

# Analiza potencijala za pasivno grijanje škole korištenjem izmjenjivača topline zemlja-zrak

---

**Glogar, Filip**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2022**

*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:235:695507>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-02-07**

*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

**Filip Glogar**

Zagreb, 2022.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

Mentorica:

Izv. prof. dr. sc. Tea Žakula

Student:

Filip Glogar

Zagreb, 2022.



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomске ispite  
Povjerenstvo za završne i diplomске ispite studija strojarstva za smjerove.

Procesno-energetski, konstrukcijski, inženjersko modeliranje i računalne simulacije i brodstrojarski

|  |        |
|--|--------|
| Sveučilište u Zagrebu<br>Fakultet strojarstva i brodogradnje |        |
| Datum  | Prilog |
| Klasa: 602 – 04 / 22 – 6 / 1                                 |        |
| Ur.broj: 15 - 1703 - 22 -                                    |        |

## ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Filip Glogar**

JMBAG: **0035214364**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Analiza potencijala za pasivno grijanje škole korištenjem izmjenjivača topline zemlja-zrak**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Analysis of a passive heating potential for a school that uses an earth-air heat exchanger**

### Opis zadatka:

Cilj rada je analizirati potencijal za pasivno grijanje Tehničke škole Ruđera Boškovića u Zagrebu korištenjem podataka za tipičnu meteorološku godinu za grad Zagreb. Analizu je potrebno provesti za sustav mehaničke ventilacije koji koristi izmjenjivač topline zemlja-zrak. Za proračun ventilacijskih potreba zgrade koristiti normu EN 16798-1:2019, metodu 1. Na temelju dostupne literature izabrati metodu za izračun godišnje uštede toplinske i električne energije uslijed korištenja pasivnog grijanja. Za parametre izmjenjivača topline koristiti preporuke dostupnih proizvođača.

### Rad treba sadržavati:

- pregled literature o pasivnom grijanju zgrada,
- opis modela korištenog za proračun izmjenjivača topline zemlja-zrak,
- rezultate proračuna godišnje uštede energije,
- zaključke o potencijalu korištenja izmjenjivača zemlja-zrak za pasivno grijanje u gradu Zagrebu.

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

Zadatak zadan:

30. 11. 2021.

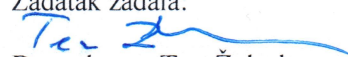
Datum predaje rada:

- 1. rok: 24. 2. 2022.
- 2. rok (izvanredni): 6. 7. 2022.
- 3. rok: 22. 9. 2022.

Predvideni datumi obrane:

- 1. rok: 28. 2. – 4. 3. 2022.
- 2. rok (izvanredni): 8. 7. 2022.
- 3. rok: 26. 9. – 30. 9. 2022.

Zadatak zadala:

  
Doc. dr. sc. Tea Žakula

Predsjednik Povjerenstva:

  
Prof. dr. sc. Vladimir Soldo

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija na Fakultetu strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu i navedenu literaturu.

Zahvaljujem izv. prof. dr. sc. Tei Žakuli i mlađoj istraživačici Luciji Magdić na velikoj pomoći prilikom izrade ovoga rada, konstruktivnim konzultacijama i komentarima te uloženom trudu i vremenu.

Posebno hvala obitelji na pruženoj potpori tijekom studija i prilikom izrade ovoga rada.

Filip Glogar

# Sažetak

Potreba za energijom za grijanje čini veliki dio svjetskih potreba za energijom. Zbog navedenog se u sektoru zgradarstva sve češće primjenjuju sustavi pasivnog grijanja kojima se mogu postići značajne uštede energije. Svrha ovoga rada je analiza potencijala za pasivno grijanje Tehničke škole Ruđera Boškovića u Zagrebu korištenjem izmjenjivača topline zemlja-zrak za predgrijavanje ventilacijskoga zraka u sustavu mehaničke ventilacije. U radu je analizirana promjena temperature vanjskoga zraka prolaskom kroz izmjenjivač topline u svrhu izračuna godišnje uštede toplinske i električne energije. Analiza je provedena za svaki sat u godini, pri čemu je za analizu promjene temperature vanjskoga zraka korišten računalni program TRNSYS. Rezultati pokazuju da se najveće uštede toplinske i električne energije ostvaruju u najhladnijim mjesecima, u kojima je temperatura vanjskoga zraka osjetno niža od temperature tla koje okružuje izmjenjivač topline. U toplijim mjesecima dolazi do smanjenja uštede energije zbog viših temperatura vanjskoga zraka. Godišnja ušteda toplinske energije korištenjem analiziranog pasivnog sustava grijanja pomoću izmjenjivača topline zemlja-zrak iznosi 1804 kWh, odnosno 7,7%. Pod pretpostavkom da se toplinska energija dobiva pomoću dizalice topline zrak-voda, procijenjena je godišnja ušteda električne energije od oko 600 kWh, odnosno 600 kn.

Ključne riječi: pasivno grijanje, izmjenjivač topline zemlja-zrak, ušteda energije

# Summary

Heating energy needs account for a large part of the world's energy needs. Hence, in the building sector there is an increase in the use of passive heating systems, which can result in significant energy savings. The objective of this thesis is to analyze the potential for passive heating of the Ruđer Bošković Technical School in Zagreb using a ground-air heat exchanger. The exchanger is a part of a mechanical ventilation system and is used to preheat the outside air. In order to calculate the annual savings of heat and electricity, it is analyzed how the outdoor air temperature changes after passing through the heat exchanger. TRNSYS software has been used to calculate the change in outdoor air temperature on an hourly basis. The results show that the biggest savings of heat and electricity are achieved in the coldest months, when the outdoor air temperature is significantly lower than the ground temperature surrounding the heat exchanger. Energy savings are reduced in the warmer months due to higher outdoor air temperatures. The use of the analyzed passive heating system, with the ground-air heat exchanger, results in annual heat energy savings of 1804 kWh, or 7,7%. Under the assumption that the heat is produced using an air-to-water heat pump, estimated annual electricity savings are about 600 kWh, or 600 kn.

Key words: passive heating, ground-air heat exchanger, energy savings

# Sadržaj

|   |     |
|---|-----|
| Sažetak .....   | I   |
| Summary .....   | II  |
| Sadržaj .....   | III |
| Popis slika .....   | V   |
| Popis tablica .....   | VII |
| 1. Uvod .....   | 1   |
| 1.1. Pasivno grijanje korištenjem topline tla .....                             | 1   |
| 2. Opis zgrade .....  | 4   |
| 3. Proračun ventilacijskih potreba .....  | 12  |
| 4. Opis korištenih metoda i računalnih alata .....                              | 15  |
| 4.1. Računalni program TRNSYS .....   | 15  |
| 4.2. Opis modela horizontalnog izmjenjivača topline u TRNSYS-u .....            | 16  |
| 4.3. Matematički model .....  | 20  |
| 4.3.1. Jednadžbe energijske bilance .....                                       | 20  |
| 4.3.1.1. Unutarnji čvorovi .....  | 20  |
| 4.3.1.2. Čvorovi cijevi .....   | 23  |
| 4.3.1.3. Rubni čvorovi i rubni uvjeti .....                                     | 27  |
| 4.4. Ulazni parametri .....   | 32  |
| 4.4.1. Geometrija izmjenjivača .....  | 32  |
| 4.4.2. Termofizikalna svojstva zraka, tla i cijevi .....                        | 34  |
| 4.4.3. Koeficijent prijelaza topline između površine zemlje i okoliša .....     | 34  |
| 4.4.4. Pogonski režim .....   | 35  |
| 4.4.5. Meteorološki podaci .....  | 35  |
| 4.5. Opis rada u TRNSYS korisničkom sučelju Simulation Studio .....             | 36  |
| 5. Rezultati simulacije i proračun uštede toplinske i električne energije ..... | 43  |



|   |    |
|---|----|
| 5.1. Rezultati simulacije .....               | 43 |
| 5.2. Proračun uštede toplinske energije.....  | 47 |
| 5.3. Proračun uštede električne energije..... | 52 |
| 6. Proračun isplativosti.....                 | 54 |
| 7. Zaključak.....                             | 55 |
| Literatura .....                              | 57 |

# Popis slika

|  |    |
|--|----|
| Slika 1. Primjer sustava s izmjenjivačem topline zemlja-zrak kod sjedišta tvrtke REHAU, Erlangen, Njemačka [3].....                              | 3  |
| Slika 2. Primjer sustava s izmjenjivačem topline zemlja-zrak za školu u St Austellu, Ujedinjeno Kraljevstvo [3].....                             | 3  |
| Slika 3. Južno pročelje zgrade Tehničke škole Ruđera Boškovića u Zagrebu.....  | 4  |
| Slika 4. Sjeverno pročelje zgrade Tehničke škole Ruđera Boškovića u Zagrebu.....   | 4  |
| Slika 5. Tlocrt prizemlja.....   | 5  |
| Slika 6. Tlocrt 1. kata .....  | 5  |
| Slika 7. Tlocrt 2. kata .....  | 6  |
| Slika 8. Tlocrt 3. kata .....  | 6  |
| Slika 9. Tlocrt 4. kata .....  | 7  |
| Slika 10. Skica rasporeda cijevi podzemnog izmjenjivača topline sastavljenog od 9 cijevi podijeljenih u 3 horizontalna sloja .....               | 16 |
| Slika 11. Serijski i paralelni spoj cijevi izmjenjivača [5].....   | 17 |
| Slika 12. Računalna domena simulacije i njene granice definirane za podzemni izmjenjivač sastavljen od 4 cijevi, podijeljenih u 2 sloja [6]..... | 19 |
| Slika 13. Y-Z ravnina mreže čvorova definirane za podzemni izmjenjivač sastavljen od 4 cijevi, podijeljenih u 2 sloja [6].....                   | 20 |
| Slika 14. Promatrani čvor i njegovi susjedni čvorovi [6].....  | 21 |
| Slika 15. Skica položaja modeliranog izmjenjivača.....   | 32 |
| Slika 16. Neporemećena temperatura tla po dubini kroz godinu izračunata prema Kusudinoj korelaciji.....  | 33 |
| Slika 17. Temperatura vanjskog zraka za tipičnu meteorološku godinu grada za grad Zagreb.....  | 35 |
| Slika 18. Početni zaslon korisničkog sučelja Simulation Studio .....   | 36 |
| Slika 19. Prikaz korištenih komponenti unutar sučelja Simulation Studio .....  | 37 |
| Slika 20. Izbornik povezivanja izlaznih meteoroloških podataka sa ulaznim parametrima izmjenjivača .....   | 38 |
| Slika 21. Izbornik definiranja ulaznih parametara .....  | 39 |
| Slika 22. Izbornik definiranja ulaznih parametara .....  | 40 |
| Slika 23. Izbornik definiranja ulaznih parametara .....  | 41 |
| Slika 24. Izbornik definiranja ulaznih parametara .....  | 42 |

|  |    |
|--|----|
| Slika 25. Usporedba izlazne temperature zraka s temperaturom zraka na ulazu i prosječnim temperaturama slojeva tla oko izmjenjivača za mjesec siječanj ..... | 44 |
| Slika 26. Razlike između temperatura zraka na izlazu i ulazu u izmjenjivač za mjesec siječanj .....  | 44 |
| Slika 27. Usporedba temperaturnog profila tla računalne simulacije i profila neporemećene temperature tla prema Kusudi za mjesec siječanj .....              | 45 |
| Slika 28. Temperaturni profil tla razvijen pomoću Kusuda korelacije .....  | 46 |
| Slika 29. Temperaturni profil tla dobiven računalnom simulacijom .....   | 46 |
| Slika 30. Pojednostavljena shema pretpostavljenog sustava mehaničke ventilacije.....   | 47 |
| Slika 31. Usporedba potrebne toplinske energije sa i bez podzemnog izmjenjivača topline...   | 51 |
| Slika 32. Ušteda toplinske energije postignuta korištenjem pasivnog sustava grijanja .....   | 52 |

# Popis tablica

|   |    |
|---|----|
| Tablica 1. Predviđene vrijednosti broja osoba i površina za prizemlje.....                                      | 8  |
| Tablica 2. Predviđene vrijednosti broja osoba i površina za 1. kat.....   | 8  |
| Tablica 3. Predviđene vrijednosti broja osoba i površina za 2. kat.....   | 9  |
| Tablica 4. Predviđene vrijednosti broja osoba i površina za 3. kat.....   | 11 |
| Tablica 5. Predviđene vrijednosti broja osoba i površina za 4. kat.....   | 11 |
| Tablica 6. Odabir potrebne količine zraka po osobi $q_p$ .....  | 13 |
| Tablica 7. Odabir potrebne količine zraka po površini prostora $q_B$ .....                                      | 13 |
| Tablica 8. Proračun ventilacijskih potreba za svaku prostoriju prizemlja .....                                  | 14 |
| Tablica 9. Ventilacijske potrebe po dijelovima zgrade .....   | 14 |
| Tablica 10. Ulazni parametri modela .....   | 17 |
| Tablica 11. Dimenzije cijevi izmjenjivača topline [8] .....   | 33 |
| Tablica 12. Termofizikalna svojstva zraka [9].....  | 34 |
| Tablica 13. Termofizikalna svojstva polietilena [9].....  | 34 |
| Tablica 14. Termofizikalna svojstva tla [7] , [9] , [10] .....  | 34 |
| Tablica 15. Vrijednosti projektnih parametara.....  | 48 |
| Tablica 16. Potrebna toplinska energija sustava ventilacije sa korištenjem podzemnog izmjenjivača topline ..... | 50 |
| Tablica 17. Cijene cijevi izmjenjivača i iskopa [8], [12] .....   | 54 |
| Tablica 18. Ukupni investicijski troškovi .....   | 54 |

# 1. Uvod

Otpriblike 40% svjetske potrošnje energije troši se u zgradarstvu, a veliki dio toga u svrhu grijanja i hlađenja. [1] Globalno se predviđa da će potražnja energije za grijanje rasti do 2030. godine i zatim se stabilizirati, dok će potrebe energije za hlađenje nastaviti rasti. [2] Zbog visoke potražnje za energijom, logično je da se sve više javlja potreba za korištenjem novih, jeftinijih i učinkovitijih sustava grijanja i hlađenja.

