

# Iskorištavanje tla kao toplinskog spremnika u sustavu geotermalnih dizalica topline

---

**Kušen, Vanja**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2016**

*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:235:014841>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-07-13**

*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

**Vanja Kušen**

Zagreb, 2016. godina.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

Mentori:

dr. sc. Marino Grozdek, dipl. ing.

Student:

Vanja Kušen

Zagreb, 2016. godina.

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

Zahvaljujem se svojem mentoru dr. sc. Marinu Grozdeku i asistentu Luki Bobanu na razumijevanju, podršci i korisnim savjetima tijekom izrade završnog rada.

Vanja Kušen



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



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

Sveučilište u Zagrebu	
Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

## ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Vanja Kušen** Mat. br.: **0035191124**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Iskorištavanje tla kao spremnika topline u sustavu geotermalne dizalice topline**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Utilization of soil as a heat source for the ground coupled heat pump system**

**Opis zadatka:**

Iskorištavanje plitkog geotermalnog potencijala za potrebe grijanja i hlađenja moguće je povezivanjem bušotinskih izmjenjivača topline (BIT) s dizalicom topline. Kod takvog sustava tlo predstavlja toplinski spremnik, odnosno u sezoni grijanja izvor topline, a u sezoni hlađenja ponor topline.

Učinkovitost bušotinskog izmjenjivača topline i sustava dizalice topline, odnosno razlika temperature neporemećenog tla i temperature fluida koji struji kroz izmjenjivač, ovisi o vođenju sustava i intenzitetu iskorištavanja topline tla.

Kako je sama izmjena topline u izmjenjivaču topline nestacionarne prirode, za modeliranje interakcije bušotine i tla koriste se numeričko-analitički modeli. Takav model sadržan je unutar programskog paketa TRNSYS.

U sklopu završnog rada potrebno je:


- opisati izvedbu bušotinskog izmjenjivača topline (BIT)
- opisati utjecajne parametre na rad BIT-a
- modelirati BIT izveden na Fakulteta strojarstva i brodogradnje u programskom paketu TRNSYS te usporediti isti s podacima dobivenim mjerenjem toplinskog odziva tla (TRT)
- analizirati različite strategije korištenja BIT-a u svrhu povećanja učinkovitosti sustava geotermalne dizalice topline
- analizirati mogućnost iskorištavanja tla kao kratkotrajnog spremnika topline.


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

Zadatak zadan:  
25. studenog 2015.

Rok predaje rada:  
1. rok: 25. veljače 2016.  
2. rok (izvanredni): 20. lipnja 2016.  
3. rok: 17. rujna 2016.

Predviđeni datumi obrane:  
1. rok: 29. 2., 02. i 03. 03. 2016.  
2. rok (izvanredni): 30. 06. 2016.  
3. rok: 19., 20. i 21. 09. 2016.

Zadatak zadao:  
  
Doc. dr. sc. Marino Grozdek

Predsjednik Povjerenstva:  
  
Prof. dr. sc. Igor Balen

## Sadržaj

1. UVOD .....	1
1.1. Tlo kao toplinski spremnik.....	1
1.2. Izvedbe sustava za iskorištavanje plitke geotermalne energije .....	2
1.2.1. Otvoreni sustavi.....	2
1.2.2. Zatvoreni sustav .....	4
2. Parametri koji utječu na rad BIT-a .....	8
2.1. Temperatura tla .....	9
2.1.1. Matematički modeli .....	9
2.2. Učinkovitost sustava .....	12
2.3. Komponente sustava, regulacija i hidraulika .....	13
3. TRNSYS.....	14
3.1. Toplinski procesi .....	14
3.1.1. Primarni toplinski procesi .....	14
3.1.2. Sekundarni toplinski procesi .....	14
3.1.3. Lokalni toplinski procesi.....	15
3.2. Numerički postupci .....	16
3.2.1. Globalni problem.....	16
3.2.2. Lokalni problem .....	18
3.2.3. Problem konstantnog toka.....	21
3.3 Superpozicija temperatura.....	22
3.4. Simulacija.....	22
4. Korištenje tla kao kratkotrajnog spremnika topline .....	25
4.1. Hlađenje tla kroz period od 12 sati.....	25
4.3. Hlađenje tla 48 sati .....	29
4.4. Ispitivanje prema satnom profilu opterećenja .....	31
4.4.1. Prirodna regeneracija tla.....	33
4.4.2. Aktivno hlađenje tla .....	36
4.4.3. Pasivno regeneriranje tla .....	39
ZAKLJUČAK .....	42

**POPIS SLIKA**

Slika 1. Temperaturni profil toplinski neporemećenog tla.....	1
Slika 2. Otvoreni sustav sa zrakom .....	3
Slika 3. Otvoreni sustav s bunarima.....	3
Slika 4. Izvedbe polaganja cijevi u bušotine .....	5
Slika 5. Paralelni spoj.....	6
Slika 6. Serijski spoj.....	6
Slika 7. Cijevi u namotajima .....	7
Slika 8. Toplinska svojstva tla kao rezultat ispitivanja toplinskog odaziva tla.....	9
Slika 9. Tokovi energije kroz tlo.....	11
Slika 10. Primjeri dvodimenzionalnih mreža .....	17
Slika 11. Primjer jednodimenzionalne mreže za rješavanje lokalnog problema.....	18
Slika 12. Podjela u subregije .....	19
Slika 13. Simuliranje u TRNSYS-u .....	23
Slika 14. Usklađivanje eksperimentalnih podataka i simulacije BIT-a .....	24
Slika 15. Test hlađenja tla 12 sati.....	26
Slika 16. Test hlađenja tla 12 sati (50 dana) .....	27
Slika 17. Test hlađenja tla 24 sata .....	28
Slika 18. Test hlađenja tla 24h (50 dana) .....	29
Slika 19. Test hlađenja tla 48 sati.....	30
Slika 20. Test hlađenja tla 48 sati (50 dana) .....	31
Slika 21. Toplinska opterećenja za srpanj izražena u kW .....	32
Slika 22. Simulacija sustava kroz 5 dana .....	33
Slika 23. Porast temperature tla.....	34
Slika 24. Usporedba temperatura .....	34
Slika 25. Usporedba temperatura kondenzacije između zračnih sustava i sustava koji koriste BIT.....	35
Slika 26. Usporedba temperatura kondenzacije za vršna opterećenja kroz 5 dana.....	36
Slika 27. Razlika učinkovitosti između sustava koji koriste BIT i sustava sa zrakom hlađenim kondenzatorom .....	36
Slika 28. Usporedba temperatura tla između aktivnog hlađenja i prirodne regeneracije tla....	37
Slika 29. Usporedba temperature kondenzacije između aktivnog hlađenja i prirodne regeneracije tla .....	38
Slika 30. Usporedba temperatura tla između pasivnog hlađenja i prirodne regeneracije tla ...	39
Slika 31. Usporedba temperatura kondenzacije .....	40
Slika 32. Usporedba temperatura kondenzacije .....	41
Slika 33. Usporedba razlika učinkovitosti za aktivno i pasivno hlađenje u odnosu na prirodnu regeneraciju .....	41

## POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
$A_p$	$m^2$	Površina područja toplinskog spremnika
$B$	m	Udaljenost između cijevi BIT-a
$B_1$	m	Udaljenost između cijevi BIT-a
$C$	$W/K \cdot m^3$	Volumetrički toplinski kapacitet spremnika
$C(i,j)$	$kJ/kg \cdot K$	Toplinski kapacitet ćelije
$E_k$	W	Količina pristigle topline u subregiju k
$F_r$	W	Toplinski tok između ćelija u radijalnom smjeru
$F_z$	W	Toplinski tok između ćelija u vertikalnom smjeru
$K_r$	$W/m \cdot K$	Toplinska provodnost između ćelija u radijalnom smjeru
$K_z$	$W/m \cdot K$	Toplinska provodnost između ćelija u vertikalnom smjeru
$L$	m	Duljina
$P_{kompresor}$	W	Snaga kompresora
$q$	W	Distribuirani toplinski tok u tlo
$q_{fv}$	$m^3/s$	Volumenski protok radnog medija
$q_l$	$W/m^3$	Uvjet toplinskog izvora koji predaje toplinski tok iz lokalnog u globalni problem
$Q_l$	$W/m^3$	Volumetrički toplinski tok u lokalnom problemu
$Q_{sf}$	$W/m^3$	Volumetrički toplinski tok po volumenu toplinskog spremnika
$R_b$	$m \cdot K/W$	Toplinski otpor stijene
$r_{bh}$	m	Radius bušotine
$s$	m	Duljina
$T$	K	Temperatura tla
$t$	s	Vrijeme
$\Delta t$	s	Vremenski korak
$T(i,j)$	K	Temperatura čvora s koordinatama $i,j$
$T_a$	K	Temperatura okolnog tla
$T_{amp}$	K	Temperaturna amplituda (odstupanje od srednje površinske temperature)
$T_f$	K	Srednja temperatura fluida u BIT-u



---

$t_g$	s	Globalni vremenski korak
$\Delta T_g$	K	Razlika temperature subregije
$T_g^k$	K	Srednja temperatura
$T_{g,j}^k$	K	Temperatura ćelije $j$ u subregiji $k$
$t_{god}$	-	Dan u godini za koji se proračunava
$T_l$	K	Lokalna temperatura
$t_{min}$	-	Dan u godini sa zabilježenim temperaturnim minimumom
$T_{sr}$	K	Srednja površinska temperatura
$T_{stijene}$	K	Temperatura stijene
$T_{sf}^k$	K	Temperatura koja se koristi u problemu konstantnog toka u subregiji $k$
$V_k$	m <sup>3</sup>	Volumen subregije $k$
$V_{k,j}$	m <sup>3</sup>	Volumen ćelije $j$ u subregiji $k$
$Z$	m	Dubina
$\alpha$	m <sup>2</sup> /s	Toplinska difuznost
$\beta$	-	Integracijska varijabla
$\varepsilon_{gr}$	-	Faktor grijanja
$\varepsilon_{hl}$	-	Faktor hlađenja
$\lambda_{stijene}$	W/m*K	Koeficijent toplinske provodnosti stijene
$\Phi_0$	W	Toplinski tok na isparivaču
$\Phi_{kond}$	W	Toplinski tok na kondenzatoru

## **SAŽETAK**

Tema završnog rada je iskorištavanje tla kao spremnika u sustavu geotermalne dizalice topline. Trendovi pokazuju sve češće korištenje sustava dizalice topline u tehnici grijanja i hlađenja zgrada te je potrebno razraditi mogućnosti povećanja učinkovitosti istih sustava.

U ovom radu razrađene su ideje i provedene simulacije kako bi se ustanovili mogući načini za poboljšanje efikasnosti te povoljnije termodinamičke procese. Pozornost je posvećena tehnici hlađenja. Pokrivanjem toplinskog opterećenja potrebno je odvoditi toplinu kondenzacije kroz bušotinski izmjenjivač topline u tlo. Kao posljedica preuzete topline, tlo se zagrijava te smanjuje mogućnost izmjene topline te zbog toga dolazi do porasta temperature kondenzacije čime se povećava kompresijski omjer dizalice topline te smanjenje faktora hlađenja.

U ovom radu ispitat će se mogućnosti regeneracije tla. U razmatranju su prirodna, aktivna i pasivna regeneracija tla.

Ključne riječi: BIT, dizalica topline, toplinski spremnik

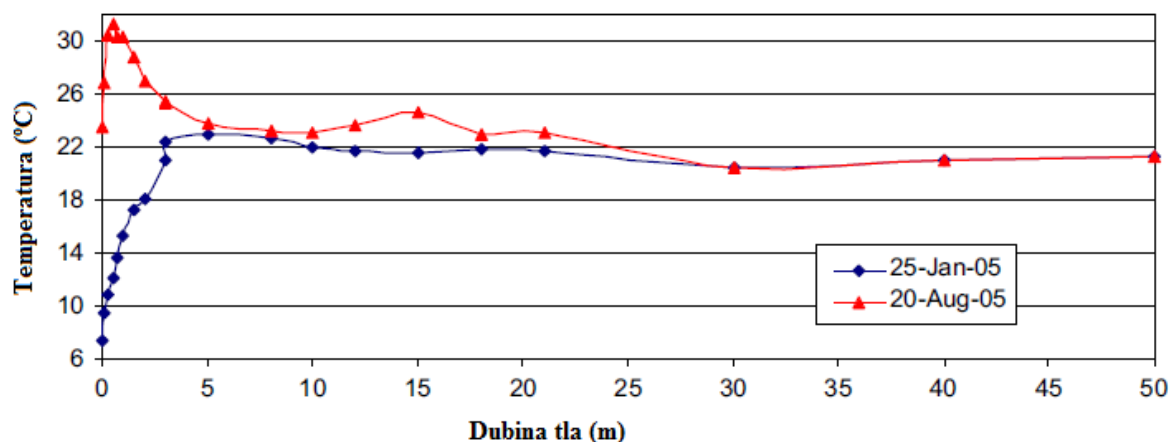
## 1. UVOD

Razvojem industrije, znanosti i ostalih ljudskih djelatnosti raste i potražnja za energijom. Energija je sve skuplja te smo primorani tražiti alternativne izvore koje prije nismo koristili kao što su Sunce, podzemne vode, zemlja pa čak i zrak. Proizvodnja energije zagađuje okoliš te tu jača ljudska svijest za zaštitom istog tako da korištenje alternativnih izvora ne znači nužno samo zadovoljavanja potreba za energijom nego i zaštita životnih uvjeta kako ljudi tako i ostatak živog svijeta što se nastoji popratiti i regulirati zakonima.

Motivacija za izradu ovog rada je mogućnost korištenja zemlje kao toplinskog izvora i ponora. Postoje različiti načini iskorištavanja tla, a u sklopu ovog rada obradit će se izvedba sustava s bušotinskim izmjenjivačima topline.

### 1.1. Tlo kao toplinski spremnik

Istraživanja su pokazala da zemlja, na određenoj dubini ima konstantu temperaturu tijekom cijele godine. Naime, pri površini postoje veća odstupanja temperature no zbog velike toplinske inercije, tj. toplinskog kapaciteta zemlje, te postojanja geotermalnog gradijenta, s dubinom ta odstupanja opadaju kao što se može vidjeti na slici 1.



Slika 1. Temperaturni profil toplinski neporemećenog tla

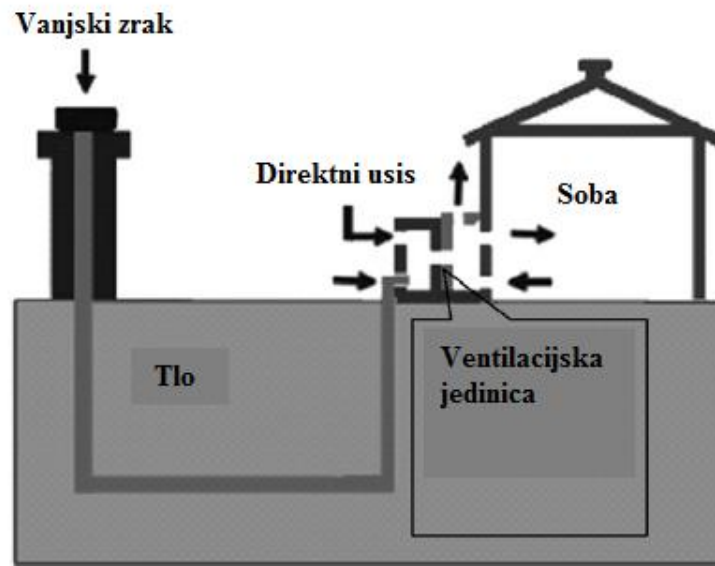
Ova slika prikazuje temperaturu tla u ovisnosti o dubini. Ova mjerenja provedena su u Nicosia-i na Cipru. Kao što se iz priloženog vidi, nakon dubine od 30 m temperatura tla je gotovo jednaka cijele godine, a s porastom dubine lagano raste zbog postojanja geotermalnog gradijenta. Iznos te temperature niži je od ljetnih visokih temperatura te viši od zimskih niskih temperatura što omogućava da se ljeti tlo koristi kao toplinski ponor, tj. rashladni spremnik koji omogućava odvođenje topline iz prostorija gdje borave ljudi, dok zimi omogućava grijanje istih prostorija. S tom su svrhom razvijeni bušotinski izmjenjivači topline koji omogućavaju prijenos tih toplina ili direktno ili indirektno putem medija.

