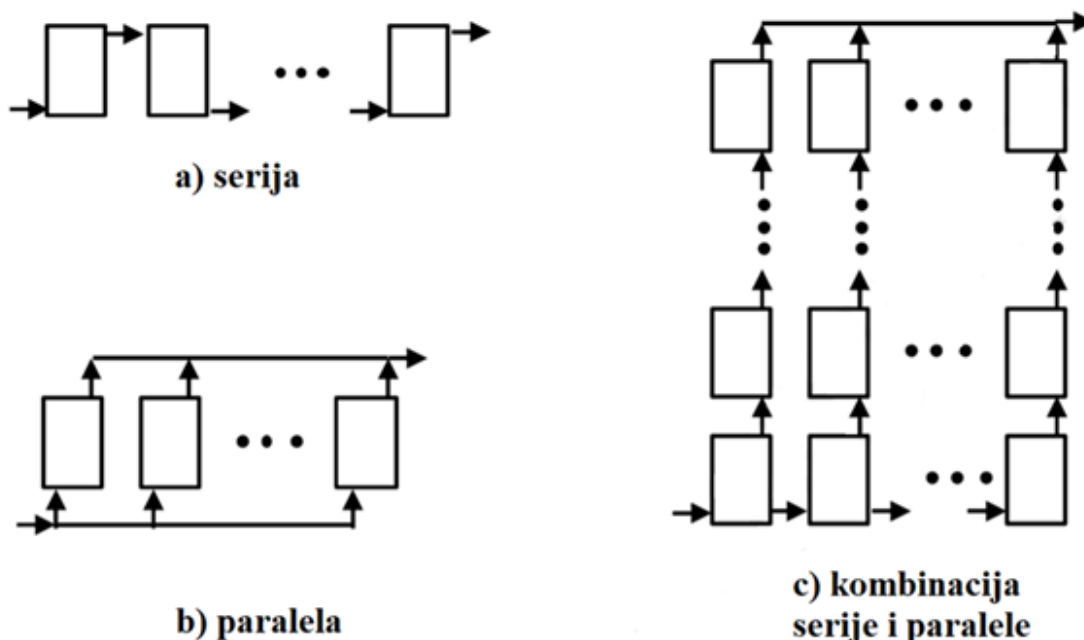
Općenito, učinkovitost kolektora se određuje ispitivanjem u akreditiranom laboratoriju, a definirana je kao omjer energije predane radnom mediju – vodi i energije upadnog zračenja. Učinkovitost u ovisnosti ozračenju, srednjoj temperaturi vode u kolektoru i temperaturi okolišnog zraka iskazuje se pomoću polinoma čiji se koeficijenti određuju regresijskom analizom na temelju eksperimentalnih podataka. Slika 4. u nastavku prikazuje karakteristične krivulje pojedinih modela kolektora pri čemu su jasno vidljive razlike u učinkovitosti, osobito pri većoj razlici temperatura medija u kolektoru i temperature okolišnog zraka. [13]



Slika 4. Usporedba učinkovitosti različitih vrsti solarnih kolektora

### 2.3.1.1. Spajanje kolektora

Solarni kolektori u načelu se spajaju serijski ili paralelno. Serijski spoj karakteriziraju veći porast temperature medija, manja učinkovitost i veći pad tlaka u kolektoru. S druge strane u paralelnom spoju se ostvaruje manji prirast temperature medija, manji pad tlaka i bolja učinkovitost. Nadalje, za ostvarivanje paralelnog spoja potrebna je veća duljina cjevovoda većih promjera zbog veće količine fluida u sustavu. U praksi je moguće koristiti kombinaciju serijskog i paralelnog spoja. Slika 5. u nastavku shematski prikazuje moguće načine spajanja solarnih kolektora. [14]



Slika 5. Načini povezivanja solarnih kolektora

### 2.3.2. Toplinski spremnik

Toplinski spremnici u novije vrijeme imaju sve značajniju ulogu u sustavima daljinskog grijanja. Osnovne uloge spremnika su ujednačavanje opterećenja proizvodnog postrojenja, pokrivanje vršnih opterećenja, povećanje fleksibilnosti postrojenja i smanjenje ovisnosti proizvodnje toplinske i električne energije u kogeneracijama. U solarnim toplinskim sustavima spremnici su posebno važni s obzirom na nerazmjer između toplinskih potreba i energije prikupljene u kolektorima.

Toplinski spremnici mogu se podijeliti prema više kategorija od čega je svakako najvažniji kapacitet odnosno razdoblje pohranjivanja. Spremnici mogu biti satni, dnevni, tjedni ili



sezonski. Važno je naglasiti kako kapacitet spremnika osim o volumenu ovisi i o temperaturnom režimu, odnosno o razlici maksimalne i minimalne temperature u spremniku. U konvencionalnoj upotrebi u sustavima solarnog daljinskog grijanja najčešći su cilindrični spremnici osjetne topline. U sustavima s velikim udjelima solarne energije zbog potrebe za velikim volumenima koriste se jamski toplinski spremnici. U novije vrijeme istražuju se bušotinski i vodonosni spremnici čija se upotreba očekuje u solarnim toplinskim sustavima vrlo velikih kapaciteta. Tablica 2. u nastavku prikazuje osnovne karakteristike opisanih spremnika.

Tablica 2. Karakteristike toplinskih spremnika

| Tip spremnika  | Cilindrični     | Jamski            | Bušotinski          | Vodonosni         |
|--|-----------------|-------------------|---------------------|-------------------|
| Medij  | Voda            | Voda              | Zemlja oko bušotine | Podzemna voda     |
| Specifični kapacitet [kWh/m <sup>3</sup> ]               | 30-80           | 30-50(60-80)      | 15-30               | 30-40             |
| Kapacitet [m <sup>3</sup> vode/m <sup>3</sup> spremnika] | 1               | 1                 | 0,2-0,33            | 0,2-0,33          |
| Temperaturni režim [°C]                                  | 5-100 (95)      | 5-95              | 5-90                | 7-18              |
| Korištenje   | Dnevni spremnik | Sezonski spremnik | Sezonski spremnik   | Sezonski spremnik |
| Specifični investicijski trošak [€/m <sup>3</sup> ]      | 100-500         | 20-40             | 20-40               | 50-60             |

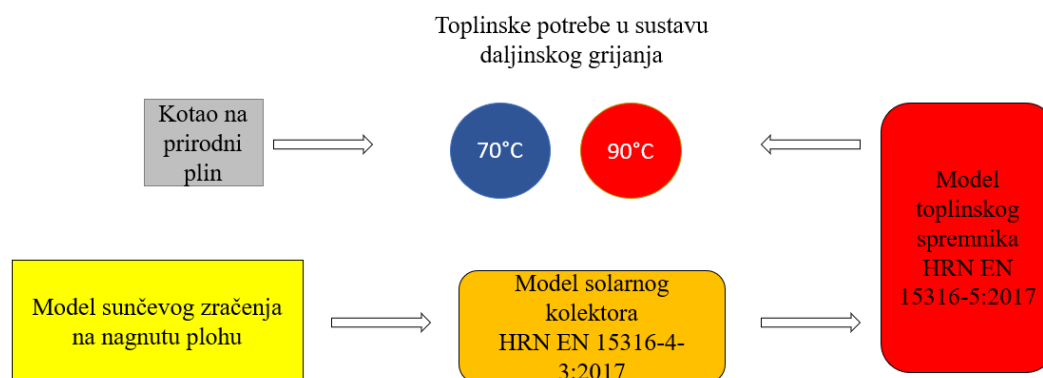
### 2.3.3. Izmjenjivači topline, pumpe, regulacijski sustav i ostala oprema

U solarnim toplinskim sustavima se za izmjenu između solarnog i sekundarnog kruga primjenjuju izmjenjivači topline, najčešće pločasti.

Osim prethodno opisanih komponenti solarni sustavi u daljinskom grijanju sastoje se i od predizoliranih toplovoda, zaporne, sigurnosne i regulacijske armature, sustava regulacije i ekspanzijske posude. U solarni krug postavljene su i pumpe, u većim sustavima najčešće frekventno regulirane u ovisnosti o intenzitetu sunčevog zračenja i temperaturi vode u kolektorima.

### 3. MODELIRANJE SOLARNOG TOPLINSKOG SUSTAVA

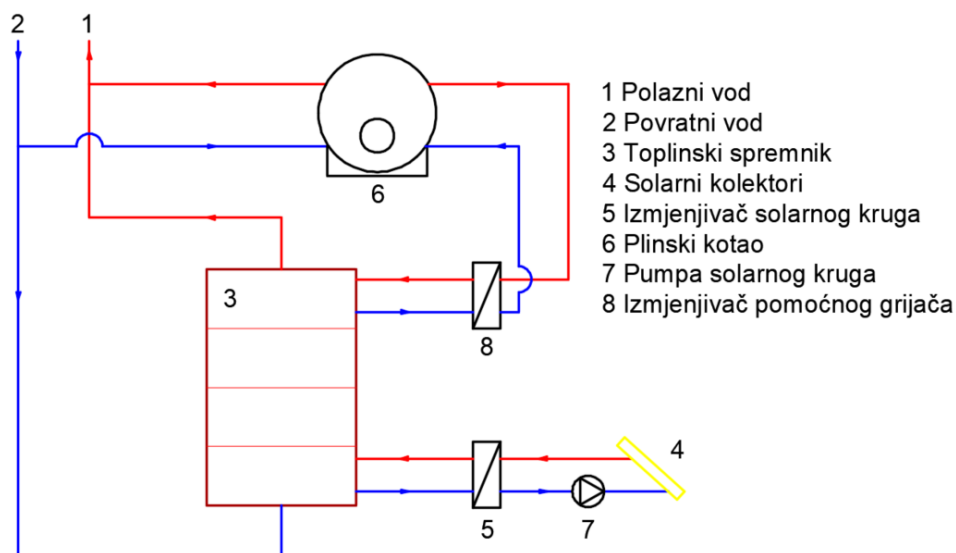
U cilju pronalaska ekonomski najprihvatljivijeg rješenja integracije solarnih kolektora u sustav daljinskog grijanja izrađen je model solarnog kolektorskog polja povezanog na toplinski spremnik. Model obuhvaća termodinamički proračun kolektorskog polja i toplinskog spremnika. Proračun se provodi na godišnjoj razini s vremenskim korakom od jednog sata. Spomenutim modelom se izračunavaju godišnje bilance energije u sustavu te se kontroliraju ostvarene temperature u spremniku kako bi se izbjegla stagnacija odnosno pregrijavanje kolektorskog kruga u ljetnim mjesecima. Slika 6. u nastavku ilustrira pojedine segmente proračuna.



Slika 6. Shematski prikaz modela solarnog toplinskog sustava

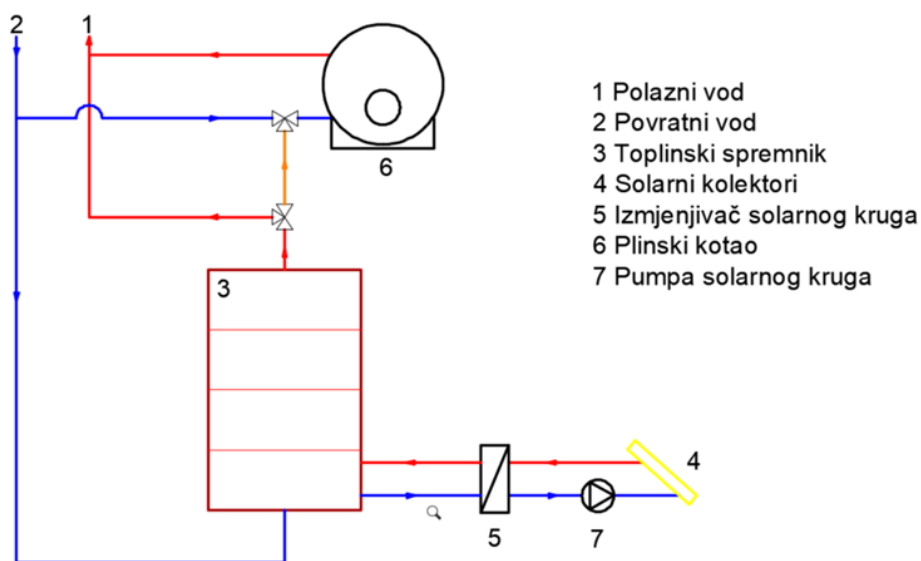
Model solarnog sustava se sastoji od proračuna upadnog sunčevog zračenja na proizvoljno nagnutu plohu, proračuna prikupljanja energije u solarnom kolektorskom polju, izmjene topline u izmjenjivaču i izračuna entalpije toplinskog spremnika. Za proračun su odabrane dvije varijante integracije solarnih kolektora u sustav daljinskog grijanja.

U prvoj varijanti se spremnik spaja na polazni vod daljinskog grijanja čime je definirana minimalna temperatura gornjeg sloja vode u spremniku u iznosu jednakom temperaturi polaznog voda daljinskog grijanja. Voda u donjem dijelu spremnika zagrijava se pomoću solarnog kolektora, a u gornjim dijelovima spremnika zagrijava se toplinskom energijom iz kotla kako bi se osigurala temperatura na izlazu iz spremnika od 90 °C. U izmjenjivaču topline pretpostavlja se temperaturni režim 90/70 °C na strani spremnika. Slika 7. prikazuje termodinamičku shemu solarnog toplinskog sustava prema varijanti I.



Slika 7. Model solarnog toplinskog sustava s grijačem unutar spremnika

U drugoj varijanti pomoćni grijač je postavljen izvan spremnika što je ekvivalentno spajanju solarnog kolektorskog polja na povratni vod pri čemu solarni kolektori služe za predgrijavanje ogrjevne vode iz povratnog voda daljinskog grijanja nakon čega slijedi daljnje grijanje ogrjevne vode u generatoru topline. Slika 8. prikazuje termodinamičku shemu solarnog toplinskog sustava prema varijanti II. U slučaju kada je temperatura vode u spremniku jednaka ili veća od temperature polaznog voda sustava daljinskog grijanja voda iz spremnika se izravno odvodi u polazni vod sustava daljinskog grijanja.



Slika 8. Model solarnog toplinskog sustava s pomoćnim grijačem izvan spremnika

Intenzitet sunčevog zračenja na proizvoljno nagnutu plohu izračunan je koristeći izotropni model na temelju poznatih podataka o satnim vrijednostima intenziteta sunčevog zračenja na okomitu plohu i prosječnih satnih vrijednosti temperature zraka.

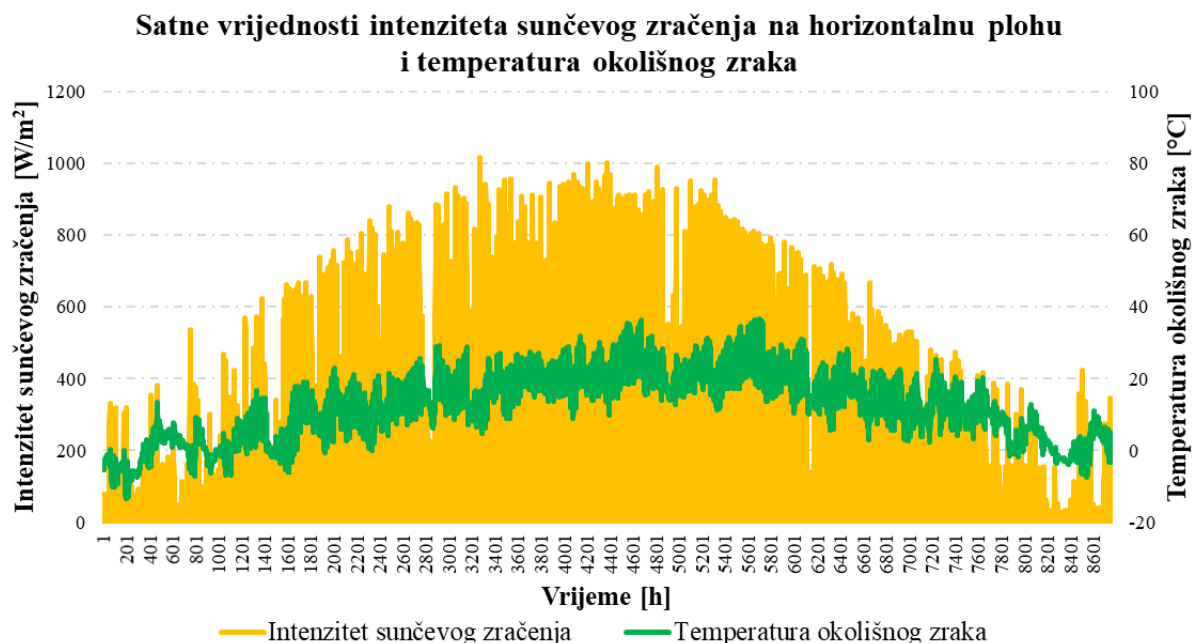
Apsorbirana energija u kolektorskom polju računa se prema normi HRN EN 15316-4-3:2017.[15] Model toplinskog spremnika sa temperaturnom stratifikacijom u 4 sloja izrađen je sukladno normi HRN EN 15316-5:2017. [16] S obzirom na to da efikasnost kolektora ovisi o ulaznoj temperaturi vode u kolektor koja se mijenja u ovisnosti o apsorbiranoj energiji kolektorskog polja iterativnim postupkom izračunana je satna vrijednost srednje temperature u kolektoru.

### **3.1. Ulazni podaci i ograničenja – tehnički dio**

Izbor ekonomski optimalnog rješenja integracije solarnog sustava u daljinsko grijanje podložan je većem broju tehničkih ograničenja koja su u najvećoj mjeri definirana lokacijom i izvedbom postojećeg sustava daljinskog grijanja. Nadalje, osim tehničkih ograničenja važni utjecajni faktori su intenzitet sunčevog zračenja i vanjska temperatura koji izravno utječu na efikasnost sustava. U nastavku su ukratko opisana pojedina ograničenja kao i ulazne vrijednosti varijabli korištenih u proračunu.

#### **3.1.1. Sunčevo zračenje i vanjska temperatura**

Najvažniji parametar koji izravno utječe na prikupljanje toplinske energije u kolektoru je dostupna energija sunca odnosno ozračenje. Za proračun ozračenja na nagnutu plohu korištene su prosječne satne vrijednosti ozračenja na horizontalnu plohu Državnog hidrometeorološkog zavoda (DHMZ). Nadalje, korištene su i prosječne satne temperature okolišnog zraka u klimatskom području grada Zagreba. Slika 9. u nastavku prikazuje prosječne satne vrijednosti intenziteta sunčevog zračenja, kao i temperatura okolišnog zraka.. Maksimalne vrijednosti sunčevog zračenja na horizontalnu plohu iznose  $1.016 \text{ W/m}^2$ , a temperature okolišnog zraka kreću se u rasponu između  $-13,3$  i  $36,6 \text{ }^\circ\text{C}$ . [17]

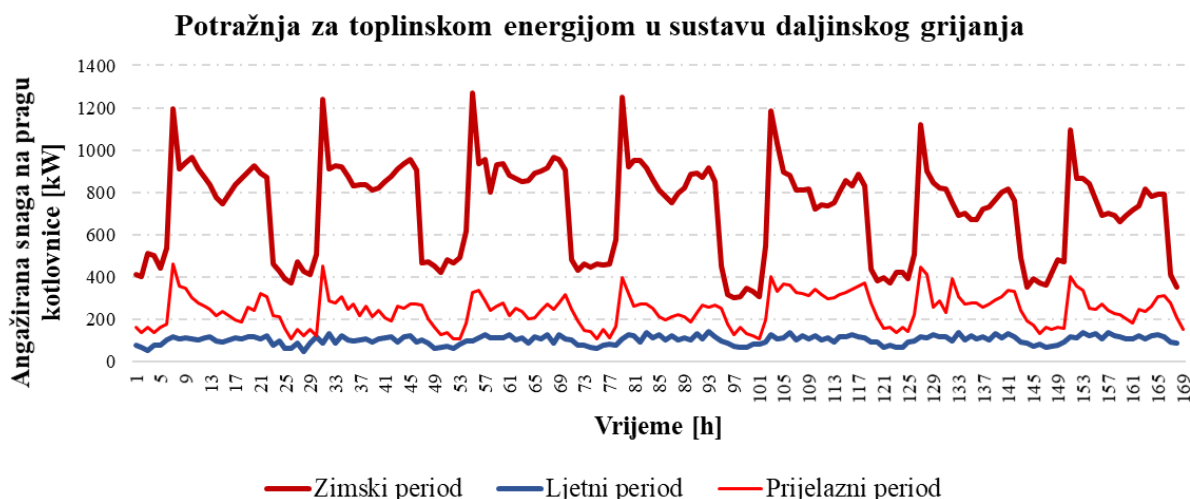


Slika 9. Dinamika ulaznih parametara - sunčevo zračenje i temperatura okolišnog zraka

### 3.1.2. Pilot sustav daljinskog grijanja

Sustav daljinskog grijanja nalazi se u klimatskom području grada Zagreba. U sezoni grijanja, točnije od rujna do svibnja, sustavom se isporučuje toplinska energija za grijanje i pripremu PTV-a, a tijekom ljetnih mjeseci sustavom se isporučuje toplinska energija za pripremu PTV-a. Na sustav daljinskog grijanja priključeno je ukupno 227 korisnika, a ukupna instalirana snaga toplinskih podstanica iznosi 2.654 kW. Za generiranje topline koriste se tri kotla na prirodni plin ukupnog učina 4.800 kW koji tijekom godine u sustav isporučuju prosječno 2.952 MWh toplinske energije. [18]