Kao jedan od načina smanjenja toplinskih potreba za grijanjem u zgradarstvu koriste se pasivni sustavi grijanja kojima se mogu značajno smanjiti troškovi toplinske i električne energije. Sustavom pasivnog grijanja iskorištava se toplinski potencijal sunčevog zračenja, zemlje ili okolišnog zraka u svrhu potpunog ili djelomičnog pokrivanja potreba građevine za toplinskom energijom. Ti sustavi posebno su pogodni za razmatranje u modernoj gradnji gdje se koriste kvalitetna toplinska izolacija, kvalitetni prozori i vrata te gdje građevine imaju visoku zrakotijesnost. Navedeni faktori utječu na smanjenje toplinskih potreba građevine te time raste potencijal za korištenje pasivnih sustava grijanja kojima bi se pokrile te potrebe.

Cilj ovog rada je analiza potencijala za pasivno grijanje te procjena uštede toplinske i električne energije na godišnjoj razini za Tehničku školu Ruđera Boškovića u Zagrebu. Analiza je provedena za sustav mehaničke ventilacije koji koristi izmjenjivač topline zemlja-zrak. U izmjenjivaču se okolišni zrak predgrijava kako bi se smanjila potreba za grijanjem ventilacijskog zraka na grijaču klimatizacijske jedinice. Rad izmjenjivača modeliran je koristeći računalni program TRNSYS te je simuliran porast temperature okolišnog zraka prolaskom kroz njega. Također je korišten i računalni program MATLAB pomoću kojega su generirani neki od ulaznih parametara potrebnih za provedbu simulacije.

## 1.1. Pasivno grijanje korištenjem topline tla

Zbog niske toplinske difuzivnosti, s porastom dubine, godišnje temperaturne amplitude tla sve se više smanjuju te dolazi do vremenskog odmaka između promjena temperatura vanjskoga zraka i promjena temperature tla. Na dubini od 5 m temperatura tla ostaje relativno konstantna tijekom godine, a daljnjim porastom dubine temperaturne razlike se sve više

smanjuju. Na dubini od 10 – 20 m temperatura tla poprima stalan iznos, sličan srednjoj godišnjoj vanjskoj temperaturi zraka, tijekom cijele godine. Zbog navedenog je temperatura tla u sezoni grijanja viša od temperature okolišnog zraka te iz tog razloga tlo ima značajan toplinski potencijal koji se može iskoristiti u sustavima pasivnoga grijanja kojima se mogu postići značajne uštede toplinske i električne energije.

U ovome radu analiziran je indirektan način iskorištenja topline tla pomoću izmjenjivača topline zemlja-zrak. Izmjenjivač se sastoji od jednog ili niza paralelnih cijevnih kanala zakopanih na određenu dubinu kroz koje, pomoću ventilatora, dolazi do strujanja okolišnog zraka niže temperature od temperature tla. Zbog razlike temperatura zraka u cijevima i okolnoga tla dolazi do prijenosa topline te zagrijavanja zraka. Glavni faktori koji utječu na efikasnost izmjenjivača su dubina na kojoj se nalaze cijevi, termofizikalna svojstva tla, brzina strujanja zraka te duljina, promjer, debljina i materijal cijevi. Treba naglasiti da se zrak teoretski može zagrijati maksimalno do temperature tla kroz koje prolazi. Pri tome će se postići određena ušteda toplinske energije zbog predgrijanja zraka, ali zrak trebati dodatno grijati nakon prolaska kroz izmjenjivač, a prije ubacivanja u prostorije.

Primjeri uspješno izvedenih sustava s izmjenjivačem topline zemlja-zrak prikazani su na Slikama 1. i 2. Slika 1. prikazuje sustav koji je izveden kod sjedišta tvrtke REHAU u Erlangenu u Njemačkoj, a sastoji se od 24 paralelnih cijevi duljine 48 m u kojima se zrak, protoka do 18000 m<sup>3</sup>/h, u sezoni grijanja zagrijava sa -18°C na +1°C. Slika 2. prikazuje sustav od 16 paralelnih cijevi duljine 30 m na dubini od 1,5 m u kojima se predgrijava zrak protoka 3457 m<sup>3</sup>/h. Sustav je izveden za školu u St Austellu u Ujedinjenom Kraljevstvu.



*Slika 1. Primjer sustava s izmjenjivačem topline zemlja-zrak kod sjedišta tvrtke REHAU, Erlangen, Njemačka [3]*



*Slika 2. Primjer sustava s izmjenjivačem topline zemlja-zrak za školu u St Austellu, Ujedinjeno Kraljevstvo [3]*

## 2. Opis zgrade

Analiza potencijala za pasivno grijanje provodi se za zgradu Tehničke škole Ruđera Boškovića u Zagrebu (Slika 3. – 9.). Škola se sastoji od 4 kata te su predviđene vrijednosti broja osoba po prostorijama i površina prostorija dane u Tablicama 1. – 5. Nacrti škole dobiveni su iz arhitektonskih podloga. Ove vrijednosti biti će korištene za proračun ventilacijskih potreba zgrade u idućem poglavlju. Ukupna korisna površina zgrade iznosi 1618,2 m<sup>2</sup>. Pretpostavljeno radno vrijeme zgrade je od 8:00 do 20:00 sati.