## 1.2. Izvedbe sustava za iskorištavanje plitke geotermalne energije

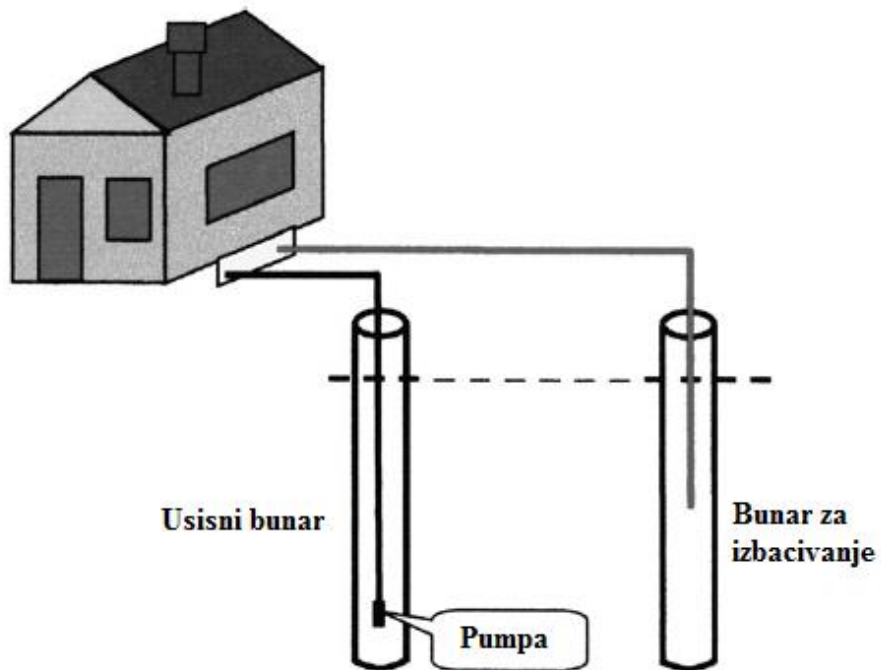
Postoje dvije osnovne podjele sustava ovisno o interakciji radnog medija i tla: otvoreni i zatvoreni. Kod otvorenih sustava petljom izmjenjivača kruži zrak koji sustavom cijevi prolazi kroz zemlju gdje se zagrijava/hladi te služi za grijanje/hlađenje prostorije dok kod zatvorenih sustava prijenos topline vrši se putem radne tvari koja služi kao nositelj topline.

### 1.2.1. Otvoreni sustavi

Kao što je već prije spomenuto, kod otvorenih sustava zrak kruži krugom cijevi izmjenjivača topline gdje izmjenjuje toplinu sa tлом te se ubacuje u prostoriju. Kao medij može se koristiti i voda koja se crpi iz jednog bunara, predaje toplinu krugu radnog medija dizalice topline te se ohlađena ispumpava u drugi bunar nizvodno. Navedeni primjer je u sezoni grijanja no taj se proces može koristiti i ljeti u sezoni hlađenja gdje je tlo rashladni spremnik. Na slici 2. vidi se primjenjeni otvoreni sustav sa zrakom, a na slici 3. s vodom.



Slika 2. Otvoreni sustav sa zrakom



Slika 3. Otvoreni sustav s bunarima

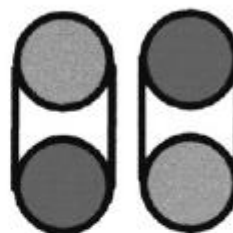
### 1.2.2. Zatvoreni sustav

Kod zatvorenih sustava izmjenjivači topline mogu biti instalirani vertikalno ili horizontalno. Način postavljanja ovisi o raspoloživoj površini za ugradnju. Vertikalna izvedba se najčešće instalira ukoliko je tlo kamenito ili nam kopanje velikih površina predstavlja problem te je upravo iz tih razloga i skuplja opcija. Toplinska inercija zemlje omogućava nam korištenje tla kao toplinskog izvora ljeti i zimi upravo zbog zemljine konstantne temperature tijekom cijele godine. Standardne bušotine se kopaju između 50-150 m u dubinu, a promjer im se najčešće kreće od 75 do 200 mm. U bušotinske rupe se instalira izmjenjivač topline te se nakon postavljanja zalijevaju materijalom koji osigurava rupu da se ne uruši te da se toplina bez velikih gubitaka može prenijeti s tla na radni medij. Taj materijal je najčešće bentonit koji ima termofizikalna svojstva slična zemlji. Nakon što se nanese bentonit i rupa je osigurana, ugrađuju se cijevi izmjenjivača načinjene od polietilena ili polipropilena. Njihov promjer kreće se između 25 i 40 mm. Postoje i različite izvedbe postavljanja cijevi izmjenjivača, a to su: U-cijev, dvostruka U-cijev te koaksijalna izvedba. Izvedbe su prikazane na slici 4. Valja naglasiti da geometrija i materijal cijevi utječu na otpore BIT-a.

Jednostruka u-cijev



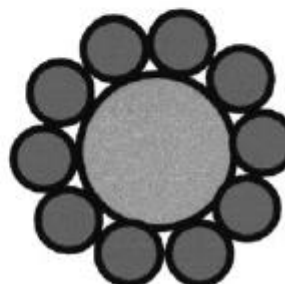
Dvostruka u-cijev



Jednostavna koaksijalna



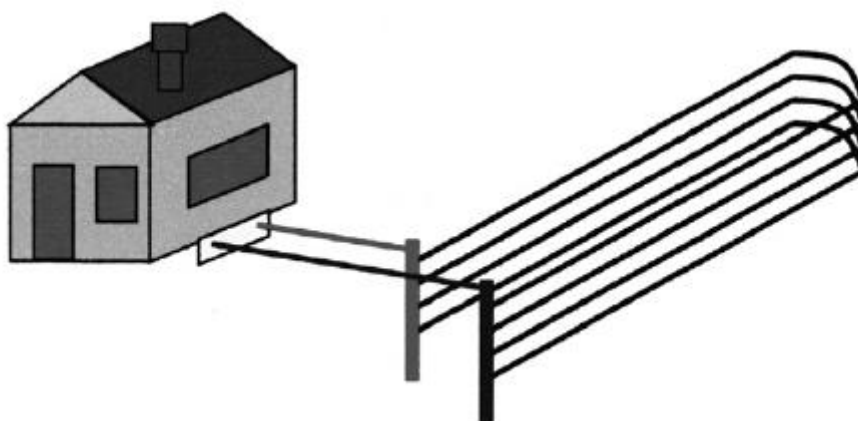
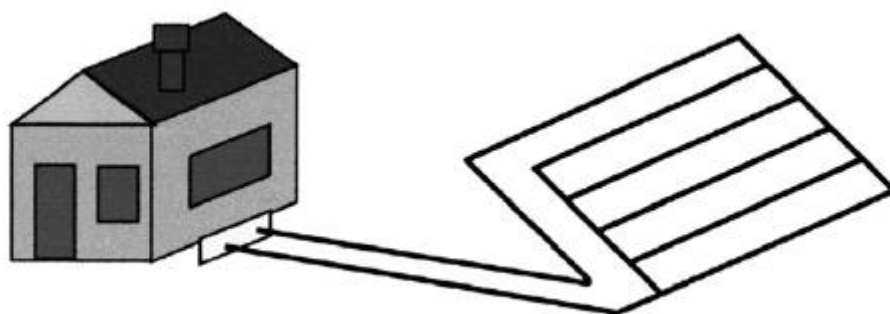
Kompleksna koaksijalna



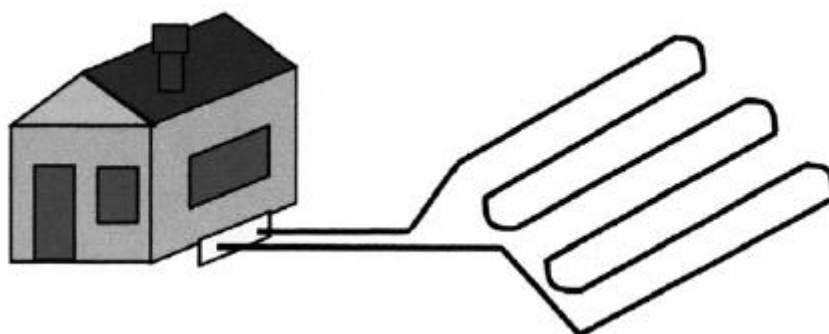
---

**Slika 4. Izvedbe polaganja cijevi u bušotine**

Horizontalno polaganje cijevi je povoljnije, ali učinkovitost takvih sustava zahtjeva veće slobodne površine tako da sunčeve zrake mogu nesmetano grijati tlo zimi. Ukoliko je regeneriranje zemlje onemogućeno tlo može promrznuti, a time značajno otežati izmjenu toplinu između zemlje i radne tvari. Takvi sustavi se postavljaju prilikom građevinskih zahvata kao što su kopanje temelja za obiteljske kuće ili druge zgrade. Cijevi se polažu na dubinama između 1 do 2 m ispod zemljine površine i ne zahtijevaju neke veće i skuplje građevinske zahtjeve i kao što je već prije navedeno, za razliku od vertikalne izvedbe pogodne su za instaliranje u područjima mekših terena koji ne predstavljaju problem za kopanje. Dakle, zemlju je potrebno regenerirati prilikom režima grijanja jer medij unutar cijevi preuzima toplinu od tla tako da je nužno osigurati čiste površine, tj. da se ništa ne gradi iznad izmjenjivača topline što može stvoriti velike neiskorištene površine ovisno o kapacitetima samih sustava. Što se tiče rasporeda cijevi postoje tri načina: paralelni spoj (slika 5.) , serijski spoj (slika 6.) te polaganje cijevi u namotajima (slika 7.).

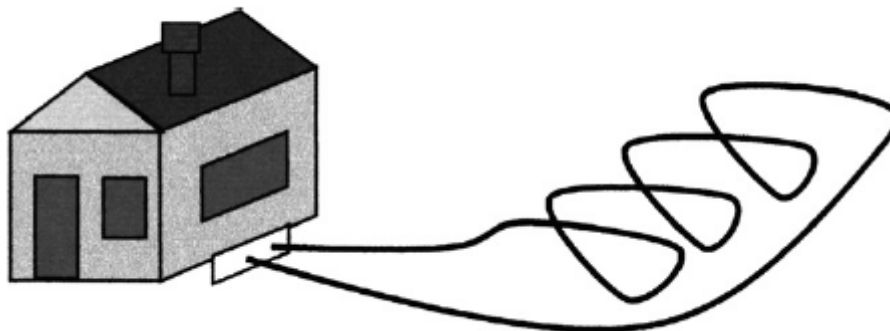


Slika 5. Paralelni spoj



Slika 6. Serijski spoj





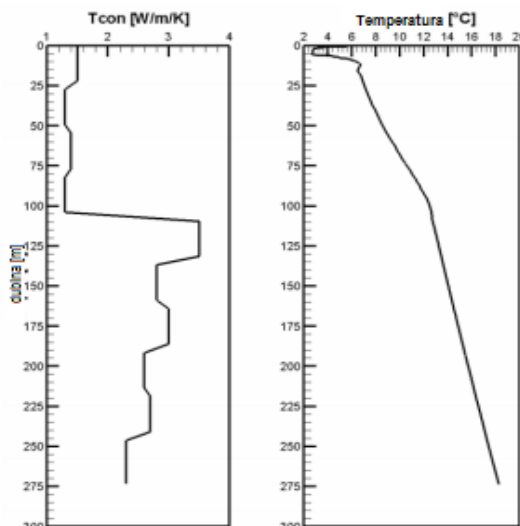
**Slika 7. Cijevi u namotajima**

Paralelni spoj je najčešća izvedba jer je zahvalna zbog velike površine izmjene topline dok je pad tlaka kroz cijevi manji te je potrebna manja snaga pumpe čime se smanjuju investicijski troškovi što je kod serijskog spoja nedostatak, ali je lakše instalirati. Cijevi u namotajima se koriste na područjima gdje regeneracija tla ne ovisi toliko o temperaturi zraka i o sunčevom zračenju te je moguće položiti veće duljine cijevi na manjoj površini što uvelike smanjuje građevinske zahvate. U pravilu kod horizontalnih izvedbi po 1 kW toplinskog učinka potrebno je 35-60 m cijevi. To su neke iskustvene vrijednosti koje se koriste u praksi, ali preporuča se provjera tih vrijednosti proračunima. Veoma je bitno osigurati adekvatnu površinu za izmjenu topline.

## 2. Parametri koji utječu na rad BIT-a

Temperatura tla, jedan je od parametara koji bitno utječe na dimenzioniranje i rad bušotinskih izmjenjivača topline jer ona jednoznačno određuje temperature isparavanja/kondenzacije. S druge strane, ona ovisi o: vrsti tla, klimatskom području, godišnjoj količini padalina, broju sunčanih sati, vlazi te pokrivaču površine tla iznad BIT-a te je za potrebe dimenzioniranja potrebno poznavati toplinska svojstva tla i toplinski otpor bušotine. Tu su i drugi parametri kao što su: satna potreba za grijanjem/hlađenjem, komponente sustava, regulacija i hidraulika.

No prije dimenzioniranja sustava potrebno je napraviti TRT (Thermal Response Test), tj. ispitivanje toplinskog odaziva tla. Potrebno je napraviti ispitivanja kako bi se utvrdila toplinska svojstva tla kao što su toplinska provodnost, toplinski otpor bušotine i temperatura tla. Ta se ispitivanja provode samo kod dimenzioniranja većih sustava (10 do 20 BIT-a; sustavi veći od 30kW) jer su za manja postrojenja ekonomski neisplativa. Kod većih sustava bitno je precizno određivanje svojstva tla jer su, zbog loših ispitivanja, a kasnije dimenzioniranja, mogući ogromni gubici što prouzročuje velik pad efikasnosti cijelog sustava, a time i značajan porast troškova. TRT je najčešće korištena metoda za utvrđivanje toplinskih svojstava tla, a njome se i predviđa temperaturni profil istog. Tim se testom također može utvrditi i utjecaj strujanja podzemnih voda koje itekako utječu na toplinsku provodnost tla, a mogu i biti potencijalni toplinski izvor ili ponor i time utjecati na temperaturni profil tla. TRT se izvodi tako da se tlo zagrijava konstantnim toplinskim tokom te se prati toplinski odaziv tla. TRT-om se dobiva srednja temperatura tla, no za određivanje temperaturnog profila tla po dubini bušotine koristi se DTRT (Distribute Thermal Response Test) i on se primjenjuje samo u znanstvene svrhe.



Slika 8. Toplinska svojstva tla kao rezultat ispitivanja toplinskog odaziva tla

## 2.1. Temperatura tla

Iako je temperatura tla konstantna tijekom cijele godine, na njenu raspodjelu u tlu utječu: fizikalna i strukturna svojstva samog tla, pokrivenost površine tla iznad izmjenjivača te klimatski faktori (temperatura zraka, vlaga, vjetar, količina sunčevog zračenja, količina padalina, geotermalni gradijent u tlu, itd.). Temperatura s porastom dubine raste s prosječnim gradijentom od 30 °C/km. Izmijenjena toplina kroz tlo može se izračunati jednostavnim množenjem temperaturnog gradijenta s koeficijentom toplinske provodnosti  $\lambda$  koji ovisi o vrsti stijene i o vlažnosti tla. Recimo, mineralne stijene pune kvarcnog pijeska imaju visok  $\lambda$ , što znači da toplina vrlo brzo i bez većeg otpora prolazi kroz njih, dok stijene glinovitog ili organskog sastava i pune vlage imaju nizak  $\lambda$ , što znači da toplina sporo prolazi kroz te stijene uz značajan otpor.