Trenutačno je sustav generiranja topline u pogonu 24 sata na dan, osim u slučaju planiranog remonta ili kvarova. Dinamika potrošnje toplinske energije u sustavu daljinskog grijanja u korelaciji je s podacima iz literature za sustave s pripremom PTV-a u ljetnim mjesecima. Značajnije varijacije izlazne snage tijekom dana karakteristične su za sezonu grijanja, a tijekom ljeta su one znatno manje. Maksimalna vrijednost angažirane snage na pragu kotlovnice, koja je u zimi i do nekoliko puta veća u odnosu na snagu angažiranu u noćnim satima, iznosi 1.345 kW. S druge strane, u ljetnim mjesecima angažirana snaga varira između 100 i 150 kW. Slika 10. prikazuje dinamiku potreba za toplinskom energijom u sustavu daljinskog grijanja u karakterističnim periodima po 7 dana; zimskom, ljetnom i prijelaznom. [18]



Slika 10. Potrebe za toplinskom energijom u sustavu daljinskog grijanja

### 3.1.2.1. Zgrada kotlovnice

Kotlovnica spomenutog sustava daljinskog grijanja nalazi se u sklopu zgrade sportske namjene. Pretpostavlja se da je cjelokupna površina ravnog krova dimenzija 45x35 m, veće dimenzije u smjeru istok-zapad, na raspolaganju za postavljanje solarnih kolektora i ostalih komponenti. Nadalje, pretpostavlja se da je nosivost krovne konstrukcije dovoljna da izdrži dodatno naprezanje koje se javlja zbog težine solarnih kolektora, radnog medija i ostale opreme. Tablica 3. u nastavku prikazuje osnovne tehničke parametre postojećeg sustava daljinskog grijanja. [18]

Tablica 3. Osnovni tehnički parametri postojećeg sustava daljinskog grijanja

| Opis   | Vrijednost [mjerna jedinica] |
|--|------------------------------|
| Ukupan broj priključenih korisnika                       | 227                          |
| Ukupna nazivna snaga toplinskih podstanica               | 2.654 [kW]                   |
| Godišnje potrebe za toplinskom energijom                 | 2952,00 [MWh]                |
| Maksimalna angažirana snaga                              | 1.345,00 [kW]                |
| Izvori topline   | 3 kotla na prirodni plin     |
| Ukupni kapacitet izvora topline                          | 4.800,00 [kW]                |
| Temperaturni režim                                       | 90/70 [°C]                   |
| Ukupna površina krova za postavljanje solarnih kolektora | 1.575 [m <sup>2</sup> ]      |

### 3.2. Modeliranje sunčevog zračenja na nagnutu plohu uz zasjenjenje

Za proračun intenziteta sunčevog zračenja na proizvoljno nagnutu plohu korišten je izotropni model sunčevog zračenja. U model je također uključen i efekt zasjenjenja s obzirom na to da se kolektori postavljaju u više paralelnih redova što uzrokuje zasjenjenje u jutarnjim i večernjim satima, a osobito u zimskim mjesecima. Proračun sunčevog zračenja uz efekt zasjenjenja u potpunosti je preuzet iz literature. [19]

Prema izrazu (1) ukupno zračenje na nagnutu plohu jednako je zbroju direktnog ( $I_{dirr}$ ), difuznog ( $I_{diff}$ ) i reflektiranog zračenja ( $I_{ref}$ ):

$$I_T = I_{dirr} + I_{diff} + I_{ref} \quad (1)$$

#### 3.2.1. Direktno zračenje

Direktno zračenje na nagnutu plohu računa se prema izrazu (2):

$$I_{dirr} = I_b \cdot R_b \cdot (1 - Sh_{frac}) \quad (2)$$

Pri čemu su:

$I_b$  – direktna komponenta sunčevog zračenja na horizontalnu plohu

$R_b$  – odnos između direktnog sunčevog zračenja na nagnutu i horizontalnu plohu

$Sh_{frac}$  – udio površine kolektorskog polja u sjeni

Proračun udjela površine kolektora u sjeni za kolektorsko polje prikazan je u nastavku.

Nadalje, odnos između direktnog zračenja na nagnutu i horizontalnu plohu računa se prema izrazu (3):

$$R_b = \frac{\cos \theta}{\cos \theta_z} \quad (3)$$

Pri čemu su:

$\theta$  – kut između sunčevih zraka i normale nagnute plohe

$\theta_z$  – kut između sunčevih zraka i vertikale

Za plohe orijentirane prema jugu ( $\gamma_{surf}=0$ )  $\cos \theta$  računa se prema jednadžbi (4):

$$\cos \theta = \cos(\phi - \beta) \cdot \cos \delta \cdot \cos \omega + \sin(\phi - \omega) \cdot \sin \delta \quad (4)$$

Pri čemu su:

$\phi$  – geografska širina

$\delta$  – kut nagiba zemljine osi prema ravnini orbite

$\beta$  – kut nagiba panela

Kut nagiba zemljine osi prema ravnini orbite računa se prema izrazu (5):

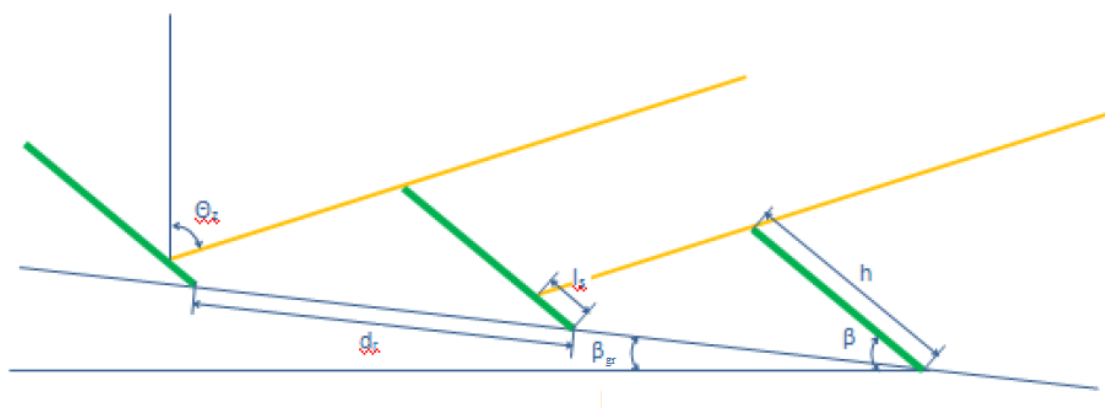
$$\delta = 23,45 \cdot \sin[360^\circ(284 + n) / 365] \quad (5)$$

Pri čemu je:

$n$  – broj dana u godini

### 3.2.1.1. Direktno zračenje uz efekt zasjenjenja

Slika 11. u nastavku prikazuje dimenzije i kutove pri proračunu efekta zasjenjenja kod proračuna direktnog zračenja.



Slika 11. Skica uz proračun direktnog zračenja [19]

Duljina sjene u ravnini koja odgovara satnom kutu  $\omega$  računa se prema izrazu (6):

$$l_{s\omega} = h_{\omega} - \frac{d_{r\omega}}{\sin(180 - \beta'_{\omega} - (90 - (\theta_z - \beta_{gr,\omega})))} \cdot \sin(90 - (\theta_z - \beta_{gr,\omega})) \quad (6)$$

Pri čemu su:

$l_{s\omega}$  – duljina sjene na površinu

$h_{\omega}$  – duljina kolektora na površinu

$d_{r\omega}$  – udaljenost između redova

$s'_{\omega}$  – nagib kolektora u odnosu na tlo

$\beta_{gr,\omega}$  – nagib tla

Indeks  $\omega$  označava da su sve veličine svedene na ravninu satnog kuta  $\omega$ . Nadalje, projekcija duljine kolektora na ravninu koja odgovara satnom kutu računa se prema izrazu (7):

$$h_{\omega} = \sqrt{h_{gr\omega}^2 + (\sin \beta \cdot h)^2 - 2 \cdot h_{gr\omega} \cdot (\sin \beta \cdot h) \cdot \cos(90 - (\beta_{gr,surf\omega} - \beta_{gr\omega}))} \quad (7)$$

Pri čemu je:

$h_{gr,\omega}$  – projekcija duljine kolektora na tlo koja se računa prema izrazu (8):



$$h_{gr\omega} = \frac{\cos \beta \cdot h}{\cos(\beta_{gr,surf\omega} - \beta_{gr\omega}) \cdot \cos \omega} \quad (8)$$

Nagib tla u odnosu na satni kut računa se prema izrazu (9):

$$\beta_{gr\omega} = \arcsin(\sin \beta_{gr} \cdot \cos(\omega - \gamma_{gr})) \quad (9)$$

Udaljenost između redova u ravnini satnog kuta dobiva se prema izrazu (10):

$$d_{r\omega} = \frac{\cos \beta_{gr,surf}}{\cos(\omega - \gamma_{surf}) \cdot \cos \beta_{gr\omega}} \cdot d_r \quad (10)$$

Pri čemu je:

$d_r$  – udaljenost između redova u ravnini tla

Nagib tla u smjeru orijentacije površine kolektora računa se prema izrazu (11):

$$\beta_{gr,surf} = \arcsin(\sin \beta_{gr} \cdot \cos(\gamma_{surf} - \gamma_{gr})) \quad (11)$$

Pri čemu su:

$\gamma_{surf}$  – orijentacija površine kolektora u odnosu na jug – azimut kolektora

$\gamma_{gr}$  – orijentacija tla u odnosu na jug – azimut tla

Nagib površine kolektora u satnom kutu sveden na nagib ravninu koja odgovara satnom kutu računa se prema izrazu (12):

$$s'_{\omega} = \arcsin\left(\frac{\sin(90 - \beta_{gr\omega}) \cdot \sin \beta \cdot h}{h_{\omega}}\right) \quad (12)$$

Ukupni udio površine kolektora u sjeni računa se prema izrazu (13):

$$Sh_{frac} = \frac{(N_r - 1) \cdot \min\left(\frac{l_s}{h_{\omega}}, 1\right)}{N_{rows}} \quad (13)$$

### 3.2.2. Difuzno zračenje

Difuzna komponenta zračenja na nagnutu plohu jednaka je umnošku difuznog zračenja ( $I_d$ ) na horizontalnu plohu i odnosa između difuznog zračenja na nagnutu i horizontalnu plohu uvažavajući efekt zasjenjenja ( $R_{d,sh}$ ) sukladno jednadžbi (14). Detaljan proračun prikazan je u nastavku.

$$I_{diff} = I_d \cdot R_{d,sh} \quad (14)$$

Za izračun difuzne komponente zračenja koristi se indeks prozračnosti atmosfere ( $k_T$ ) koji se računa prema izrazu (15):

$$k_T = \frac{I}{I_0} \quad (15)$$

Pri čemu je:

$I_0$  – ekstraterestičko zračenje

Iznos ekstraterestičkog zračenja u pojedinom satu računa se prema izrazu (16).

$$I_0 = G_s \cdot \left( 1 + 0,033 \cdot \cos \frac{360 \cdot n}{365} \right) \cdot \cos \theta_z \quad (16)$$

Pri čemu je:

$G_s$  – Sunčeva konstanta u iznosu 1347 W/m<sup>2</sup>.

Tablica 4. prikazuje veze između indeksa prozračnosti i difuznog zračenja uz pripadajuća ograničenja u prvom stupcu pri čemu je  $\alpha$  kut između horizonta i središta sunčevog diska. [20]

Tablica 4. Izrazi za određivanje veze između indeksa prozračnosti i difuznog zračenja

| Interval              | Ograničenje                        | Izraz  |
|-----------------------|------------------------------------|--|
| $0 \leq k_T \leq 0,3$ | $\frac{I_d}{I} \leq 1,0$           | $\frac{I_d}{I} = 1,020 - 0,254 \cdot k_T + 0,0123 \cdot \sin \alpha$ |
| $0,3 < k_T \leq 0,78$ | $0,1 \leq \frac{I_d}{I} \leq 0,97$ | $\frac{I_d}{I} = 1,400 - 1,749 \cdot k_T + 0,177 \cdot \sin \alpha$  |
| $0,78 < k_T$          | $0,1 \leq \frac{I_d}{I}$           | $\frac{I_d}{I} = 0,486 \cdot k_T + 0,182 \cdot \sin \alpha$          |

### 3.2.2.1. Difuzno zračenje uz efekt zasjenjenja

Utjecaj zasjenjenja difuznog zračenja ostvaruje se na drugom i svim sljedećim redovima. Slika 12. prikazuje dimenzije i kutove korištene za proračun difuznog zračenja.

Kut koji opisuje dio horizonta s kojega zračenje dopire do kolektora za prvi red računa se prema izrazu (17)

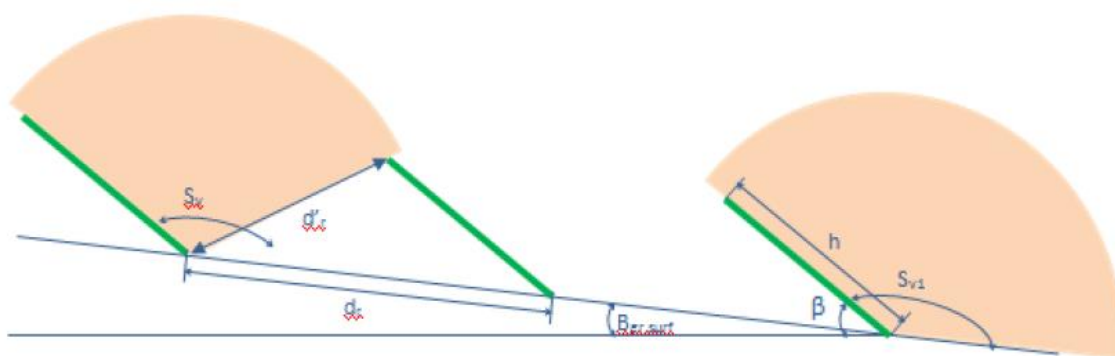
$$S_{v1} = 180 - (\beta - \beta_{gr, surf}) \quad (17)$$

Omjer difuznog zračenja na prvi red i horizontalnu površinu računa se prema izrazu (18):

$$R_{d1} = 0,5 \cdot (1 - A_l) \cdot (1 + \cos(\beta - \beta_{gr, surf})) \cdot \left( 1 + \sin^3 \left( \frac{\beta}{2} \right) \right) + A_l \cdot R_b \quad (18)$$

Pri čemu je:

$A_l$  – indeks anizotropije



Slika 12. Skica uz proračun difuznog zračenja [19]

Omjer između difuznog zračenja na iduće redove i horizontalnu plohu računa se prema izrazu (19):

$$R_d = 0,5 \cdot (1 - A_f) \cdot (1 + \cos(180 - s_v)) \cdot \left( 1 + \sin^3 \left( \frac{\beta}{2} \right) \right) + A_f \cdot R_b \cdot (1 - Sh_{frac}) \quad (19)$$

Za proračun omjera  $R_d$  kolektor je podijeljen u 10 dijelova te je konačna vrijednost jednaka prosjeku omjera  $R_d$ . Kut  $S_v$  za pojedini segment računa se prema izrazu (41):

$$S_v = \arccos \left( \frac{h^2 + d_r'^2 - d_r^2}{2 \cdot h \cdot d_r'} \right) \quad (20)$$

Konačno, omjer difuznog zračenja na nagnutu plohu i horizontalu računa se prema izrazu (21):

$$R_{d,sh} = \frac{((N_{rows} - 1) \cdot R_d + R_{d1})}{N_{rows}} \quad (21)$$

### 3.2.3. Reflektirano zračenje

Prema jednadžbi (22) reflektirano zračenje ( $I_{ref}$ ) na nagnutu plohu jednako je zbroju reflektiranog direktnog i difuznog zračenja, pri čemu se u obzir uzima efekt zasjenjenja površine od drugih kolektora.

$$I_{ref} = I_b \cdot R_{r,b} + I_d \cdot R_{r,d} \quad (22)$$

Pri čemu su:

$R_{r,b}$  – odnos reflektiranog direktnog zračenja na nagnutu i horizontalnu površinu uvažavajući učinak zasjenjenja

$R_{r,d}$  – odnos reflektiranog difuznog zračenja na nagnutu i horizontalnu površinu uvažavajući učinak zasjenjenja

Detaljniji izrazi koji opisuju proračun za korekciju dobivenih vrijednosti zbog zasjenjenja prikazani su u nastavku.

### 3.2.3.1. Reflektirano zračenje uz efekt zasjenjenja

Direktno i difuzno zračenje na prvi red kolektora računaju se prema izrazu (23):

$$R_{r1,b} = R_{r1,d} = 0,5 \cdot (1 - \cos(\beta - \beta_{gr,surf})) \cdot \rho \quad (23)$$

Pri čemu je:

$\rho$  – faktor refleksije tla

Reflektirano zračenje na redove u sjeni računa uz pomoć omjera reflektiranog zračenja na prvi red –  $r_{p-1}$ . Direktno reflektirano zračenje na redove u sjeni ovisi o duljini zrake na tlu -  $l_{sun}$ . Duljina zrake je 0 ako je površina djelomično u sjeni, što znači da direktno zračenje ne dolazi do tla ispred kolektora, a u slučaju kad zračenje dopire do tla ispred kolektora duljina  $l_{sun}$  računa se prema izrazu (24):

$$l_{sun} = d_{row} - \frac{h_{\omega}}{\sin(90 - \theta'_{z\omega})} \cdot \sin(180 - s'_{\omega} - (90 - \theta'_{z\omega})) \quad (24)$$

Nadalje, spomenuti omjer računa se prema izrazu (25):

$$r_{p-1,b} = \frac{l_{sun}}{h} \quad (25)$$

Reflektirano direktno zračenje redova u sjeni se računa prema izrazu (26):

$$R_{m,b} = R_{r1,b} \cdot r_{p-1,b} \quad (26)$$

Konačno, reflektirano zračenje  $R_{r,b}$  računa se prema izrazu (27):

$$R_{r,b} = \frac{((N_{rows} - 1) \cdot R_{m,b} + R_{r1,b})}{N_{rows}} \quad (27)$$

Reflektirano difuzno zračenje na redove u sjeni računa se kao omjer reflektiranog difuznog zračenja na prvi red prema izrazu (28), a konačni omjer reflektiranog difuznog zračenja na nagnutu površinu kolektora u sjeni prema izrazu (29):

$$r_{p-1,d} = \frac{S_v}{(180 - (\beta - \beta_{gr,surf}))} \quad (28)$$

$$R_{m,d} = R_{r1,d} \cdot r_{p-1,d} \quad (29)$$

Konačno, ukupno reflektirano difuzno zračenje računa se prema izrazu (30):

$$R_{r,d} = \frac{((N_{rows} - 1) \cdot R_{m,d} + R_{r1,d})}{N_{rows}} \quad (30)$$

### 3.3. Odabir kolektora i dimenzioniranje solarnog kolektorskog polja

Povoljna orijentacija zgrade u prostoru omogućava okretanje kolektora prema jugu ( $\gamma = 0^\circ$ ) s ciljem ostvarivanja maksimalnog iznosa prikupljene energije u kolektorima. Prethodno opisani proračun sunčevog zračenja na nagnutu plohu kolektora proveden je za uspravno i polegnuto postavljene kolektore kako bi se ispitale obje mogućnosti i odredio povoljniji raspored kolektora.