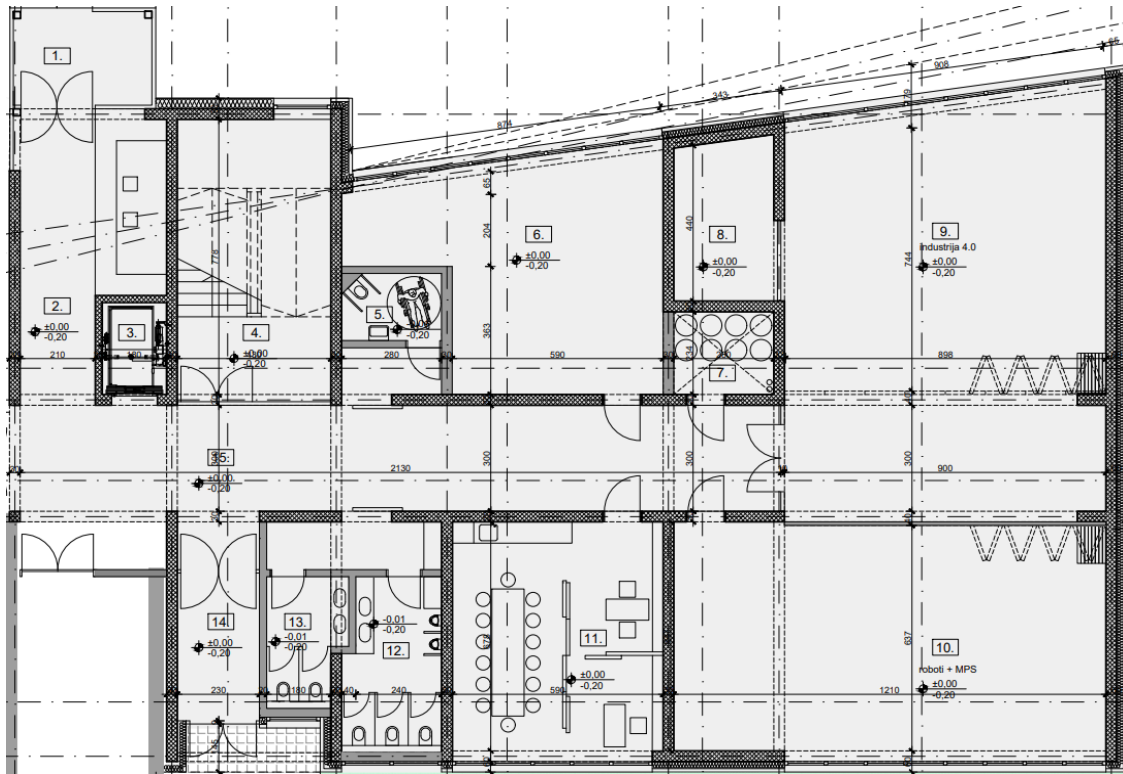


Slika 3. Južno pročelje zgrade Tehničke škole Ruđera Boškovića u Zagrebu

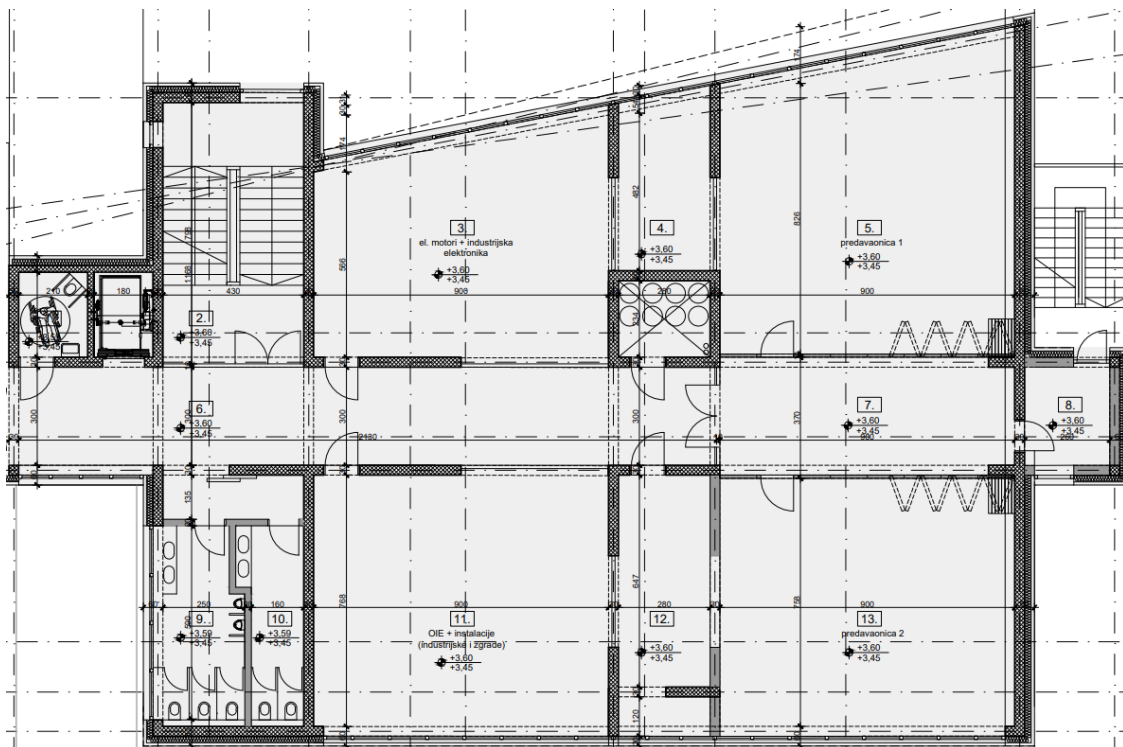


Slika 4. Sjeverno pročelje zgrade Tehničke škole Ruđera Boškovića u Zagrebu

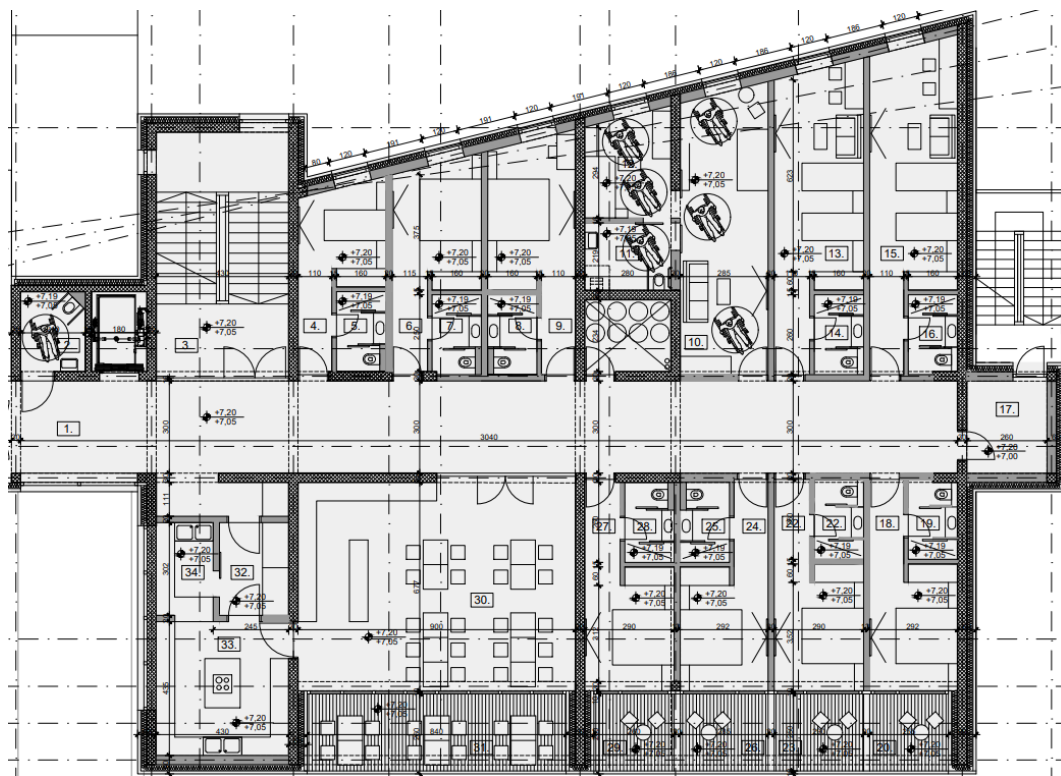




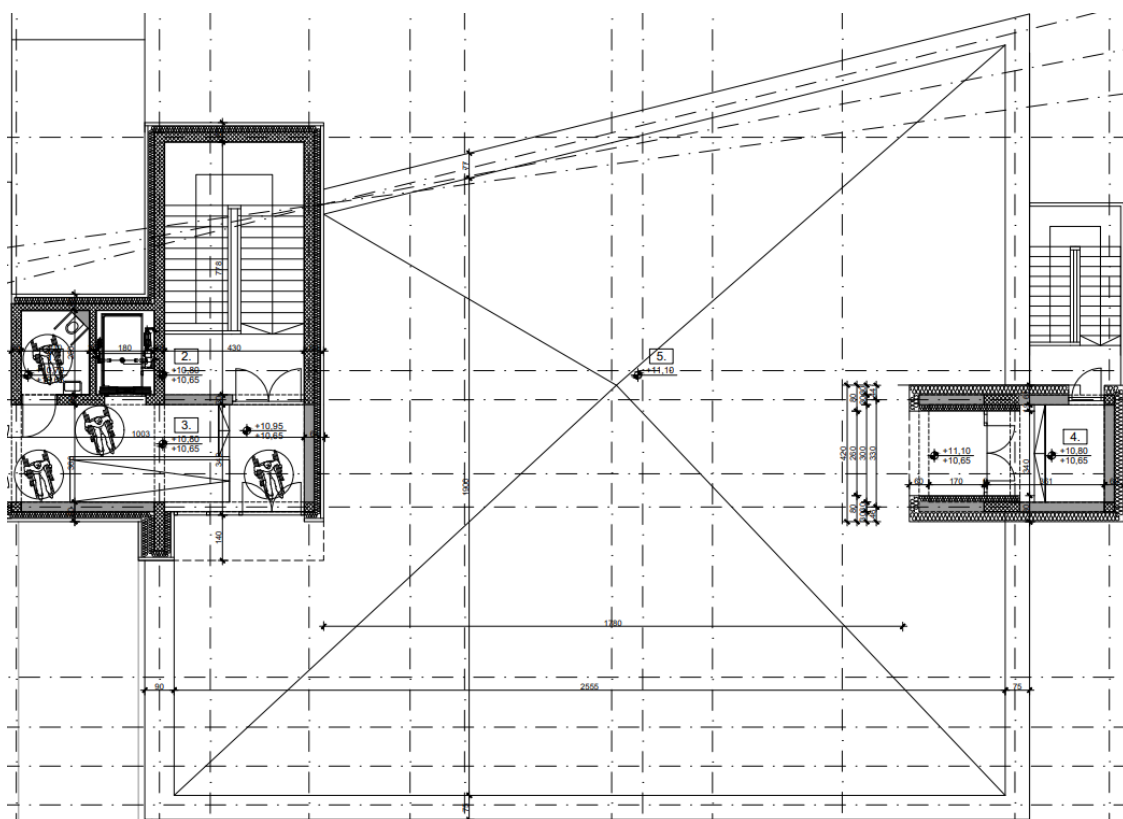
Slika 5. Tlocrt prizemlja



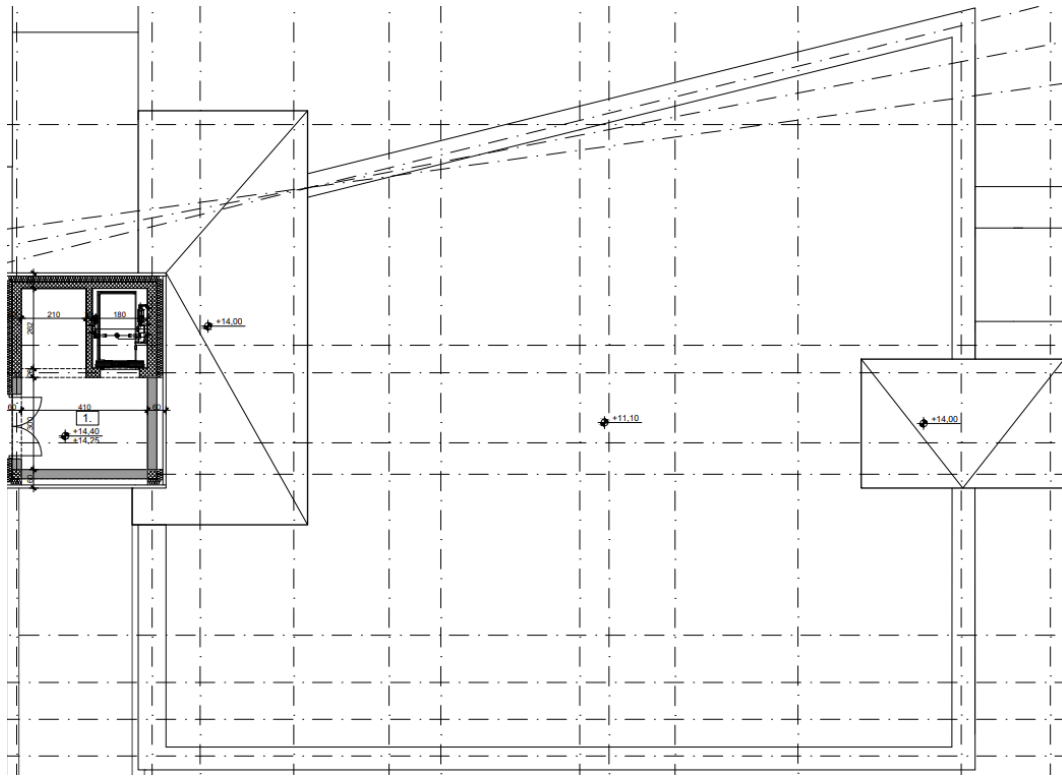
Slika 6. Tlocrt 1. kata



Slika 7. Tlocrt 2. kata



Slika 8. Tlocrt 3. kata



Slika 9. Tlocrt 4. kata

Tablica 1. Predviđene vrijednosti broja osoba i površina za prizemlje

| Prostorija | Opis prostorije    | Broj osoba | Površina [m <sup>2</sup> ] |
|------------|--------------------|------------|----------------------------|
| 1          | Vjetrobran         | 0          | 10,29                      |
| 2          | Recepcija          | 3          | 27,94                      |
| 3          | Okno dizala        | 0          | 4,68                       |
| 4          | Stubište           | 0          | 33,45                      |
| 5          | WC                 | 0          | 5,07                       |
| 6          | Strojarnica        | 0          | 49,89                      |
| 7          | Instalacijsko okno | 0          | 6,56                       |
| 8          | Spremište          | 0          | 12,89                      |
| 9          | Industrija 4.0     | 15         | 106,12                     |
| 10         | roboti + MPS       | 15         | 82,85                      |
| 11         | Uprava             | 5          | 41,02                      |
| 12         | Sanitarije M       | 0          | 14,31                      |
| 13         | Sanitarije Ž       | 0          | 7,6                        |
| 14         | Vjetrobran         | 0          | 13,13                      |
| 15         | Hodnik             | 0          | 77,38                      |

Tablica 2. Predviđene vrijednosti broja osoba i površina za 1. kat

| Prostorija | Opis prostorije         | Broj osoba | Površina [m <sup>2</sup> ] |
|------------|-------------------------|------------|----------------------------|
| 1          | WC                      | 0          | 5,76                       |
| 2          | Stubište                | 0          | 34,32                      |
| 3          | El. motori + ind. Elek. | 15         | 62,62                      |
| 4          | Spremište               | 0          | 15,67                      |

|    |                        |    |       |
|----|------------------------|----|-------|
| 5  | Predavaonica 1         | 25 | 82,48 |
| 6  | Hodnik                 | 0  | 66,03 |
| 7  | Hodnik                 | 0  | 6,83  |
| 8  | Pretprostor evakuacije | 0  | 32,19 |
| 9  | Sanitarije M           | 0  | 18,77 |
| 10 | Sanitarije Ž           | 0  | 14,28 |
| 11 | OIE + Instalacije      | 15 | 73,29 |
| 12 | Spremište              | 1  | 22,93 |
| 13 | Predavaonica 2         | 25 | 71,33 |

Tablica 3. Predviđene vrijednosti broja osoba i površina za 2. kat

| Prostorija | Opis prostorije | Broj ljudi | Površina [m <sup>2</sup> ] |
|------------|-----------------|------------|----------------------------|
| 1          | Hodnik          | 0          | 95,99                      |
| 2          | WC              | 0          | 5,45                       |
| 3          | Stubište        | 0          | 34,42                      |
| 4          | Soba 1          | 1          | 13,5                       |
| 5          | Kupaonica 1     | 0          | 3,9                        |
| 6          | Soba 2          | 1          | 16,48                      |
| 7          | Kupaonica 2     | 0          | 3,9                        |
| 8          | Kupaonica 3     | 0          | 3,9                        |
| 9          | Soba 3          | 1          | 18,23                      |

|    |                              |    |       |
|----|------------------------------|----|-------|
| 10 | Soba 4                       | 1  | 27,61 |
| 11 | Kupaonica 4                  | 0  | 6,25  |
| 12 | Soba 4 - spavaći             | 1  | 10,72 |
| 13 | Soba 5                       | 2  | 25,42 |
| 14 | Kupaonica 5                  | 0  | 3,9   |
| 15 | Soba 6                       | 2  | 27,07 |
| 16 | Kupaonica 6                  | 0  | 3,9   |
| 17 | Pretprostor evak.            | 0  | 7,8   |
| 18 | Soba 7                       | 2  | 14,69 |
| 19 | Kupaonica 7                  | 0  | 3,9   |
| 20 | Lođa 7                       | 0  | 6,5   |
| 21 | Soba 8                       | 2  | 14,69 |
| 22 | Kupaonica 8                  | 0  | 3,9   |
| 23 | Lođa 8                       | 0  | 6,5   |
| 24 | Soba 9                       | 2  | 14,69 |
| 25 | Kupaonica 9                  | 0  | 3,9   |
| 26 | Lođa 9                       | 0  | 6,5   |
| 27 | Soba 10                      | 2  | 14,49 |
| 28 | Kupaonica 10                 | 0  | 3,9   |
| 29 | Lođa 10                      | 0  | 6,5   |
| 30 | Restoran                     | 40 | 60,95 |
| 31 | Terasa restorana             | 0  | 21    |
| 32 | Spremište namirnica          | 0  | 6,79  |
| 33 | Kuhinja                      | 1  | 18,71 |
| 34 | Prostorija za pranje<br>suda | 1  | 5,59  |

Tablica 4. Predviđene vrijednosti broja osoba i površina za 3. kat

| <b>Prostorija</b> | <b>Opis prostorije</b> | <b>Broj ljudi</b> | <b>Površina<br/>[m<sup>2</sup>]</b> |
|-------------------|------------------------|-------------------|-------------------------------------|
| 1                 | WC                     | 0                 | 5,76                                |
| 2                 | Stubište               | 0                 | 33,89                               |
| 3                 | Hodnik                 | 0                 | 28,3                                |
| 4                 | Pretprostor evak.      | 0                 | 7,8                                 |

Tablica 5. Predviđene vrijednosti broja osoba i površina za 4. kat

| <b>Prostorija</b> | <b>Opis prostorije</b> | <b>Broj ljudi</b> | <b>Površina<br/>[m<sup>2</sup>]</b> |
|-------------------|------------------------|-------------------|-------------------------------------|
| 1                 | Hodnik                 | 0                 | 21,15                               |

Potrebno je napomenuti da će se otvaranjem vrata između prostorija 5, 7 i 13 na 1. katu, zajednički prostor koristiti za sjednice na kojima će projektni broj osoba iznositi 120. Zato će se ove 3 prostorije u proračunu ventilacijskih potreba promatrati kao jedna prostorija sa 120 osoba i površine jednake zbroju površina prostorija.