### 2.1.1. Matematički modeli

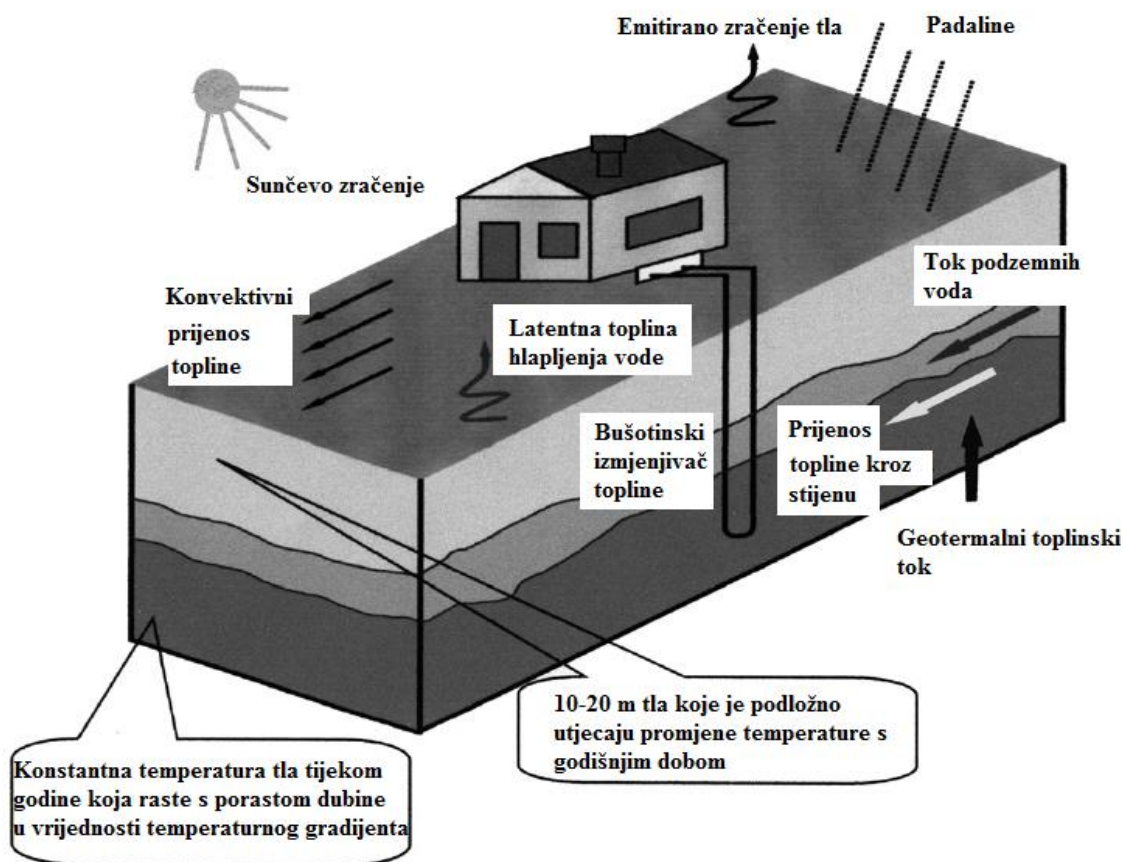
Jedan od bitnih parametara je površinska temperatura tla te je korisno poznavati taj podatak, a još bi bilo korisnije predvidjeti kako se ona ponaša na dnevnoj i godišnjoj bazi. U tu svrhu, Mihalakakou je predstavio matematički model za predviđanje dnevnih i godišnjih odstupanja površinske temperature. U modelu je koristio diferencijalnu jednadžbu

tranzijentnog provođenja topline i jednadžbu očuvanja energije na površine tla. Jednadžba očuvanja energije sadržala je sljedeće članove: konvektivni prijenos topline između tla i zraka, apsorbiranu sunčevu energiju, latentnu toplinu koja se javlja zbog hlapljenja vode iz tla te dugovalno zračenje. Jednadžba glasi:

$$T = T_{sr} + T_{amp} * \exp\left(-Z * \sqrt{\frac{\pi}{365 * \alpha}}\right) * \cos\left[\frac{2\pi}{365} * \left(t_{god} - t_{min} - \frac{Z}{2} * \sqrt{\frac{365}{\pi * \alpha}}\right)\right],$$

gdje je:

T	temperatura tla;
T <sub>sr</sub>	srednja površinska temperatura;
T <sub>amp</sub>	temperaturna amplituda (odstupanje od srednje površinske temperature);
Z	dubina;
α	toplinska difuzivnost;
t <sub>god</sub>	dan u godini (za koji računamo);
t <sub>min</sub>	dan u godini sa zabilježenim temperaturnim minimumom;



Slika 9. Tokovi energije kroz tlo

S druge strane, mjerenje toplinskog odaziva tla može se analizirati i različitim metodama i matematičkim modelima. Jedan od primjera je LSM (Line Source Method) koju je predstavio Ingersoll 1948. To je jednostavan i robusan model koji se najčešće koristi za analizu TRT-a. Također je dao i matematički model za ovu metodu koji glasi:

$$T_f - T_{stijene} = \frac{q}{L} * \left( R_b + \frac{1}{2\pi\lambda_{stijene}} * \int_{\frac{r_{bh}}{2\sqrt{at}}}^{\infty} \frac{e^{-\beta^2}}{\beta} d\beta \right)$$

gdje je:

$T_f$  srednja temperatura fluida u BIT;

$T_{stijene}$  temperatura stijene;

$q$  distribuirana toplina u tlo;

$L$  duljina;

$R_b$  toplinski otpor stijene;

---

$\lambda_{\text{stijene}}$	koeficijent toplinske provodnost stijene;
$r_{\text{bh}}$	radijus BIT-a;
$\alpha$	toplinska difuzivnosti;
$\beta$	integracijska varijabla;
$t$	vrijeme;

Ovi modeli izvedeni su kako bi se čim lakše mogli analizirati podaci dobiveni ispitivanjem toplinskog odaziva tla te kako bi se predvidjelo toplinsko ponašanje tla. Postoje brojne pretpostavke i ograničenja LSM-a kao što su: izotropno tlo, isključivo radijalno provođenje, zanemaruje se geometrija unutar bušotine, vrijedi nakon određenog vremena kada se bušotina progrije, nije pogodan za modeliranje sustav, itd. No za ovaj projekt najbolji matematički model za rješavanje problema je upravo onaj koji koristi TRNSYS. Daljnje analize tla radit će se na TRNSYS-ovom modelu o kojem će se detaljnije govoriti u 3. točki.

## 2.2. Učinkovitost sustava

Kako bi dodatno efikasnost porasla, koriste se sustavi za pohranu odbačene toplinske energije zemlje. Kod takvih sustava faktor grijanja/hlađenja ( $\epsilon$ ) mnogo je veći kod takve izvedbe nego kada nema sustava za pohranu odbačene energije što uvelike smanjuje pogonske troškove. Prilikom eksploatacije topline iz spremnika, promjena temperature istog je neizbježna te je poželjno da toplinski kapacitet spremnika bude čim veći, a temperatura konstantna. Temperatura spremnika utječe na faktor grijanja/hlađenja jer svojim zasićenjem otežava izmjenu toplinu između medija u cijevima i tla.

Jednadžba za faktor hlađenja glasi

$$\epsilon_{\text{hl}} = \frac{\Phi_0}{P_{\text{kompresor}}};$$

dok jednadžba za faktor grijanja glasi

$$\varepsilon_{gr} = \frac{\Phi_{kond}}{P_{pump}} = \frac{\Phi_0 + P_{kompresor}}{P_{kompresor}},$$

gdje je:

$\varepsilon_{hl}$ ( $\varepsilon_{gr}$ )	faktor hlađenja (grijanja),
$\Phi_0$	toplinski tok na isparivaču [kW],
$\Phi_{kond}$	toplinski tok na kondenzatoru [kW] ,
$P_{kompresor}$	snaga kompresora [kW].

U tehnici hlađenja, toplinski tok predan ponoru (toplina kondenzacije) , tj. tlu je onaj koji je preuzet od strane izvora (toplinski tok isparivača) uvećan za energiju kompresije.

Stoga, satna potreba za grijanjem/hlađenjem predstavlja bitnu veličinu pri dimenzioniranju sustava dizalica toplina te proračuni počinju upravo od tih parametara. Oni također jednoznačno određuju dimenzije i cijenu sustava.

### 2.3. Komponente sustava, regulacija i hidraulika

Komponente sustava se moraju optimizirati te time osigurati i njihova što veća učinkovitost. Svaka komponenta sustava ima svoje gubitke koji su neizbježni te ih je nužno minimizirati pravilnim i pažljivim dimenzioniranjem. Također, bitno je odabrati pravilnu regulaciju koja će upravljati sustavom kako ne bi radio više nego je to potrebno te tako stvarao nepotrebne pogonske troškove. Sustavi BIT-a zahtijevaju automatsku regulaciju koja može postići sinergiju pumpe s ostalim komponentama. Također sustavi BIT-a se ne mogu puniti bilo kojom radnim medijem. Radni medij svojim strujanjem ne smije biti uzrok velikom padu tlaka u sustavu jer se time povećavaju troškovi električne energije za pogon pumpe. Najčešća radna tvar kojom se pune zatvoreni sustavi dizalica topline je R407C.

### 3. TRNSYS

U ovoj točki bit će razrađen princip i matematički model na kojem se temelji komponenta 557 koja predstavlja BIT.

#### 3.1. Toplinski procesi

Toplinski procesi u području toplinskog spremnika (tla) su zahtjevni. Uglavnom se oni sastoje od konduktivnog i konvektivnog prijenosa topline. Radi se na principu globalnih toplinskih procesa koji se sastoje od više lokalnih. Lokalni procesi se promatraju kao jednaki u cijelom toplinskom spremniku, tj. ne razlikuju se bitno. Bitno je razlikovati primarne od sekundarnih toplinskih procesa.

##### 3.1.1. Primarni toplinski procesi

Struktura tla se mijenja s dubinom što bitno utječe na karakteristiku tla, a time i na izmjenu topline između BIT-a i toplinskog spremnika. Tu su i mogući brojni toplinski gubici koji smanjuju efikasnost izmjene topline te se iz tog razloga često instaliraju toplinski izolatori na površinu iznad spremnika, no glavni problem je osmisliti interakciju između velikog broja toplinskih tokova, toplinskog kapaciteta samog spremnika te svojstva prijenosa topline u svakom od toplinskih tokova. Stoga, veoma je bitno detaljno proučiti te opisati lokalne toplinske procese za svaki toplinski tok kako bi se mogli čim bolje opisati i aproksimirati ukupni (globalni) toplinski tokovi na cijelo BIT-u.

##### 3.1.2. Sekundarni toplinski procesi

Procesi koji imaju manji utjecaj ili gotovo nikakav na ponašanje toplinskog spremnika (tla) spadaju u grupu sekundarnih toplinskih procesa. U tu grupu procesa spada izmjena topline sa tokovima podzemnih voda. Podzemne vode mogu uzrokovati toplinske gubitke, no mogu i pogodovati toplinskoj regeneraciji tla. Numerički model van Meursa pokazuje da bi bilo poželjno instalirati zaštitni hidraulički zastor ukoliko podzemni tok vode premašuje 50 mm/dan. Protok vode ovisi o broju pukotina, širini i duljini pukotina te lokalnim hidrauličkim



gradijentima. No, veoma je teško procijeniti utjecaj podzemnih voda na toplinske procese.

Kod većih toplinskih spremnika podzemne vode imaju veoma malen utjecaj na toplinske gubitke, no kod manjih toplinskih spremnika može imati značajan utjecaj te ih je nužno detaljno proučiti i uzeti u obzir. Utjecaj na toplinski spremnik ima i okoliš, tj. promjena stanja okoliša kao što je promjena temperatura zraka s promjenom godišnjih doba ili utjecaj padalina. Kod dubokih toplinskih spremnika, taj utjecaj se može zanemariti no kod plićih toplinskih spremnika ove promjene mogu uzrokovati poremećaje u ponašanju istih i tako uzrokovati neželjene poremećaje u radu BIT-a. Kako bi minimizirali utjecaj okolišnjeg zraka kod proračuna je bitno uzimati srednje godišnje površinske temperature tla i toplinska svojstva određena TRT-om, tzv. efektivna svojstva tla kako bismo se udaljili od idealnih slučajeva i uzeli to kao svojevrsni faktor sigurnosti.

### ***3.1.3. Lokalni toplinski procesi***

Pravilan opis lokalnih procesa je krucijalan kako bi se što preciznije izrazili toplinski tokovi. Toplinski tokovi kroz cijev jednoznačno su definirani temperaturom i brzinom strujanja fluida u cijevi, toplinskim svojstvima tla oko cijevi (i kvalitetom bentonita kojim se zalijevaju bušotine kako se ne bi urušile te poboljšava izmjenu topline), temperaturom tla koje okružuje cijev te. Kako i temperature tako i toplinski tokovi variraju s aksijalnom koordinatom cijevi. Tako preuzeta ili predana toplina upravlja globalnim toplinskim procesom.

Raspored cijevi može biti pravokutni ili šahovski. Ovisno o rasporedu cijevi može se izračunati površina područja toplinskog spremnika.

Za pravokutni raspored koristi se izraz:

$$A_p = B * B_1;$$

dok za šahovski izraz glasi:

$$A_p = \frac{\sqrt{3}}{2} * B^2;$$

$A_p$  površina područja toplinskog spremnika [ $m^2$ ],

$B, B_1$  razmak između cijevi [m].

## 3.2. Numerički postupci

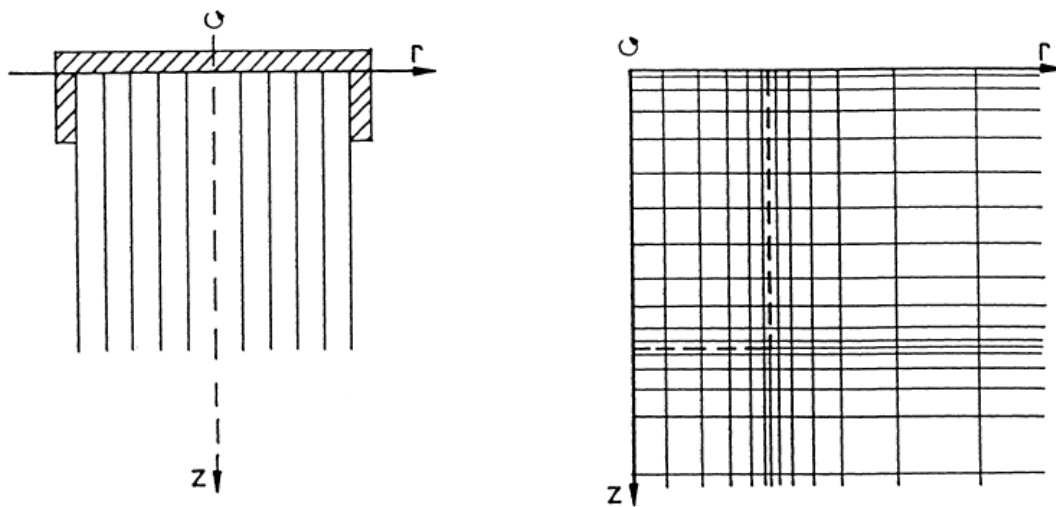
Toplinski proces je modeliran kao superpozicija koja se sastoji od tri djela: globalni problem, lokalni problem te problem konstantnog toka. Svaki od problema bit će pojašnjen u pojedinoj točki. Toplinska bilanca za radni medija daje nam varijaciju temperature tijekom njegovog protjecanja kroz cijev. Ta varijacija temperature veoma je bitna u slučaju sporog strujanja fluida kroz cijev.

### 3.2.1. Globalni problem

Globalni toplinski procesi uključuju toplinske procese velikih razmjera kao što su izmjena topline između toplinskog spremnika i okolnog tla, izmjena topline između pojedinih dijelova samog toplinskog spremnika i izmjena topline konvekcijom između tla i okolišnjeg zraka, itd.

Promatrani volumen sastoji se od volumena toplinskog spremnika i djela tla koje okružuje isti. Volumen spremnika, toplinska svojstva, raspored cijevi i temperaturni profil pretpostavljeni su sa cilindričnom simetričnošću oko osi koja prolazi kroz sredinu toplinskog spremnika. Toplinska svojstva tla definirana su toplinskom provodnosti i volumetričkim toplinskim kapacitetom. Model koji se koristi danas koristi pretpostavku da su toplinska svojstva tla homogena na području volumena spremnika. Izolacija se može postaviti ili na površinu toplinskog spremnika ili na granicu toplinskog spremnika i okolišnjeg tla.

Numerički model koristi metodu konačnih razlika. Volumen toplinskog spremnika je pretvoren u dvodimenzionalnu mrežu koristeći cilindričnu koordinatu  $r$  i vertikalnu koordinatu  $z$ .



**Slika 10. Primjeri dvodimenzionalnih mreža**

Toplinski tok se procjenjuje na temelju jednostavne diferencijalne jednadžbe. Radijalne i vertikalne osi  $r$  i  $z$  preimenuju se u  $i$  i  $j$ . Dakle, toplinski toku radijalnom smjeru između ćelija  $(i-1, j)$  i  $(i, j)$  može se izraziti pomoću sljedećeg izraza:

$$F_r(i, j) = K_r(i, j) * [T(i - 1, j) - T(i, j)];$$

gdje  $K_r$  predstavlja toplinsku provodnost između ćelija  $(i-1, j)$  i  $(i, j)$ . Toplinski tok u vertikalnom smjeru između ćelija  $(i, j-1)$  i  $(i, j)$  može se izraziti pomoću sljedećeg izraza:

$$F_z(i, j) = K_z(i, j) * [T(i, j - 1) - T(i, j)];$$

Za ćelije smještene u volumenu toplinskog spremnika postoje dva toplinska izvora, jedan koji prenosi toplinu iz lokalnog problema i jedan koji redistribuira toplinu po volumenu toplinskog spremnika uslijed cirkulacije radnog medija. U mreži, oni se zapisuju kao  $Q_l(i, j)$  i

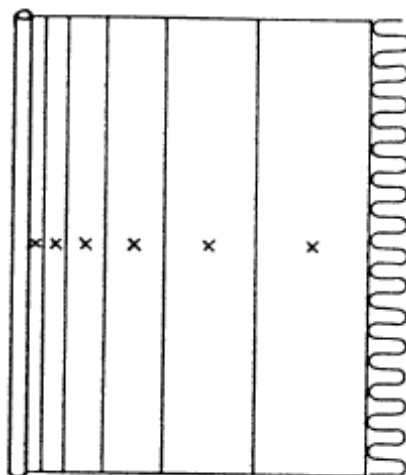
$Q_{sf}(i, j)$ . Kada su poznati iznosi toplinskih izvora, temperature u čvorovima mreže i temperature površine tla u danom vremenskom trenutku može se izračunati novo temperaturno polje u novom vremenskom trenutku.

$$T(i, j)_{t+\Delta t} = T(i, j)_t + [F_r(i, j) - F_r(i + 1, j) + F_z(i, j) - F_z(i, j + 1) + Q_l(i, j) + Q_{sf}(i, j)] * \frac{\Delta t}{C(i, j)};$$

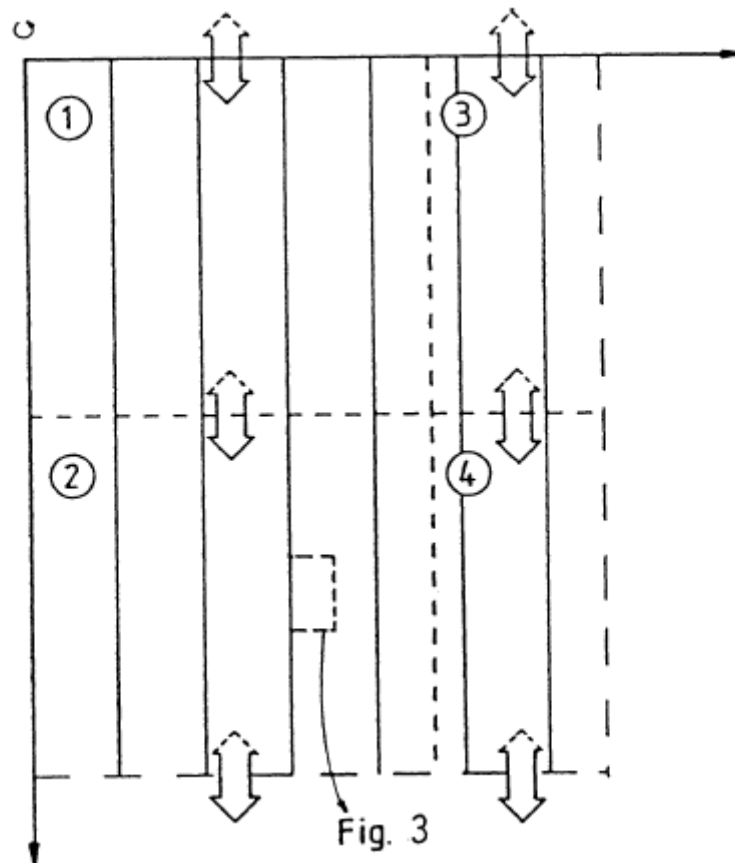
$\Delta t$  predstavlja vremenski korak, a  $C(i, j)$  je toplinski kapacitet ćelije.