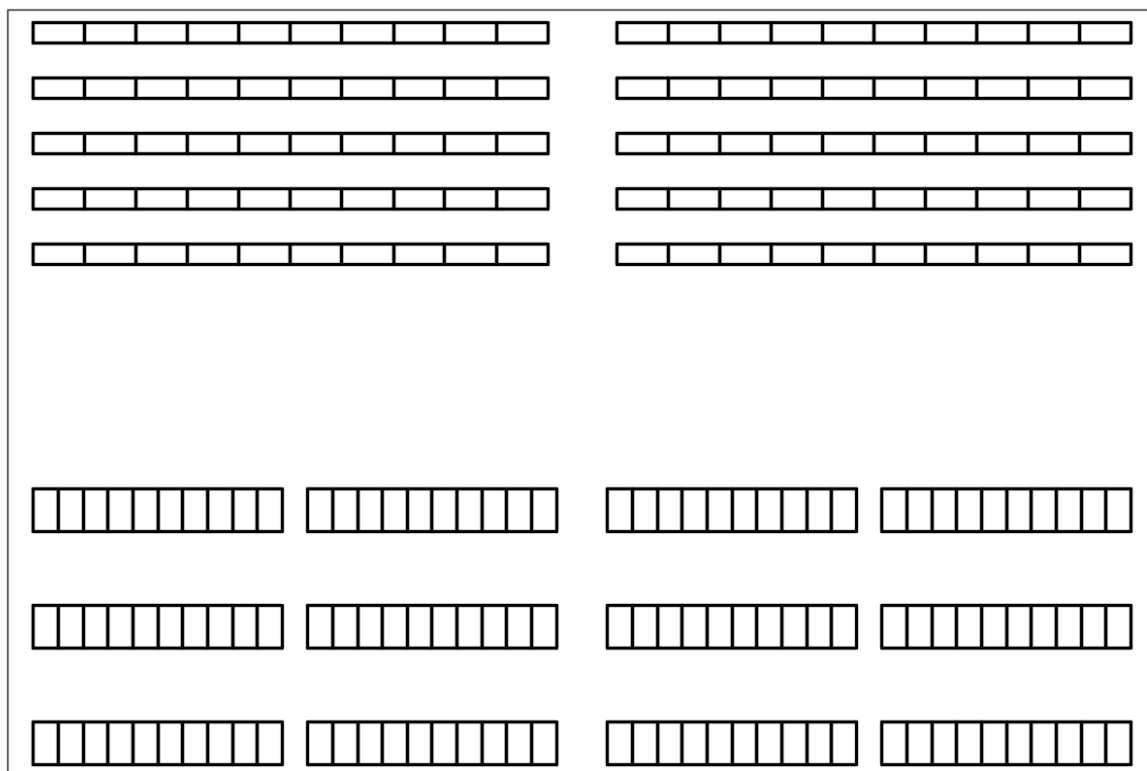
Uvažavajući dimenziju zgrade u smjeru istok – zapad te dimenzije kolektora njihov broj u jednom redu određen je tako da je između kolektora ostavljen slobodan prostor dovoljan za postavljanje toplovoda i ostale opreme kao i za slobodno kretanje po krovu prilikom održavanja solarnog toplinskog sustava. Nadalje, kolektori su posloženi u veće grupe koje se sastoje od 10 kolektora. Ukupan broj kolektora u polju jednak je umnošku broja redova i broja kolektora u redu prema izrazu (31), a ukupna površina kolektorskog polja jednaka je umnošku broja kolektora u polju i bruto površine kolektora prema izrazu (32).

$$N_{sol,mod} = N_r \cdot N_{cr} \quad (31)$$

$$A_{sol} = A_{sol,mod} \cdot N_{sol,mod} \quad (32)$$

Proračun specifičnog iznosa dozračene energije po površini proveden je za raspon broja redova od 1 pa do maksimalnog mogućeg broja redova uvažavajući dimenziju zgrade u smjeru sjever – jug. Optimalni nagib kolektora u pojedinom slučaju odabran je na temelju rezultata proračuna sunčevog zračenja po izotropnom modelu. Slika 13. u nastavku prikazuje tlocrt građevine na kojemu su prikazani mogući rasporedi kolektora. U gornjem dijelu prikazan je raspored solarnih kolektora u slučaju kada su kolektori postavljeni tako da je dulja stranica paralelna s horizontalom, a u donjem dijelu slike prikazan je raspored u slučaju kada je kraća stranica kolektora paralelna s horizontalom. U nastavku se slučajevi opisuju tako da se za slučaj kada je dulja stranica paralelna s horizontalom koristi izraz da je kolektor postavljen uspravno, a u drugom slučaju da je kolektor polegnut.

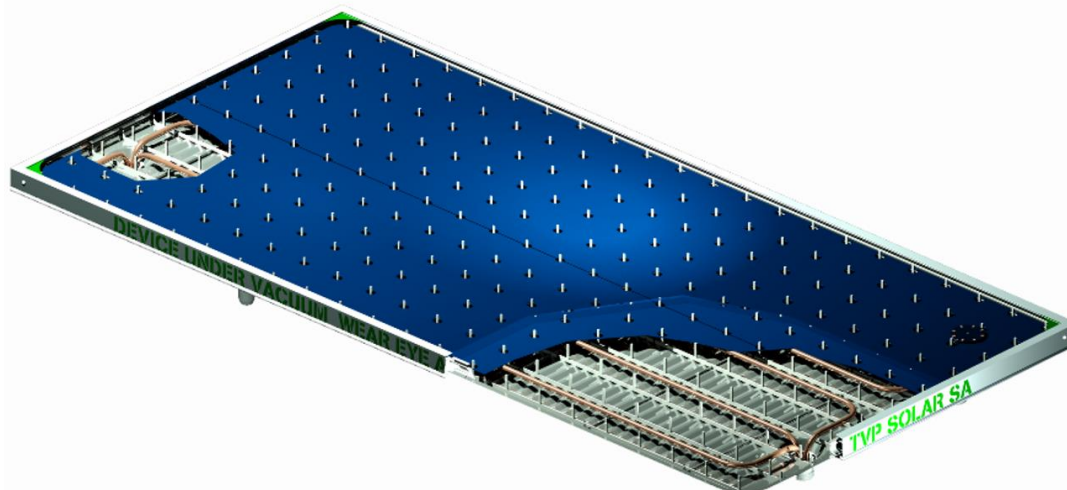
Za proračun je odabran je kolektor *MT – Power 4* zbog visoke efikasnosti prikupljanja topline pri višim temperaturama radnog medija. S obzirom na to da se solarno kolektorsko polje nalazi na zgradi u kojoj se nalazi kotlovnica kolektorsko polje je centralizirano integrirano na sustav daljinskog grijanja preko postojeće kotlovnice. Nadalje, pretpostavlja se da su kolektori spojeni u paralelu.



Slika 13. *Mogući rasporedi solarnih kolektora*

### 3.3.1. Kolektor MT – Power 4

Pločasti vakuumski kolektor MT – Power 4 namijenjen je za proizvodnju toplinske i rashladne energije u procesnoj industriji, daljinskom grijanju, desalinizaciji i sličnim namjenama. Slika 14. u nastavku prikazuje model spomenutog kolektora na kojemu se mogu vidjeti karakteristični dijelovi vakuumskog pločastog kolektora.



Slika 14. *Solarni kolektor TVP MT Power 4*

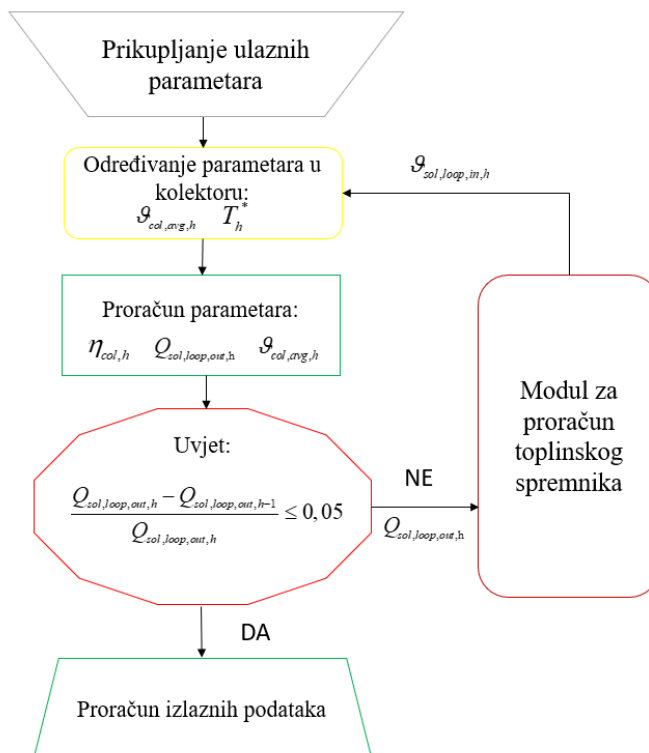
Kolektor je prikladan za primjenu u solarnim toplinskim sustavima većeg kapaciteta. Karakterizira ga visoka efikasnost čak i pri povišenim temperaturama radnog medija, a ujedno je i jedini kolektor certificiran za rad na temperaturama do 200°C. Tablica 5. sadrži vrijednosti najvažnijih karakterističnih parametara kolektora *MT – Power 4* preuzetih iz izvještaja o testiranju kolektora, a koji se koriste u proračunu. [13]

Tablica 5. Karakteristike odabranog solarnog kolektora

| Opis  | Oznaka              | Vrijednost | Mjerna jed.                     |
|---|---------------------|------------|---------------------------------|
| Referentna površina kolektora               | $A_G$               | 1,96       | m <sup>2</sup>                  |
| Duljina                                     | $l$                 | 975        | mm                              |
| Širina                                      | $w$                 | 2.015      | mm                              |
| Visina                                      | $h$                 | 51         | mm                              |
| Masa  | $m$                 | 53         | kg                              |
| Priključak na kolektor                      | -                   | DN 32      | -                               |
| Optička učinkovitost solarnog kolektora     | $\eta_0$            | 0,737      | -                               |
| Faktor polukružne promjene upadnog kuta     | $K_{hem(50^\circ)}$ | 0,957      | -                               |
| Koeficijent toplinskih gubitaka prvog reda  | $a_1$               | 0,504      | W/m <sup>2</sup> K              |
| Koeficijent toplinskih gubitaka drugog reda | $a_2$               | 0,006      | W/m <sup>2</sup> K <sup>2</sup> |

### 3.4. Modeliranje prikupljanja energije u kolektorskom polju – EN 15316-4-3 [15]

Za izračun korisne topline koja se predaje radnom mediju u kolektorskom polju proračun je proveden sukladno normi HRN EN 15316-4-3:2017. Normom je definiran proračun apsorbirane toplinske energije u kolektoru, toplinskih gubitaka u kolektorskom polju te količine električne energije potrebne za pogon crpki i ostale opreme. S obzirom na to da je učinkovitost kolektora ovisna o srednjoj temperaturi vode u kolektoru proračun se provodi iterativno kako unutar kolektora tako i u vezi s modelom toplinskog spremnika. Slika 15. prikazuje tijek proračuna unutar kolektora sukladno prethodnom opisu. Kao što se može vidjeti iz shematskog prikaza proračuna uvjet za završetak iteracije jest da razlika između trenutnog i prethodnog koraka iteracije bude manja od 5%.



Slika 15. Tijek proračuna solarnog kolektora

### 3.4.1. Inicijalni proračuni

Prvi korak proračuna obuhvaća izračun ukupnog masenog protoka u kolektorskom polju sukladno jednadžbi (12)

$$m_{col} = m_{col,h} \cdot A_{sol,mod} \cdot N_{col} \quad (33)$$

Pri čemu su:

$m_{col}$  – maseni protok u kolektorskom polju

$m_{col,h}$  – specifični maseni protok u solarnom kolektoru

$A_{sol,mod}$  – površina solarnog kolektora

$N_{col}$  – ukupan broj solarnih kolektora

Nakon izračuna masenog potoka potrebno je definirati koeficijent gubitka topline cjevovoda u kolektorskom polju koji je prema izrazu (34) jednak:

$$H_{sol,loop} = c_{ls,1} + c_{ls,2} \cdot A_{sol,mod} \cdot N_{sol,mod} \quad (34)$$

Pri čemu su:

$c_{ls,1}, c_{ls,2}$  – koeficijenti toplinskih gubitaka solarnog polja



Snaga elektromotora crpke primarnog kruga kao i električna snaga regulacijske opreme definirani su normom te se računaju sukladno izrazu (35) odnosno (36):

$$P_{sol,pmp} = c_{sp,1} + c_{sp,2} \cdot A_{sol,mod} \cdot N_{sol,mod} \quad (35)$$

Pri čemu su:

$c_{sp,1}, c_{sp,2}$  – koeficijenti snage pumpe

$$P_{sol,ctrl} = c_{ctrl,1} \cdot A_{sol,mod} \cdot N_{sol,mod} \quad (36)$$

Pri čemu je:

$c_{ctrl,1}$  – koeficijent snage sustava regulacije

Tablica 6. u nastavku prikazuje vrijednosti pojedinih koeficijenta koji su korišteni u proračunu, a preuzeti su iz norme.

Tablica 6. Konstante korištene u proračunu solarnog kolektorskog polja

| Opis                                | Oznaka       | Vrijednost | Mjerna jed.           |
|-------------------------------------|--------------|------------|-----------------------|
| Faktor snage pumpe prvog reda       | $c_{sp,1}$   | 25         | W                     |
| Faktor snage pumpe drugog reda      | $c_{sp,2}$   | 2          | W/(Km <sup>2</sup> )  |
| Faktor snage regulacijskog sustava  | $c_{ctrl,1}$ | 2          | W/m <sup>2</sup>      |
| Specifični toplinski kapacitet vode | $c_w$        | 0,00161    | kWh/kgK               |
| Maseni protok fluida u kolektoru    | $m_{col}$    | 0,02       | kg/(sm <sup>2</sup> ) |

### 3.4.2. Iterativni proračun prikupljanja energije u solarnom kolektorskom polju

Prikupljena energija u solarnim kolektorima funkcija je intenziteta sunčevog zračenja, temperature okolišnog zraka i srednje temperature vode u kolektoru. Srednja temperatura vode u kolektoru ovisi o ulaznoj i izlaznoj temperaturi vode i jednaka je njihovoj srednjoj vrijednosti. Ulazna temperatura mijenja se s obzirom na stanje u spremniku, a izlazna temperatura ovisi o prikupljenoj energiji te je za određivanje konačnih vrijednosti potrebno provesti iterativni proračun. Iteracija se unutar kolektora provodi četiri puta, a unutar kruga solarni kolektor – spremnik dok se ne postigne razlika prikupljene energije između dva koraka iteracije manja od 5%. U prvom koraku iteracije srednja temperatura vode u kolektoru određuje se prema izrazu (37).

$$\mathcal{Q}_{col,avg,h,i} = \mathcal{Q}_{sol,loop,in,h-1,i} + \frac{0,4 \cdot I_{sol,h} \cdot A_{sol}}{m_{col,i} \cdot C_w \cdot 2} \quad (37)$$

Prvi korak proračuna je određivanje reducirane temperaturne razlike u kolektoru prema izrazu (38).

$$T_{h,i}^* = \frac{\mathcal{G}_{col,avg,h,i} - \mathcal{G}_{e,h,i}}{I_{sol,h}} \quad (38)$$

Idući korak obuhvaća proračun efikasnosti kolektora u pojedinom vremenskom koraku prema izrazu (39).

$$\eta_{col,h,i} = \eta_0 \cdot K_{hem(50^\circ)} - a_1 \cdot T_{h,i}^* - a_2 \cdot T_{h,i}^{*2} \cdot I_{sol,h} \quad (39)$$

Koristeći vršnu efikasnost kolektora, ukupnu površinu kolektora i intenzitet sunčevog zračenja prema izrazu (40) izračunava se ukupna apsorbirana energija u kolektoru.

$$Q_{sol,gen,h,i} = \eta_0 \cdot I_{sol,h} \cdot A_{sol} \cdot t_{ci} \quad (40)$$

Ukupna energija generirana u kolektorskom polju izračunava se prema izrazu (41):

$$Q_{sol,out,h} = \eta_{col,h,i} \cdot I_{sol,h} \cdot A_{sol} \cdot t_{ci} \quad (41)$$

Ukupni gubitci u kolektorskom polju jednaki su umnošku koeficijenta gubitka topline i razlike temperature sukladno izrazu (42):

$$Q_{sol,loop,ls,h,i} = H_{sol,loop} \cdot (\mathcal{G}_{col,avg,h,i} - \mathcal{G}_{sol,amb,h}) \cdot t_{ci} \quad (42)$$

Konačno, iznos toplinske energije isporučene iz kolektorskog polja računa se prema izrazu (43):

$$Q_{sol,loop,out,h,i} = Q_{sol,out,h,i} - Q_{sol,loop,ls,h,i} \quad (43)$$

Osnovni uvjet za isporuku toplinske energije iz solarnog kolektorskog polja definiran je izrazom (44). U slučaju da iznos prikupljene energije u određenom vremenskom koraku ne zadovoljava uvjet, vrijednost ukupne prikupljene energije u solarnom kolektorskom polju  $Q_{sol,loop,out}$  iznosi 0.

$$Q_{sol,loop,out,h,i} \geq 3 \cdot P_{sol,pmp} \cdot t_{ci} \quad (44)$$

Koristeći dobivene rezultate prema izrazu (45) računa se srednja temperatura vode koja se potom uvrštava u sljedeći korak iteracije.

$$\mathcal{G}_{col,avg,h,i} = \frac{\mathcal{G}_{sol,loop,in,h-1,i} + \mathcal{G}_{sol,loop,in,h,i}}{2} + \frac{Q_{sol,loop,out,h,i}}{m_{col,i} \cdot c_w \cdot 2} \quad (45)$$

Izlazna temperatura vode iz kolektora računa se prema izrazu (46):

$$\mathcal{G}_{sol,loop,out} = \mathcal{G}_{sol,loop,in,h} + \frac{Q_{sol,loop,out,h,i}}{m_{col,i} \cdot c_w \cdot 2} \quad (46)$$

Električna energija utrošena za rad crpke i regulacije računa se prema izrazu (47):

$$W_{sol,aux} = (P_{sol,crt} + P_{sol,pmp}) \cdot t_{ci} \quad (47)$$

U satima kada je  $Q_{sol,loop,out} = 0$  vrijedi  $P_{sol,pmp} = 0$ .

### 3.5. Modeliranje bivalentnog spremnika topline

Određivanje inicijalnih dimenzija spremnika provedeno je prema smjernicama *Solar District Heating Guidelines (SDH Guidelines)*. [10] Konačni volumen, odnosno kapacitet spremnika određeni su tako da ne dolazi do pregrijavanja spremnika. U ovom proračunu termodinamički model spremnika izrađen je prema normi HRN EN 15316 – 5.

#### 3.5.1. Određivanje kapaciteta – volumena spremnika topline

Dimenzioniranje spremnika topline provodi se s ciljem maksimalnog iskorištavanja toplinske energije kolektorskog polja u ljetnim mjesecima. Spremnik je dimenzioniran tako da nema odbacivanja viška toplinske energije odnosno da maksimalna temperatura u spremniku ne prelazi 100°C. Kod prve iteracije veličina spremnika računa se sukladno smjernicama za projektiranje solarnih toplinskih sustava u daljinskom grijanju

#### 3.5.2. HRN EN 15316 – 5 [16]

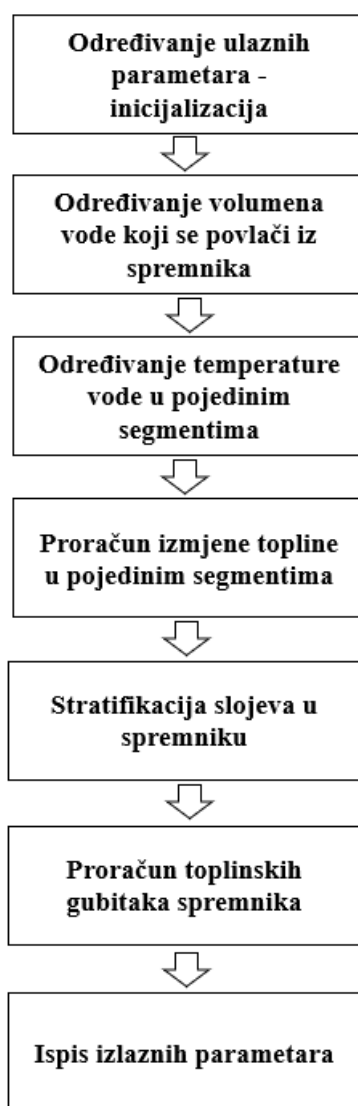
Norma HRN EN 15316 – 5 namijenjena je za energetske proračun toplovodnih sustava skladištenja energije za grijanje, potrošnu toplu vodu ili njihove kombinacije. Normom su definirana dva načina proračuna akumulacijskih toplovodnih spremnika. Metoda A uzima u obzir temperaturnu stratifikaciju unutar spremnika koristeći satni vremenski korak, dok se sukladno proračunu po metodi B pretpostavlja homogena temperatura u spremniku, a proračun je moguće provoditi na satnoj, dnevnoj ili godišnjoj razini. U ovom radu korištena je metoda A, a proračun je prilagođen sustavu daljinskog grijanja.

Metoda A bazirana je na energetskej jednadžbi (48) postavljenoj na segment homogene temperature pri čemu je spremnik podijeljen na ukupno četiri segmenta jednakih volumena. Prvi član s lijeve strane jednadžbe označava vremensku promjenu entalpije promatranog segmenta spremnika, član  $Q_{t+1,i}$  opisuje unos ili odvođenje toplinske energije pomoću izmjenjivača topline, drugi član s desne strane opisuje promjenu entalpije segmenta zbog izmjene tvari – vode između segmenata, a posljednji član  $Q_{sto,ls,i}$  označava gubitke toplinske energije pojedinog segmenta spremnika prema okolišu. Normom nije opisana izmjena topline provođenjem između pojedinih segmenata spremnika.

$$m_i \cdot c_p \cdot (\mathcal{G}_{t+1,i} - \mathcal{G}_{t,i}) = Q_{t+1,i} + \Delta m_t \cdot c_p \cdot (\mathcal{G}_{t-1,i} - \mathcal{G}_{t,i}) - Q_{sto,ls,i} \quad (48)$$

Pri čemu su:

Proračun spremnika se sukladno normi provodi u 9 koraka, a zbog prilagodbe sustavu daljinskog grijanja broj koraka je nešto manji. S obzirom na to da u sustavu daljinskog grijanja postoji jedinstvena potražnja za toplinskom energijom, odnosno energija se u sustav šalje za grijanje i pripremu PTV-a proračun je modificiran kako bi se mogao provesti za sustav daljinskog grijanja. Nadalje, proračun je proveden za dva slučaja – kada je postavljena temperatura u gornjem sloju spremnika odnosno kada se ogrjevna voda za grijanje priprema u gornjem sloju spremnika u drugom slučaju kada nije postavljena minimalna temperatura u gornjem sloju spremnika, odnosno kada se ogjevna voda dogrijava izvan spremnika. Slika 16. prikazuje redoslijed koraka u proračunu.



Slika 16. Redoslijed koraka u proračunu toplinskog spremnika

### 3.5.2.1. Inicijalizacija proračuna

Sukladno prethodno opisanom postupku prije početka proračuna prema normi HRN EN 15316 – 5 određuje se veličina spremnika. Osim veličine spremnika potrebno je definirati početne temperature segmenata spremnika, postavne temperature u segmentima s grijačem kao i položaje priključaka solarnih kolektora i grijača. Početna temperatura u spremniku jednaka je temperaturi povrat sustava daljinskog grijanja - 70°C. U slučaju s grijačem unutar spremnika temperatura sloja u kojemu je grijač jednaka je temperaturi polaza sustava daljinskog grijanja – 90°C.