### 3. Proračun ventilacijskih potreba

Kako bi se započelo sa modeliranjem izmjenjivača topline potrebno je izračunati potrebnu količinu vanjskoga zraka za zadovoljavanje higijenskih zahtjeva zgrade. Proračun ventilacijskih potreba škole proveden je sukladno normi EN 16798-1, Metodi 1. Metoda uzima u obzir površinu prostorija te njihovu zaokupljenost. Formula za računanje ukupnih ventilacijskih potreba prema normi glasi:

$$q_{tot} = n \cdot q_p + A_R \cdot q_B \quad (1)$$

gdje su:

|           |  |
|-----------|--|
| $q_{tot}$ | ukupne ventilacijske potrebe prostora [l/s]                          |
| $n$       | projektirani broj osoba koje borave u prostoru                       |
| $q_p$     | potrebna količina zraka po osobi [l/(s·osobi)]                       |
| $A_R$     | površina poda prostora [m <sup>2</sup> ]                             |
| $q_B$     | potrebna količina zraka po površini prostora [l/(s·m <sup>2</sup> )] |

Vrijednost potrebne količine zraka po osobi  $q_p$  odabrana je sukladno normi iz Tablice 6. za kategoriju prostora I, s očekivanim udjelom nezadovoljnih osoba od 15% i iznosi 10 l/(s·osobi). Potrebna količina zraka po površini prostora  $q_B$  odabrana je sukladno normi iz Tablice 7. za zgradu kategorije I sa vrlo malim stupnjem zagađenja zraka i iznosi 0,5 l/(s·m<sup>2</sup>).



Tablica 6. Odabir potrebne količine zraka po osobi  $q_p$ 

| Kategorija prostora | Očekivani postotak nezadovoljnih [%] | Potrebna količina zraka po osobi [l/s·osobi] |
|---------------------|--------------------------------------|--|
| I                   | 15                                   | 10   |
| II                  | 20                                   | 7  |
| III                 | 30                                   | 4  |
| IV                  | 40                                   | 2,5  |

Tablica 7. Odabir potrebne količine zraka po površini prostora  $q_B$ 

| Kategorija | Zgrada sa vrlo malim stupnjem zagađenja [l/s·m <sup>2</sup> ] | Zgrada sa malim stupnjem zagađenja [l/s·m <sup>2</sup> ] | Zgrada sa nemalim stupnjem zagađenja [l/s·m <sup>2</sup> ] |
|------------|---|--|--|
| I          | 0,5   | 1  | 2  |
| II         | 0,35  | 0,7  | 1,4  |
| III        | 0,2   | 0,4  | 0,8  |
| IV         | 0,15  | 0,3  | 0,6  |

Poznavajući potrebne količine zraka  $q_p$  i  $q_B$ , kao i projektne vrijednosti broja osoba po prostorijama i površine prostorija prikazane u prošlom poglavlju (Tablice 1. – 5.), pomoću jednadžbe (1) mogu se izračunati ventilacijske potrebe za svaku prostoriju u zgradi. Proračun ventilacijskih potreba za svaku prostoriju prizemlja prikazan je u Tablici 8. U Tablici 9. prikazane su vrijednosti izračunatih ventilacijskih potreba po katovima zgrade te njihov zbroj koji predstavlja ukupne ventilacijske potrebe zgrade. Vrijednost ukupnih ventilacijskih potreba zgrade iznosi 3289,11 l/s.

Tablica 8. Proračun ventilacijskih potreba za svaku prostoriju prizemlja

| Prostorija | Opis prostorije    | $n \cdot q_p$<br>[l/s] | $A_R \cdot q_B$<br>[l/s] | Ventilacijske potrebe<br>[l/s] |
|------------|--------------------|------------------------|--------------------------|--------------------------------|
| 1          | Vjetrobran         | 0                      | 5,15                     | 5,15                           |
| 2          | Recepcija          | 10                     | 13,97                    | 23,97                          |
| 3          | Okno dizala        | 0                      | 2,34                     | 2,34                           |
| 4          | Stubište           | 0                      | 16,73                    | 16,73                          |
| 5          | WC                 | 0                      | 2,54                     | 2,54                           |
| 6          | Strojarnica        | 0                      | 24,95                    | 24,95                          |
| 7          | Instalacijsko okno | 0                      | 3,28                     | 3,28                           |
| 8          | Spremište          | 0                      | 6,45                     | 6,45                           |
| 9          | Industrija 4.0     | 150                    | 53,06                    | 183,06                         |
| 10         | roboti + MPS       | 150                    | 41,43                    | 171,43                         |
| 11         | Uprava             | 30                     | 20,51                    | 50,51                          |
| 12         | Sanitarije M       | 0                      | 7,16                     | 7,16                           |
| 13         | Sanitarije Ž       | 0                      | 3,8                      | 3,80                           |
| 14         | Vjetrobran         | 0                      | 6,57                     | 6,57                           |
| 15         | Hodnik             | 0                      | 38,69                    | 38,69                          |

Tablica 9. Ventilacijske potrebe po dijelovima zgrade

| Dio zgrade    | Ventilacijske potrebe<br>[l/s] |
|---------------|--------------------------------|
| Prizemlje     | 626,59                         |
| 1.kat         | 1763,25                        |
| 2.kat         | 850,82                         |
| 3.kat         | 37,88                          |
| 4.kat         | 10,58                          |
| <b>Ukupno</b> | <b>3289,11</b>                 |

## 4. Opis korištenih metoda i računalnih alata

Za analizu potencijala pasivnog grijanja Tehničke škole Ruđera Boškovića i provedbu simulacije korišteni su računalni alati TRNSYS i MATLAB. Računalni program TRNSYS korišten je za simulaciju izmjenjivača topline zemlja-zrak, odnosno za izračun promjene temperature zraka njegovim prolaskom kroz izmjenjivač. MATLAB je korišten za generiranje ulaznih parametara potrebnih za provedbu simulacije kao što su vrijeme rada sustava klimatizacije i vrijednosti koeficijenta prijelaza topline između površine zemlje i okoliša. Ovi ulazni parametri su generirani na satnoj razini kroz cijelu godinu.

### 4.1. Računalni program TRNSYS

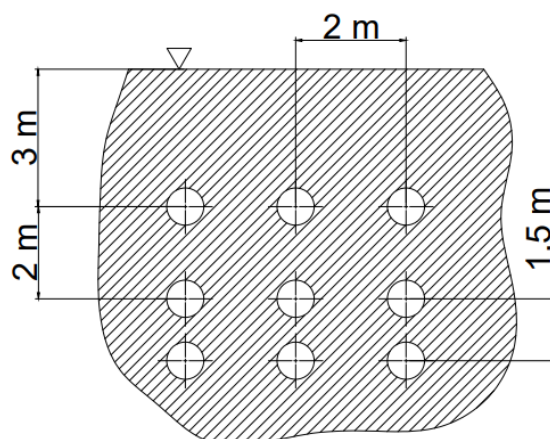
Računalni program TRNSYS (*Transient System Simulation Program*) je program koji se koristi za simulaciju dinamičkih sustava. U praksi je najčešće korišten za simulacije elektroenergetskih i termoenergetskih sustava kao što su HVAC sustavi, niskoenergetske zgrade, solarni sustavi, kogeneracijski sustavi i slično. [4] U ovome radu korišten je za simulaciju horizontalnog podzemnog izmjenjivača topline zemlja-zrak.

Provedba simulacije se odvija u glavnom korisničkom sučelju koje se zove Simulation Studio. U njemu se na jednostavan grafički način povezuju sve komponente potrebne za provedbu simulacije sustava. Svaka komponenta u TRNSYS-u ima svoj individualni naziv koji je definiran kao *Type* sa svojim pripadajućim brojem. Tako je na primjer naziv komponente horizontalnog podzemnog izmjenjivača topline *Type997*. Osim komponente horizontalnog podzemnog izmjenjivača topline, u ovom radu korištene su komponente *Type9e* koja služi za čitanje podataka s vanjske datoteke u svrhu povezivanja sa ulaznim parametrima sustava potrebnim za provedbu simulacije i *Type25c* koja služi za ispis podataka traženih rezultata simulacije u obliku tekstualne datoteke.

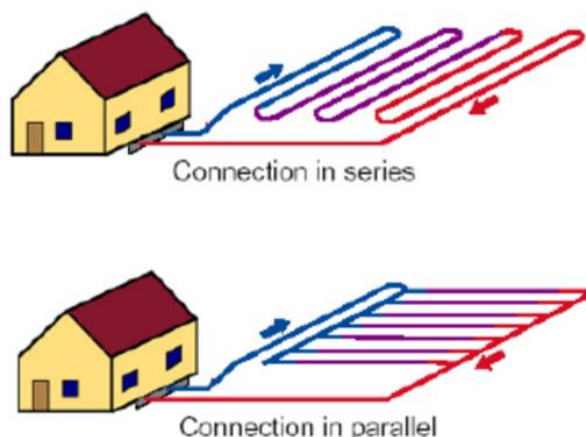
## 4.2. Opis modela horizontalnog izmjenjivača topline u TRNSYS-u

Horizontalni izmjenjivač topline zemlja-zrak u TRNSYS-u modeliran je korištenjem komponente *Type997*. Njome se modelira izmjenjivač topline ukopan u zemlju, a koji se može sastojati od jednog ili više slojeva horizontalnih cijevi. Kroz cijevi struji zrak koji se zagrijava ili hladi uslijed razlike temperatura između zraka i okolnog tla. U modelu je moguće uzeti u obzir promjenjiva svojstva tla po dubini, kao i utjecaj podzemne vode, ukoliko postoji. Također je moguće uzeti u obzir izolaciju, ukoliko je ima iznad izmjenjivača, kao i različite tipove zona iznad izmjenjivača. Različiti tipovi zona iznad izmjenjivača odnose se na slučaj kada bi npr. izmjenjivači bili smješteni ispod neke zgrade ili objekta koji ima temperaturu različitu od temperature okolišnog zraka. U slučaju postojanja zgrade iznad polja izmjenjivača moguće je koristiti model zgrade definiran u TRNSYS-u preko pripadajuće komponente (npr. *Type56*). Povezivanjem komponenti modela zgrade i podzemnog izmjenjivača definira se sustav u kojemu je izmjenjivač topline zakopan ispod zgrade.

Model pretpostavlja da se svaki horizontalni sloj izmjenjivača sastoji od jednakog broja cijevi iste duljine i razmaka, dok vertikalni razmak između slojeva cijevi ne mora biti isti. Primjer takvog izmjenjivača sastavljenog od 9 cijevi podijeljenih u 3 horizontalna sloja prikazan je na Slici 10. Moguće je modelirati serijski ili paralelan spoj cijevi izmjenjivača (primjer na Slici 11.).



Slika 10. Skica rasporeda cijevi podzemnog izmjenjivača topline sastavljenog od 9 cijevi podijeljenih u 3 horizontalna sloja



Slika 11. Serijski i paralelni spoj cijevi izmjenjivača [5]

Glavni ulazni parametri modela, potrebni za definiranje računalne domene, provedbu simulacije te dobivanje krajnjeg rješenja simulacije prikazani su u Tablicama 10. – 11. Vrijednosti parametara, korištenih u ovome radu biti će prikazani u poglavlju 4.4. Vrijednost protoka zraka kroz izmjenjivač je poznata iz ventilacijskih potreba zgrade izračunatih u prethodnom poglavlju (Tablica 8. i 9.), a preostale vrijednosti korištenih parametara bit će prikazane u odlomku 4.5.

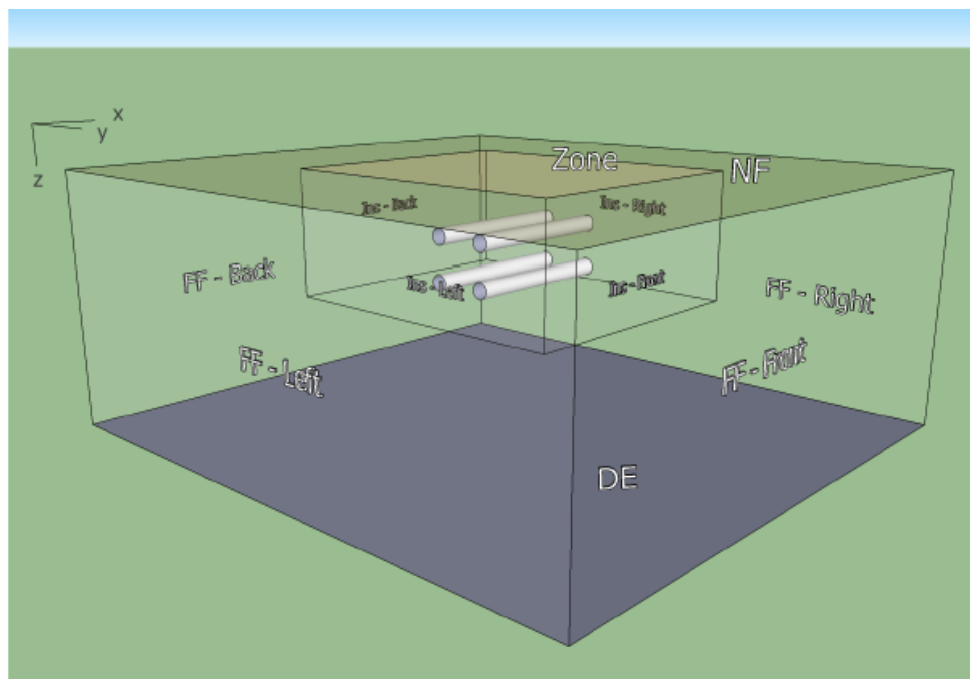
Tablica 10. Ulazni parametri modela

| Redni broj                               | Ulazni parametar                          |
|--|---|
| <b>GEOMETRIJA I IZVEDBA IZMJENJIVAČA</b> |   |
| 1.                                       | Broj cijevi u svakom sloju                |
| 2.                                       | Broj slojeva cijevi                       |
| 3.                                       | Duljina cijevi [m]                        |
| 4.                                       | Unutarnji promjer cijevi [m]              |
| 5.                                       | Vanjski promjer cijevi [m]                |
| 6.                                       | Dubina svakog sloja cijevi [m]            |
| 7.                                       | Horizontalna udaljenost između cijevi [m] |