### 3.2.2. Lokalni problem

Toplinski procesi vezani uz pojedinu cijev su modulirani pomoću jednodimenzionalne radijalne mreže. Na taj se način toplinski spremnik podjeli u N subregija. Za lokalne probleme se pretpostavlja da su jednaki oko svake cijevi u pojedinoj subregiji te postoji samo jedan lokalni problem u subregiji.



Slika 11. Primjer jednodimenzionalne mreže za rješavanje lokalnog problema



Slika 12. Podjela u subregije

Lokalni problem se može riješiti pomoću jednadžbe za izmjenu topline konvekcijom u radijalnim koordinatama koja glasi:

$$C \frac{\partial T_l}{\partial t} = \lambda \left( \frac{\partial^2 T_l}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_l}{\partial r} \right) - q_l;$$

gdje je:

$T_l$  lokalna temperatura;

$\lambda$  toplinska vodljivost tla;

$C$  volumetrički toplinski kapacitet;

$q_l$  uvjet toplinskog izvora koji služi za prebacivanje toplinskog toka iz lokalnog u globalni problem;

Vanjska granica je u potpunosti izolirana tako da nema izmjene topline s okruženje van iste.

Subregije služe kako bi se opisao put toplinskog toka kroz toplinski spremnik. Broj potrebnih subregija kako bi se očuvala preciznost proračuna ovisi o veličini temperaturne varijacije duž toka radnog medija kroz toplinski spremnik. No, ponekad je potrebno podijeliti spremnik u mnogo subregija ako je tok radnog medija kompliciran ili je njegov tok malen.

Prijenos topline iz lokalnog na globalni problem vrši se preko uvjeta toplinskog izvora  $q_l$ . Izraz za uvjet za subregiju k glasi:

$$q_l = \frac{E_k}{t_g * V_k};$$

gdje je:

$E_k$  količina pristigle topline u subregiju k;

$t_g$  globalni vremenski korak;

$V_k$  volumen subregije k;

Možemo izraziti porast temperature  $\Delta T_g$  uslijed pristigle količine topline  $E_k$ , gdje je C volumetrički toplinski kapacitet.

$$\Delta T_g = \frac{q_l * t_g}{C} = \frac{E_k}{C * V_k};$$

Toplinska bilanca radnog medija je veoma bitna. Izmjena topline je prisutna ukoliko postoji razlika temperatura između radnog fluida i tla. Fluid preuzima ili predaje toplinu ovisno o sezoni. Također su mogući slučajevi gdje u jednom djelu svojeg toka kroz cijev preuzima, a u drugom dijelu predaje toplinu ukoliko postoje velike varijacije temperature tla s dubinom. Ukoliko se zanemare te tranzijentne pojave, toplinska bilanca radnog medija može se izraziti ovako:

$$C_f q_{fp} \frac{\partial T}{\partial s} + \alpha_p (T_f - T_a) = 0;$$

$$C_f q_{fv} \frac{\partial T}{\partial s} + \alpha_v (T_f - T_a) = 0.$$

U gornjoj jednadžbi sve je svedeno na jedinicu duljine cijevi (indeks p), a u donjoj na jedinicu volumena toplinskog spremnika (indeks v). Član s u jednadžbi predstavlja duljinu puta koji prođe fluid svojim tokom kroz toplinski spremnik.  $q_{fv}$  predstavlja protok radnog medija,  $T_f$  temperatura fluida, a  $T_a$  temperatura okolnog tla, a  $\alpha$  je koeficijent prijelaza topline između radnog medija i tla. Kako bi se izračunala potrebna ulazna temperatura fluida koristi se izraz:

$$T_{fin} = \frac{Q - Q^0}{C_f Q_f (1 - B)};$$

### 3.2.3. Problem konstantnog toka

Rješenje konstantnog toka daje temperaturno polje oko cijevi za konstantni preuzeti ili predani toplinski tok. To rješenje se koristi kod pulsiranja koja variraju u dugim i sporim vremenskim intervalima. Izraz za temperaturno polje glasi:

$$T_{sf}^k = \sum_j \frac{V_{k,j}}{V_k} [\beta_{sf}^k T_{sf,fin}^k + (1 + \beta_{sf}^k)(T_{g,j}^k - T_g^k)] = \beta_{sf}^k T_{sf,fin}^k;$$

gdje je:

$$\beta_{sf}^k = e^{-\frac{\alpha_v V_k}{C_f Q_f}};$$

$V_{k,j}$  volumen ćelije j u subregiji k;

$T_{g,j}^k$  temperatura ćelije j u subregiji k;

$T_g^k$  srednja temperatura;

$T_{sf}^k$  temperatura koja se koristi u problemu konstantnog toka;

U početku se postavi uvjet da je  $T_{sf,fin}^k = \mathbf{0}$ . Iz toga slijedi da su sve ulazne i izlazne temperature prema i od svake subregije jednake nuli. Uvjet kojim se predodredila temperatura ćelija rješava se u lokalnim problemima.

### 3.3 Superpozicija temperatura

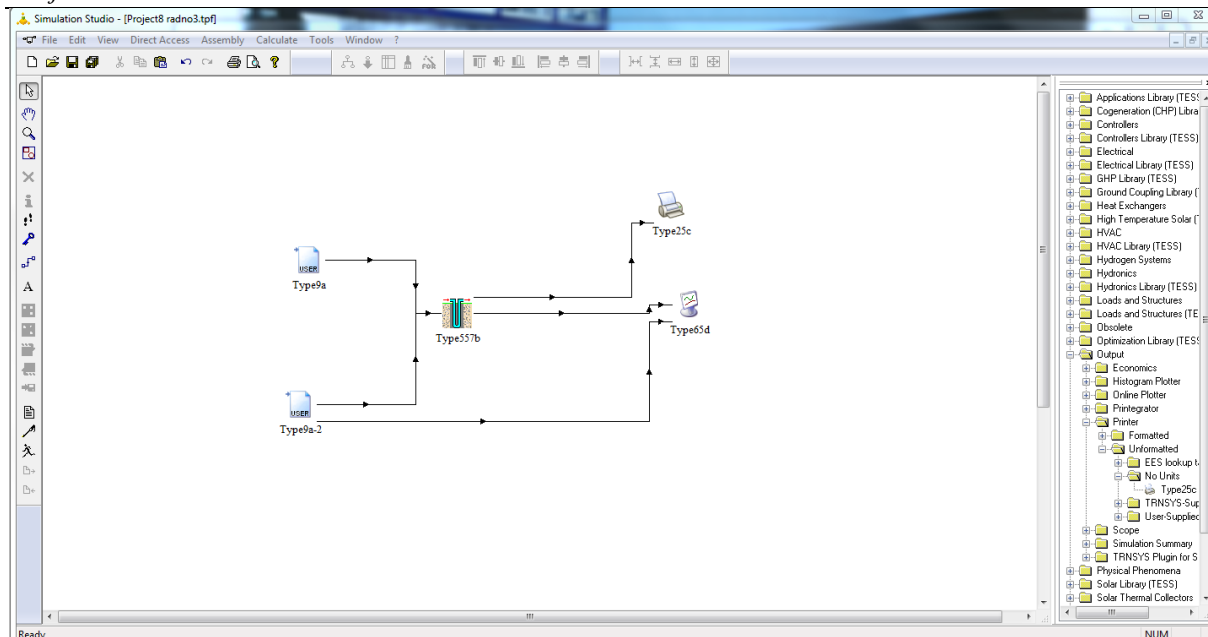
Temperatura tla definirana je kao superpozicija triju temperatura: globalne, lokalne i temperature konstantnog toka. Kako bi se zadržala postavljena temperatura jedna mora definirati radijalnu udaljenost do prve najbliže cijevi. Radijalna udaljenost od cijevi održava se tako da se odredi koordinata  $j'$  za odgovarajući čvor u lokalnoj mreži. Tada se postavljena temperatura može izračunati iz sljedećeg izraza:

$$T = T_{g,i,j}^k + T_{l,j'}^k + T_{sf,j'}^k.$$

### 3.4. Simulacija

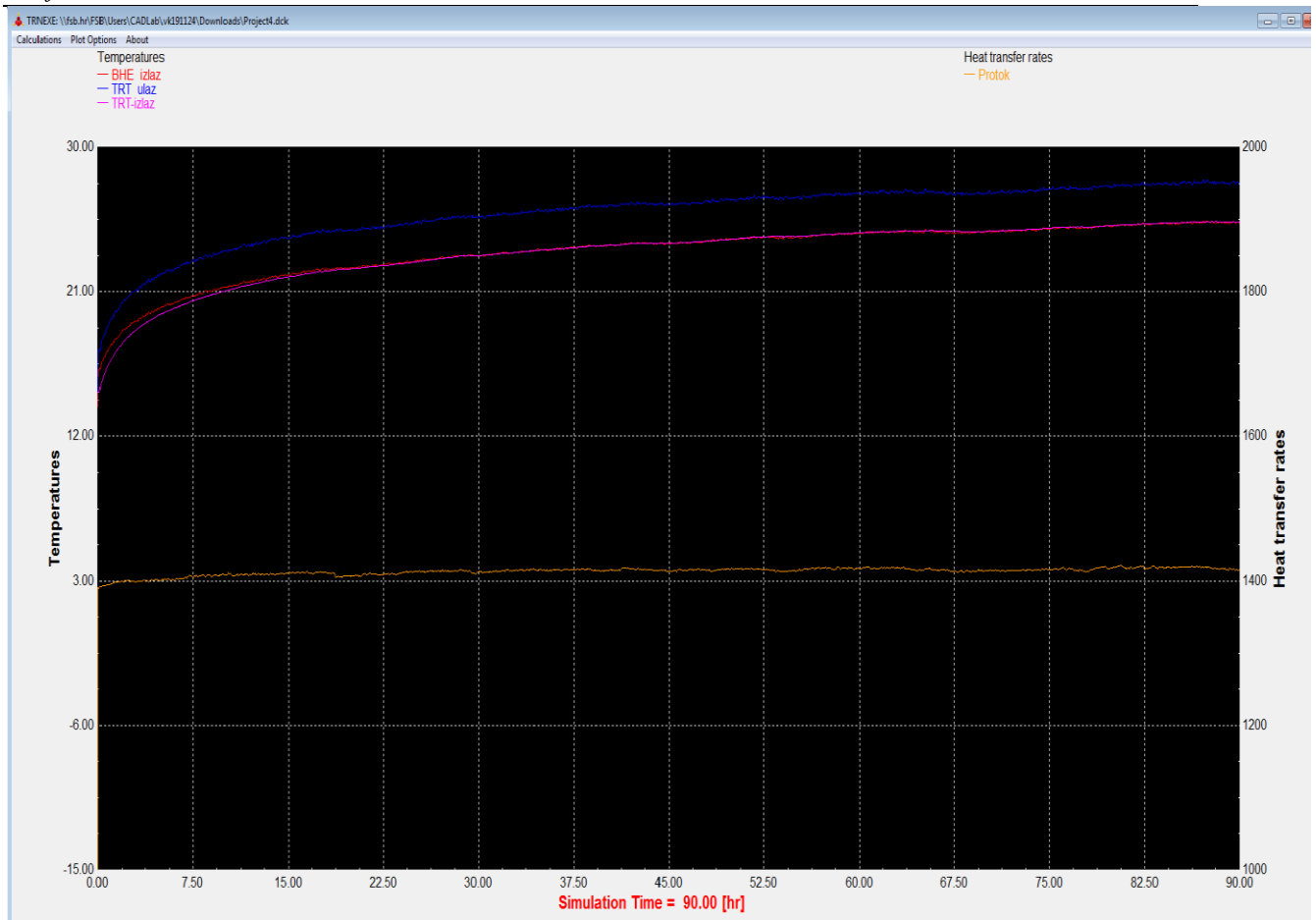
Simuliranje u TRNSYS-u omogućuje analizu radnih uvjeta dizalice topline. Cilj je pratiti temperaturu toplinskog spremnika te ocijeniti kako on utječe na rad sustava. Kao jedna od varijabli, temperatura tla ima značajan utjecaj na potencijal izmjene topline. U sezoni hlađenja kod sustava voda-glikol smjesa, preko BIT-a se odbacuje toplina kondenzacije dizalice topline u zemlju. Kako se tlo zagrijava, smanjuje se razlika između ulazne temperature, tj. izlazne temperature iz BIT-a i temperature tla te pri konstantnom protoku više nije moguće predati potreban toplinski tok zemlji, što dovodi do povišenja temperature kondenzacije, a time i nepovoljnijeg i neučinkovitijeg rada cijelog sustava. Također unutar TRNSYS-a moguće je razmotriti opcije koje poboljšavaju učinkovitost rada BIT-a i sustava dizalice topline.





Slika 13. Simuliranje u TRNSYS-u

TRNSYS kao programski paket ima određene pretpostavke te u nekim slučajevima te pretpostavke mogu stvoriti određene pogreške kod simuliranja. Validacija modela razvijenog u TRNSYS-u vršila se koristeći rezultate TRT-a izvedenog na bušotini u sklopu Fakulteta strojarstva i brodogradnje te je provedena u trajanju od 90 sati s vremenskim korakom ulaznih podataka od 3 minute kako bi se moglo što bolje opisati ponašanje sustava BIT-a. Kod simuliranja tog sustava u TRNSYS-u pojavila su se određena nepodudaranja temperatura na izlazu iz BIT-a između simulacije i TRT-a. Ulazne temperature mjerene TRT-om korištene su kao ulazni podaci za simulaciju zajedno s protokom. Također su unešena i fizikalna svojstva dobivena mjerenjima za tlo u Zagrebu. Rezultati simulacije su pokazali nepodudaranje između izlaznih temperatura iz BIT-a mjerenim TRT-om i dobivenih simulacijom te kako bi se te temperature uskladile bilo je potrebno varirati određene parametre. Prva pretpostavka bila je da treba promijeniti koeficijent toplinske vodljivosti tla koji iznosi  $\lambda = 1,7 \frac{W}{m^2}$ . No rezultati se nisu bitno promijenili pa je druga pretpostavka bila da se promjeni temperaturni gradijent u tlu, no ni taj parametar nije dao željene rezultate. Treća pretpostavka bila je točna a radilo se o promjeni otpora između fluida i tla. Promjenom tog parametra približno smo izjednačili temperature te se izlazna temperatura medija iz BIT-a dobivena simulacijom i TRT-om poklapaju.



Slika 14. Usklađivanje eksperimentalnih podataka i simulacije BIT-a

Time je potvrđen model opisan u sklopu TRNSYS-a te su usklađena fizikalna svojstva tla i radni parametri BIT-a za daljnja testiranja i simulacije.

## 4. Korištenje tla kao kratkotrajnog spremnika topline

U ovom poglavlju razmotrit će se opcija korištenja tla za kratkotrajnu pohranu toplinske energije. U ovom slučaju, pozornost je posvećena pohrani rashladnog učina u periodu kada ne postoje potrebe za hlađenjem kondicioniranog prostora.