### 3.5.2.2. Određivanje volumena vode koja se isporučuje u sustav daljinskog grijanja

Proračun prema normi je prilagođen za sustav daljinskog grijanja te je potražnja za toplinskom modelirana kao potrošnja PTV-a prema normi. Temperatura hladne vode jednaka je temperaturi povrata sustava daljinskog grijanja – 70 °C. Na temelju potražnje za toplinskom energijom i temperature vode u četvrtom sloju spremnika za svaki sat izračunava se potreban volumen vode. S obzirom na relativno veliki iznos toplinskih potreba, osobito u zimskim mjesecima, iz spremnika se u jednom satu maksimalno može uzeti 25% volumena, odnosno samo voda iz gornjeg sloja. Maksimalni iznos toplinske energije na raspolaganju računa se prema izrazu (49), a potrebni volumen prema izrazu (50). U slučaju kada je temperatura vode u spremniku veća od 90°C pretpostavlja se da se voda povučena iz spremnika miješa s vodom iz povratnog voda kako bi se ostvarila konačna temperatura polaza od 90°C.

$$Q_{dh,max} = V_{sto,i} \cdot c_w \cdot \rho_w \cdot (g_{vol,i} - g_{w,cold}) \quad (49)$$

$$V_{sto,use} = \frac{Q_{dh}}{c_w \cdot \rho \cdot (g_{sto,vol,i} - g_{w,cold})} \quad (50)$$

Energija pomoćnog grijača unutar spremnika računa se prema izrazu (53), a energija pomoćnog grijača izvan spremnika prema izrazu (54).

$$Q_{sto,h,bh} = V_{sto,use} \cdot c_w \cdot \rho \cdot (90 - g_{sto,vol,4}) \quad (51)$$

$$Q_{sto,h,bh} = V_{sto,4} \cdot c_w \cdot \rho \cdot (90 - g_{sto,vol,4}) \quad (52)$$

U slučaju kada je potreba za toplinskom energijom u sustavu veća od maksimalne energije koja se može isporučiti iz spremnika potrebno je izravno u sustav dovesti toplinsku energiju prema jednadžbi (53):

$$Q_b = Q_{dh} - Q_{dh,max} \quad (53)$$

### 3.5.2.3. Temperature u spremniku nakon isporuke vode

Za proračun temperature vode po slojevima pretpostavlja se pomicanje preostalog volumena vode u spremniku prema vrhu spremnika, a pri dnu spremnika u njega utječe volumen hladne vode jednak volumenu isporučene vode. Zamišljeni segmenti fiksirani su u spremniku te poprimaju homogenu temperaturu koja je rezultat miješanja segmenata. U slučaju u kojemu je volumen isporučene vode veći od jednog segmenta spremnika temperatura svakog segmenta spremnika postavlja se jednakom temperaturi segmenta ispod, a temperatura donjeg sloja jednaka je temperaturi hladne vode sukladno izrazima (54) i (55):

$$\vartheta_{sto,vol,i} = \vartheta_{sto,vol,i-1} \quad (54)$$

$$\vartheta_{sto,vol,1} = \vartheta_{w,cold} \quad (55)$$

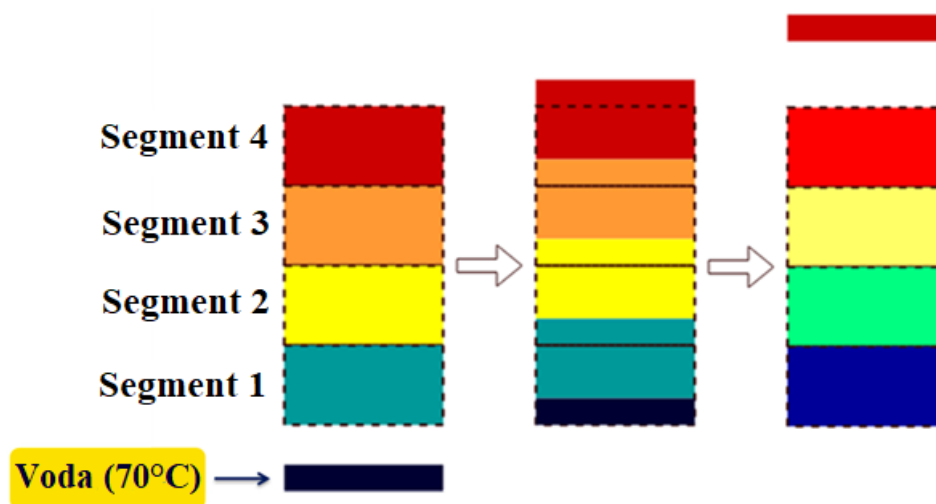
Preostali iznos vode koju je potrebno dovesti u spremnik umanjuje se za nadopunjeni volumen segmenta sukladno izrazu (56):

$$V_{sto,use,W} = V_{sto,use,W} - V_{sto,vol,i} \quad (56)$$

Temperatura vode u pojedinom spremniku računa se prema jednadžbi (57):

$$\vartheta_{sto,vol,i} = \frac{\vartheta_{sto,vol,i-1} \cdot V_{sto,use,W} + \vartheta_{sto,vol,i} \cdot (V_{sto,use,i} - V_{sto,use,W})}{V_{sto,vol,i}} \quad (57)$$

Slika 17. shematski prikazuje opisani postupak proračuna temperature vode u spremniku.



Slika 17. Shematski prikaz proračuna temperature u spremniku

### 3.5.2.4. Indirektna predaja ili oduzimanje energije iz spremnika

Ovaj korak koristi se za proračun izmjene toplinske energije spremnika s vanjskim ili unutarnjim izmjenjivačem topline. U slučaju kada je temperatura vode u sloju u kojemu se nalazi grijač niža od postavne temperature grijač se uključuje kako bi zagrijao vodu na postavnu temperaturu prema izrazu (58).

$$Q_{H,sto,vol,i} = \rho_w \cdot c_w \cdot V_{sto,vol,i} \cdot (\mathcal{G}_{sto,set} - \mathcal{G}_{sto,vol,i}) \quad (58)$$

Postavna temperatura jednaka je polaznoj temperaturi sustava daljinskog grijanja, a povećanje temperature uzrokovano dodatnim grijačem računa se prema izrazu (59).

$$\Delta \mathcal{G}_{vol,4} = \frac{Q_{H,sto,vol,4}}{\rho_w \cdot C_w \cdot V_{sto,vol,4}} \quad (59)$$

Izmjena topline između solarnog sustava i spremnika odvija se u donjem segmentu spremnika. Ukupna toplinska energija koja se dovodi u spremnik računa se prema HRN EN 15316 – 5.2017, a porast temperature u donjem segmentu spremnika računa se prema izrazu (60).

$$\Delta \mathcal{G}_{vol,1} = \frac{Q_{sto,H,vol,1}}{\rho_w \cdot C_w \cdot V_{sto,vol,1}} \quad (60)$$

Pri čemu vrijedi izraz (61):

$$Q_{sto,H,vol,1} = Q_{sol,loop,out} \quad (61)$$

Porast temperature u pojedinim segmentima računa se prema izrazu (62):

$$\mathcal{G}_{sto,vol,i} = \mathcal{G}_{sto,vol,i} + \Delta \mathcal{G}_{vol,1} \quad (62)$$

### 3.5.2.5. Prirodna stratifikacija

Usljed dovođenja topline i isporuke vode može se dogoditi da je temperatura u višem segmentu spremnika niža od temperature vode u višem sloju spremnika. U tom slučaju dolazi do adijabatskog miješanja dvaju segmenata nakon čega segmenti poprimaju zajedničku temperaturu. Proces se provodi iterativno sve dok temperaturni profil po visini spremnika ne postane stabilan. Temperatura slojeva spremnika nakon miješanja računa se prema izrazu (63):

$$\mathcal{G}_{sto,vol,i} = \mathcal{G}_{sto,vol,i+1} = \frac{\mathcal{G}_{sto,vol,i} \cdot V_{sto,vol,i} + \mathcal{G}_{sto,vol,i+1} \cdot V_{sto,vol,i+1}}{V_{sto,vol,i} + V_{sto,vol,i+1}} \quad (63)$$

### 3.5.2.6. Toplinski gubitci spremnika i temperatura spremnika na kraju vremenskog koraka

Toplinski gubitci spremnika računaju se za svaki segment prema izrazu (64):

$$Q_{sto,ls,vol,i} = f_{sto,bac,acc} \cdot f_{sto,dis,ls} \cdot \frac{V_{sto,vol,i}}{V_{sto}} \cdot H_{sto,ls} \cdot (\mathcal{G}_{sto,vol,i} - \mathcal{G}_e) \quad (64)$$

Konačna temperatura pojedinog segmenta umanjuje se za iznos prema izrazu (65).

$$\Delta \mathcal{G}_{sto,vol,i} = - \frac{Q_{sto,ls,vol,i}}{c_w \cdot \rho \cdot V_{sto,vol,i}} \quad (65)$$

Koeficijent toplinskih gubitaka toplinskog spremnika računa se prema izrazu (66) sukladno normi.

$$H_{ex} = \left\{ \left[ c_{sto,1} \cdot c_{sto,2} \cdot (c_{sto,3})^{1000 \cdot V_{sto}} \right] \right\} / (c_{sto,4} \cdot c_{sto,5}) \quad (66)$$

### 3.5.2.7. Proračun izmjenjivača topline

Kod indirektno izmjenjivača topline postoji temperaturna razlika koja je definirana izrazom (67).

$$\Delta \mathcal{G}_{ex} = - \frac{Q_{ex}}{H_{ex} \cdot t_{ci}} \quad (67)$$

Konačna temperatura na izlazu iz izmjenjivača topline funkcija je temperature u spremniku i temperaturne razlike prema izrazu (68).

$$\mathcal{G}_{ex,out} = \mathcal{G}_{sto,vol,i} + \Delta \mathcal{G}_{ex} \quad (68)$$

Koeficijent prijenosa topline izmjenjivača topline za solarni kolektor računa se prema izrazu (69).

$$H_{ex} = \frac{P_{n,design} \cdot 1000}{\Delta t_{m,design}} \quad (69)$$

Srednja logaritamska temperaturna razlika računa se prema izrazu (70):

$$\Delta t_{m,design} = \frac{(\mathcal{G}_1 - \mathcal{G}_{sto,vol,i}) - (\mathcal{G}_2 - \mathcal{G}_{sto,vol,i})}{\ln \frac{\mathcal{G}_1 - \mathcal{G}_{sto,vol,i}}{\mathcal{G}_2 - \mathcal{G}_{sto,vol,i}}} \quad (70)$$

Tablica 7. u nastavku sadrži vrijednosti konstanti korištenih u proračunu spremnika, a definiranih prema normi.

### 3.5.2.8. Napunjenost spremnika

Napunjenost spremnika u pojedinom satu računa se prema izrazu (71), a nazivni kapacitet spremnika ostvaruje se kada je temperatura u svim segmentima jednaka 90 °C.

$$Q_{sto,t} = \sum_{i=1}^4 \rho_w \cdot c_w \cdot V_{sto,vol,i} \cdot (\mathcal{G}_{sto,vol,i} - \mathcal{G}_{w,cold}) \quad (71)$$



Tablica 7. Konstante korištene u proračunu toplinskog spremnika

| Opis                                   | Oznaka      | Vrijednost | Mjerna jed. |
|--|-------------|------------|-------------|
| Prva konstanta toplinskog spremnika    | $C_{sto,1}$ | 0          | -           |
| Druga konstanta toplinskog spremnika   | $C_{sto,2}$ | 0,16       | -           |
| Treća konstanta toplinskog spremnika   | $C_{sto,3}$ | 0,5        | -           |
| Četvrta konstanta toplinskog spremnika | $C_{sto,4}$ | 1000       | -           |
| Peta konstanta toplinskog spremnika    | $C_{sto,5}$ | 1          | -           |

### 3.6. EnergyPRO [19]

Rezultati proračuna koristeći norme HRN EN 15316-4-3:2017 i HRN EN 15316-5:2017 u ovom radu su uspoređeni s rezultatima dobivenima koristeći računalni program *EnergyPRO*. Program je namijenjen za izradu detaljnih tehničkih i financijskih analiza novih i postojećih projekata u sektoru energetike. Primjenjuje se za modeliranje i simuliranje kompleksnih energetske sustava, izradu tehno-ekonomskih analiza, usporedbu različitih scenarija, izradu analiza osjetljivosti, utjecaja na okoliš i sl. Program nudi veliki raspon tehničkih i financijskih izvještaja i grafičkih prikaza kojima se opisuje dinamika kompleksnih energetske sustava kako s tehničke tako i s financijske strane. Programom je moguće simulirati različite komponente energetske sustava kao što su kotlovi, kogeneracijska postrojenja, vjetroturbine, solarni toplinski sustavi, spremnici topline, baterije i sl.

Komponente u sustavu opisuju se parametrima koji se konvencionalno upotrebljavaju za modeliranje pojedinih komponenti. S obzirom na to da se za modeliranje solarnog toplinskog sustava u daljinskom grijanju koriste modeli solarnog kolektora, toplinskog spremnika i kotla oni su ukratko opisani u nastavku.

#### 3.6.1. Model solarnog kolektorskog polja

Za modeliranje solarnih kolektora osnovni parametri su ukupna površina kolektorskog polja, nagib i azimut. Nadalje, u program se unose satne vrijednosti intenziteta sunčevog zračenja i vanjskih temperatura kao i podaci o geografskoj širini i dužini razmatrane lokacije. Efikasnost solarnog kolektora opisana je pomoću vršne efikasnosti kolektora, koeficijenta gubitka prvog i drugog reda te faktorom polukružne promjene upadnog kuta. Nadalje, moguće je definirati temperaturni režim u kolektorskom polju, pad temperature na izmjenjivaču topline solarnog kruga i postotak gubitaka topline u kolektorskom polju. U proračun je moguće uključiti i utjecaj

zasjenjenja kolektora pri čemu je potrebno unijeti podatke o broju redova kolektora, udaljenosti između redova i visini kolektora, a po potrebi i nagib tla. Temperature na ulazu i izlazu iz kolektora moguće je zadati kao konstantne vrijednosti ili kao promjenjive varijable u svakom satu.

### **3.6.2. Model toplinskog spremnika**

U programu EnergyPRO toplinski spremnik opisuje se pomoću parametara volumena i temperature u gornjem i donjem sloju odnosno temperaturnog režima. Nadalje moguće je definirati minimalni udio topline u spremniku kao i maksimalni udio vode kojeg je moguće iskoristiti. U programu je moguće uključiti i toplinske gubitke spremnika pri čemu je osim volumena potrebno zadati i visinu spremnika, debljinu i toplinsku provodnost izolacije te temperaturu okolišnog zraka. Alternativno je gubitke moguće opisati koristeći vlastiti izraz.

### **3.6.3. Kotao**

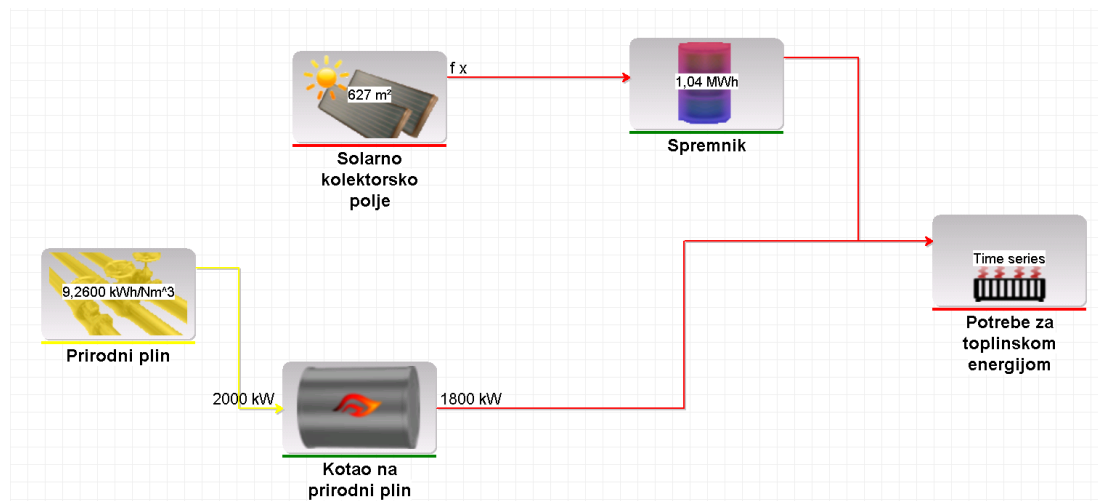
Kotao se u modelu definira nazivnom snagom, efikasnošću i gorivom koje se koristi za proizvodnju toplinske energije. Moguće je definirati maksimalnu efikasnost te efikasnosti pri djelomičnom opterećenju odnosno definirati efikasnost karakterističnim izrazom.

### **3.6.4. Strategija upravljanja energetske sustavom**

U programu je moguće definirati strategiju upravljanja pojedinim komponentama tako što se definiraju prioritete po pojedinim komponentama odnosno da se pojedinim komponentama omogućava ili onemogućava rad na djelomičnom opterećenju. Nadalje, moguće je pojedinim komponentama omogućiti skladištenje energije u spremnik. U slučaju kada su zadane cijene energenata u programu je moguće voditi postrojenje tako da se minimiziraju troškovi.

### 3.6.5. Model solarnog toplinskog sustava u daljinskom grijanju

Kao što je prethodno spomenuto, model solarnog toplinskog sustava u daljinskom grijanju sastoji se od kotla, toplinskog spremnika i solarnog kolektorskog polja. Slika 18. prikazuje model solarnog toplinskog sustava u daljinskom grijanju izrađen u računalnom programu *EnergyPRO*.



Slika 18. *EnergyPRO* model solarnog toplinskog sustava u daljinskom grijanju

Svi ulazni parametri koji se pojavljuju u proračunu prema normi su istovjetni, a parametri koji se ne pojavljuju u normi su procijenjeni te su uneseni u program. Tablica 8. sadrži sažeti prikaz parametara korištenih u modelu u *EnergyPRO*-u.

Tablica 8. *Ulazni parametri za model solarnog toplinskog sustava – EnergyPRO*

| Opis                                      | Oznaka                     | Vrijednost | Mjerna jed. |
|---|----------------------------|------------|-------------|
| Temperatura vode na ulazu u kolektor      | $\vartheta_{sol,loop,in}$  | 70         | °C          |
| Temperatura vode na izlazu iz kolektora   | $\vartheta_{sol,loop,out}$ | 75         | °C          |
| Pad temperature na izmjenjivaču           | $\Delta\vartheta_{ex}$     | 3          | °C          |
| Postotak toplinskih gubitaka u kol. polju | $Q_{sto,ls,p}$             | 3          | %           |
| Temperatura u gornjem sloju spremnika     | $\vartheta_{sto,vol,4}$    | 90         | °C          |
| Temperatura u donjem sloju spremnika      | $\vartheta_{sto,vol,1}$    | 70         | °C          |
| Visina spremnika                          | $h_{sto}$                  | 6          | m           |
| Debljina izolacije spremnika              | $t_{ins}$                  | 200        | mm          |
| Toplinska provodnost izolacije            | $\lambda$                  | 0,039      | W/mK        |
| Učinkovitost kotla na prirodni plin       | $\eta_{gb}$                | 0,9        | -           |

### 3.7. Proračun ekonomskih pokazatelja

Konačna površina solarnog kolektorskog polja i volumen spremnika odabrani su na temelju kriterija najmanjeg jednostavnog perioda povrata uvažavajući pri tome tehnička ograničenja. Jednostavni period povrata računa se kao kvocijent ukupnih investicijskih troškova i godišnje uštede koja se ostvaruje prikupljanjem energije u kolektoru umjesto izgaranjem plina u kotlu prema izrazu (72).

$$JPP = \frac{I_{uk}}{S_{god}} \quad (72)$$

#### 3.7.1. Investicijski troškovi

Investicijski troškovi jednaki su zbroju investicijskih troškova u solarno kolektorsko polje, spremnik, izmjenjivače topline i ostalih troškova prema izrazu (73).

$$I_{uk} = I_{sol} + I_{sto} + I_{ex} + I_{oth} \quad (73)$$

Iznosi investicijskih troškova u pojedine komponente solarnog toplinskog sustava računaju se koristeći specifične investicijske troškove i kapacitet pojedinog dijela sukladno izrazima (74), (75) i (76).

$$I_{sol} = i_{sol} \cdot A_{col} \quad (74)$$

$$I_{sto} = i_{sto} \cdot V_{sto} \quad (75)$$

$$I_{ex} = 200 + i_{ex} \cdot Q_{ex} \quad (76)$$

Vrijednosti specifičnih investicijskih troškova u solarno kolektorsko polje i spremnik određene su koristeći podatke iz literature o specifičnim investicijskim troškovima te se računaju sukladno izrazima (77) i (78). [10],[21],[22] Slika 19. prikazuje kretanje specifičnih investicijskih troškova u ovisnosti o instaliranoj površini kolektora odnosno volumenu spremnika.