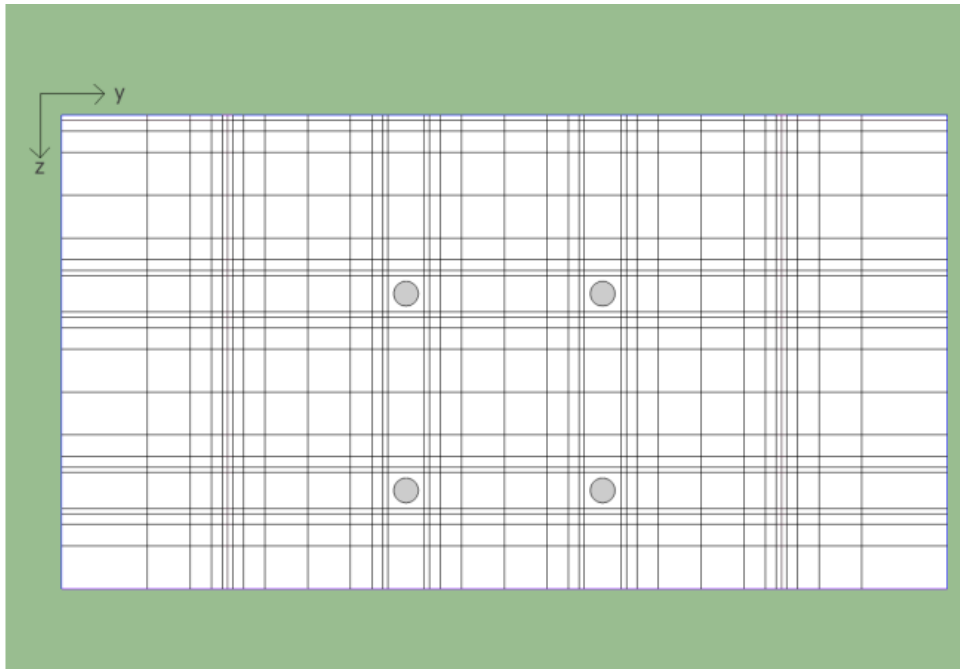
|  |   |
|--|---|
| 8.   | Definiranje serijskog ili paralelnog spoja cijevi izmjenjivača: za paralelni spoj treba kod svake cijevi upisati 0 – što označava da u svaku cijev ulazi protok koji je definiran u ulaznim podacima, a za serijski spoj treba upisati 1 – što označava da je izlazni protok iz jedne cijevi jednak ulaznom protoku u drugu cijev |
| <b>TERMOFIZIKALNA SVOJSTVA TLA/CIJEVI/FLUIDA</b> |   |
| 9.   | Toplinska provodnost cijevi [W/mK]  |
| 10.  | Kontaktni otpor između cijevi i tla [m <sup>2</sup> Kh/kJ]  |
| 11.  | Toplinska provodnost zraka [W/mK]   |
| 12.  | Toplinski kapacitet zraka [kJ/kgK]  |
| 13.  | Gustoća zraka [kg/m <sup>3</sup> ]  |
| 14.  | Viskoznost zraka [Pa·s]   |
| 15.  | Toplinska provodnost tla [W/mK]   |
| 16.  | Toplinski kapacitet tla [kJ/kgK]  |
| 17.  | Gustoća tla [kg/m <sup>3</sup> ]  |
| 18.  | Emisijski faktor površine tla   |
| 19.  | Apsorpcijski faktor površine tla  |
| <b>RUBNI UVJETI</b>                              |   |
| 20.  | Udaljenost granica domene od izmjenjivača   |
| 21.  | Rubni uvjet na granicama domene: upisati broj 1 za uvjet provođenja ili 2 za adijabatski uvjet  |
| 22.  | Izračun promjene temperature na površini tla:<br>1 – korištenjem energetske bilance, 2 – korištenje Kusudine korelacije, 3 – korištenje prosječne temperature tla   |
| 23.  | Temperatura tla na donjoj granici domene (uobičajeno se uzima srednja godišnja temperatura zraka) [°C]  |
| <b>GENERIRANJE RAČUNALNE MREŽE</b>               |   |
| 24.  | Broj čvorova duž svake cijevi   |
| 25.  | Najmanja veličina čvora [m]   |
| 26.  | Faktor rasta čvora  |
| <b>ULAZNI PODACI</b>                             |   |
| 27.  | Ulazna temperatura zraka [°C]   |
| 28.  | Protok zraka [kg/h]   |

|     |   |
|-----|---|
| 29. | Temperatura zraka iznad izmjenjivača topline [°C]                                       |
| 30. | Koeficijent prijelaza topline između površine tla i vanjskog zraka [W/m <sup>2</sup> K] |
| 31. | Fiktivna temperatura neba [°C]  |
| 32. | Ukupno Sunčevo zračenje [kJ/h]  |

Nakon određivanja parametara potrebnih za definiranje cijele računске domene simulacije, program generira 3-D mrežu tla koristeći heksaedarske čvorove s pravokutnim površinama. Generirani čvorovi su manji što su bliže područjima koja nas zanimaju, kao što su granice između cijevi i tla, a veći što su bliže granicama domene. Prikaz računalne domene i njenih granica (označenih kao FF, NF i DE) prikazan je na Slici 12., a primjer generirane mreže prikazan je na Slici 13.



Slika 12. Računalna domena simulacije i njene granice definirane za podzemni izmjenjivač sastavljen od 4 cijevi, podijeljenih u 2 sloja [6]



Slika 13. Y-Z ravnina mreže definirane za podzemni izmjenjivač sastavljen od 4 cijevi, podijeljenih u 2 sloja [6]

## 4.3. Matematički model

Model prijenosa topline između zraka i tla temelji se na jednadžbama energijskih bilanci u diferencijalnom obliku za svaki čvor te se, nakon postavljanja rubnih uvjeta, definirani sustav jednadžbi rješava metodom konačnih razlika. Rješenje daje temperaturne gradijente, izmijenjene toplinske tokove, akumulacije energije i izlaznu temperaturu zraka iz izmjenjivača za svaki definirani vremenski korak simulacije.

### 4.3.1. Jednadžbe energijske bilance

#### 4.3.1.1. Unutarnji čvorovi

Unutarnji čvorovi su definirani kao čvorovi koji ne sadrže cijev i kojima niti jedna stranica nije u istoj ravnini sa granicom domene (Slika 14.). Energijska bilanca za unutarnje čvorove sastoji se isključivo od akumulacije i provođenja između zadanog čvora i njegovih 6 susjednih čvorova te glasi:

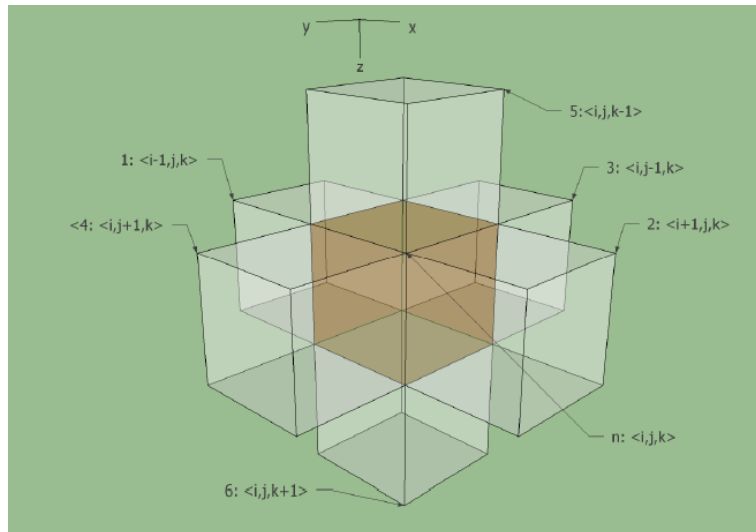


$$\dot{q}_{aku.tla_{i,j,k}} = \sum_{n=1}^6 \dot{q}_{prov.i,j,k,n} \quad (2)$$

gdje su:

$\dot{q}_{aku.tla_{i,j,k}}$  akumulacija energije u čvoru tla [kJ/h],

$\dot{q}_{prov.i,j,k,n}$  provođenjem izmijenjeni toplinski tok promatranog čvora sa susjednim čvorom [kJ/h].



Slika 14. Promatrani čvor i njegovi susjedni čvorovi [6]

Provođenjem izmijenjeni toplinski tok promatranog čvora sa susjednim čvorom  $n$  kroz površinu  $A_{i,j,k,n}$  računa se prema:

$$\dot{q}_{prov.i,j,k,n} = \frac{A_{i,j,k,n}(T_n - T_{i,j,k})}{R''_{i,j,k,n}} \quad (3)$$

gdje su:

|                 |  |
|-----------------|--|
| $A_{i,j,k,n}$   | zajednička površina promatranog čvora $i$ i čvora $n$ kroz koju se izmjenjuje toplinski tok [ $m^2$ ], |
| $T_n$           | temperatura čvora $n$ [ $^{\circ}C$ ],   |
| $T_{i,j,k}$     | temperatura promatranog čvora [ $^{\circ}C$ ],   |
| $R''_{i,j,k,n}$ | specifični toplinski otpor između promatranog čvora $i$ i čvora $n$ [ $m^2Kh/kJ$ ].                    |

Akumulacija energije u pojedinom čvoru tla računa se prema:

$$\dot{q}_{aku.tla_{i,j,k}} = \rho_{tla_{i,j,k}} V_{i,j,k} c_{tla_{i,j,k}} \frac{dT_{i,j,k}}{dt} \quad (4)$$

gdje su:

|                         |  |
|-------------------------|--|
| $\rho_{tla_{i,j,k}}$    | gustoća tla [ $kg/m^3$ ],                              |
| $V_{i,j,k}$             | volumen čvora [ $m^3$ ],                               |
| $c_{tla_{i,j,k}}$       | specifični toplinski kapacitet tla [ $kJ/kgK$ ],       |
| $\frac{dT_{i,j,k}}{dt}$ | brzina promjene temperature čvora u vremenu [ $K/h$ ]. |

### 4.3.1.2. Čvorovi cijevi

#### Strana tla

Energijska bilanca za čvorove tla koji sadrže segmente cijevi identična je kao i za unutarnje čvorove, ali sa dodatnim članom koji predstavlja preneseni toplinski tok sa fluida, kroz stijenku cijevi, u tlo:

$$\dot{q}_{aku.tla_{i,j,k}} = \sum_{n=1}^6 \dot{q}_{prov.i,j,k,n} + \dot{q}_{f_{i,j,k}} \quad (5)$$

gdje je prema navedenom:

$\dot{q}_{f_{i,j,k}}$  preneseni toplinski tok sa fluida, kroz stijenku cijevi, u tlo [kJ/h].

Kako bi se izračunao  $\dot{q}_{f_{i,j,k}}$  potrebno je odrediti ukupni toplinski otpor prolaza topline s fluida, kroz stijenku cijevi, u tlo  $R_{cil}$ :

$$R_{cil} = R_{cil.tla} + R_{cil.cijevi} + R_f \quad (6)$$

gdje su:

$R_{cil.tla}$  toplinski otpor čvora tla [K/W],

$R_{cil.cijevi}$  toplinski otpor kroz stijenku cijevi [K/W],

$R_f$  toplinski otpor sa fluida na stijenku cijevi [K/W].

Toplinski otpori kroz tlo i stijenku izraženi su preko cilindričnih koordinata zbog cilindrične stijenske cijevi i računaju se prema:

$$R_{cil.tla} = \frac{\ln\left(\frac{D_{v,tla}}{D_{v,cijevi}}\right)}{2\pi\Delta x_p\lambda_{tla}} \quad (7)$$

$$R_{cil.cijevi} = \frac{\ln\left(\frac{D_{v,cijevi}}{D_{u,cijevi}}\right)}{2\pi\Delta x_p\lambda_{cijevi}} \quad (8)$$

gdje su:

|                    |  |
|--------------------|--|
| $D_{v,tla}$        | vanjski promjer čvora tla [m],                 |
| $D_{v,cijevi}$     | vanjski promjer cijevi [m],                    |
| $D_{u,cijevi}$     | unutarnji promjer cijevi [m],                  |
| $\Delta x_p$       | duljina čvora [m],                             |
| $\lambda_{tla}$    | toplinska provodnost tla [W/mK],               |
| $\lambda_{cijevi}$ | toplinska provodnost materijala cijevi [W/mK]. |

Kako bi se izračunao toplinski otpor sa fluida na stijenku cijevi  $R_f$  potrebno je odrediti koeficijent prijelaza topline na strani fluida  $\alpha_f$ , kojeg se računa preko Nusseltove značajke. Nusseltova značajka računa se pomoću Reynoldsove i Prandtllove značajke:

$$Re = \frac{\rho_f w_f D_{u,cijevi}}{\mu_f} \quad (9)$$

$$Pr = \frac{c_{p,f}\mu_f}{\lambda_f} \quad (10)$$

$$Nu = \left\{ \begin{array}{l} 3,66 \dots \dots (za Re \leq 2300) \\ 0,023Re^{0,9}Pr^{1/3} \dots \dots (za Re > 2300) \end{array} \right\} \quad (11)$$

gdje su:

|             |  |
|-------------|--|
| $\rho_f$    | gustoća fluida [ $\text{kg/m}^3$ ],                        |
| $w_f$       | brzina strujanja fluida [ $\text{m/s}$ ],                  |
| $\mu_f$     | dinamička viskoznost fluida [ $\text{Pa}\cdot\text{s}$ ],  |
| $c_{p,f}$   | specifični toplinski kapacitet fluida [ $\text{kJ/kgK}$ ], |
| $\lambda_f$ | toplinska provodnost fluida [ $\text{W/mK}$ ].             |

Koeficijent prijelaza topline i toplinski otpor računaju se kao:

$$\alpha_f = \frac{Nu \cdot \lambda_f}{D_{u,cijevi}} \quad (12)$$

$$R_f = \frac{1}{\alpha_f \cdot \pi D_{u,cijevi} \Delta x_p} \quad (13)$$

Konačno, toplinski tok sa fluida, kroz stijenkicu cijevi u čvor tla jednak je:

$$\dot{q}_{f_{i,j,k}} = \frac{T_{f_{i,j,k}} - T_{i,j,k}}{R_{cil}} \quad (14)$$

gdje je:

$T_{f_{i,j,k}}$  temperatura čvora fluida koji se nalazi u čvoru tla  $i,j,k$  [ $^{\circ}\text{C}$ ].