Poželjno je pohraniti rashladni učin kako bi se mogla pokriti vršna opterećenja i time rasteretiti sustav te ostvariti moguće uštede kod investicije zbog manjih dimenzija sustava ili omogućiti veći potencijal za izmjenu topline između radnog medija i toplinskog spremnika tako da se poveća srednja logaritamska razlika temperatura. U tu su svrhu provedeni testovi kako bi se definirala dinamika tla te mogućnost pohrane rashladnog učina.

Testovi su provedeni tako da se mijenjaju ulazni parametri kao što su protok i ulazna temperatura fluida u BIT. Simulirani sustav hladi 12 sati zgradu, a preostalih 12 sati kada nema potrebe za hlađenjem, hladi tlo. Također su simulirani sustavi s vremenskim koracima hlađenja tla od 24 i 48 sati. Sustav koristi temperaturni režim 6/12 °C.

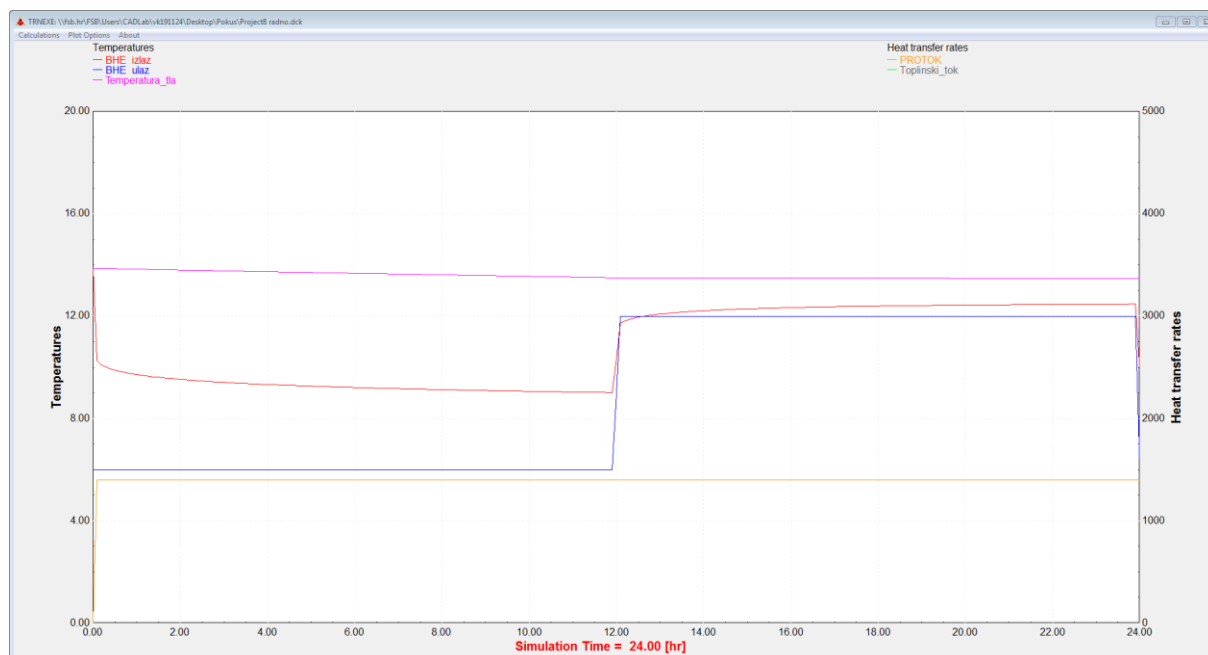
Žuta linija predstavlja konstantni protok, plava linija predstavlja ulaznu temperaturu fluida na ulazu u BIT, crvena predstavlja izlaznu temperaturu fluida iz BIT-a, a ljubičasta linija predstavlja temperaturu tla. Boje linija ostaju jednake za sve testove.

### 4.1. Hlađenje tla kroz period od 12 sati

Rezultat ovog testa pokazao bi mogućnost skladištenja rashladnog učina u vremenskom periodu od 12 sati s vremenskim korakom ulaznih podataka od 6 minuta. Simulacijom bi se vidjelo je li moguće skladištiti rashladni učin kada on nije potreban za hlađenje zgrade. Dakle, pretpostavka je da se rashladni učin koristi 12 sati za potrebe hlađenja zgrade, a 12 sati njime hladimo tlo. Ovime bi se pokazala moguća primjena ovakvo režima rada u praksi.

Simulacija je provedena za 24 sata. Prvih 12 sati hladimo tlo s vodom 6 °C, a zatim okrećemo proces i u BIT puštamo jednak protok vode temperature 12 °C. Ako se temperatura

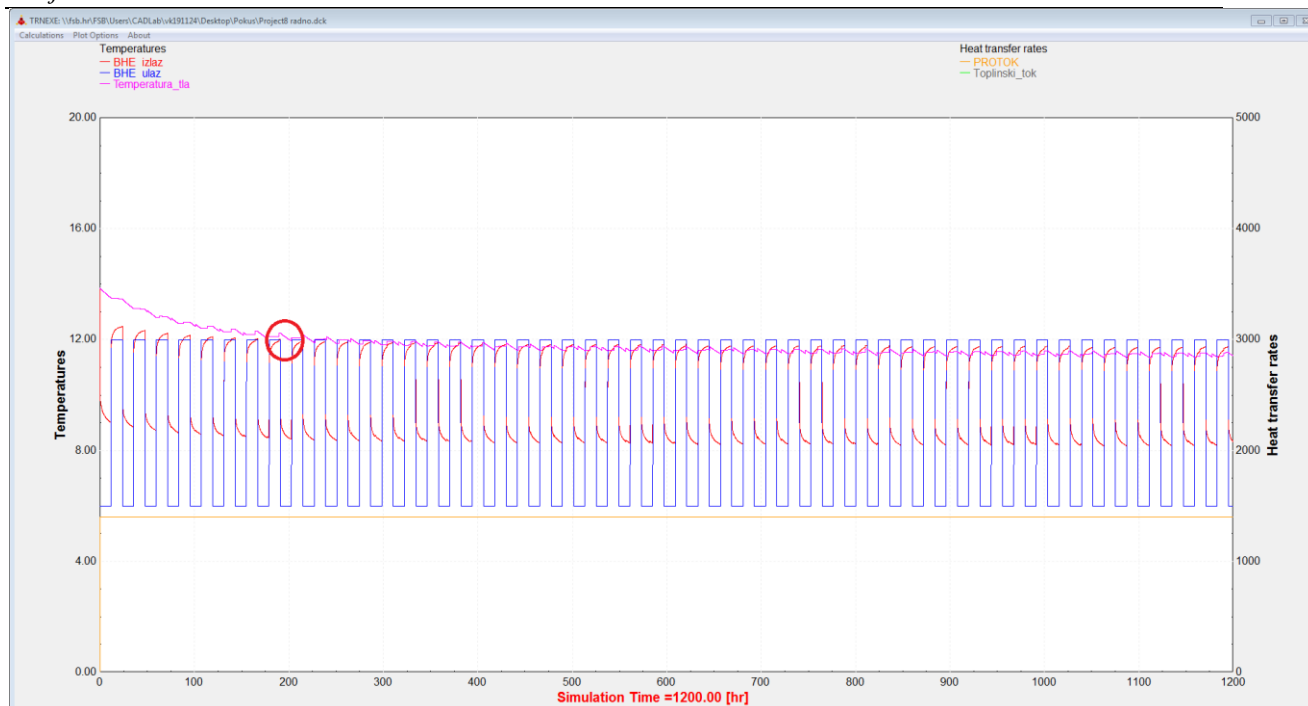
tla spusti ispod  $12\text{ }^{\circ}\text{C}$  teoretski se može reći da je rashladni učin pohranjen i da se može iskoristiti. Bitno je pratiti i temperaturu tla ovog procesa jer ako temperatura tla ne padne ispod  $12\text{ }^{\circ}\text{C}$ , ne možemo iskoristiti rashladni učin.



**Slika 15. Test hlađenja tla 12 sati**

U dvanaestom satu se temperatura na ulazu u BIT diže na  $12\text{ }^{\circ}\text{C}$ , a na izlazu iz BIT-a jest niža nego na ulazu i iznosi  $10,14\text{ }^{\circ}\text{C}$ , no temperaturna razlika i vremenski interval su premali za iskorištavanje rashladnog učina te temperatura na izlazu iz BIT-a konstantno raste prema temperaturi tla. Razlika temperatura nije uzrokovana zbog temperature tla već zbog geometrije i tromosti U-cijevi izmjenjivača što ukazuje da takav režim hlađenja tla nije dovoljan za iskorištavanje tla kao kratkotrajnog spremnika topline. Usporedimo li toplinu preuzetu iz tla kroz 12 sati koja iznosi  $250064,4\text{ kJ}$  i preuzeti rashladni učin kada je izlazna temperatura fluida iz BIT-a niža od ulazne kroz period od 40 minuta koji iznosi  $3907,9\text{ kJ}$ , jasno je vidljivo da hlađenje tla u ovom režimu nije dovoljno te da je tlo kao spremnik pretromo. No, isto tako vidljivo je smanjenje temperature tla. U nultom trenutku ( $t=0\text{h}$ ) ona je iznosila  $13,88\text{ }^{\circ}\text{C}$ , u trenutku ( $t=12\text{h}$ ) ona iznosi  $13,34\text{ }^{\circ}\text{C}$ , dok u krajnjem trenutku ( $t=24\text{h}$ ) ona iznosi  $13,11$ . Jasno je vidljivo da ovim kratkoročnim hlađenjem tla nije moguće iskoristiti rashladni učin.

Kako bi se vidjelo daljnje ponašanje tla simulacija je produljena s 24 sata na 50 dana.

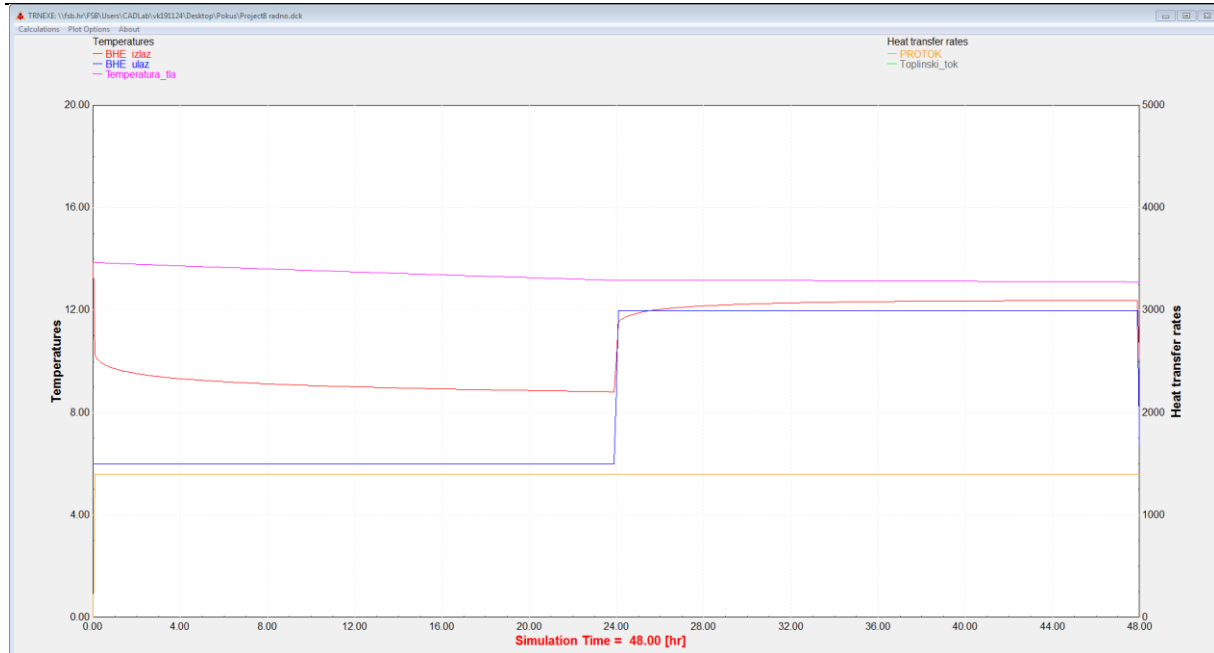


**Slika 16. Test hlađenja tla 12 sati (50 dana)**

Test je proveden tako da se prethodni profil ciklički ponavlja kroz 50 dana (1200h). Rezultati ovog testa pokazali su da je moguće snižavanje temperature ispod 12 °C te da je moguće iskorištavanje pohranjenog rashladnog učina. Nakon 198 sati i 30 minuta (zaokruženo na slici 16.) temperatura tla je dosegla temperaturu 11,99 °C te je zbog razlike temperatura između ulaza fluida u BIT i temperature tla omogućen prijelaz topline, a time i korištenje tla kao spremnika rashladnog učina. Nakon 50 dana temperatura tla pala je na 10,9°C.

#### 4.2. Hlađenje tla 24 sata

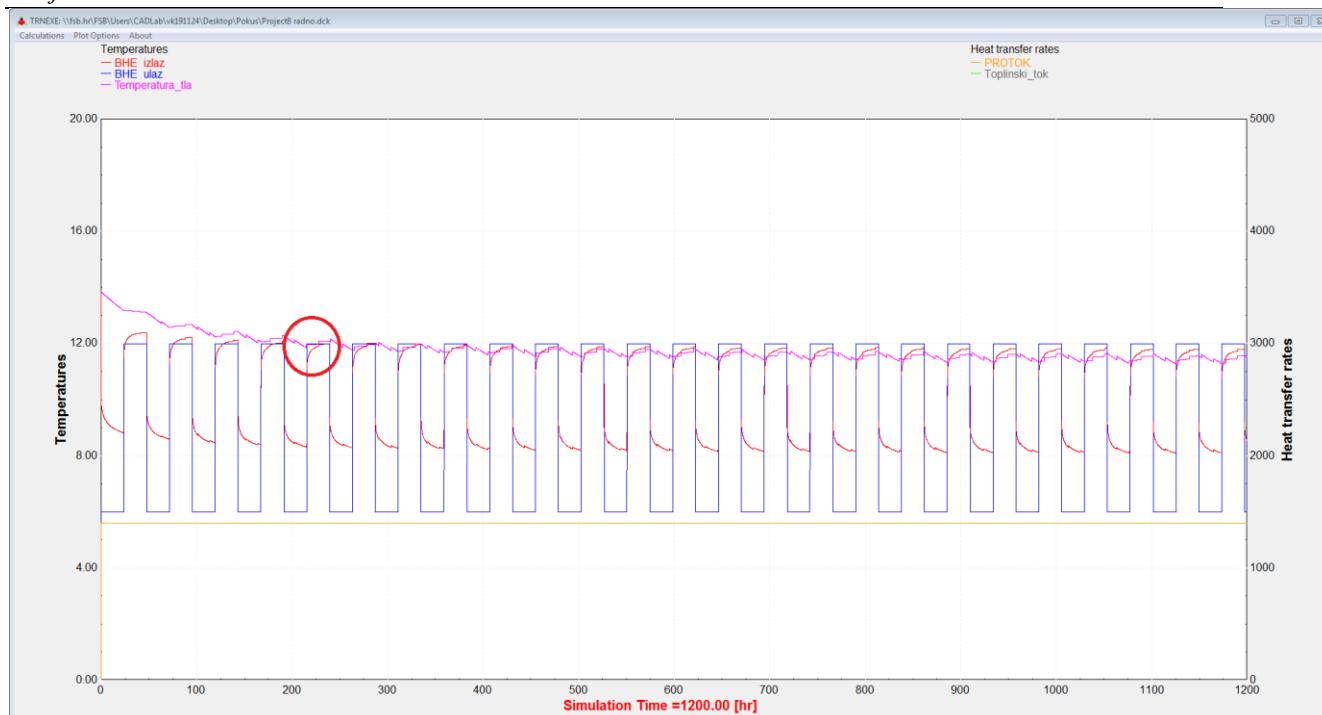
Ovim testom će se utvrditi je li duže hlađenje tla od 24 sata može dovoljno ohladiti tlo da bi se mogao iskoristiti akumulirani rashladni učin. Vremenski koraci ulaznih podataka iznose 6 minuta. Radi se o jednakom temperaturnom režimu i protoku kao i u prošlom testu.



**Slika 17. Test hlađenja tla 24 sata**

Simulacija je pokazala da ni hlađenje od 24 sata još uvijek nije dovoljno da temperatura tla padne ispod 12°C, ali kratki period nakon 24 sata pokazuje napredak u razlici temperatura između ulaza i izlaza fluida u BIT-u, a time i veći potencijal za preuzimanje rashladnog učina. Toplina preuzeta iz tla tijekom prvih 24 sata iznosi 482543,376 kJ dok preuzeta energija rashladnog učina kroz period od 288 minuta kada je prisutna negativna razlika između izlazne i ulazne temperature fluida u BIT-u 18267,71 kJ. Dakle preuzeti rashladni učin kod ovog testa je viši nego kod hlađenja tla 12 sati, no nije relevantan jer uzrok izmjene topline ne leži u interakciji s tlom nego u tromosti sustava prilikom promjene režima.

Radi istraživanja i ispitivanja dinamike tla teste se proširuje na 50 dana (1200 sati).