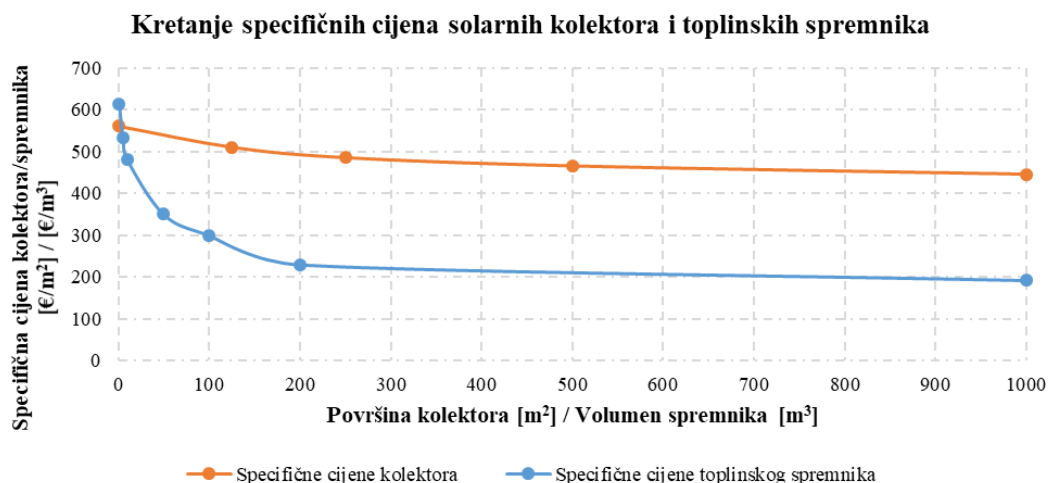
$$i_{sol} = 0,002 \cdot A_{sol}^2 - 0,02794 \cdot A_{sol} + 551,4 \quad (77)$$

$$i_{sto} = 676,37 \cdot V_{sto}^{-0,182} \quad (78)$$

Specifični investicijski troškovi u izmjenjivač topline prema izrazu (79) iznose:

$$i_{ex} = 3 \text{ [€/kW]} \quad (79)$$

Vrijednost ostalih investicijskih troškova procijenjena je na 5.000€.



Slika 19. Kretanje specifičnih cijena solarnih kolektora i toplinskih spremnika

### 3.7.2. Proračun prihoda, rashoda i bilanci

Godišnji troškovi ( $E$ ) uključuju troškove održavanja ( $M$ ) koji su procijenjeni na 1% iznosa ukupne investicije te troškove električne energije ( $E_{el}$ ) koja se koristi za pogon pumpi solarnog kruga, a računaju se prema izrazu (80).

$$E = M + E_{el} \quad (80)$$

Nadalje, godišnji prihodi ( $S$ ) računaju se kao umnožak specifične cijene toplinske energije ( $e_q$ ) i ostvarenih ušteda prema izrazu (81).

$$S = Q_s \cdot e_q \quad (81)$$

Cijena proizvodnje toplinske energije ( $e_q$ ) procijenjena je na 45 €/MWh. Ušteda toplinske energije ( $Q_s$ ) računa se kao razlika toplinske energije proizvedene u kotlovima u trenutačnom stanju ( $Q_{ng}$ ) i sa solarnim toplinskim sustavom ( $Q_{b,sol}$ ) prema izrazu (82).

$$Q_s = Q_{ng} - Q_{b,sol} \quad (82)$$

Godišnji troškovi za pogon pumpi i regulacijskog sustava računaju se prema izrazu (83), a jednaki su umnošku ukupne godišnje energije utrošene za rad pumpi ( $W_{aux}$ ) i regulacijskog sustava i specifične cijene električne energije ( $e_e$ ) u iznosu od 30 €/MWh.

$$E_{el} = e_e \cdot W_{aux} \quad (83)$$

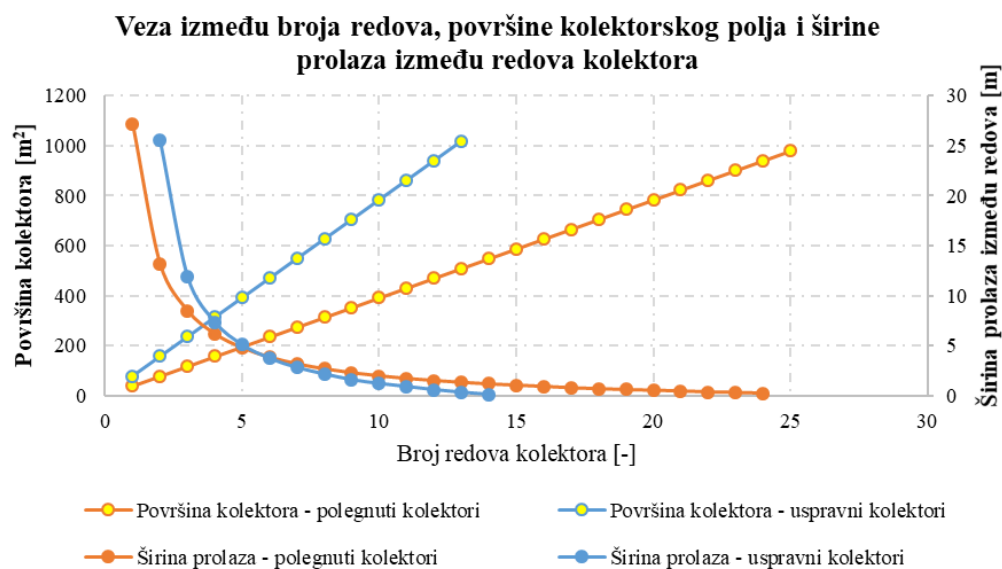
Konačna bilanca računa se kao razlika prihoda i rashoda prema izrazu (84).

$$B = S - E \quad (84)$$

## 4. REZULTATI

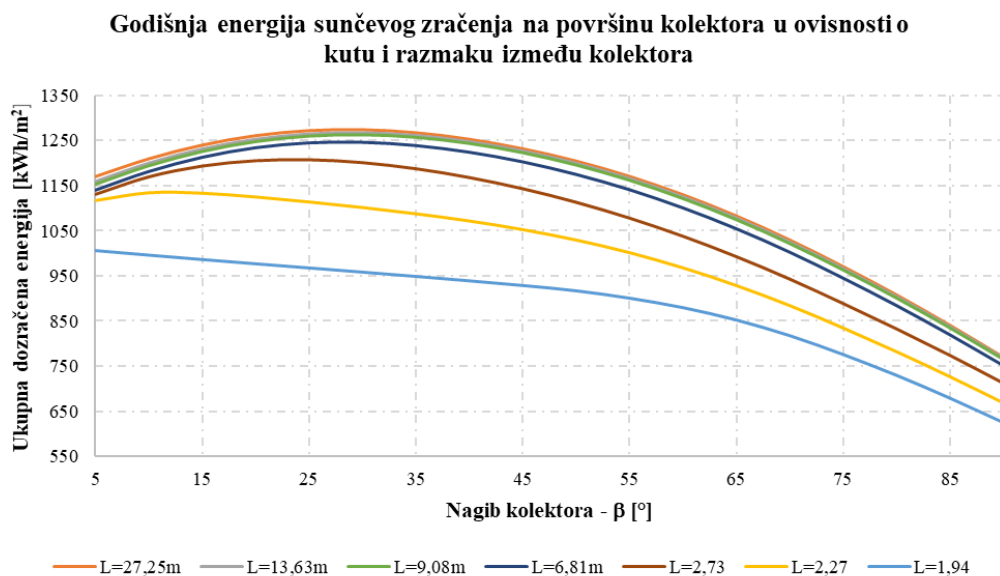
### 4.1. Rezultati proračuna ukupne dozračene energije na površinu kolektora

Kao što je prethodno opisano, ukupno zračenje na površinu solarnih kolektora razmatrano je za slučaj kada su kolektori postavljeni uspravno i za slučaj kada su kolektori polegnuti. Za različit broj redova izračunan je intenzitet sunčevog zračenja na kvadratni metar površine uvažavajući efekt zasjenjenja kolektora. Slika 20. prikazuje vezu između broja redova kolektora i površine i razmaka koji se pri tome ostvaruju. Iz slike se može vidjeti kako površina kolektora raste linearno s povećanjem broja redova. U slučaju kada su kolektori postavljeni uspravno površina se povećava dvostruko brže u odnosu na slučaj kada se kolektori postavljaju u položenom položaju. Nadalje, širina prolaza između kolektora pada eksponencijalno pri čemu se brži pad također ostvaruje kod uspravno postavljenih kolektora zbog njihove veće dimenzije u smjeru horizontale.



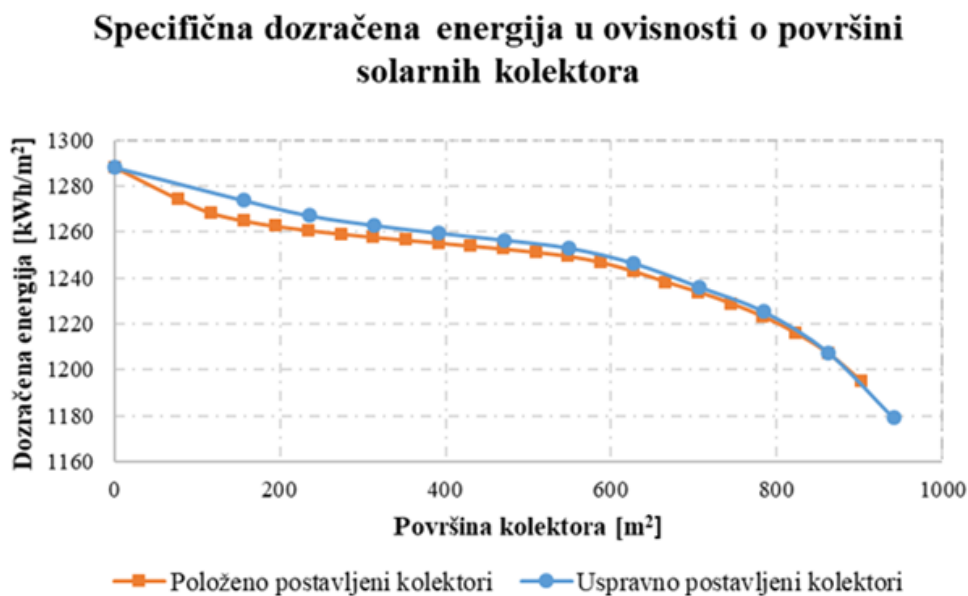
Slika 20. Veza između broja redova, površine i širine prolaza između redova

Proračun je proveden za raspon kutova nagiba kolektora od  $0^\circ$  do  $90^\circ$ . U sljedećim koracima proračuna korišten je nagib za koji je ostvaren maksimalan iznos dozračene energije u cijeloj godini. Za najveći broj slučajeva najpovoljniji iznos kuta  $\beta$  iznosi  $30^\circ$  dok je kod malog razmaka kolektora povoljnije smanjiti nagib kolektora kako bi se umanjio negativan utjecaj zasjenjenja. Slika 21. prikazuje iznose ukupne dozračene energije po jedinici površine u ovisnosti o kutu nagiba kolektora i razmaku  $L$  između redova za slučaj uspravno postavljenih kolektora.



Slika 21. Godišnja energija sunčevog zračenja na nagnutu površinu

Godišnji iznos dozračene energije na položeno postavljene kolektore pokazuje iste trendove, no apsolutni iznos sunčevog zračenja na isti iznos površine nešto je manji zbog manje udaljenosti između redova, odnosno većeg zasjenjenja. Slika 22. prikazuje usporedbu dozračene energije u ovisnosti o površini kolektora za oba slučaja. Na slici su prikazani specifični iznosi dozračene energije za optimalni kut nagib kolektora za određeni broj redova. Iz dijagrama se može vidjeti kako se najveća razlika ostvaruje za veće razmake između kolektora dok se manja razlika ostvaruje kod manjih razmaka između kolektora, odnosno u slučaju kada se optimalni kut nagiba kolektora smanjuje.

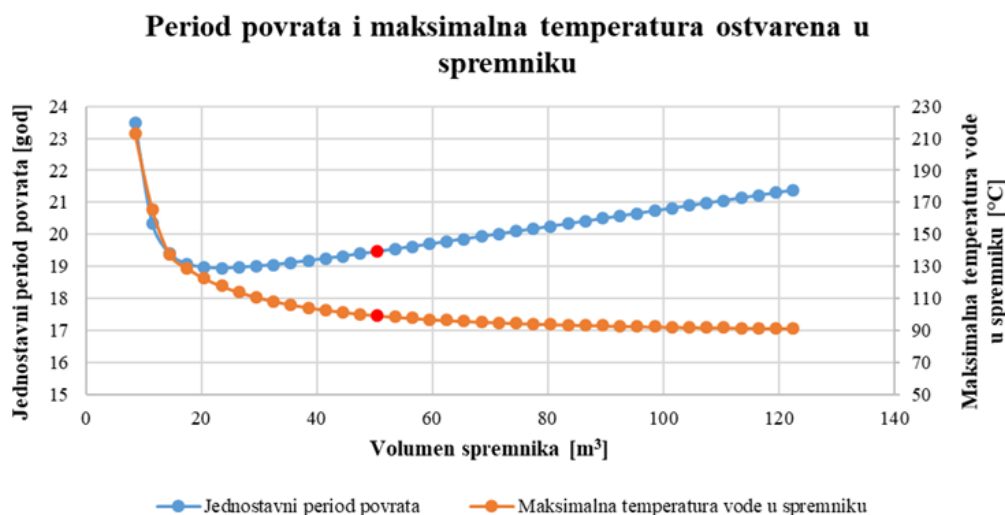


Slika 22. Usporedba dozračene energije po jedinici površine

## 4.2. Određivanje volumena spremnika – odabir solarnog toplinskog sustava s najmanjim periodom povrata

Sukladno opisanom proračunu analiziran je veći broja različitih scenarija. Osnovni parametar koji se varira u pojedinom scenariju je broj redova kolektora, a posredno i površina. Nadalje za svaki scenarij analizirana je i promjena perioda povrata u ovisnosti o volumenu spremnika.

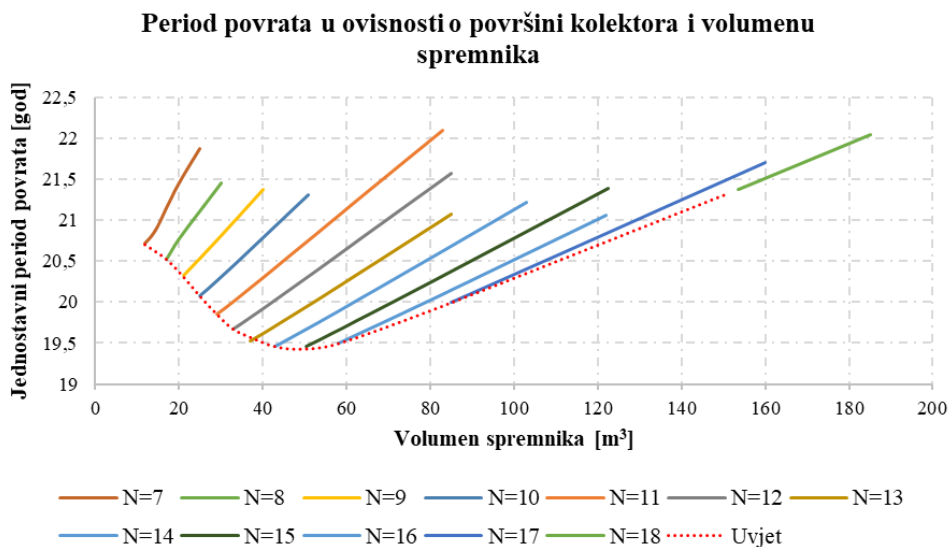
Slika 23. prikazuje karakterističnu krivulju jednostavnog perioda povrata za površinu kolektora od 588 m<sup>2</sup> i različite volumene spremnika. U istom dijagramu prikazane su i maksimalne ostvarene temperature vode u spremniku. Kao konačno rješenje, odnosno za određivanje minimalnog perioda povrata svih scenarija, odabran je slučaj s najmanjim volumenom spremnika koji zadovoljava uvjet  $\vartheta_{sto,vol,4,max} < 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ . U dijagramu je spomenuti slučaj označen crvenim markerom.



Slika 23. Određivanje minimalnog volumena spremnika za  $A=588\text{ m}^2$

Slika 24. prikazuje krivulje perioda povrata za različite instalirane površine solarnog kolektorskog polja u ovisnosti o volumenu spremnika. Najkraći periodi povrata kreću se oko 19,5 godina za ukupnu površinu kolektorskog polja između 470,4 i 588,8 m<sup>2</sup>. Minimalni period povrata u ovom slučaju iznosi 19,48 godina, a ostvaruje se u slučaju s 14 redova kolektora odnosno uz ukupnu površinu kolektora od 548,8 m<sup>2</sup> i volumen spremnika od 42 m<sup>3</sup>. Nadalje, iz nagiba krivulja može se zaključiti da su veći sustavi manje osjetljivi na promjenu volumena spremnika, odnosno da je u većim sustavima moguće ugraditi relativno veći spremnik uz manju promjenu perioda povrata. Točkasta crvena linija predstavlja granicu odnosno minimalni volumen spremnika koji je određen prethodno opisanim postupkom. Zbog bolje preglednosti krivulje za manje površine su izostavljene iz dijagrama.

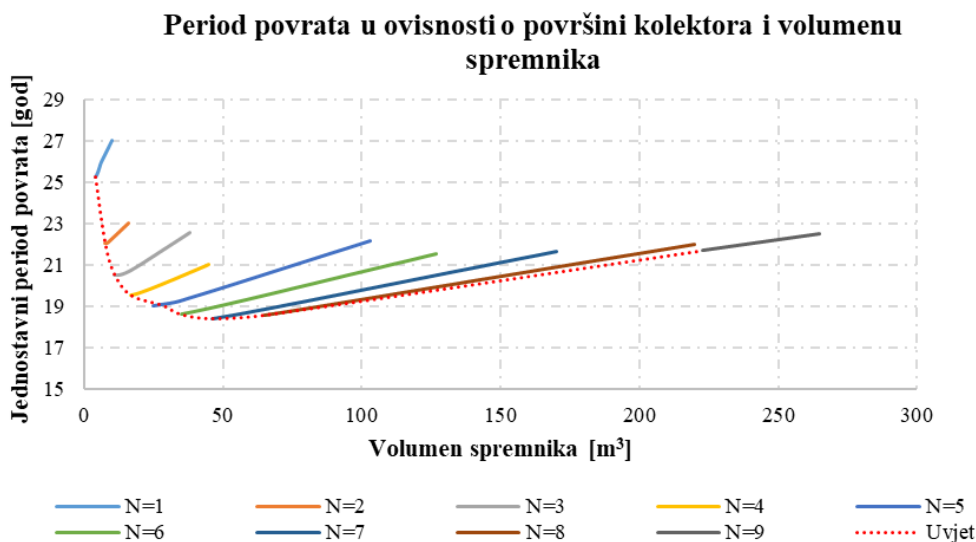




Slika 24. Periodi povrata prema modelu s položenim kolektorima

Slika 24. prikazuje dijagram ekvivalentan dijagramu na slici, ali za slučaj s uspravno postavljenim kolektorima. Karakteristične linije koje predstavljaju periode povrata za različite površine pokazuju iste trendove, no zbog većeg osunčanja uzrokovanog manjim efektom zasjenjenja periodi povrata za iste površine kolektora su kraći.

Jednostavni periodi povrata kreću se u rasponu od 18,37 do 26,51 godina. Najkraći period povrata ostvaruje se za 7 redova solarnih kolektora odnosno ukupnu površinu od 548,8 m<sup>2</sup> i odgovarajući volumen spremnika od 45 m<sup>3</sup>. Period povrata za slučaj s površinom od 78,4 m<sup>2</sup> iznosi 25,27 godina, a u slučaju s površinom kolektora od 784 m<sup>2</sup> period povrata iznosi 26,51 godinu. Točkasta crvena linija predstavlja ograničenje - minimalni volumen spremnika.



Slika 25. Periodi povrata prema modelu s uspravnim kolektorima

S obzirom na prethodno iznesene rezultate može se zaključiti kako je energetska, a posljedično i ekonomska, povoljnije uspravno postaviti solarne kolektore i ostvariti veći razmak između redova nego postaviti kolektore u položenom položaju uz manji razmak između redova. Tablica 9. prikazuje rezultate proračuna u slučaju kada su kolektori uspravno postavljeni.