## Strana fluida

Energijska bilanca za čvor koji sadrže fluid sastoji se od akumulacije, prolaza topline s fluida kroz stijenku na tlo i prijenosa topline zbog gibanja fluida iz jednog susjednog čvora u drugi. Akumulacije energije u čvoru fluida jednaka je:

$$\dot{q}_{aku.f_{i,j,k}} = \rho_{f_{i,j,k}} V_{i,j,k} c_{f_{i,j,k}} \frac{dT_{f_{i,j,k}}}{dt} \quad (15)$$

gdje su:

$\dot{q}_{aku.f_{i,j,k}}$  akumulacija energije u čvoru fluida [kJ/h],

$\rho_{f_{i,j,k}}$  gustoća fluida [kg/m<sup>3</sup>],

$c_{f_{i,j,k}}$  specifični toplinski kapacitet fluida [kJ/kgK],

$\frac{dT_{f_{i,j,k}}}{dt}$  brzina promjene temperature čvora fluida u vremenu [K/h].

Korištenjem ulaznog rubnog uvjeta moguće je dobiti temperaturu čvora fluida i krajnje rješenje. Akumulacija energije u čvoru fluida tada se može zapisati pomoću ulazne temperature fluida  $T_{f,ulaz}$  koja tada predstavlja ulazni rubni uvjet:

$$\dot{q}_{aku.f_{i,j,k}} = \dot{m}_f c_{p,f} (T_{f,ulaz} - T_{f_{i,j,k}}) - \dot{q}_{f_{i,j,k}} \quad (16)$$

### 4.3.1.3. Rubni čvorovi i rubni uvjeti

Rubni čvorovi su definirani kao čvorovi kojima je barem 1, a maksimalno 3, stranice u istoj ravnini kao i granica domene. Energijska bilanca rubnih čvorova definira se po istom principu kao kod ostalih čvorova.

Cjelokupna domena računске simulacije je pravokutna prizma. Kao takva, ima definirana 3 različita tipa granice simulacije:

1. granica dubinske zemlje (*Deep Earth*) – donja stranica prizme
2. granica površine zemlje (*Ground*) – gornja stranica prizme
3. granice dalekog polja (*Far Field*) – bočne stranice prizme

#### Granice domene:

#### Donja granica i bočne granice (*Deep Earth i Far Field*)

U nastavku su prikazane energijske bilance za rubni čvor na lijevoj granici domene. Na isti način mogu se definirati energijske bilance i toplinski tokovi za preostale 3 granice domene.

Lijeva granica domene (*Left Far Field*)

$$\dot{q}_{aku.tla_{1,j,k}} = \sum_{n=2}^6 \dot{q}_{prov.1,j,k,n} + \dot{q}_{dp,L_{1,j,k}} \quad (17)$$

Donja granica domene (*Deep Earth*)

$$\dot{q}_{aku.tla_{i,j,Nz}} = \sum_{n=1}^5 \dot{q}_{prov.i,j,Nz,n} + \dot{q}_{dz_{i,j,Nz}} \quad (18)$$

gdje su:

$\dot{q}_{dp,L_{1,j,k}}$  toplinski tok kroz lijevu granicu dalekog polja [kJ/h],

$\dot{q}_{dz_{i,j,Nz}}$  toplinski tok kroz granicu dubinske zemlje [kJ/h].

Za ove rubne čvorove korišteni su rubni uvjeti 1. vrste kojima se zadaje temperatura u svakom trenutku na granicama simulacije te se stoga mogu definirati gore navedeni toplinski tokovi kroz granice simulacije:

$$\dot{q}_{dp,L_{1,j,k}} = \frac{A_{1,j,k,1}(T_{BC}|_{z_k,dan} - T_{1,j,k})}{\frac{\Delta x_{1,j,k}}{2\lambda_{tla_{1,j,k}}}} \quad (19)$$

$$\dot{q}_{dz_{i,j,Nz}} = \frac{A_{i,j,Nz,6}(T_{BC}|_{z_{dz,dan}} - T_{i,j,Nz})}{\frac{\Delta S_{i,j,Nz}}{2\lambda_{tla_{i,j,Nz}}}} \quad (20)$$

gdje je:

$T_{BC}|_{z_{dz,dan}}$  temperatura tla na dubini  $z$  na dan u godini  $dan$ , odnosno temperatura u svakom trenutku na granicama simulacije



Za krajnje rješenje potrebno je definirati rubne uvjete temperature na granicama simulacije  $T_{BC}|_{z,dan}$ . Taj temperaturni profil tla se definira koristeći Kusuda korelaciju po kojoj neporemećena temperatura tla ovisi o dubini  $z$  i dobu godine  $dan$ :

$$T_{BC}|_{z,dan} = T_{pros} - T_{amp} \cdot \exp\left(-z \left(\frac{\pi}{365\alpha_{tla}}\right)^{0,5}\right) \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{365} \left(dan - dan_{min} - \frac{z}{2} \left(\frac{365}{\pi\alpha_{tla}}\right)^{0,5}\right)\right) \quad (21)$$

gdje su:

|                |  |
|----------------|--|
| $T_{pros}$     | prosječna temperatura površine (približno jednaka prosječnoj godišnjoj temperaturi zraka) [°C],                                  |
| $T_{amp}$      | godišnja amplituda temperature površine [(maksimalna godišnja temperatura zraka – minimalna godišnja temperatura zraka)/2] [°C], |
| $\alpha_{tla}$ | toplinska difuzivnost tla [m <sup>2</sup> /s],   |
| $dan_{min}$    | dan u godini sa minimalnom temperaturom površine [dan].  |

Potrebno je naglasiti da su u ovom radu za prosječnu temperaturu površine i godišnju amplitudu temperature površine korištene temperature zraka, a ne tla, čime se uvode određena odstupanja temperaturnog profila neporemećenog tla. [7] Vrijednosti temperature zraka dobivene su iz podataka za tipičnu meteorološku godinu za grad Zagreb.

### Gornja granica (*Ground*)

Energijska bilanca za rubni čvor na granici površine zemlje definirana je na način da se pretpostavlja ravnoteža između provođenjem izmijenjenog toplinskog toka kroz površinu zemlje s konvektivnim toplinskim tokom između površine i okoliša, toplinskim tokom

izmijenjenim zračenjem s površine na okoliš i ukupnim sunčevim zračenjem (solarno, difuzno i reflektirano) na površinu:

$$\dot{q}_{prov.pov.1,j,k} + \dot{q}_{konv.1,j,k} + \dot{q}_{zrač.tla\ i\ okoliša_{1,j,k}} + \dot{q}_{uk.sunč.zrač.1,j,k} = 0 \quad (22)$$

Provođenjem izmijenjeni toplinski tok kroz površinu definira se kao:

$$\dot{q}_{prov.pov.1,j,k} = \frac{A_{i,j,1,1}(T_{i,j,1} - T_{BC}|_{0,dan})}{\frac{\Delta z_{i,j,1}}{2\lambda_{tla_{i,j,1}}}} \quad (23)$$

Konvektivno izmijenjeni toplinski tok između površine i okoliša:

$$\dot{q}_{konv.1,j,k} = \alpha(T_{ok} - T_{BC}|_{0,dan}) \quad (24)$$

gdje su:

$\alpha$  koeficijent prijelaza topline sa površine zemlje na okoliš [W/m<sup>2</sup>K],

$T_{ok}$  temperatura okoliša [°C].

Koeficijent prijelaza topline zračenjem i toplinski tok izmijenjen zračenjem sa površine na okoliš računa se kao:

$$\alpha_z = \sigma \varepsilon_z (T_{BC}|_{0,dan} + T_{neba})(T_{BC}|_{0,dan} + T_{neba})^3 \quad (25)$$

$$\dot{q}_{zrač.tla\ i\ okoliša_{1,j,k}} = \alpha_z (T_{neba} - T_{BC}|_{0,dan}) \quad (26)$$

gdje su:

|                 |  |
|-----------------|--|
| $\alpha_z$      | koeficijent prijelaza topline zračenjem između površine zemlje i okoliša [W/m <sup>2</sup> K], |
| $\varepsilon_z$ | emisijski faktor površine zemlje,  |
| $\sigma$        | Stefan – Boltzmannova konstanta,   |
| $T_{neba}$      | fiktivna temperatura neba [°C].  |

Toplinski tok izmijenjen ukupnim sunčevim zračenjem (direktno, difuzno i reflektirano) na površinu zemlje jednak je:

$$\dot{q}_{uk.sunč.zrač.1,j,k} = a_z R \quad (27)$$

gdje su:

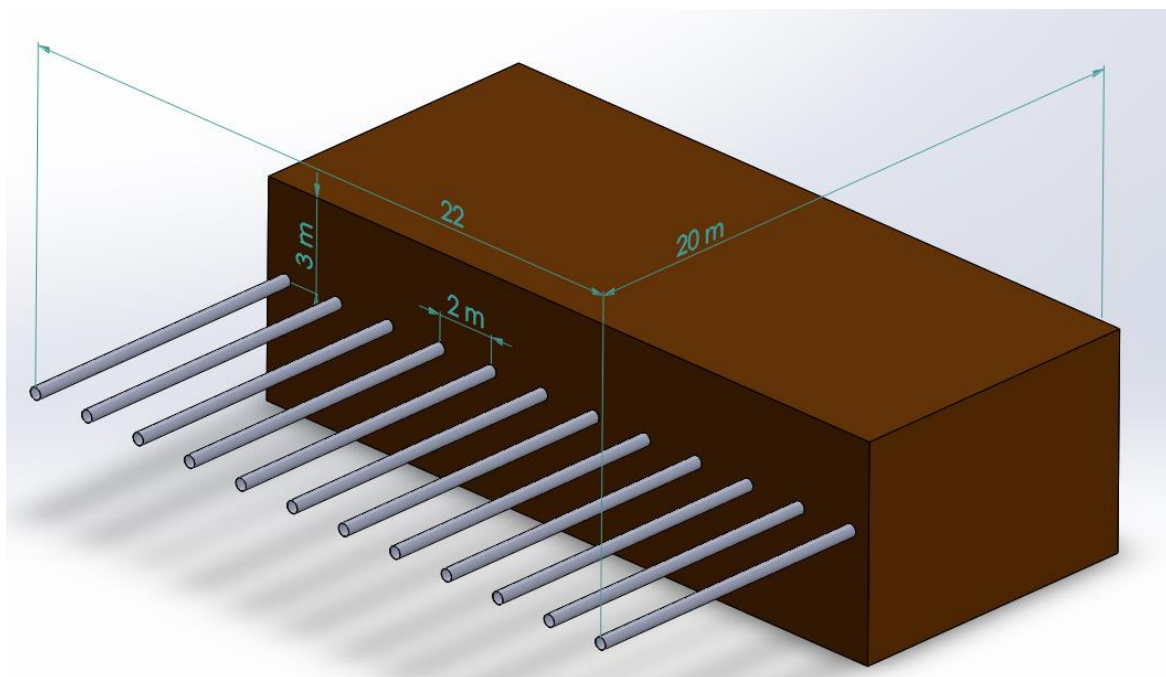
|       |  |
|-------|--|
| $a_z$ | apsorpcijski faktor površine zemlje,                 |
| $R$   | ukupna dozračena energija na površinu zemlje [kJ/h]. |

Kako je ranije spomenuto, sa sada određenim energijskim bilancama za svaki čvor i zadanim rubnim uvjetima, dobiva se rješenje sustava jednadžbi za svaki vremenski korak simulacije koristeći metodu konačnih razlika.