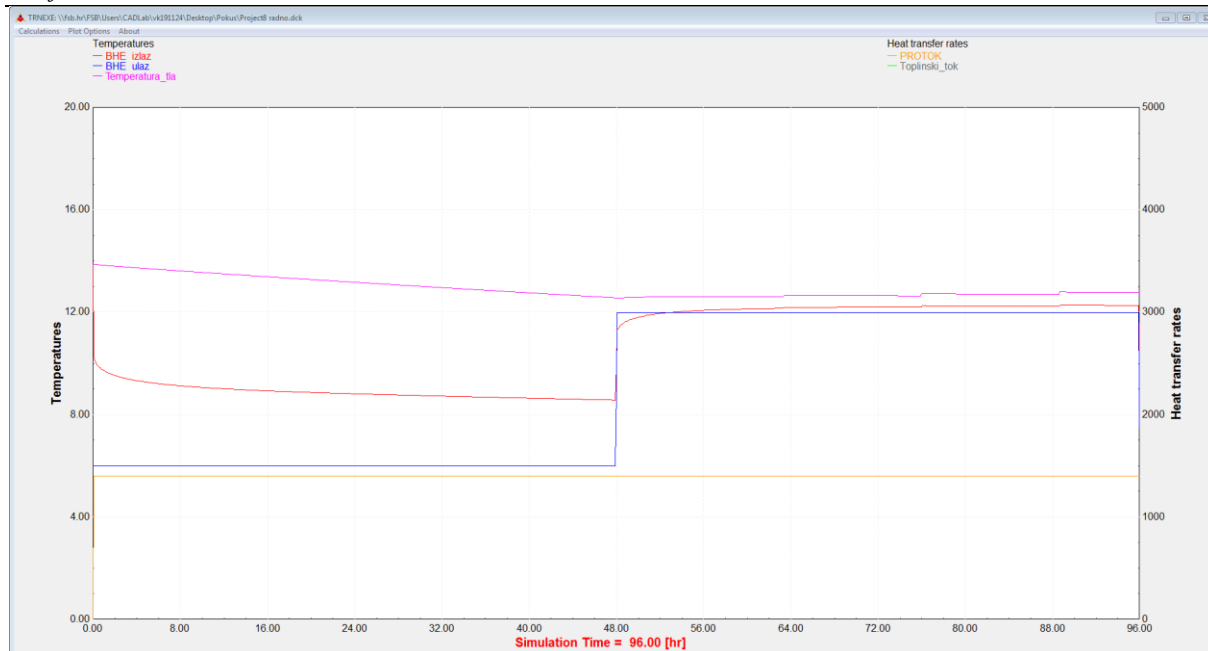


**Slika 18. Test hlađenja tla 24h (50 dana)**

Rezultati simulacije pokazali su da će se temperatura tla spustiti ispod  $12^{\circ}\text{C}$  nakon 135 sati i 30 minuta (označeno na slici 18.). Nakon 50 dana temperatura tla pala je na  $10,50^{\circ}\text{C}$  te varira oko te vrijednosti što znači da je ostvaren stacionarni režim izmjene topline s tlom i temperatura tla s prisutnim temperaturnim režimom i protokom ne može se dalje smanjivati. Dakle, ovaj režim je povoljniji što se tiče iskorištavanja rashladnog učina, no njega ne možemo primijeniti u praksi jer to bi značilo da 24 sata nije dostupno hlađenje zgrade jer se taj učin troši na hlađenje tla.

#### 4.3. Hlađenje tla 48 sati

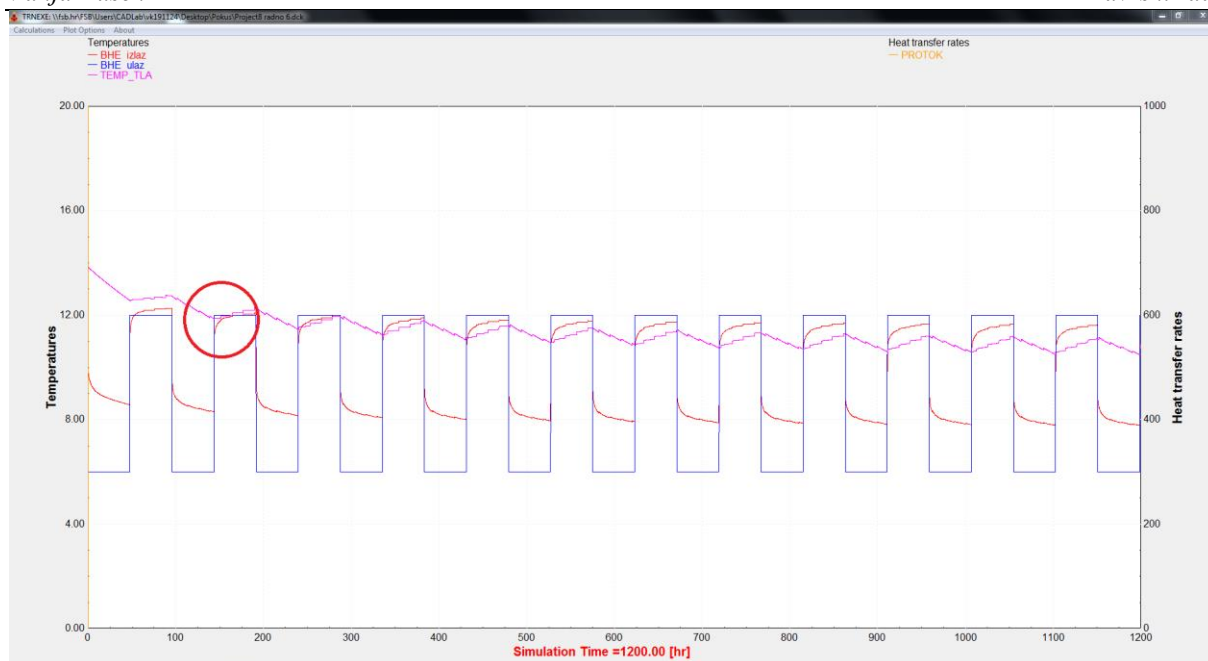
U prethodnom testu je razjašnjeno da ovakav način rada sustava nije moguć u praksi, ali ovo ispitivanje je napravljeno isključivo kako bi se proučila dinamika tla. Radi se s jednakim temperaturnim režimom, jednakim protokom i jednakim vremenskim korakom ulaznih podataka od 6 minuta.



Slika 19. Test hlađenja tla 48 sati

Rezultati kao i u prijašnjim testovima pokazuju da se tlo ne može u ovako kratkom vremenskom periodu koristiti kao kratkotrajni toplinski spremnik, no i dalje se vidi kako duži vremenski interval hlađenja tla pogoduje većem snižavanju temperature tla upravo zbog same tromosti tla. Toplina predana tlu ovim režimom iznosi 965086,8 kJ, dok preuzeti rashladni učin u periodu nešto manjem od 5 sati iznosi 30446,19 kJ.



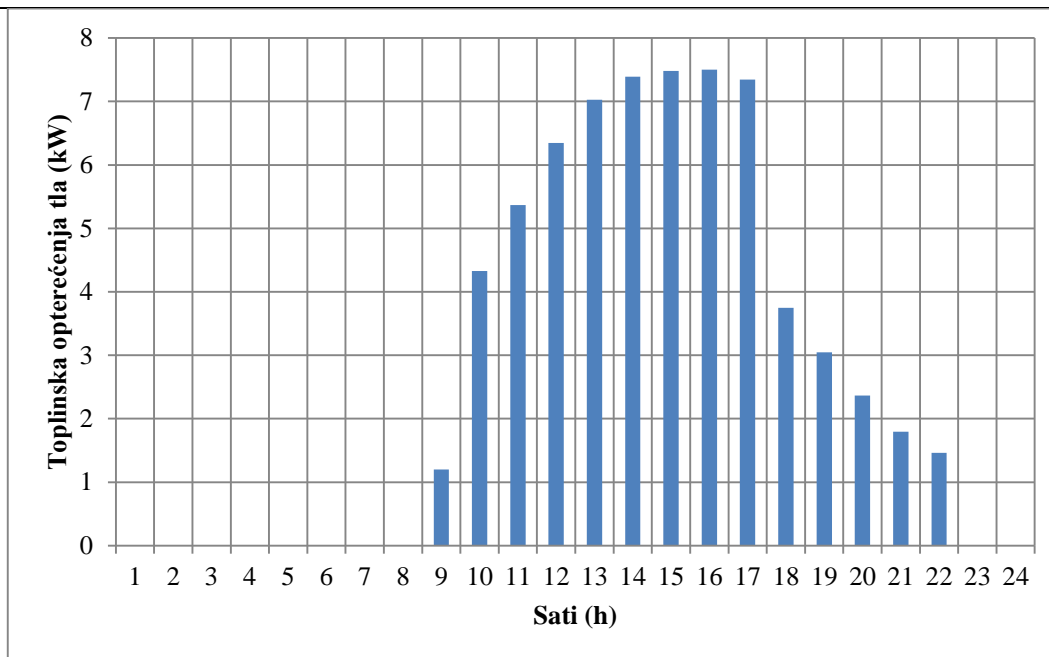


**Slika 20. Test hlađenja tla 48 sati (50 dana)**

Rezultati su pokazali da nakon 135 sati temperatura tla pada ispod  $12\text{ }^{\circ}\text{C}$  (označeno na slici 20.). Nakon 1200 sati, temperatura tla nije pala ispod  $10,50\text{ }^{\circ}\text{C}$  čime je potvrđeno toplinsko zasićenje tla i dokaz da se bolji rezultati ne mogu ostvariti ovim temperaturnim režimom i protokom. Rezultati ovog ispitivanja i ispitivanje s periodom od 24 sata pokazuju daju veoma sličan odziv tla.

#### 4.4. Ispitivanje prema satnom profilu opterećenja

Ispitivanja u prethodnim točkama pokazala su da se tlo ne može koristiti kao kratkotrajni toplinski spremnik. Ovim simulacijama bit će ispitana mogućnost povećanja učinkovitosti sustava dizalice topline, a pozornost se posvećuje dinamici tla. U prvom ispitivanju promatrano je prirodno regeneriranje tla u periodu kada nema potrebe za hlađenjem, u drugom će biti aktivno hlađenje tla preokretanjem procesa te odvođenje topline iz tla vodom temperature  $6\text{ }^{\circ}\text{C}$ , a u trećem pasivno hlađenje tla vodom iz povrata temperature  $12\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

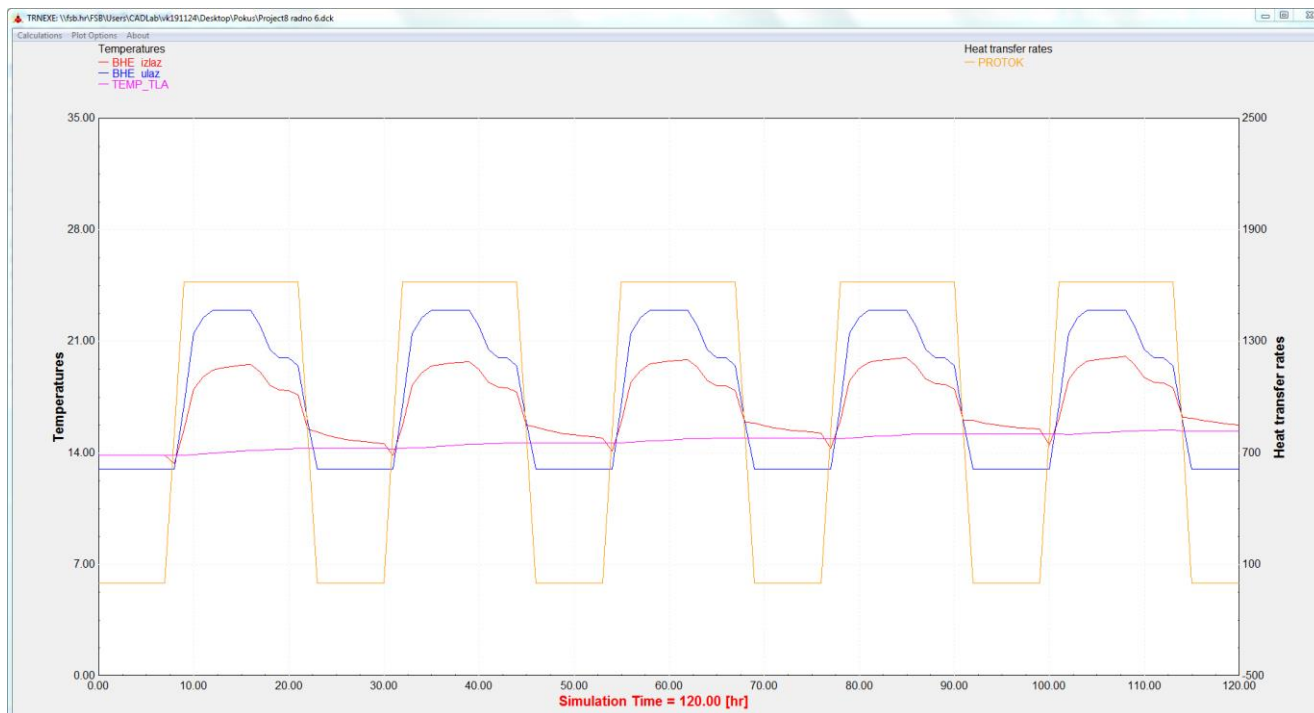


**Slika 21. Toplinska opterećenja za srpanj izražena u kW**

Na slici 21. predstavljena su simulirana toplinska opterećenja za srpanj. Sustav se sastoji od dizalice topline i bušotinskog izmjenjivača topline preko kojeg se odbacuje topline kondenzacije. Sustav je dimenzioniran tako da uz, konstantan protok (0,45 kg/s) i maksimalnu temperaturnu razliku na ulazu i izlazu iz BIT-a od 6°C prilikom maksimalnog opterećenja u 16 sati, odvede toplinu kondenzacije.

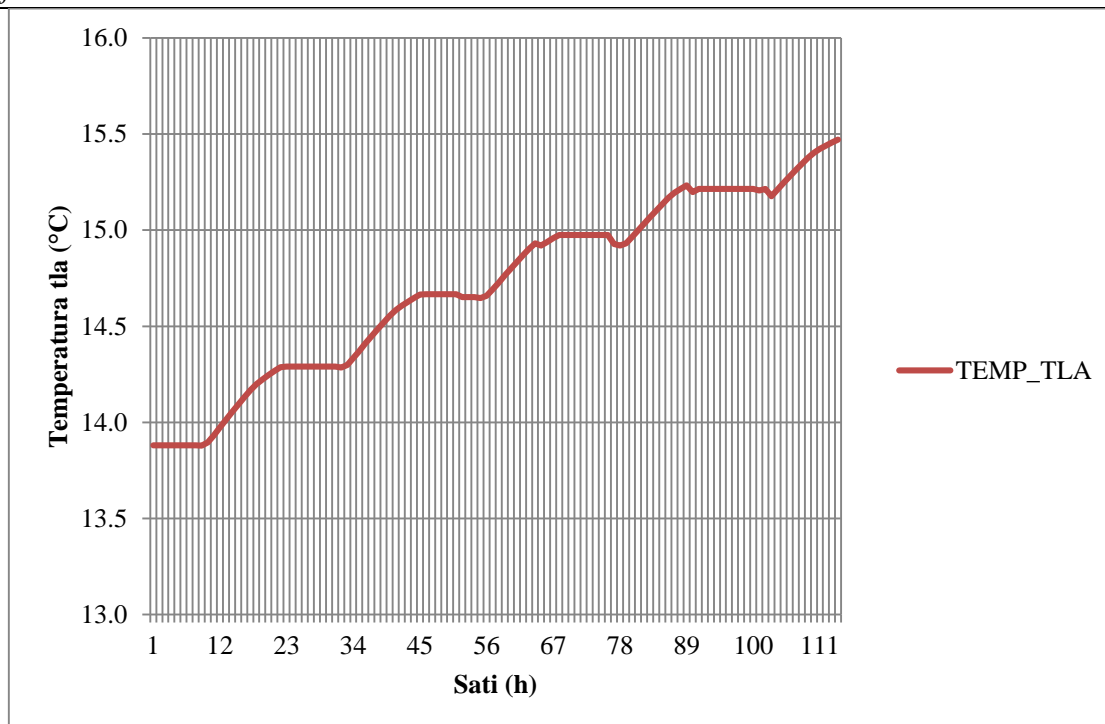
U ovom modelu zastupljene su dvije pretpostavke. Prva pretpostavka je konstantan protok u BIT-u, tj. toplinski učin BIT-a se regulira promjenom razlike temperatura fluida na ulazu i izlazu iz izmjenjivača, druga pretpostavka je jednakost temperatura na ulazu/izlazu BIT-a i temperature tla kada nema potrebe za hlađenjem (kada je toplinsko opterećenje jednako nuli). Druga pretpostavka se korigira s promjenom temperature tla.