Tablica 9. Rezultati proračuna - solarni toplinski sustavi

| Površina kolektora [m <sup>2</sup> ] | Volumen spremnika [m <sup>3</sup> ] | Prikupljena energija [MWh] | Udio solarne energije [%] | Prosječna efikasnost kolektora [-] | JPP   | Cijena topline [€/MWh] |
|--------------------------------------|-------------------------------------|----------------------------|---------------------------|------------------------------------|-------|------------------------|
| 78,4                                 | 4                                   | 60,52                      | 2,05                      | 0,5224                             | 25,27 | 41,01                  |
| 156,8                                | 7,5                                 | 119,08                     | 4,03                      | 0,5223                             | 22,07 | 37,98                  |
| 235,2                                | 11                                  | 177,71                     | 6,02                      | 0,5226                             | 20,25 | 36,26                  |
| 313,6                                | 17                                  | 237,93                     | 8,06                      | 0,5267                             | 19,51 | 34,53                  |
| 392,0                                | 28                                  | 298,18                     | 10,1                      | 0,5296                             | 19,04 | 34,23                  |
| 470,4                                | 35                                  | 356,43                     | 12,07                     | 0,5290                             | 18,59 | 33,65                  |
| 548,8                                | 45                                  | 414,69                     | 14,05                     | 0,5293                             | 18,37 | 33,37                  |
| 627,2                                | 65                                  | 471,56                     | 15,97                     | 0,5298                             | 18,56 | 33,53                  |
| 705,6                                | 223                                 | 527,27                     | 17,86                     | 0,5321                             | 21,69 | 36,75                  |
| 784,0                                | 500                                 | 574,43                     | 19,46                     | 0,5295                             | 26,51 | 41,57                  |

#### 4.3. Tehničke karakteristike odabranog sustava

Kao što je već opisano u ekonomski najpovoljnijem slučaju ukupna površina kolektorskog polja jednaka je 548,8 m<sup>2</sup>, a odabrani volumen spremnika iznosi 45 m<sup>3</sup>. U odabranom slučaju solarnim kolektorima je u sustav daljinskog grijanja isporučeno 414,69 MWh toplinske energije što je ekvivalentno udjelu solarne energije u sustavu pod 14,05%. Toplinski gubitci spremnika iznose 19,72 MWh što je ekvivalentno iznosu od 1% energije ubačene u spremnik. Kotlovima na prirodni plin u sustav je ubačeno preostalih 2557,23 MWh toplinske energije. Maksimalna izlazna snaga iz kolektora iznosi 347,6 kW, a maksimalna ostvarena temperatura u toplinskom spremniku iznosi 99,41 °C. Tablica 10. u nastavku prikazuje najvažnije parametre u odabranom sustavu.

Tablica 10. Tehničke karakteristike odabranog rješenja

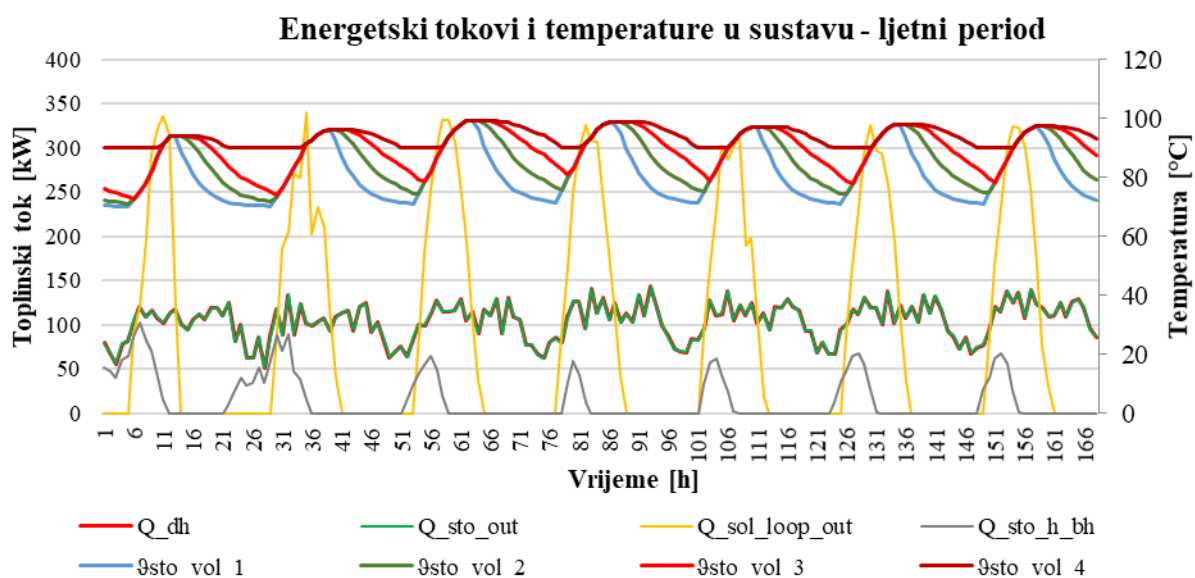
| Opis                             | Oznaka                 | Vrijednost | Mjerna jed.    |
|----------------------------------|------------------------|------------|----------------|
| Ukupni broj kolektora            | $N_{sol,mod}$          | 280        | -              |
| Ukupna površina kolektora        | $A_{sol}$              | 548,8      | m <sup>2</sup> |
| Volumen spremnika                | $V_{sto}$              | 45         | m <sup>3</sup> |
| Ukupno prikupljena energija      | $Q_{sol,loop,out}$     | 414,69     | MWh            |
| Udio solarne energije            | $Sol_{frac}$           | 14,05      | %              |
| Maksimalni iznos toplinskog toka | $Q_{sol,loop,out,max}$ | 347,6      | kW             |
| Prosječna efikasnost kolektora   | $\eta_{col,avg}$       | 0,5293     | -              |

#### 4.4. Dinamika solarnog toplinskog sustava

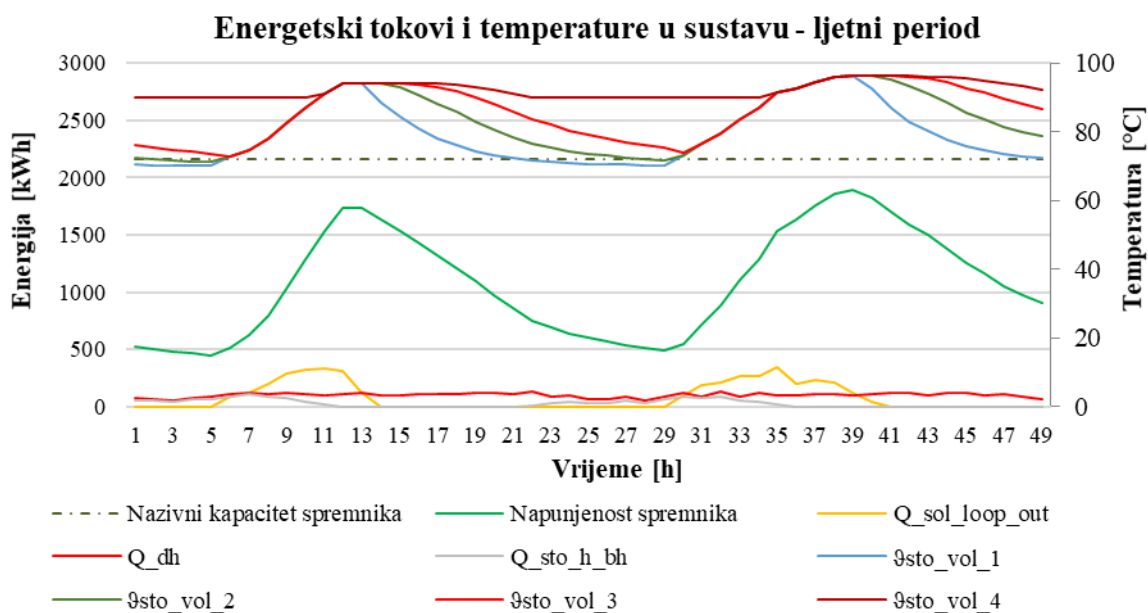
##### 4.4.1. Model s grijačem unutar spremnika

Slika 26. u nastavku prikazuje dinamiku solarnog toplinskog sustava i spremnika u karakterističnom tjednu u ljetnom periodu. Crvenom linijom prikazane su potrebe za toplinskom energijom ( $Q_{dh}$ ) koja se u potpunosti isporučuje iz toplinskog spremnika ( $Q_{sto,out}$ ) koji je prikazan zelenom linijom. U gornjem dijelu dijagrama prikazane su temperature ( $\vartheta_{sto,vol,i}$ ) četiriju slojeva spremnika sukladno legendi ispod dijagrama. Solarni toplinski sustav ima vršni učin od 347,6 kW dok potražnja za toplinskom energijom ne prelazi 150 kW. Tijekom dana temperatura gornjeg sloja spremnika dostiže, a u nekim satima i premašuje 90°C te u tim satima nije potrebno dogrijavanje vode u spremniku. U periodima u kojima je temperatura vode u spremniku niža od 90°C vodu je potrebno dogrijati pomoćnim grijačem koji je prikazan sivom linijom ( $Q_{sto,h,bh}$ )

Spremnik uz odabrani volumen služi za pohranu toplinske energije na satnoj razini što znači da se višak energije prikuplja u spremniku tijekom dana, a iskorištava se tijekom večernjih i noćnih sati. Slika 27. prikazuje temperature vode u spremniku te količine pohranjene energije za period od dva dana u ljetnom režimu. U dijagramu se može vidjeti kako zbog zagrijavanja donjeg sloja dolazi do miješanja sa slojevima iznad te svi poprimaju istu temperaturu. S druge strane hlađenje se odvija postepeno po svim segmentima u kojima se ostvaruju različite temperature. Energija pohranjena u spremniku - napunjenost spremnika prikazana je zelenom linijom. U dijagramu je žutom bojom prikazan i iznos topline prikupljen u solarnim kolektorima ( $Q_{sol,loop,out}$ ), a crvenom bojom je prikazan iznos toplinske energije isporučen u sustav daljinskog grijanja ( $Q_{dh}$ ).



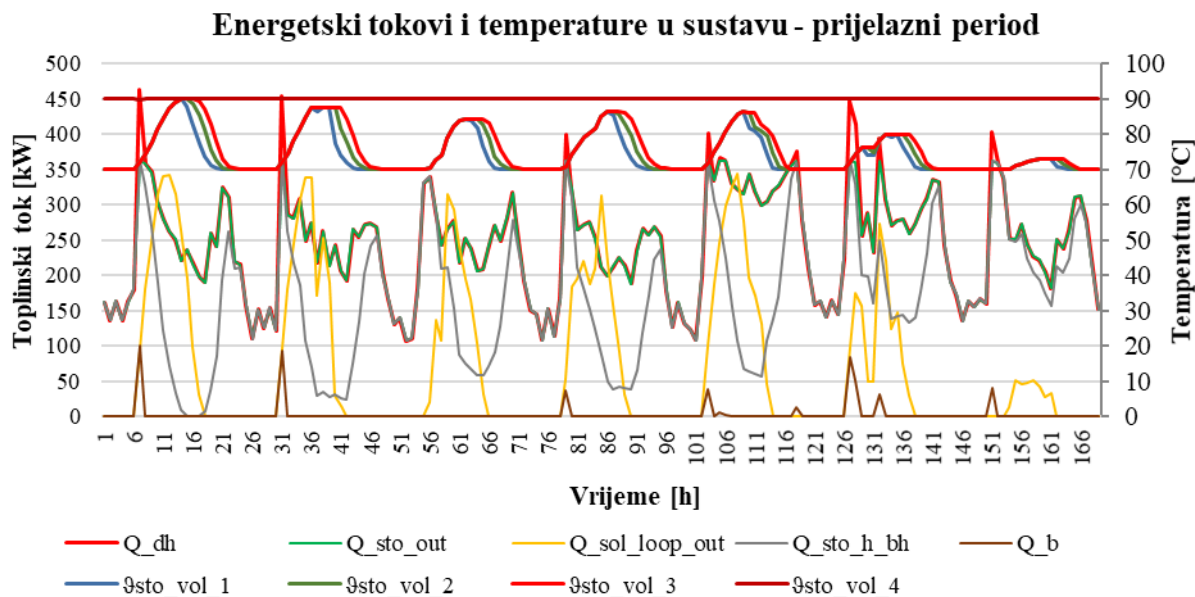
Slika 26. Energetski tokovi i temperature u sustavu - ljetni period



Slika 27. Detaljniji prikaz energetskih tokova i temperatura u spremniku

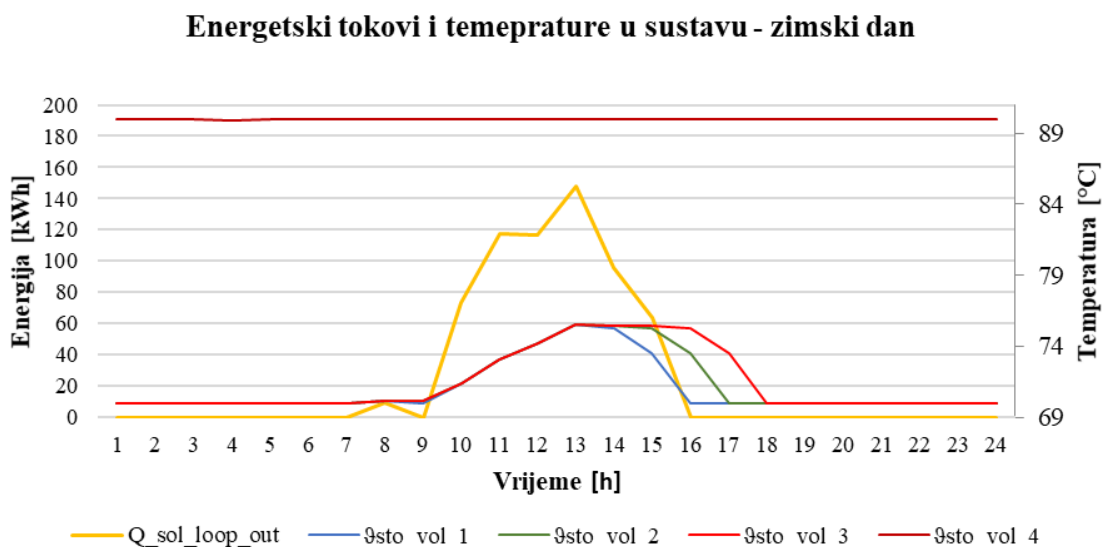
U prijelaznom periodu toplinska energija se u sustav daljinskog grijanja isporučuje iz spremnika, ali i iz pomoćnog kotla ( $Q_b$ ). Solarnim sustavom u spremnik se isporučuje toplinska energija tijekom dana na temperaturama manjim od  $90^{\circ}\text{C}$ . Pomoćni izvor topline isporučuje toplinsku energiju gotovo u svim trenucima. Slika 28. prikazuje opisana kretanja temperature i energetskih tokova u prijelaznom periodu pri čemu se može vidjeti kako temperature donjih slojeva spremnika samo u jednom danu uspijevaju dostići  $90^{\circ}\text{C}$ . Smeđa linija predstavlja

toplinsku energiju koja se dobavlja dodatnim grijačem – izvan spremnika, odnosno toplinsku energiju koju nije moguće isporučiti iz spremnika.



Slika 28. Energetski tokovi i temperature u sustavu - prijelazni period

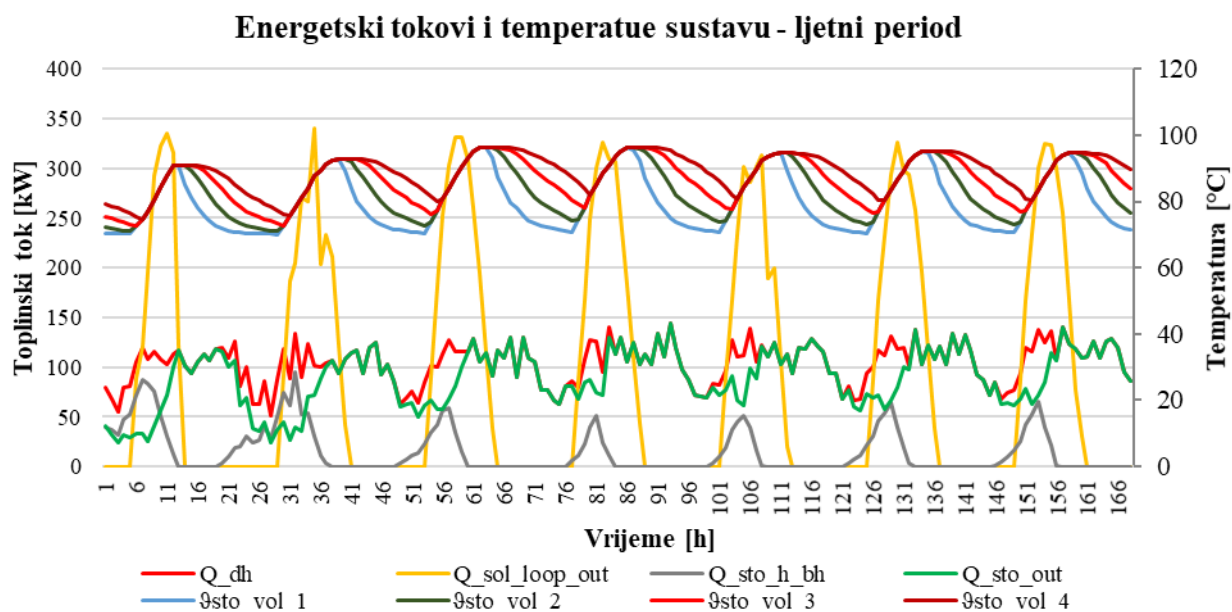
U zimskom periodu solarni toplinski sustav u nekim danima isporučuje toplinsku energiju, dok je u nekim danima ozračenost nedovoljna da bi sustav isporučivao toplinu. Toplinska energija dovedena u spremnik dovoljna je za povećanje temperature u spremniku u iznosu do 5°C. Slika 29. prikazuje kretanja temperature u spremniku i iznose energije prikupljene u kolektoru u karakterističnom zimskom danu u kojemu su ostvareni uvjeti za prikupljanje energije.



Slika 29. Temperature u spremniku i prikupljena energija u kolektoru - zimski dan

#### 4.4.2. Model s grijačem izvan spremnika

Kod modela s pomoćnim grijačem izvan spremnika temperatura u svim slojevima ovisi o iznosu toplinske energije dovedene iz solarnih kolektora i volumenu vode isporučene u sustav daljinskog grijanja. S obzirom na to da minimalna temperatura gornjeg sloja nije postavljena na 90°C kod povećanja temperature donjeg sloja dolazi do miješanja svih slojeva vode u spremniku te se pri tome ostvaruje niža temperatura u donjem sloju što pozitivno utječe na učinkovitost kolektora. Model s grijačem izvan spremnika uz iste ulazne parametre na godišnjoj razini rezultira gotovo istom količinom prikupljene toplinske energije u kolektorima, no zbog mogućnosti miješanja vode i s četvrtim slojem vidljivo je malo povećanje prikupljene energije u kolektorima koje je rezultat povećane učinkovitosti zbog niže prosječne ulazne temperature u kolektoru. Ponašanje solarnog toplinskog sustava po ovom modelu slično je ponašanju sustava po prethodnom modelu. Slika 30. u nastavku prikazuje dinamiku u karakterističnom tjednu u ljetnom periodu. Crvena linija predstavlja toplinske potrebe, a zelena toplinsku energiju isporučenu iz spremnika. U trenucima kada je temperatura vode u spremniku manja od 90°C uključuje se pomoćni grijač koji dogrijava vodu – siva linija.



Slika 30. Energetski tokovi i temperature u sustavu – ljetni period

#### 4.5. Usporedba rezultata proračuna prema modelu s pomoćnim grijačem izvan i unutar spremnika

Unatoč tome što na godišnjoj razini model s grijačem izvan spremnika ne pokazuje značajnu razliku u iznosu energije prikupljene u kolektorima, razlika temperature u slojevima spremnika

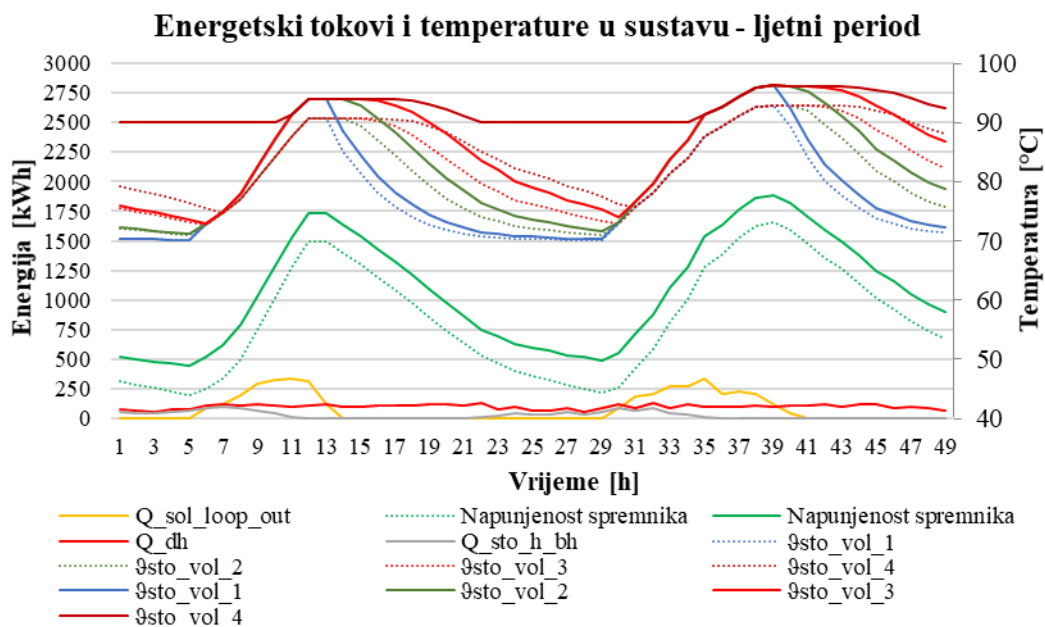
je značajna, kao i napunjenost toplinskog spremnika u karakterističnim ljetnim odnosno zimskim periodima. Tablica 11. u nastavku prikazuje rezultate dobivene korištenim modelima.