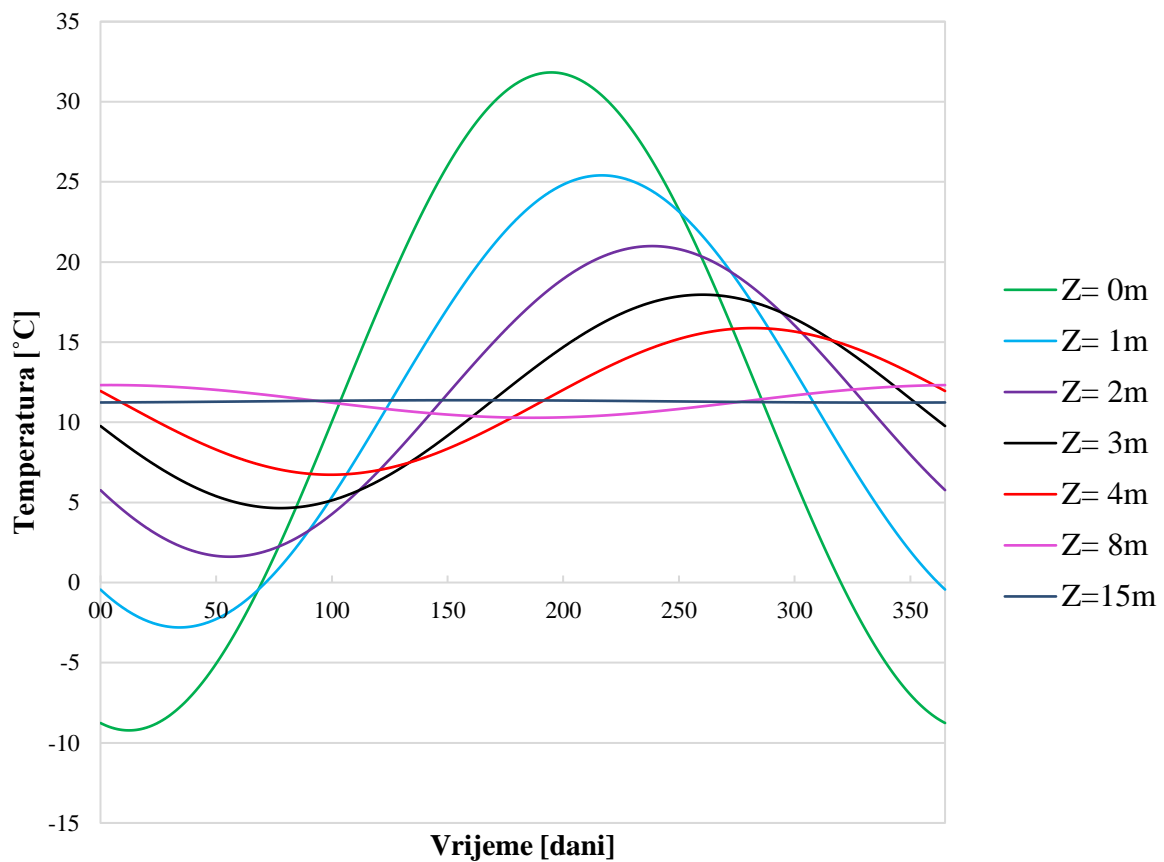
## 4.4. Ulazni parametri

### 4.4.1. Geometrija izmjenjivača

Izmjenjivač analiziran u ovom radu sastoji se od paralelnog snopa 12 cijevi duljine 20 m, zakopanih na dubinu od 3 m s horizontalnim razmakom između cijevi od 2 m. Izmjenjivač zauzima ukupnu površinu zemlje od 448 m<sup>2</sup>. Skica izmjenjivača u prostoru prikazana je na Slici 15. Razmak između cijevi od 2 m odabran je kako bi se što više smanjio međusobni utjecaj susjednih cijevi na izmjenu topline s tlom, a dubina od 3 m odabrana je sukladno vrijednostima neporemećene temperatura tla tijekom godine na toj dubini. Te vrijednosti određene su preko Kusuda korelacije (21) i prikazane su na Slici 16. Vidljivo je da neporemećena temperatura tla tijekom godine sve manje varira sa porastom dubine, od površine na kojoj temperatura prati oscilacije temperature zraka, do dubine od 15 m na kojoj temperatura poprima stabilnu vrijednost jednaku srednjoj godišnjoj temperaturi zraka. Dubina od 3 m odabrana je s ciljem da se smanji utjecaj vanjskih čimbenika, kao što su temperatura zraka i dozračena sunčeva energija, a koji utječu na oscilacije temperature tla po dubini i u vremenu. Drugi bitan čimbenik odabira dubine bila je cijena iskopa koja s porastom dubine raste. Cilj je postići kompromis između cijene iskopa i utjecaja vanjskoga okoliša .



Slika 15. Skica položaja modeliranog izmjenjivača



Slika 16. Neporemećena temperatura tla po dubini kroz godinu izračunata prema Kusudinoj korelaciji

Dimenzije i broj cijevi odabrani prema preporukama proizvođača na način da za zadani protok, određen iz ventilacijskih potreba zgrade, brzina u cijevima ne prelazi 3 m/s. Odabrane dimenzije cijevi su prema tome prikazane u Tablici 11.

Tablica 11. Dimenzije cijevi izmjenjivača topline [8]

| Vanjski promjer $D_v$<br>[mm] | Unutarnji promjer $D_u$<br>[mm] | Debljina stijenke $s$<br>[mm] |
|-------------------------------|---------------------------------|-------------------------------|
| 400                           | 380,4                           | 9,8                           |

#### 4.4.2. Termofizikalna svojstva zraka, tla i cijevi

Termofizikalna svojstva zraka, tla i polietilenskih cijevi prikazana su u Tablicama 12. – 14. i smatraju se konstantnima. Svojstva tla su odabrana iz izmjerenih vrijednosti uzoraka tla uzetih na području grada Zagreba.

Tablica 12. Termofizikalna svojstva zraka [9]

|  |            |
|--|------------|
| Specifični toplinski kapacitet $c_p$ [J/kgK] | 1005       |
| Gustoća $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]          | 1,21       |
| Toplinska provodnost $\lambda$ [W/mK]        | 0,0252     |
| Dinamička viskoznost fluida $\mu$ [Pas]      | 0,00001795 |

Tablica 13. Termofizikalna svojstva polietilena [9]

|                                       |      |
|---------------------------------------|------|
| Toplinska provodnost $\lambda$ [W/mK] | 0,28 |
|---------------------------------------|------|

Tablica 14. Termofizikalna svojstva tla [7], [9], [10]

|   |      |
|---|------|
| Specifični toplinski kapacitet $c$ [J/kgK]    | 1450 |
| Gustoća $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]           | 1950 |
| Toplinska provodnost $\lambda$ [W/mK]         | 2    |
| Emisijski faktor površine tla $\varepsilon_z$ | 0,66 |
| Apsorpcijski faktor površine tla $a_z$        | 0,34 |

#### 4.4.3. Koeficijent prijelaza topline između površine zemlje i okoliša

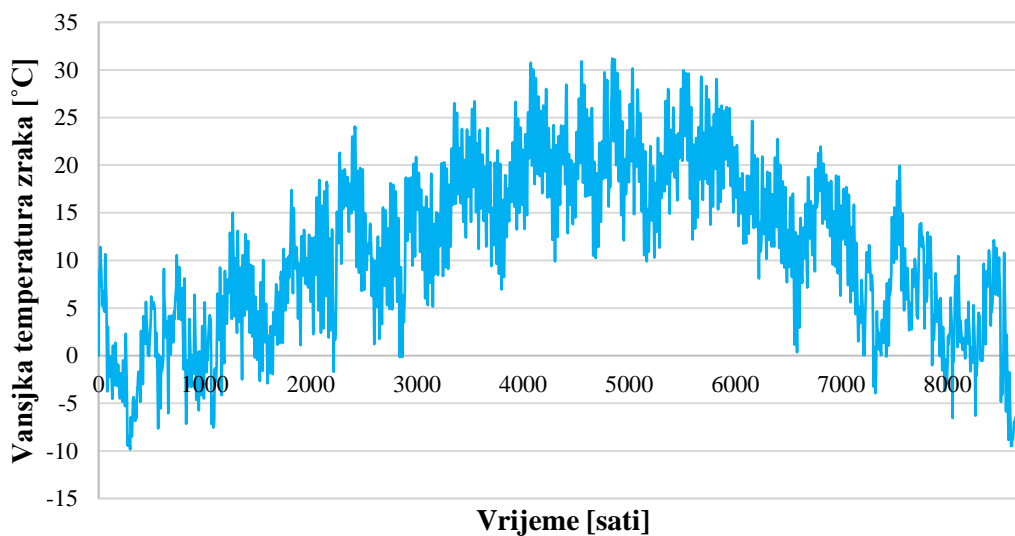
Konvektivno izmijenjeni toplinski tok između površine zemlje i okoliša odvija se slobodnom konvekcijom. Za vrijednost koeficijent prijelaza topline između površine zemlje i okoliša  $\alpha$  uzeta je vrijednost od 25 W/m<sup>2</sup>K te ju se smatra konstantnom tijekom cijele godine. [11]

#### 4.4.4. Pogonski režim

Temeljem DIN V 18599-10 određeno je da se prostor škole koristi 5 dana u tjednu od 8:00 do 20:00 sati, ali da je sustav ventilacije uključen od 6:00 do 20:00 sati. Izvan toga vremena pretpostavljeno je da je sustav ventilacije ne radi.

#### 4.4.5. Meteorološki podaci

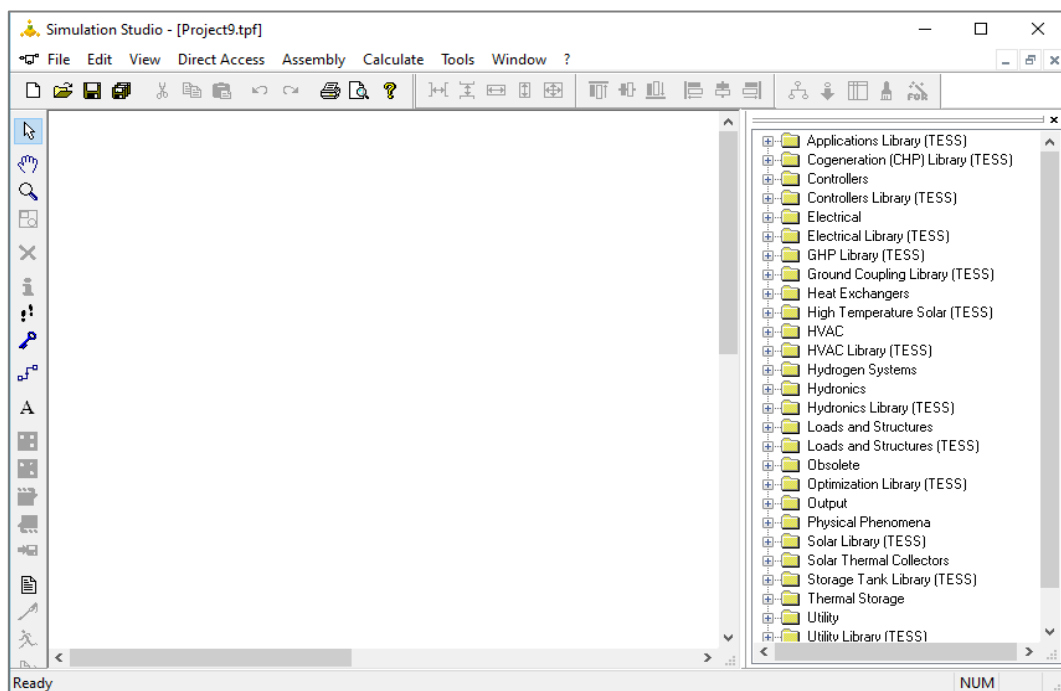
Za provedbu simulacije korišteni su meteorološki podaci na satnoj bazi za tipičnu meteorološku godinu u gradu Zagrebu, pri čemu su u obzir uzeti podaci o vanjskoj temperatura zraka (Slika 17.), fiktivnoj temperaturi neba te ukupnom sunčevom zračenju na površinu zemlje.



Slika 17. Temperatura vanjskog zraka za tipičnu meteorološku godinu grada za grad Zagreb

## 4.5. Opis rada u TRNSYS korisničkom sučelju Simulation Studio

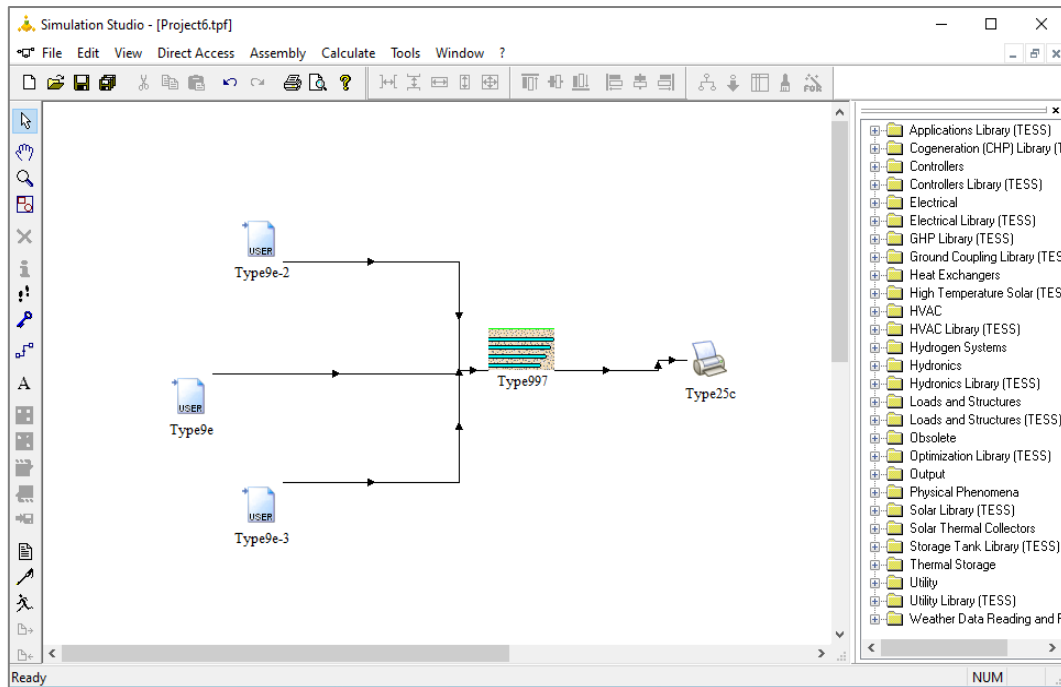
U TRNSYS-ovom sučelju Simulation Studio povezuju se komponente sustava potrebne za provedbu i sama provedba simulacije u svrhu dobivanja rezultata. Pokretanjem programa otvara se korisničko sučelje prikazano na Slici 18. Na desnoj strani sučelja nalazi se izbornik svih dostupnih TRNSYS komponenti simulacije, na lijevoj strani alatna traka te u sredini glavna radna površina programa na kojoj se povezuju željene komponente sustava.