### 4.4.1. Prirodna regeneracija tla



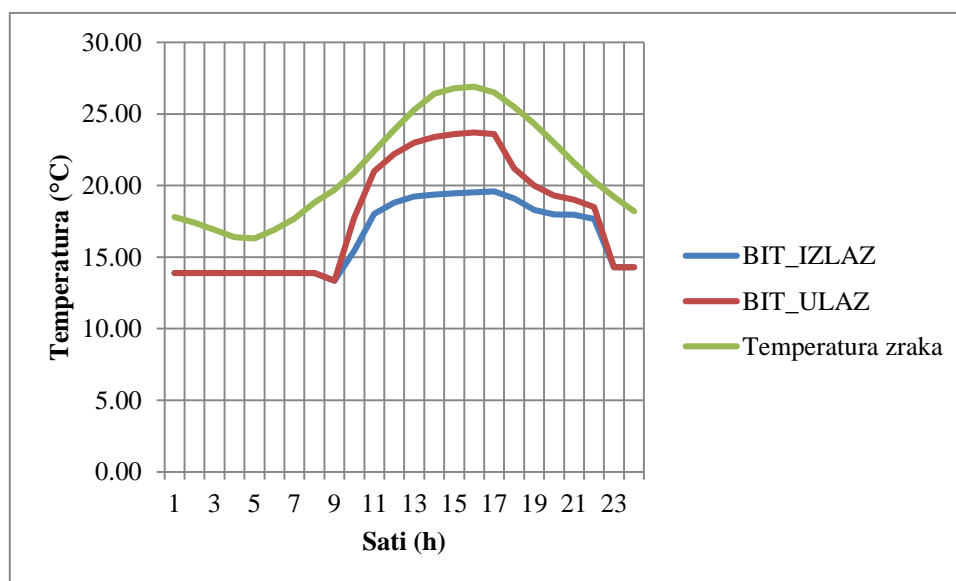
**Slika 22. Simulacija sustava kroz 5 dana**

Na slici 22. simuliran je rad sustava kroz pet dana. Žuta boja predstavlja protok vode kroz BIT, plava boja temperaturu fluida na ulazu u BIT, crvena boja označava temperaturu fluida na izlazu iz BIT-a, a ljubičasta temperaturu tla. Ovime je dobivena krivulja temperature tla koja uvjetuje temperaturne režime cijelog sustava. Kako temperatura tla raste, smanjuje se potencijal za izmjenu topline između fluida u izmjenjivaču i tla što znači da time raste temperatura cijelog sustava na što je vezana i već spomenuta, temperatura kondenzacije. Kao posljedica porasta temperature kondenzacije javlja se porast kompresijskog omjera dizalice topline što dovodi do smanjenja učinkovitosti rada sustava.



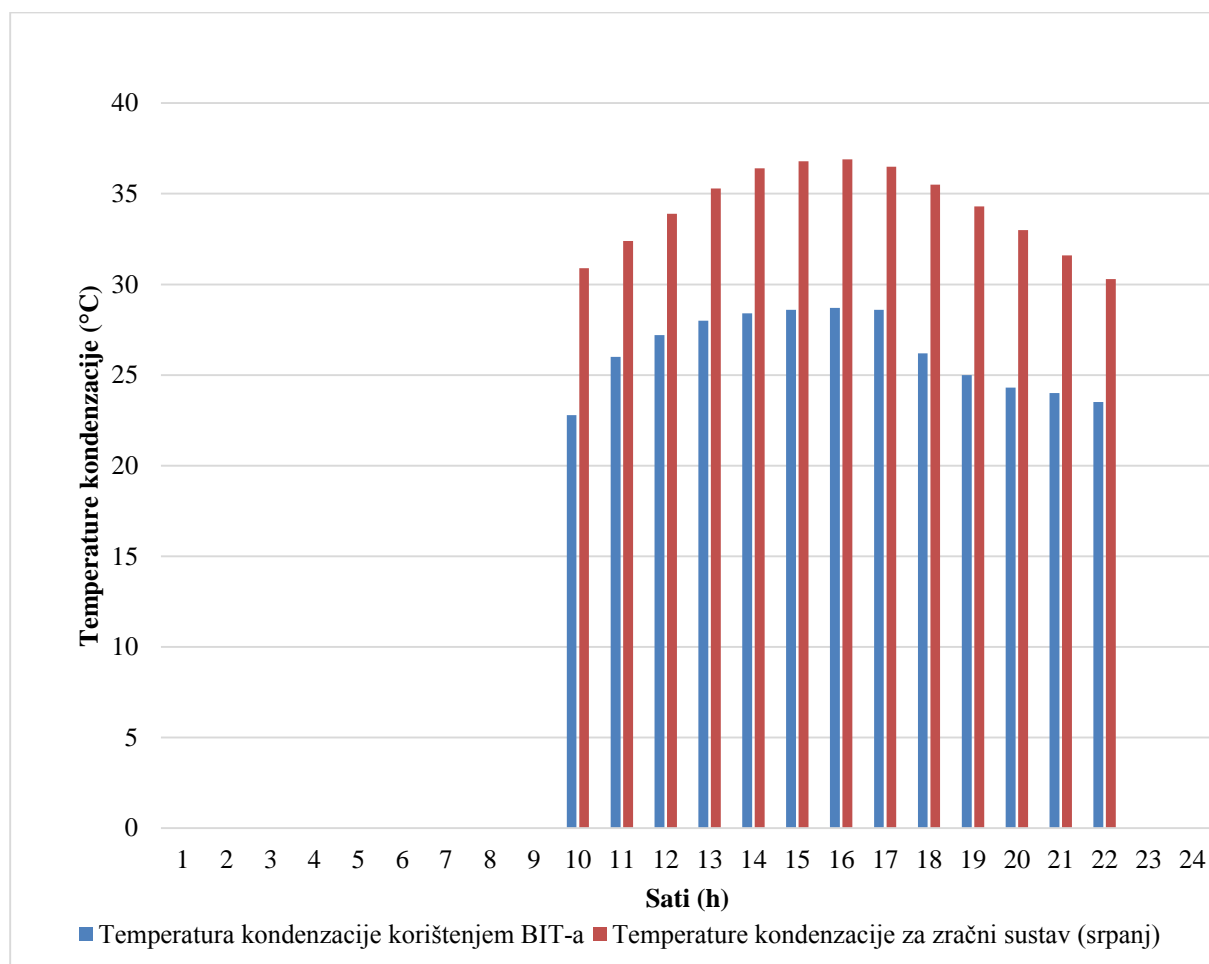
Slika 23. Porast temperature tla

Na slici 23. u periodu kada nema potrebe za radom sustava, vidi se stagnacija nakon prvog dana te pad temperature tla. Regeneracija tla je veoma bitna kako bi se održala učinkovitost sustava budući da iskustveni podaci govore da s porastom temperature kondenzacije od 1°C učinkovitost pada 3%.



Slika 24. Usporedba temperatura

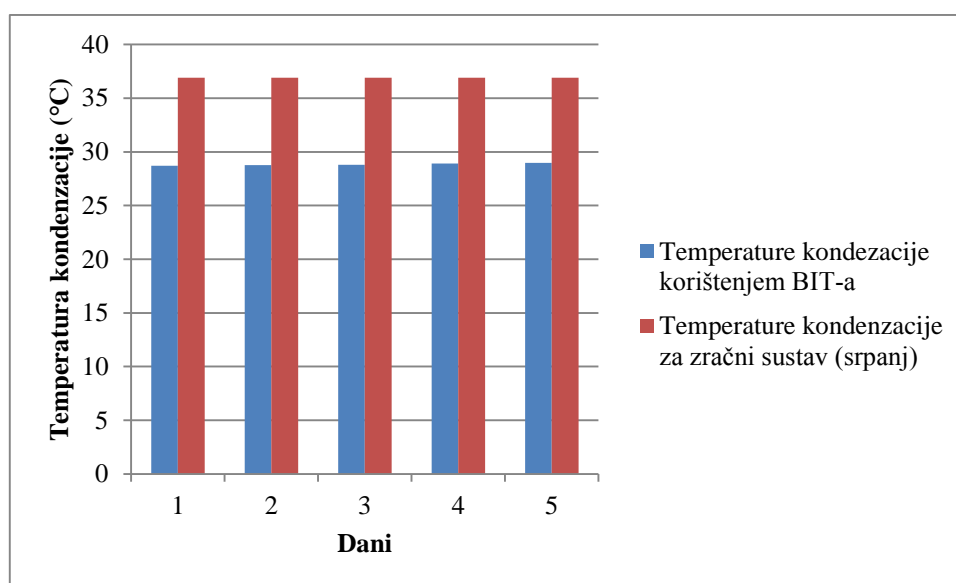
Slika 24. prikazuje kako se temperature sustava mijenjaju tijekom 24 sata uslijed promjene toplinskog opterećenja. Kao posljedica toga u 16 sati prvog dana, temperatura na ulazu u BIT iznosi 23,7°C, drugog dana 23,75°C, trećeg 23,9°C, četvrtog 24°C i petog 24,12°C. Upravo zbog toga dolazi i do pada učina bušotinskog izmjenjivača topline.



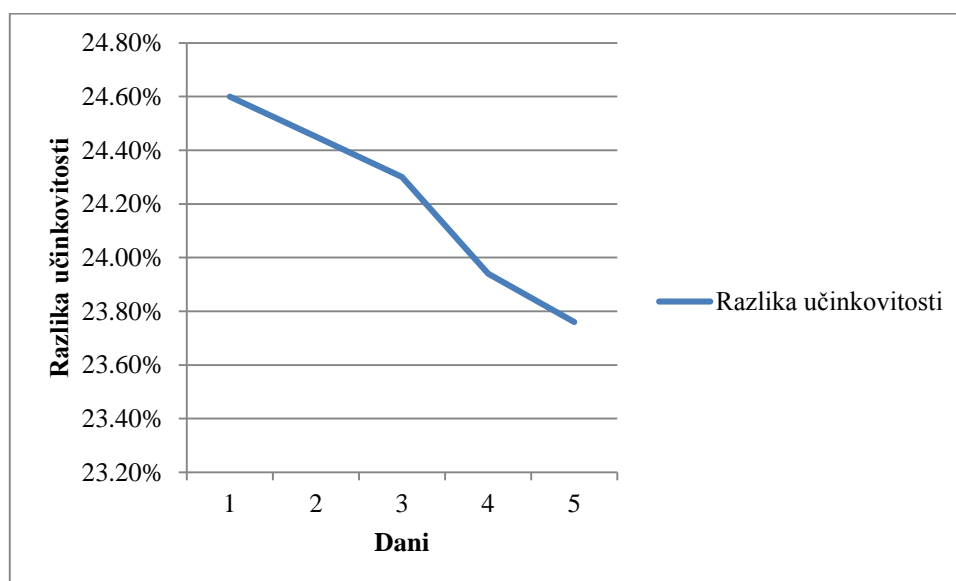
**Slika 25. Usporedba temperatura kondenzacije između zračnih sustava i sustava koji koriste BIT**

Sustavi koji koriste BIT za odbacivanje topline kondenzacije u prednosti su pred sustavima sa zračnim kondenzatorima što se može vidjeti na slici 26. Temperature kondenzacije za zračne kondenzatore dobivene su uvećanjem karakterističnih dnevnih temperatura za 10°C. Isto tako, to su prosječne temperature zraka za srpanj, no mogu se očekivati i znatno više temperature što može bitno smanjiti učinkovitost sustava upravo zbog povezanosti između najviše dnevne temperature i vršnog toplinskog opterećenja. Prilikom maksimalnog opterećenja u 16 sati sustav koji koristi BIT za odbacivanje topline kondenzacije učinkovitiji je 24,6% od sustava koji koristi zrakom hlađeni kondenzator.

Navedena učinkovitost dana je za prvi dan i ona će padati sa svakim danom kako temperatura tla raste što je prikazano na slici 27.



Slika 26. Usporedba temperatura kondenzacije za vršna opterećenja kroz 5 dana

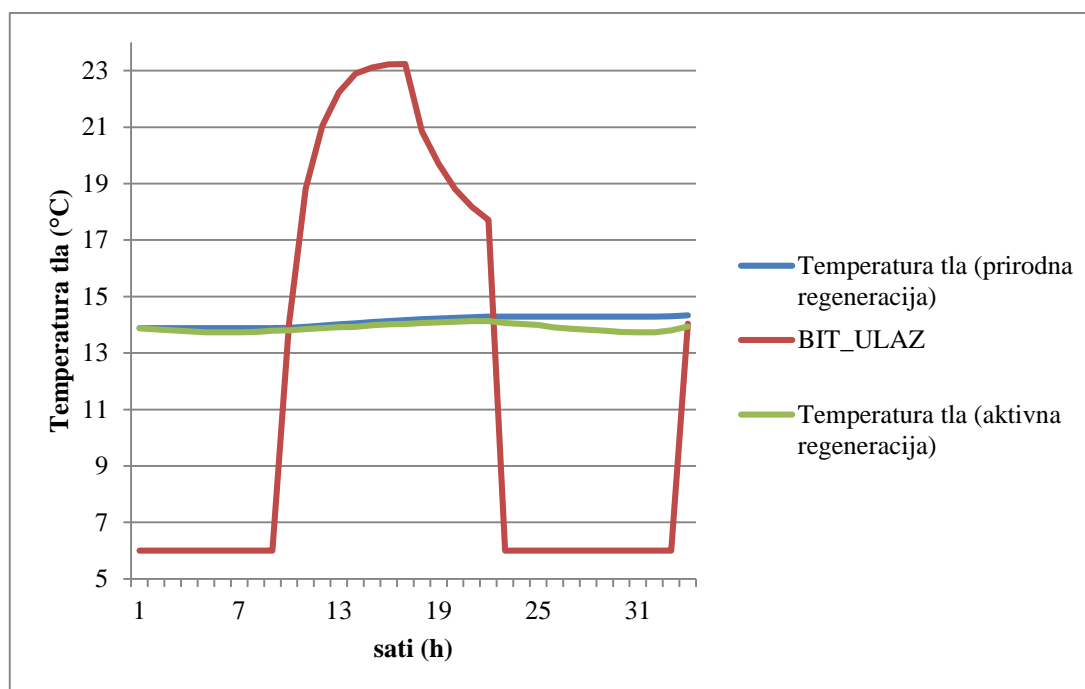


Slika 27. Razlika učinkovitosti između sustava koji koriste BIT i sustava sa zrakom hlađenim kondenzatorom

#### 4.4.2. Aktivno hlađenje tla

U ovom slučaju, sustav dizalice topline prekreće proces te hladi vodu koja prenosi rashladni učin i hladi tlo u periodu kada nema potrebe za hlađenjem. Temperatura vode iznosi

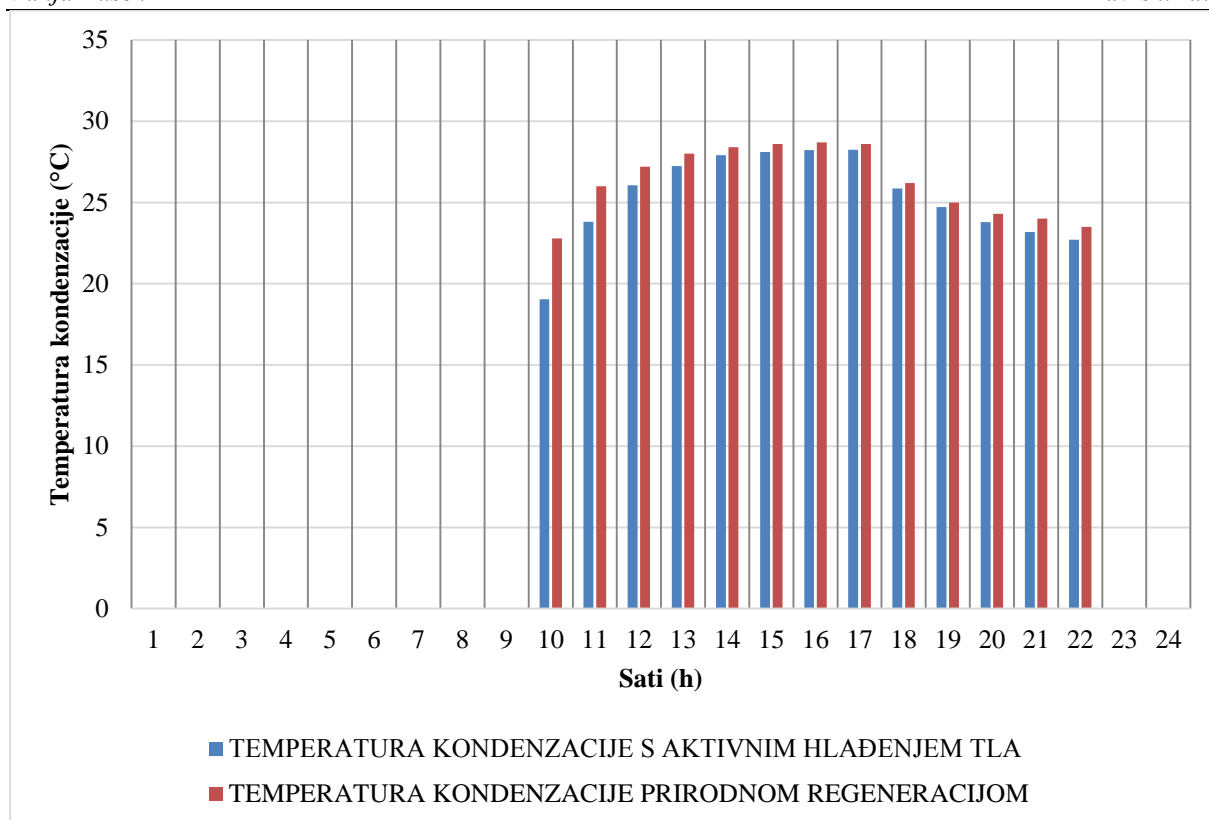
6°C, a protok je jednak kroz cijeli dan i iznosi 0,45 kg/s. Time se omogućuje brže regeneriranje tla, a time i poboljšana izmjena topline između fluida u BIT-u i tla.