Tablica 11. Usporedba rezultata proračuna prema oba modela

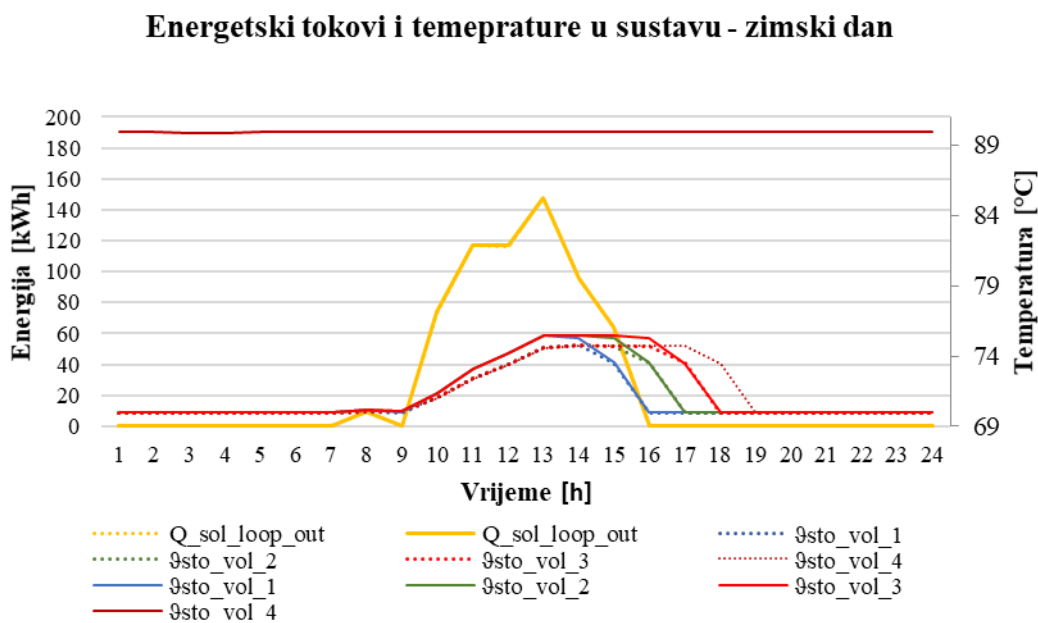
| Parametar                              | Oznaka                | Mjerna jedinica | Grijač unutar spremnika | Grijač izvan spremnika |
|--|-----------------------|-----------------|-------------------------|------------------------|
| Ukupna površina kolektora              | $A_{sol}$             | m <sup>2</sup>  | 548,8                   | 548,8                  |
| Volumen spremnika                      | $V_{sto}$             | m <sup>3</sup>  | 45                      | 45                     |
| Prikupljena energija                   | $Q_{sol,loop,out}$    | MWh             | 414,49                  | 414,72                 |
| Maksimalna temperatura u spremniku     | $\vartheta_{sto,max}$ | °C              | 99,41                   | 96,51                  |
| Toplinski gubitci spremnika            | $Q_{sto,ls}$          | MWh             | 19,72                   | 18,46                  |
| Energija pomoćnih grijača              | $Q_{bh}$              | MWh             | 2557,23                 | 2555,79                |
| Energija prikupljena u zimskom periodu | $Q_{sol,loop,out,w}$  | MWh             | 160,50                  | 160,27                 |
| Energija prikupljena u ljetnom periodu | $Q_{sol,loop,out,w}$  | MWh             | 253,98                  | 254,78                 |
| Period povrata                         | JPP                   | god             | 18,37                   | 18,28                  |

Slika 31. prikazuje vrijednosti za model s grijačem izvan spremnika u ljetnom periodu točkastim linijama, dok su vrijednosti za model s grijačem unutar spremnika prikazane punim linijama. Jasno je vidljivo kako se u ovom modelu s grijačem unutar spremnika ostvaruju više temperature gornjih slojeva nego kod modela s grijačem izvan spremnika. S obzirom na to da se temperatura u gornjem sloju ne održava na 90°C napunjenost spremnika je nešto veća u odnosu na slučaj kada je grijač postavljen izvan spremnika. Nadalje, razlika u iznosu prikupljene toplinske energije u kolektoru nije značajna što će biti objašnjeno u nastavku.

Slika 32. prikazuje kretanje temperatura u spremniku u zimskom periodu i toplinsku energiju prikupljenu u kolektoru. Iz dijagrama se može zaključiti kako su temperature u spremniku i u ovom periodu niže u slučaju s grijačem izvan spremnika, a značajnija razlika u iznosu prikupljene energije u ovom periodu nije prisutna.



Slika 31. Usporedba energetskega tokova i temperatura - ljetni period

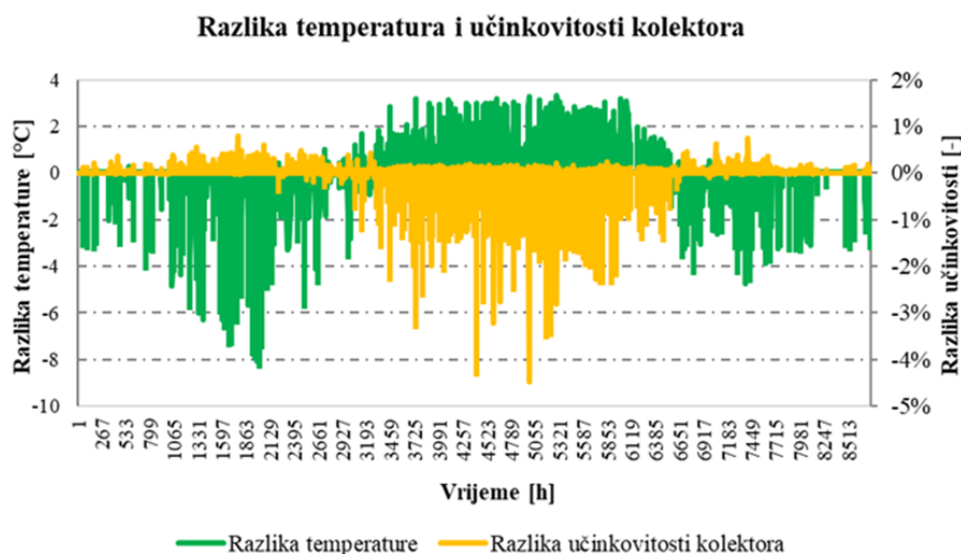


Slika 32. Usporedba energetskega tokova i temperatura - zimski period

Slika 33. prikazuje razlike temperature u kolektoru i učinkovitosti kolektora između dva modela. Razlika se računa oduzimanjem vrijednosti prema modelu s grijačem izvan spremnika od vrijednosti prema modelu unutar spremnika. Zbog relativno malog nagiba karakteristične krivulje učinkovitosti korištenog kolektora u ovisnosti o temperaturi medija u kolektoru i relativno visoke temperature povrata, razlika temperature u kolektoru od 8 °C rezultira padom efikasnosti u iznosu od nešto većem od 1%. U ljetnom periodu razlika temperature (3°C) ima

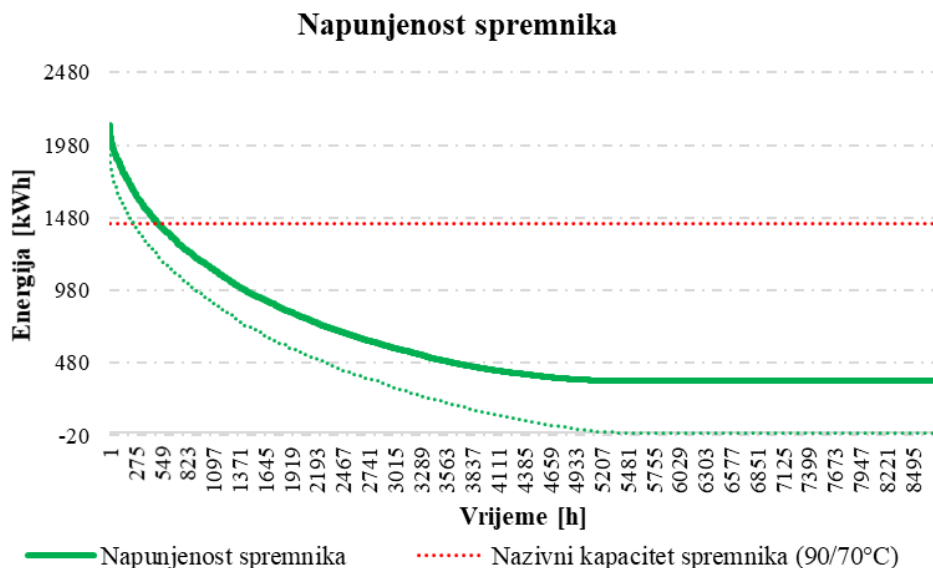


nešto veći utjecaj na učinkovitost (4%) zbog manje temperaturne razlike medija u kolektoru i temperature okolišnog zraka. U slučaju da su korišteni pločasti kolektori realno je očekivati da bi spomenute razlike bile značajnije. Nadalje, osnovni razlog ovako male razlike je mali utjecaj temperature vode u spremniku na efikasnost kolektora zbog relativno visoke temperature vode u kolektoru što onemogućuje veće oscilacije temperature u spremniku te se samim time povećava utjecaj vanjske temperature na učinkovitost kolektora u danom trenutku. Važno je naglasiti kako je temperatura u spremniku s pomoćnim izvorom topline unutar spremnika gotovo u svakom trenutku veća od temperature vode u spremniku s pomoćnim izvorom topline smještenim izvan spremnika. Unatoč tome temperatura u solarnom krugu ne prati opisati trend te je u zimskom periodu veća kod modela s grijačem izvan spremnika, a u ljetnom periodu s grijačem unutar spremnika.



Slika 33. Usporedba srednjih temperatura u kolektoru i učinkovitosti

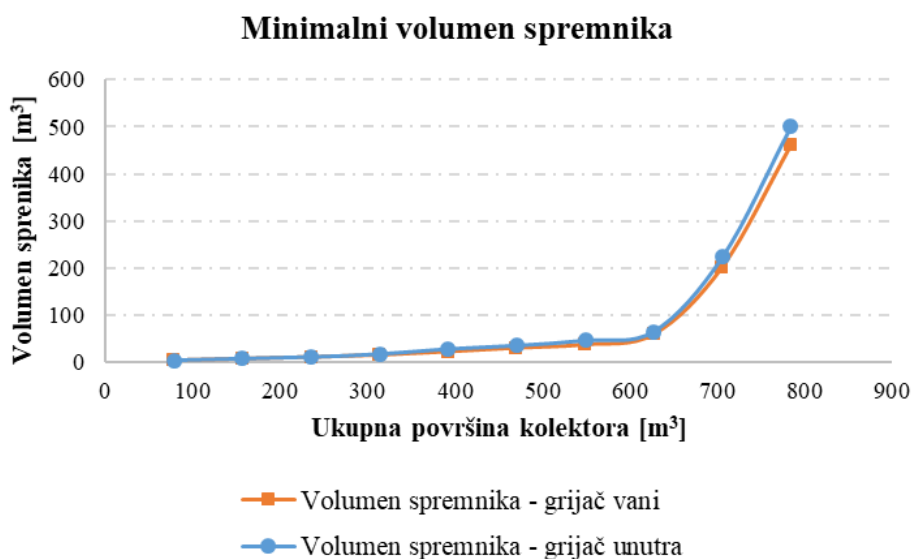
Slika 34. u nastavku prikazuje usporedbu napunjenosti spremnika u oba slučaju. Točkastom linijom prikazana je napunjenost spremnika s grijačem izvan spremnika. Iz slike se može vidjeti kako se za potrebe solarnog toplinskog sustava spremnik koristi oko 50% vremena. Kod modela s grijačem unutar spremnika gornji sloj se koristi tijekom cijele godine. Kao što je navedeno u uvodnom dijelu u praksi se spremnici koriste za povećanje fleksibilnosti sustava daljinskog grijanja no to nije obuhvaćeno ovim proračunom te je realno očekivati da postoje dodatne prednosti ugradnje toplinskog spremnika što bi imalo povoljan utjecaj na smanjenje perioda povrata.



Slika 34. Napunjenost spremnika

#### 4.5.1. Usporedba minimalnog volumena spremnika

S obzirom na to da se u modelu s pomoćnim grijačem izvan spremnika grijanje vode odvija izvan spremnika ostvarene temperature u spremniku su nekoliko stupnjeva niže u odnosu na temperature u modelu s grijačem unutar spremnika. Kao što je ranije opisano u tom slučaju su maksimalne temperature koje se ostvaruju također niže te su i konačne odabrane vrijednosti volumena spremnika također manje. Slika 35. predstavlja usporedbu minimalnih volumena toplinskih spremnika prema oba modela pri čemu se može uočiti kako razlika minimalnog volumena spremnika nije značajna.



Slika 35. Usporedba minimalnih volumena spremnika

Unatoč tome što se prema modelu s grijačem izvan spremnika dobiva nešto manji minimalni volumen spremnika u usporedbi s modelom s grijačem unutar spremnika odabran je volumen spremnika prema modelu s grijačem unutra kako bi postojala rezerva kapaciteta spremnika u slučaju manjih toplinskih potreba odnosno većeg intenziteta zračenja.

#### **4.6. Rasprava rezultata dobivenih modelom i moguća poboljšanja**

S obzirom na to da je opisani model orijentiran na proračun solarnog toplinskog sustava odnosno na izračun prikupljene toplinske energije u kolektoru u ovisnosti o temperaturama u spremniku ovim modelom nije moguće odrediti posljedice integriranja solarnog toplinskog sustava na postojeće postrojenje za generiranje toplinske energije odnosno kotlove na prirodni plin. Sukladno tome ovim modelom nije moguće ocijeniti prednosti u pogledu povećanja fleksibilnosti koje donosi ugradnja toplinskog spremnika u sustav daljinskog grijanja.

Nadalje, u slučaju kada bi se modeliralo ubacivanje toplinske energije iz solarnih kolektora u različite segmente spremnika u ovisnosti o temperaturnoj razlici između vode u solarnom krugu i segmentu spremnika temperatura vode u donjem segmentu spremnika odnosno na ulazu u kolektor bila bi niža, a učinkovitost kolektora bi se povećala, osobito u ljetnim mjesecima.

Za precizniji proračun model je moguće proširiti detaljnijim proračunom toplinskih gubitaka u spremniku, energije potrebne za pogon pumpi i slično, no s obzirom na minimalni utjecaj spomenutih komponenti na cjelokupni sustav to nije nužno.

#### **4.7. Usporedba rezultata s računalnim programom EnergyPRO**

Usporedba dobivenih rezultata s rezultatima računalnog programa EnergyPRO provedena je za dva scenarija u oba slučaja, odnosno u slučaju kada su kolektori postavljeni uspravno i kada su polegnuti. Općenito, odstupanja u iznosu prikupljene energije kao i toplinskih gubitaka spremnika su vrlo mala i iznose nekoliko postotaka. Tablica 12. sadrži kratki pregled rezultata. Nadalje, i u modelu izrađenom u programu *EnergyPRO* pokazalo se da je povoljnije postaviti kolektore u uspravnom položaju odnosno da je veća dimenzija kolektora paralelna s osi horizontale. Toplinski gubici spremnika 50% su manji u spomenutom modelu u odnosu na model izrađen prema normi HRN EN 15316-5.

Tablica 12. Usporedba rezultata s računalnim programom EnergyPRO

| Parametar  | Oznaka             | Mjerna jedinica | Model   | EnergyPRO |
|--|--------------------|-----------------|---------|-----------|
| <b>Scenarij 1 – 7 redova uspravno postavljenih kolektora</b>   |                    |                 |         |           |
| Površina kolektora   | $A_{sol}$          | $m^2$           | 548,8   | 548,8     |
| Volumen spremnika  | $V_{sto}$          | $m^3$           | 45      | 45        |
| Prikupljena energija   | $Q_{sol,loop,out}$ | MWh             | 414,49  | 390,1     |
| Toplinski gubitci spremnika                                    | $Q_{sto,ls}$       | MWh             | 19,72   | 8,3       |
| Energija pomoćnih grijača                                      | $Q_{bh}$           | MWh             | 2.557,2 | 2570,1    |
| <b>Scenarij 2 – 14 redova polegnuto postavljenih kolektora</b> |                    |                 |         |           |
| Površina kolektora   | $A_{sol}$          | $m^2$           | 548,0   | 548,8     |
| Volumen spremnika  | $V_{sto}$          | $m^3$           | 42      | 42        |
| Prikupljena energija   | $Q_{sol,loop,out}$ | MWh             | 394,40  | 381,3     |
| Toplinski gubitci spremnika                                    | $Q_{sto,ls}$       | MWh             | 18,4    | 8,1       |
| Energija pomoćnih grijača                                      | $Q_{bh}$           | MWh             | 2.576,0 | 2.577,0   |

## 5. ZAKLJUČAK

Za integraciju solarne toplinske energije u sustave daljinskog grijanja u cilju prikupljanja što veće količine energije po jedinici površine pri višim temperaturnim režimima najpovoljniji su vakuumski pločasti solarni kolektori nakon čega slijede cijevni vakuumski kolektori te pločasti. S druge strane vakuumski kolektori zahtijevaju znatno veća ulaganja. Nadalje, za integraciju veće površine kolektora koja rezultira značajnijim udjelom solarne toplinske energije potrebno je u sustav ugraditi toplinski spremnik kako bi se izbjeglo pregrijavanje radnog medija i stagnacija u solarnom krugu. S druge strane ugradnja toplinskog spremnika povećava investicijske troškove te je period povrata investicije u ovaj složeniji sustav dulji. Povećavanjem veličine sustava period povrata se smanjuje, a optimum se ostvaruje povećanjem instaliranog kapacitetom kolektora do one vrijednosti za koju se u ljetnom periodu može ostvariti pražnjenje spremnika do početka idućeg ciklusa prikupljanja toplinske energije odnosno do početka idućeg dana.

U slučaju kada je prostor za postavljanje solarnih kolektora ograničen povoljnije ih je postavljati uspravno pri čemu se isti iznos površine kolektora ostvaruje manjim brojem redova, a samim time se između pojedinih redova ostvaruje veći razmak i smanjuje učinak zasjenjenja. Nadalje, u slučaju kada se kolektori postavljaju na manjoj udaljenosti korisno je istražiti utjecaj zasjenjenja i ukupne površine kolektora s obzirom na to da se povećanjem ukupne površine kolektora povećava učinak zasjenjenja, ali se istodobno povećava površina koja prikuplja energiju, a optimum ovisi o geometriji površine na koju se kolektori postavljaju. Najpovoljniji kut za prikupljanje solarne topline iznosi  $30^\circ$ , a smanjuje se tek kada se kolektori postavljaju na vrlo malom razmaku, što znači da nagib kolektora ima značajniji utjecaj negoli djelomično zasjenjenje.

Prema modelu solarnog toplinskog sustava koji je izrađen prema normama HRN EN 15316 -4-3:2017 i HRN EN 15316-5:2017 i uvažavajući ograničenja prisutna u postojećem sustavu daljinskog grijanja s godišnjim toplinskim potrebama od 2952 MWh najpovoljnije rješenje je integracija  $548,8 \text{ m}^2$  solarnih kolektora raspoređenih u sedam redova i odgovarajućeg toplinskog spremnika volumena  $45 \text{ m}^3$ . Nadalje, s obzirom na relativno male razlike u periodu povrata u načelu je integracija solarnih kolektora površine od 157 do  $706 \text{ m}^2$  podjednako isplativa pri čemu spremnik služi za skladištenje toplinske energije na satnoj razini. U tom slučaju odluka o veličini sustava je na investitoru odnosno odabrana varijanta ovisi o željenom

udjelu solarne toplinske energije u sustavu i financijskim sredstvima na raspolaganju. Za integraciju solarnih kolektora veće površine nužno je izgraditi značajno veći toplinski spremnik u kojem će se skladištiti toplinska energija na dulji period. Nadalje, integracija solarnih kolektora površine manje od 150 m<sup>2</sup> moguća je izravnim povezivanjem solarnih kolektora na mrežu daljinskog grijanja pri čemu je moguće izbjeći izgradnju toplinskog spremnika, a samim time i smanjiti investicijske troškove. U ovom slučaju nije moguće postići udio toplinske energije iz solarnog sustava veći od 5% zbog male potrošnje toplinske energije u ljetnim mjesecima.

Usporedbom modela s grijačem unutar odnosno izvan spremnika nije primijećena značajnija razlika u periodu povrata, no međutim zbog nižih temperatura vode u spremniku model s grijačem izvan spremnika rezultirao je malo (<1%) boljom prosječnom učinkovitošću kolektora kao i nešto većom količinom prikupljene energije. Kod primjene pločastih kolektora spomenuta razlika bila bi značajnija s obzirom na veći nagib karakteristične krivulje učinkovitosti u ovisnosti o temperaturi medija u kolektoru. Osim toga mala razlika na godišnjoj razini posljedica je i relativno visoke temperature povrata zbog koje se smanjuju varijacije temperature vode u spremniku pri čemu veći utjecaj na učinkovitost kolektora ima temperatura okolišnog zraka koja se tijekom godine mijenja u rasponu dvostruko većem u odnosu na raspon temperature medija u kolektoru. Nadalje, male toplinske potrebe u ljetnim mjesecima zahtijevaju veći volumen spremnika što znači da je za zimske uvjete spremnik predimenzioniran te je porast temperature vode u spremniku tijekom zime ograničen. Zbog manje temperaturne razlike između vode u solarnom sustavu i okolišnog zraka u ljetnim mjesecima je utjecaj temperature vode u solarnom sustavu na učinkovitost kolektora veći u ljetnim mjesecima.