**Slika 28. Usporedba temperatura tla između aktivnog hlađenja i prirodne regeneracije tla**

Na slici 27. vidljiv je pad temperature tla, što znači i bolja regeneracija tla čime se omogućuje bolja izmjena topline u periodu vršnog opterećenja kada te razlika iznosi 0,27°C. U periodu aktivnog regeneriranja, ovim režimom, potrebno je iz tla preuzeti 82,38 kWh topline. Također je vidljiva razlika temperature i u prvih 10 sati sljedećeg dana gdje temperatura tla kontinuirano raste te iznosi 14,34°C ukoliko se regenerira prirodnim putem, te temperatura tla ako se regenerira aktivno te ona iznosi 13,94°C. Valja napomenuti da se aktivnom metodom tlo u potpunosti regeneriralo te da kada temperatura tla padne ispod 13,88°C (temperatura tla u početnom trenutku) nije više potrebno hlađenje tla. Ovim načinom hlađenja tla, početna temperatura tla postigne se nakon 4 sata hlađenja.

Ova metoda uspješno u regenerira tlo, no zahtjeva potrošnju veće količine energije.



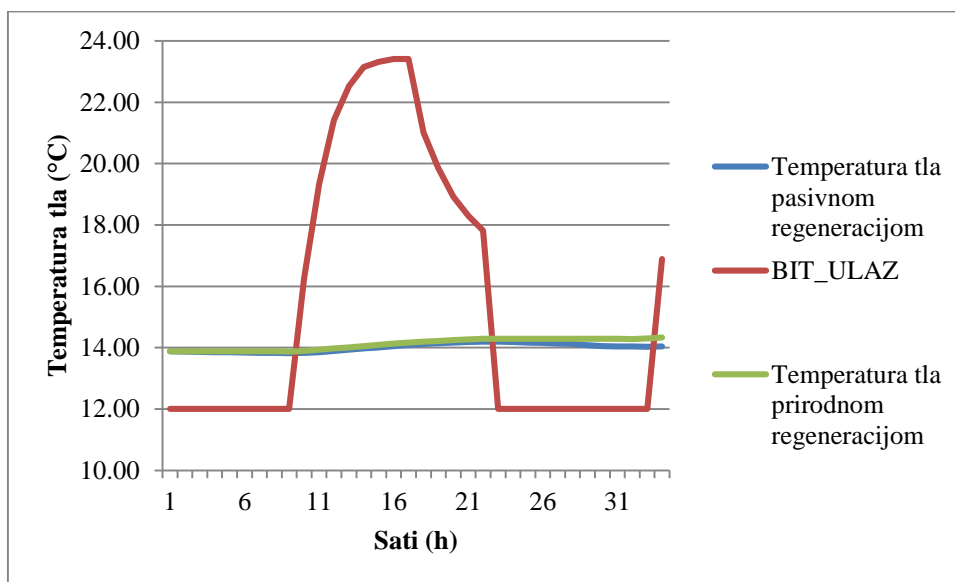
**Slika 29. Usporedba temperature kondenzacije između aktivnog hlađenja i prirodne regeneracije tla**

Cilj hlađenja tla u konačnici je smanjivanje temperature kondenzacije. Simulacija pokazuje mogućnost povećanja učinkovitosti sustava.



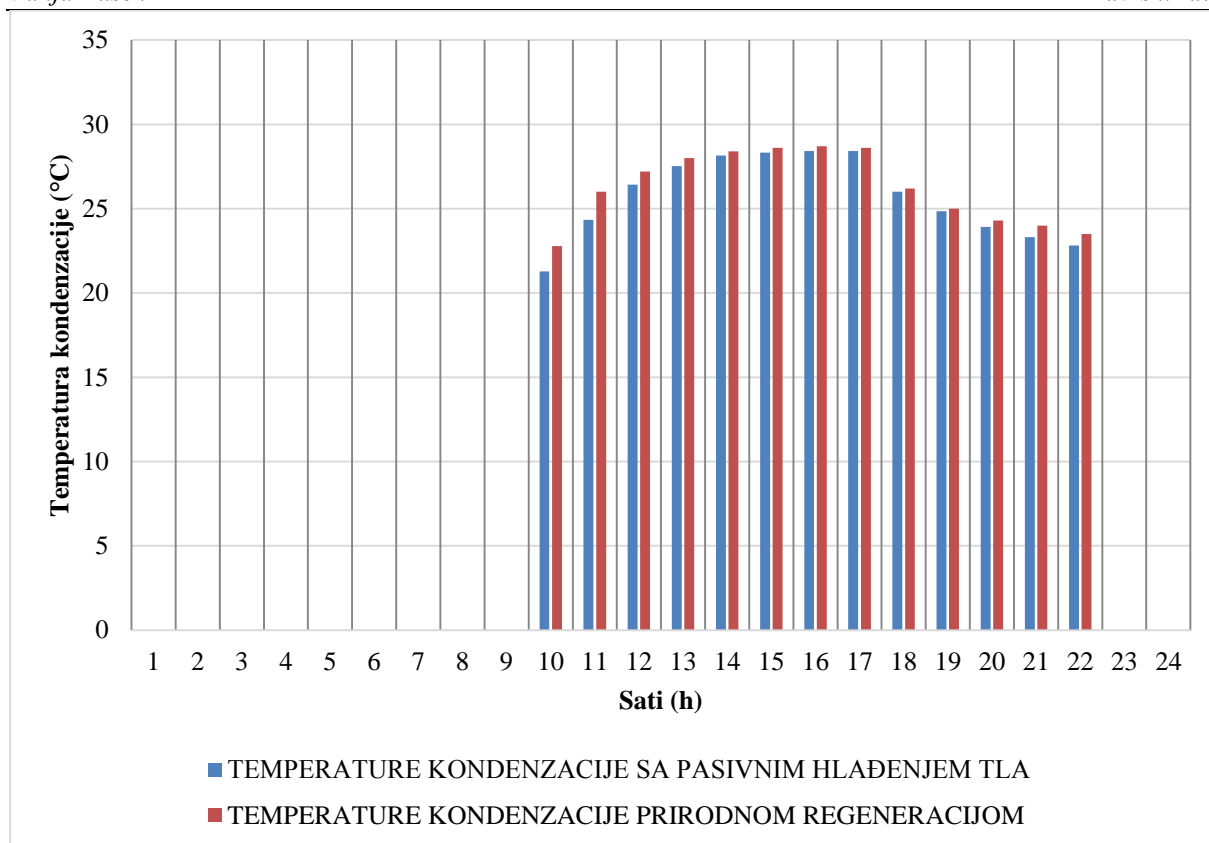
#### 4.4.3. Pasivno regeneriranje tla

Primjenom ove metode, tlo se regenerira povratom vode u BIT ulazne temperature 12°C, uz jednak protok. Na ovaj način se također omogućuje brža regeneracija tla uz manju potrošnju energije od prethodnog slučaja.



Slika 30. Usporedba temperatura tla između pasivnog hlađenja i prirodne regeneracije tla

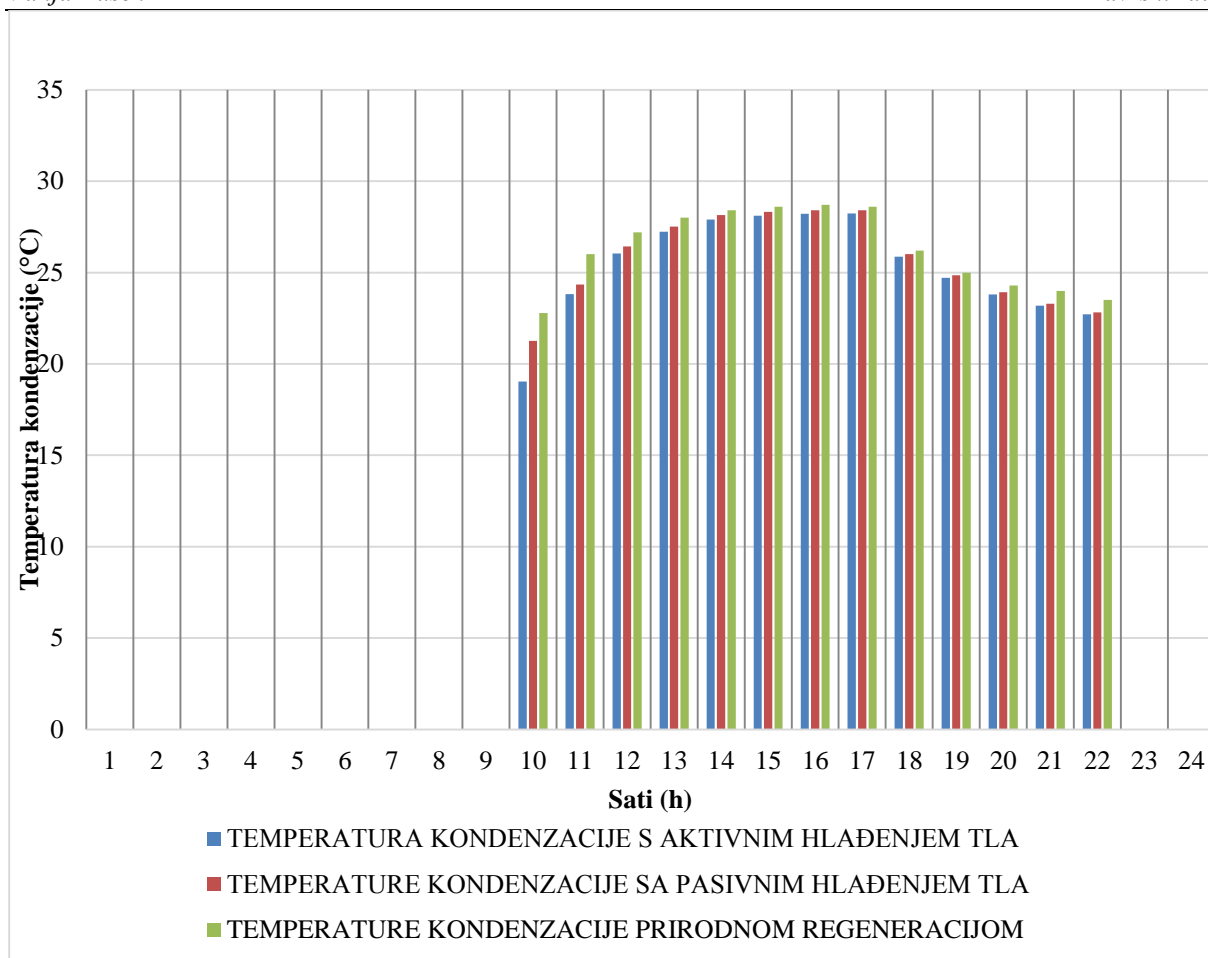
Na slici 30. vidljivo je smanjenje temperature tla pasivnom regeneracijom, no ne u potpunosti. Treba uzeti u obzir i manju utrošenu energiju u regeneraciju tla. Sa svakim danom temperatura tla će rasti, ali sporije nego u slučaju prirodne regeneracije.



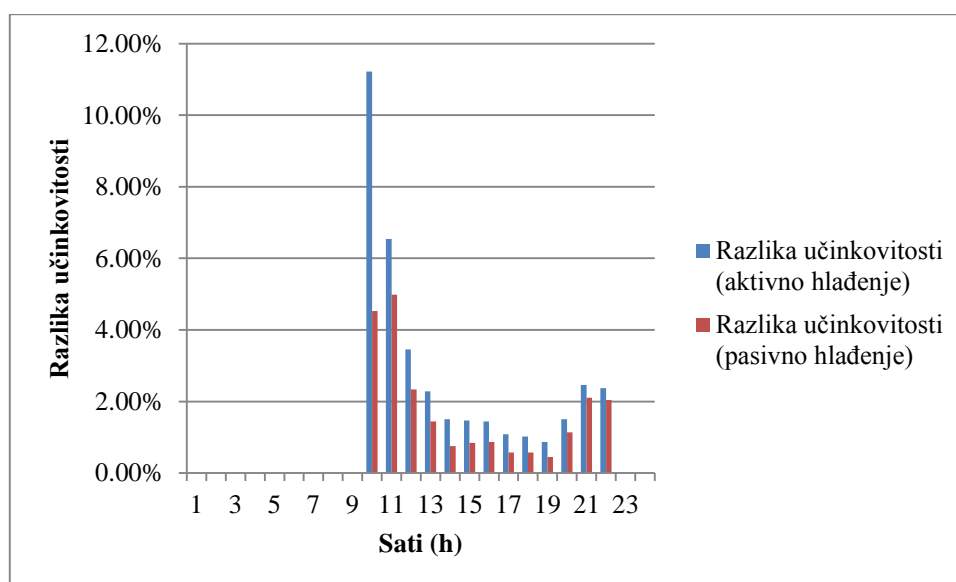
**Slika 31. Usporedba temperatura kondenzacije**

Rezultati ispitivanja prikazani su na slici 29. gdje je vidljivo smanjenje temperature kondenzacije ovakvim načinom regeneracije. Količina topline preuzeta iz tla u periodu kada nema potrebe za hlađenjem iznosi 22,29 kWh što je manje nego u prethodnom slučaju.

Na slikama 32. i 33. prikazani su utjecaji načina regeneracije tla na temperature kondenzacija i učinkovitost sustava. Aktivnim hlađenjem se omogućava potpuna regeneracija tla uz preuzetu energiju koja iznosi 82,39 kWh. Pasivnim hlađenjem tlo se nije u potpunosti regeneriralo, ali je učinkovitost sustava viša nego kod prirodne regeneracije, a preuzeta energija iz tla iznosi 22,29 kWh. Pasivno hlađenje može preuzeti manje energije, ali isto tako troši samo energiju pumpe, dok aktivno hlađenje tla zahtjeva energiju za pogon cijele dizalice topline i energiju pumpe.



Slika 32. Usporedba temperatura kondenzacije



Slika 33. Usporedba razlika učinkovitosti za aktivno i pasivno hlađenje u odnosu na prirodnu regeneraciju

## **ZAKLJUČAK**

U sklopu ovog završnog rada napravljene su analize tla kao kratkotrajnog toplinskog spremnika te ispitivanje mogućnosti povećanje učinkovitosti sustava. Parametri koji su unešeni u programski paket TRNSYS temelje se na eksperimentalnim podacima.

Rezultati simulacija pokazali su da korištenje tla kao kratkotrajnog toplinskog spremnika nije moguće zbog veoma velikog toplinskog kapaciteta tla koji uzrokuje njegovu tromost te nemogućnost hlađenja tla na niže temperature u kraćim vremenskim periodima koji su obrađeni u ovom radu, no moguće je povećanje učinkovitosti sustava BIT-a hlađenjem tla gdje su simulacijama dobiveni povoljni rezultati. Ova ispitivanja služila su za razmatranja na strani tla, bez detaljne izvedbe sustava na strani potrošača kao i promjena rada sustava dizalice topline. Trebalo bi provesti daljnje analize gdje bi se u obzir uzele stvarne satne potrebe za cijelu sezonu te različite izvedbe sustava na strani potrošača.

## LITERATURA

- [1] Lihua Gao, Jun Zhao, Zipeng Tang: A review on borehole seasonal solar thermal energy storage, SHC, 2014.
- [2] Thomas Megel, Ernst Rohner, Roland Wagner, Ladislaus Rybach: The Use of the Underground as a Geothermal Storage for Different Heating and Cooling Needs, GEOWATT AG, 2010.
- [3] Hanne Thorshaug Andersen, Yong Li: Modelling the heating of the Green Energy Lab in Shanghai by the geothermal heat pump combined with the solar thermal energy and ground energy storage, SHC, 2014.
- [4] N. Giordano, C. Comina, G. Mandrone, A. Cagni: Borehole thermal energy storage (BTES). First results from the injection phase of a living lab in Torino (NW Italy), Italy, 2015.
- [5] Georgios Florides, Soteris Kalogirou: Ground heat exchangers-A review of systems, models and applications, Higher Technical Institute, Nicosia 2152, Cyprus, 2006.
- [6] Jose Acuna: Improvements of U-pipe Borehole Heat Exchangers, Stockholm, 2010.
- [7] Burkhard Sanner, Goran Hellstrom, Jeffrey D. Spitler, Signhild Gehlin: More than 15 years of mobile Thermal Response Test-a summary of experiences and prospects, Germany, Sweden, USA, EGC, 2013.
- [8] Goran Hellstrom: Duct Ground Heat Storage Model, Manual for Computer Code, University of Lund, Sweden, 1989.
- [9] A. Galović: Termodinamika II, Zagreb, 2010.

## **PRILOZI**

I. CD-R disc