Usporedbom rezultata s računalnim programom *EnergyPRO* također nije primijećena značajnija razlika u ukupnoj godišnjoj prikupljenoj energiji. Rezultati odstupaju nekoliko postotaka, a osnovni razlog leži u pretpostavljenim parametrima, drugačijem modeliranju toplinskih gubitaka spremnika itd. Model izrađen prema normi predstavlja detaljnije rješenje s obzirom na to da omogućava kontrolu ostvarenih temperatura u spremniku, dok se u *EnergyPRO*-u temperaturni režim spremnika pretpostavlja, a program pokazuje samo napunjenost spremnika tijekom godine.

Potencijalno poboljšanje modela moglo bi se ostvariti omogućavanjem izmjene topline između solarnog kruga i različitih slojeva spremnika u ovisnosti o iznosu temperature na izlazu iz spremnika, detaljnijim modeliranjem pomoćnih grijača i toplinskih gubitaka spremnika.

## LITERATURA

1. [www.euroheat.org](http://www.euroheat.org), Pristupljeno 18.01.2020.
2. [https://ec.europa.eu/energy/topics/energy-efficiency/heating-and-cooling\\_en?redir=1](https://ec.europa.eu/energy/topics/energy-efficiency/heating-and-cooling_en?redir=1), Pristupljeno 18.01.2020
3. [https://ec.europa.eu/energy/topics/renewable-energy/renewable-energy-directive\\_en](https://ec.europa.eu/energy/topics/renewable-energy/renewable-energy-directive_en); Renewable Energy Directive (2009/28/EC);Pristupljeno: 01.02.2020.
4. <https://www.solar-district-heating.eu/>, Pristupljeno: 20.01.2020.
5. Dović, Damir: Obnovljivi izvori energije, Uporaba sunčeve energije u termotehničkim sustavima, FSB, Zagreb,2012.
6. [www.tvpsolar.com](http://www.tvpsolar.com), Pristupljeno 21.01.2020.
7. <https://www.iea-shc.org/solar-heat-worldwide>; IEA, Pristupljeno: 25.01.2020.
8. Majdančić, Ljubomir: Solarni sustavi, Zagreb, 2010.
9. <https://tehnostan-vukovar.hr/> Pristupljeno:03.02.2020.
10. Sørensen, P.,A. et all: Solar District Heating Guidelines, Collection of fact sheets, SDH, 2012.
11. Solites
12. Maraj, Alti et all: Comparison of the Energy Performance between Flat-plate and Heat Pipe Evacuated Tube Collectors for Solar Water Heating Systems under Mediterranean Climate Conditions, JSDEWES,p87-100, 2019.
13. <http://www.estif.org/solarkeymarknew/>, Pristupljeno: 26.02.2020.
14. Jalili, Farid Jamshidian et all: An overview of Solar Thermal Power Generation Systems, 5th International Conference and Exhibition on Solar Energy, Teheran, 2018.
15. HRN EN 15316-4-3:2017
16. HRN EN 15316-5:2017
17. Državni hidrometeorološki zavod -DHMZ
18. Projekt *KeepWarm*, <https://keepwarmeurope.eu/>
19. Jernes, Niels: EnergyPRO User Guide, EMD International A/S, 2014.
20. Reindl, D.,T.et all: Diffuse fraction correlations, Solar Energy, 1990, p.1-7.
21. Valančius, R;Analysis of Medium-Scale Solar Thermal Systems and Their Potential in Lithuania, Energies, 2015.
22. Pavičević, M; Diplomski rad, FSB, Zagreb

## **PRILOZI**

1. CD-R
2. Dimenzije u solarnom kolektorskom polju
3. Ukupne godišnje vrijednosti ozračenja na nagnutu plohu u ovisnosti o kutu nagiba i broju redova kolektora [kWh/m<sup>2</sup>]



## Prilog 2. – Dimenzije u solarnom kolektorskom polju

| Opis | Položeno postavljeni kolektori |                            | Uspravno postavljeni kolektori |                            |
|------|--------------------------------|----------------------------|--------------------------------|----------------------------|
|      | Broj redova [-]                | Površina [m <sup>2</sup> ] | Razmak [m]                     | Površina [m <sup>2</sup> ] |
| 1    | 39,2                           | -                          | 78,40                          | -                          |
| 2    | 78,4                           | 28,06                      | 156,80                         | 27,25                      |
| 3    | 117,6                          | 14,03                      | 235,20                         | 13,63                      |
| 4    | 156,8                          | 9,35                       | 313,60                         | 9,08                       |
| 5    | 196,0                          | 7,01                       | 392,00                         | 6,81                       |
| 6    | 235,2                          | 5,61                       | 470,40                         | 5,45                       |
| 7    | 274,4                          | 4,68                       | 548,80                         | 4,54                       |
| 8    | 313,6                          | 4,01                       | 627,20                         | 3,89                       |
| 9    | 352,8                          | 3,51                       | 705,60                         | 3,41                       |
| 10   | 392,0                          | 3,12                       | 784,00                         | 3,03                       |
| 11   | 431,2                          | 2,81                       | 862,40                         | 2,73                       |
| 12   | 470,4                          | 2,55                       | 940,80                         | 2,48                       |
| 13   | 509,6                          | 2,34                       | 1019,20                        | 2,27                       |
| 14   | 548,8                          | 2,16                       |                                |                            |
| 15   | 588,0                          | 2,00                       |                                |                            |
| 16   | 627,2                          | 1,87                       |                                |                            |
| 17   | 666,4                          | 1,75                       |                                |                            |
| 18   | 705,6                          | 1,65                       |                                |                            |
| 19   | 744,8                          | 1,56                       |                                |                            |
| 20   | 784,0                          | 1,48                       |                                |                            |
| 21   | 823,2                          | 1,40                       |                                |                            |
| 22   | 862,4                          | 1,34                       |                                |                            |
| 23   | 901,6                          | 1,27                       |                                |                            |
| 24   | 940,8                          | 1,22                       |                                |                            |

Prilog 3. – Ukupne godišnje vrijednosti ozračenja na nagnutu plohu u ovisnosti o kutu nagiba i broju redova kolektora [kWh/m<sup>2</sup>]

### 1. Kolektori postavljeni u polegnutom položaju

|                            | $I_T$                 | $I_T$                 | $I_T$                 | $I_T$                 | $I_T$                 | $I_T$                 | $I_T$                 | $I_T$                 | $I_T$                 | $I_T$                 | $I_T$                 | $I_T$                 |
|----------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
|                            | [kWh/m <sup>2</sup> ] | [kWh/m <sup>2</sup> ] | [kWh/m <sup>2</sup> ] | [kWh/m <sup>2</sup> ] | [kWh/m <sup>2</sup> ] | [kWh/m <sup>2</sup> ] | [kWh/m <sup>2</sup> ] | [kWh/m <sup>2</sup> ] | [kWh/m <sup>2</sup> ] | [kWh/m <sup>2</sup> ] | [kWh/m <sup>2</sup> ] | [kWh/m <sup>2</sup> ] |
| $\beta$ [°]/N <sub>r</sub> | 1                     | 2                     | 3                     | 4                     | 5                     | 6                     | 7                     | 8                     | 9                     | 10                    | 11                    | 12                    |
| 5                          | 1180,5                | 1170,4                | 1160,3                | 1155,0                | 1151,5                | 1149,0                | 1147,1                | 1145,4                | 1144,0                | 1142,6                | 1141,4                | 1140,3                |
| 10                         | 1218,8                | 1209,7                | 1200,7                | 1196,0                | 1192,8                | 1190,6                | 1188,7                | 1187,2                | 1185,8                | 1184,6                | 1183,4                | 1182,2                |
| 15                         | 1248,2                | 1240,0                | 1231,9                | 1227,5                | 1224,7                | 1222,5                | 1220,8                | 1219,3                | 1218,0                | 1216,7                | 1215,6                | 1214,4                |
| 20                         | 1268,4                | 1260,9                | 1253,5                | 1249,4                | 1246,7                | 1244,7                | 1243,0                | 1241,6                | 1240,3                | 1239,0                | 1237,9                | 1236,7                |
| 25                         | 1278,8                | 1272,1                | 1265,4                | 1261,7                | 1259,2                | 1257,3                | 1255,7                | 1254,2                | 1252,9                | 1251,7                | 1250,5                | 1249,3                |
| 30                         | 1280,0                | 1274,0                | 1268,1                | 1264,7                | 1262,4                | 1260,6                | 1259,0                | 1257,6                | 1256,3                | 1255,1                | 1253,8                | 1252,5                |
| 35                         | 1272,6                | 1267,4                | 1262,3                | 1259,2                | 1257,1                | 1255,4                | 1253,9                | 1252,5                | 1251,2                | 1250,0                | 1248,7                | 1247,3                |
| 40                         | 1257,5                | 1253,0                | 1248,6                | 1245,9                | 1243,9                | 1242,3                | 1240,9                | 1239,5                | 1238,2                | 1236,9                | 1235,6                | 1234,1                |
| 45                         | 1236,0                | 1232,0                | 1228,0                | 1225,5                | 1223,6                | 1222,1                | 1220,7                | 1219,3                | 1218,0                | 1216,7                | 1215,3                | 1213,7                |
| 50                         | 1208,6                | 1204,7                | 1200,9                | 1198,5                | 1196,7                | 1195,1                | 1193,6                | 1192,3                | 1190,9                | 1189,5                | 1188,1                | 1186,4                |
| 55                         | 1174,4                | 1170,7                | 1167,1                | 1164,7                | 1163,0                | 1161,4                | 1159,9                | 1158,5                | 1157,1                | 1155,7                | 1154,3                | 1152,5                |
| 60                         | 1133,6                | 1130,1                | 1126,7                | 1124,5                | 1122,7                | 1121,2                | 1119,7                | 1118,3                | 1116,9                | 1115,5                | 1113,9                | 1112,1                |
| 65                         | 1086,3                | 1083,2                | 1080,0                | 1077,9                | 1076,2                | 1074,7                | 1073,2                | 1071,8                | 1070,4                | 1068,9                | 1067,4                | 1065,5                |
| 70                         | 1032,8                | 1029,9                | 1027,1                | 1025,1                | 1023,5                | 1022,0                | 1020,6                | 1019,2                | 1017,7                | 1016,3                | 1014,8                | 1012,9                |
| 75                         | 973,3                 | 970,9                 | 968,5                 | 966,7                 | 965,2                 | 963,7                 | 962,3                 | 960,9                 | 959,5                 | 958,1                 | 956,6                 | 954,7                 |
| 80                         | 909,9                 | 908,0                 | 906,2                 | 904,6                 | 903,2                 | 901,8                 | 900,4                 | 899,1                 | 897,7                 | 896,3                 | 894,8                 | 893,0                 |
| 85                         | 841,8                 | 840,7                 | 839,7                 | 838,5                 | 837,2                 | 835,9                 | 834,6                 | 833,3                 | 831,9                 | 830,6                 | 829,1                 | 827,4                 |
| 90                         | 770,1                 | 769,6                 | 769,1                 | 768,6                 | 767,7                 | 766,6                 | 765,3                 | 764,1                 | 762,8                 | 761,4                 | 760,0                 | 758,4                 |

|                            | $I_T$                 | $I_T$                 | $I_T$                 | $I_T$                 | $I_T$                 | $I_T$                 | $I_T$                 | $I_T$                 | $I_T$                 | $I_T$                 | $I_T$                 | $I_T$                 |
|----------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
|                            | [kWh/m <sup>2</sup> ] | [kWh/m <sup>2</sup> ] | [kWh/m <sup>2</sup> ] | [kWh/m <sup>2</sup> ] | [kWh/m <sup>2</sup> ] | [kWh/m <sup>2</sup> ] | [kWh/m <sup>2</sup> ] | [kWh/m <sup>2</sup> ] | [kWh/m <sup>2</sup> ] | [kWh/m <sup>2</sup> ] | [kWh/m <sup>2</sup> ] | [kWh/m <sup>2</sup> ] |
| $\beta$ [°]/N <sub>r</sub> | 13                    | 14                    | 15                    | 16                    | 17                    | 18                    | 19                    | 20                    | 21                    | 22                    | 23                    | 24                    |
| 5                          | 1139,1                | 1138,0                | 1136,9                | 1135,8                | 1134,6                | 1133,4                | 1132,2                | 1130,8                | 1129,5                | 1128,0                | 1126,4                | 1124,6                |
| 10                         | 1181,1                | 1180,0                | 1178,9                | 1177,6                | 1176,3                | 1174,9                | 1173,5                | 1171,9                | 1170,0                | 1167,5                | 1164,0                | 1159,4                |
| 15                         | 1213,3                | 1212,1                | 1210,8                | 1209,4                | 1207,7                | 1205,9                | 1203,6                | 1200,6                | 1196,9                | 1192,3                | 1186,0                | 1177,6                |
| 20                         | 1235,5                | 1234,2                | 1232,7                | 1230,7                | 1228,3                | 1225,2                | 1221,4                | 1217,0                | 1211,6                | 1204,6                | 1195,5                | 1182,9                |
| 25                         | 1248,0                | 1246,5                | 1244,5                | 1241,6                | 1238,0                | 1233,7                | 1228,8                | 1222,9                | 1215,8                | 1206,8                | 1194,8                | 1178,3                |
| 30                         | 1251,1                | 1249,3                | 1246,6                | 1242,8                | 1238,1                | 1232,9                | 1226,7                | 1219,5                | 1211,1                | 1200,3                | 1185,8                | 1166,9                |
| 35                         | 1245,7                | 1243,4                | 1240,1                | 1235,4                | 1229,9                | 1223,7                | 1216,5                | 1208,2                | 1198,6                | 1186,5                | 1170,4                | 1150,4                |
| 40                         | 1232,2                | 1229,6                | 1225,9                | 1220,5                | 1214,1                | 1206,9                | 1198,9                | 1189,8                | 1179,4                | 1166,3                | 1149,6                | 1129,4                |
| 45                         | 1211,6                | 1208,7                | 1204,5                | 1198,8                | 1191,6                | 1183,6                | 1174,9                | 1165,2                | 1154,1                | 1140,5                | 1123,8                | 1104,1                |
| 50                         | 1184,1                | 1181,0                | 1176,6                | 1170,7                | 1162,9                | 1154,3                | 1145,0                | 1134,7                | 1123,2                | 1109,6                | 1093,2                | 1074,4                |
| 55                         | 1150,0                | 1146,8                | 1142,3                | 1136,4                | 1128,3                | 1119,2                | 1109,4                | 1098,8                | 1087,1                | 1073,5                | 1057,7                | 1040,1                |
| 60                         | 1109,6                | 1106,3                | 1101,8                | 1095,9                | 1088,1                | 1078,6                | 1068,5                | 1057,6                | 1045,8                | 1032,5                | 1017,4                | 1001,0                |
| 65                         | 1062,9                | 1059,7                | 1055,3                | 1049,6                | 1042,2                | 1032,8                | 1022,5                | 1011,5                | 999,8                 | 986,7                 | 972,4                 | 957,1                 |
| 70                         | 1010,4                | 1007,2                | 1002,9                | 997,5                 | 990,6                 | 982,1                 | 971,8                 | 960,7                 | 949,0                 | 936,4                 | 922,8                 | 908,5                 |
| 75                         | 952,3                 | 949,2                 | 945,2                 | 940,0                 | 933,8                 | 926,0                 | 916,7                 | 905,8                 | 894,2                 | 882,0                 | 869,0                 | 855,6                 |
| 80                         | 890,6                 | 887,6                 | 883,9                 | 879,1                 | 873,4                 | 866,5                 | 858,3                 | 848,5                 | 837,3                 | 825,5                 | 813,0                 | 800,4                 |
| 85                         | 825,2                 | 822,3                 | 818,8                 | 814,5                 | 809,3                 | 803,3                 | 796,1                 | 787,7                 | 778,0                 | 766,7                 | 754,8                 | 742,7                 |
| 90                         | 756,3                 | 753,6                 | 750,4                 | 746,5                 | 741,9                 | 736,6                 | 730,3                 | 723,1                 | 714,9                 | 705,5                 | 694,5                 | 683,1                 |

### 2. Kolektori postavljeni u uspravnom položaju

|                            | $I_T$                 | $I_T$                 | $I_T$                 | $I_T$                 | $I_T$                 | $I_T$                 | $I_T$                 | $I_T$                 | $I_T$                 | $I_T$                 | $I_T$                 | $I_T$                 | $I_T$                 | $I_T$                 |
|----------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
|                            | [kWh/m <sup>2</sup> ] | [kWh/m <sup>2</sup> ] | [kWh/m <sup>2</sup> ] | [kWh/m <sup>2</sup> ] | [kWh/m <sup>2</sup> ] | [kWh/m <sup>2</sup> ] | [kWh/m <sup>2</sup> ] | [kWh/m <sup>2</sup> ] | [kWh/m <sup>2</sup> ] | [kWh/m <sup>2</sup> ] | [kWh/m <sup>2</sup> ] | [kWh/m <sup>2</sup> ] | [kWh/m <sup>2</sup> ] | [kWh/m <sup>2</sup> ] |
| $\beta$ [°]/N <sub>r</sub> | 1                     | 2                     | 3                     | 4                     | 5                     | 6                     | 7                     | 8                     | 9                     | 10                    | 11                    | 12                    | 13                    | 14                    |
| 5                          | 1180,8                | 1170,1                | 1159,5                | 1153,6                | 1149,4                | 1146,0                | 1143,0                | 1140,2                | 1137,3                | 1134,3                | 1131,0                | 1126,9                | 1118,1                | 1082,5                |
| 10                         | 1219,0                | 1209,4                | 1199,9                | 1194,5                | 1190,6                | 1187,5                | 1184,6                | 1181,7                | 1178,5                | 1175,0                | 1169,6                | 1159,5                | 1135,3                | 1071,5                |
| 15                         | 1248,4                | 1239,7                | 1231,1                | 1226,0                | 1222,3                | 1219,2                | 1216,4                | 1213,2                | 1209,2                | 1203,2                | 1193,6                | 1175,7                | 1134,3                | 1060,3                |
| 20                         | 1268,6                | 1260,6                | 1252,6                | 1247,9                | 1244,3                | 1241,2                | 1238,2                | 1234,4                | 1228,4                | 1219,5                | 1205,4                | 1179,1                | 1125,9                | 1049,6                |
| 25                         | 1279,1                | 1271,8                | 1264,5                | 1260,0                | 1256,6                | 1253,5                | 1250,3                | 1245,2                | 1236,9                | 1225,4                | 1207,4                | 1173,8                | 1114,8                | 1039,1                |
| 30                         | 1280,3                | 1273,7                | 1267,1                | 1262,9                | 1259,5                | 1256,5                | 1253,0                | 1246,4                | 1236,2                | 1222,1                | 1201,0                | 1162,9                | 1102,5                | 1028,7                |
| 35                         | 1273,0                | 1267,1                | 1261,2                | 1257,3                | 1254,1                | 1251,0                | 1247,0                | 1239,1                | 1227,1                | 1211,1                | 1187,6                | 1147,6                | 1088,6                | 1018,1                |
| 40                         | 1257,9                | 1252,6                | 1247,4                | 1243,7                | 1240,6                | 1237,5                | 1233,1                | 1224,3                | 1210,6                | 1193,1                | 1168,1                | 1128,1                | 1072,5                | 1006,5                |
| 45                         | 1236,4                | 1231,6                | 1226,7                | 1223,2                | 1220,1                | 1217,0                | 1212,2                | 1202,8                | 1187,7                | 1168,9                | 1143,3                | 1104,5                | 1053,4                | 992,4                 |
| 50                         | 1209,0                | 1204,3                | 1199,6                | 1196,1                | 1192,9                | 1189,7                | 1184,6                | 1175,0                | 1158,8                | 1139,1                | 1113,3                | 1076,5                | 1030,1                | 975,1                 |
| 55                         | 1174,8                | 1170,3                | 1165,7                | 1162,2                | 1159,0                | 1155,7                | 1150,5                | 1140,9                | 1124,2                | 1103,7                | 1078,2                | 1043,7                | 1002,0                | 953,5                 |
| 60                         | 1134,0                | 1129,6                | 1125,3                | 1121,8                | 1118,7                | 1115,3                | 1110,1                | 1100,6                | 1084,0                | 1063,1                | 1038,0                | 1005,8                | 968,2                 | 926,1                 |
| 65                         | 1086,8                | 1082,6                | 1078,5                | 1075,1                | 1072,0                | 1068,7                | 1063,5                | 1054,3                | 1038,6                | 1017,5                | 992,9                 | 962,9                 | 929,0                 | 892,2                 |
| 70                         | 1033,2                | 1029,4                | 1025,5                | 1022,3                | 1019,2                | 1016,0                | 1010,9                | 1002,2                | 987,9                 | 967,0                 | 943,0                 | 915,0                 | 884,3                 | 851,6                 |
| 75                         | 973,9                 | 970,4                 | 966,9                 | 963,9                 | 960,9                 | 957,7                 | 952,8                 | 944,7                 | 931,7                 | 912,4                 | 888,9                 | 862,6                 | 834,5                 | 805,5                 |
| 80                         | 910,6                 | 907,6                 | 904,6                 | 901,7                 | 898,9                 | 895,7                 | 891,1                 | 883,6                 | 872,0                 | 855,2                 | 832,7                 | 807,7                 | 781,7                 | 755,5                 |
| 85                         | 842,7                 | 840,5                 | 838,3                 | 835,7                 | 832,9                 | 829,9                 | 825,6                 | 818,7                 | 808,5                 | 793,9                 | 774,0                 | 750,3                 | 726,0                 | 702,0                 |
| 90                         | 770,7                 | 769,5                 | 768,3                 | 766,1                 | 763,5                 | 760,7                 | 756,7                 | 750,4                 | 741,4                 | 728,9                 | 712,4                 | 690,6                 | 667,8                 | 645,6                 |