Slika 18. Početni zaslon korisničkog sučelja Simulation Studio

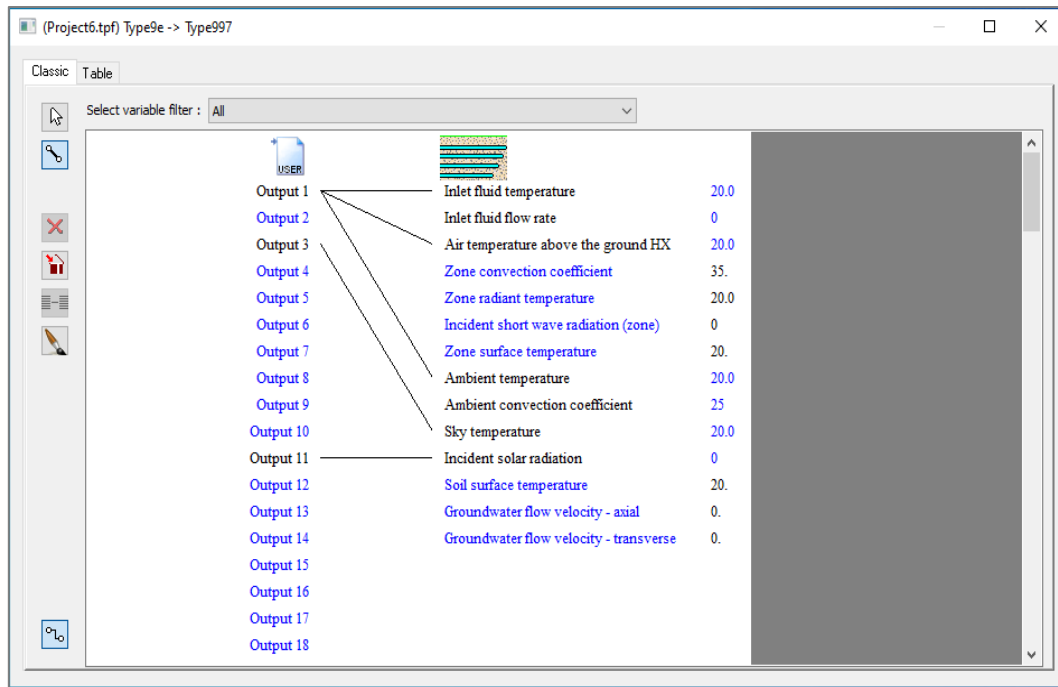
U sklopu ovoga rada korištene i povezane su 3 komponente unutar korisničkog sučelja Simulation Studio: *Type9e*, *Type997* i *Type25c* kako je prikazano na Slici 19. Komponente su povezane alatom *Link* smještenim u alatnoj traci s lijeve strane sučelja. Pomoću njega jednostavno se povezuju izlaz jedne komponente s ulazom druge komponente.





Slika 19. Prikaz korištenih komponenti unutar sučelja Simulation Studio

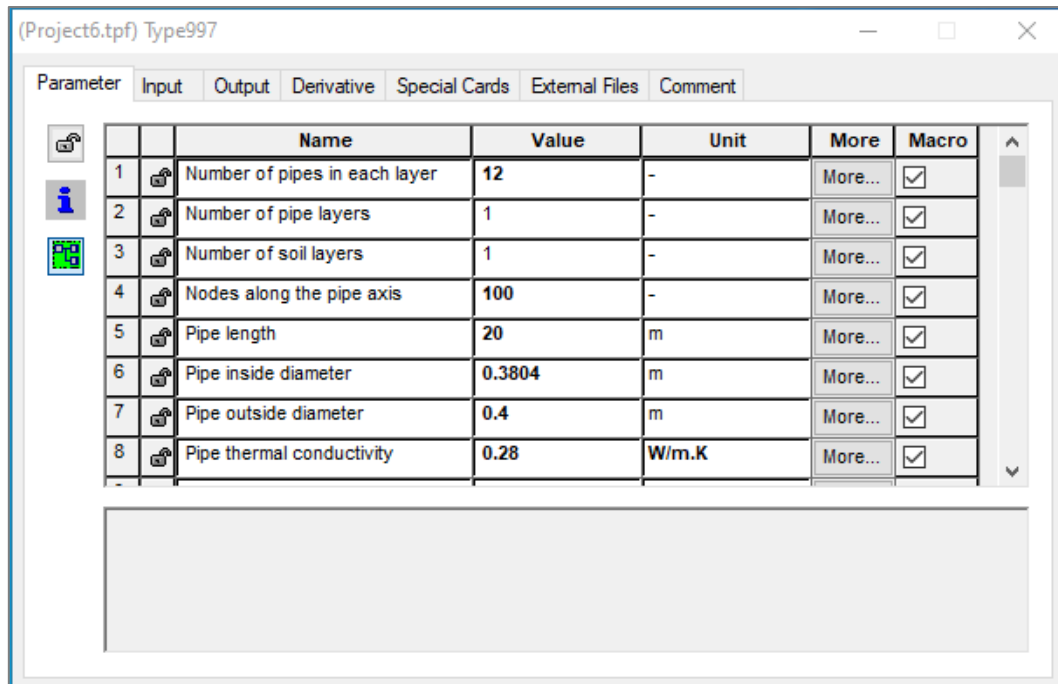
Do komponente *Type9e*, koja služi sa čitanje podataka sa vanjske datoteke, dolazi se preko *Utility* → *Data Readers* → *Generic Data Files* → *Expert Mode* → *Free Format* → *Type9e* s desne strane sučelja. Komponenta *Type9e* u ovome radu je korištena za očitavanje meteoroloških podataka, podataka o pogonskom režimu sustava i vrijednosti koeficijenta prijelaza topline između površine zemlje i okoliša na satnoj razini kroz cijelu godinu. Ove komponente povezane su sa komponentom horizontalnog podzemnog izmjenjivača topline *Type997* do koje se dolazi preko *GHP Library* → *Ground Heat Exchangers* → *Horizontal* → *Type997*. Dvoklikom na strelicu koja povezuje ove komponente otvara se izbornik u kojemu se odabire koji će izlazni parametri iz komponente *Type9e* biti povezani sa ulaznim parametrima komponente *Type997*. Na Slici 20. prikazan je takav izbornik u kojemu se povezuju meteorološki podaci vanjske temperature zraka, fiktivne temperature neba te ukupno dozračene sunčeve energije na površinu zemlje s ulaznim parametrima izmjenjivača. Na isti način povezuju se i ostali podaci kako bi se definirali ulazni parametri bez kojih se ne može provesti simulacija navedeni u poglavlju 4.2.



Slika 20. Izbornik povezivanja izlaznih meteoroloških podataka sa ulaznim parametrima izmjenjivača

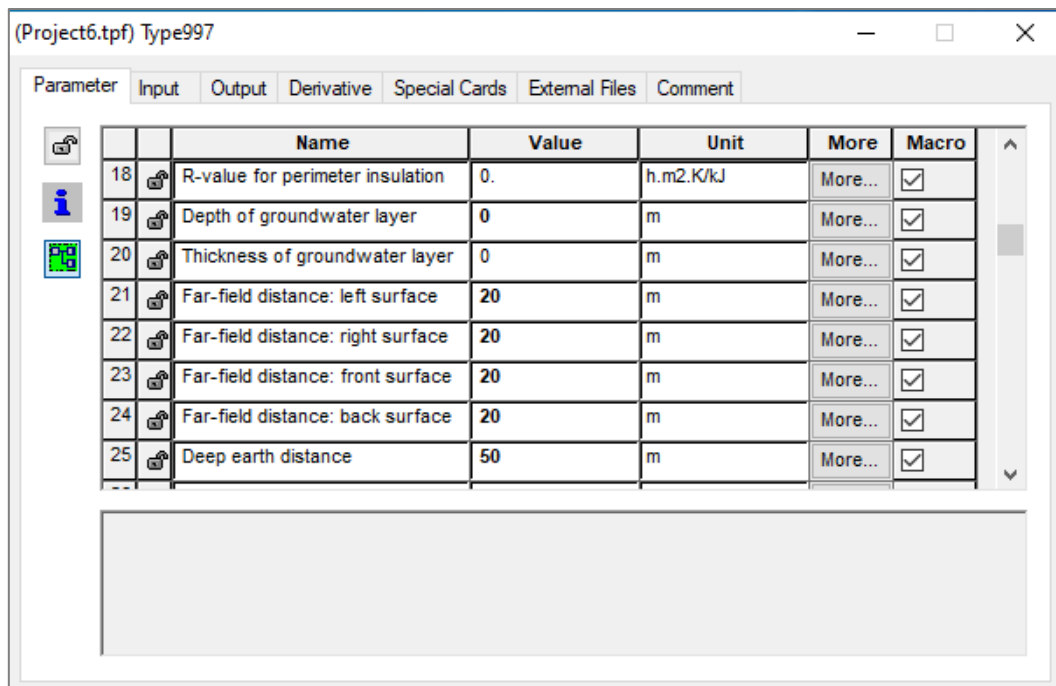
Dvoklikom na komponentu podzemnog izmjenjivača *Type997* otvara se izbornik u kojemu se upisuju ulazni parametri potrebni za definiranje računске domene, provedbu te dobivanje krajnjeg rješenja simulacije koji su opisani u prethodnim poglavljima.

Broj, duljina i dimenzije cijevi, broj slojeva tla, broj čvorova duž cijevi i toplinska provodnost materijala cijevi definirani su i prikazani na Slici 21. Broj slojeva tla je uzet kao 1, odnosno na taj način je definirano da tlo ima konstantna termodinamička svojstva po dubini.



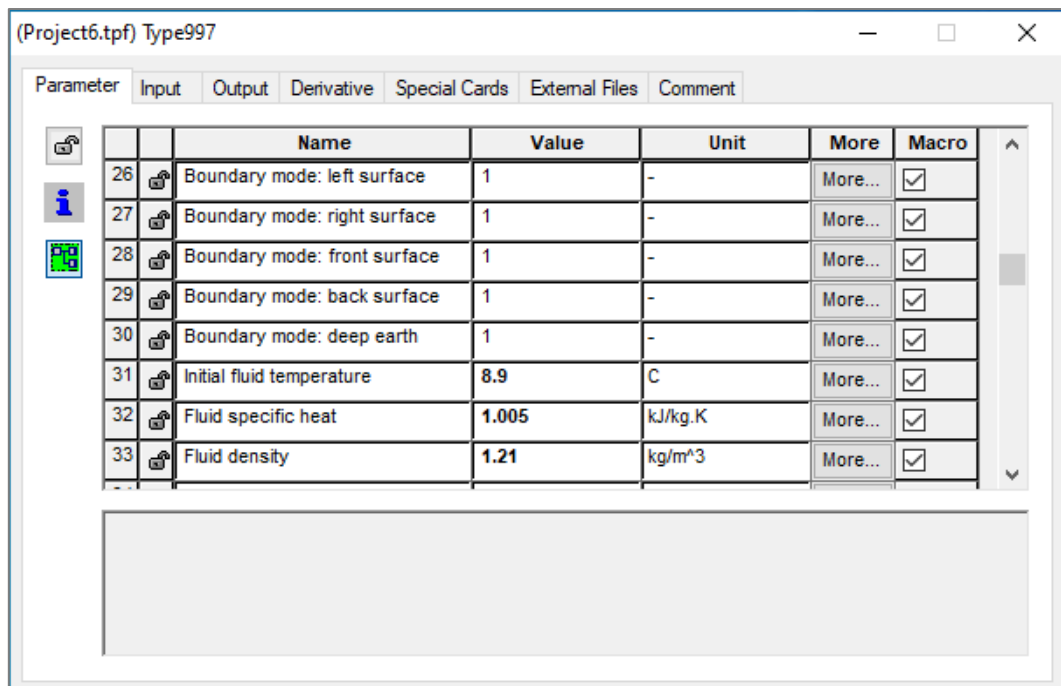
Slika 21. Izbornik definiranja ulaznih parametara

Vrijednosti udaljenosti granica simulacije dubinske zemlje i dalekog polja, objašnjenih u poglavlju 4.3.1.3., od cijevi izmjenjivača prikazane su na Slici 22. Pomoću tih dimenzija, dimenzija duljine, broja i rasporeda cijevi te dubine na koju su cijevi zakopane potpuno su definirane dimenzije domene simulacije. Dobivena računaska domena simulacije ima oblik pravokutne prizme.



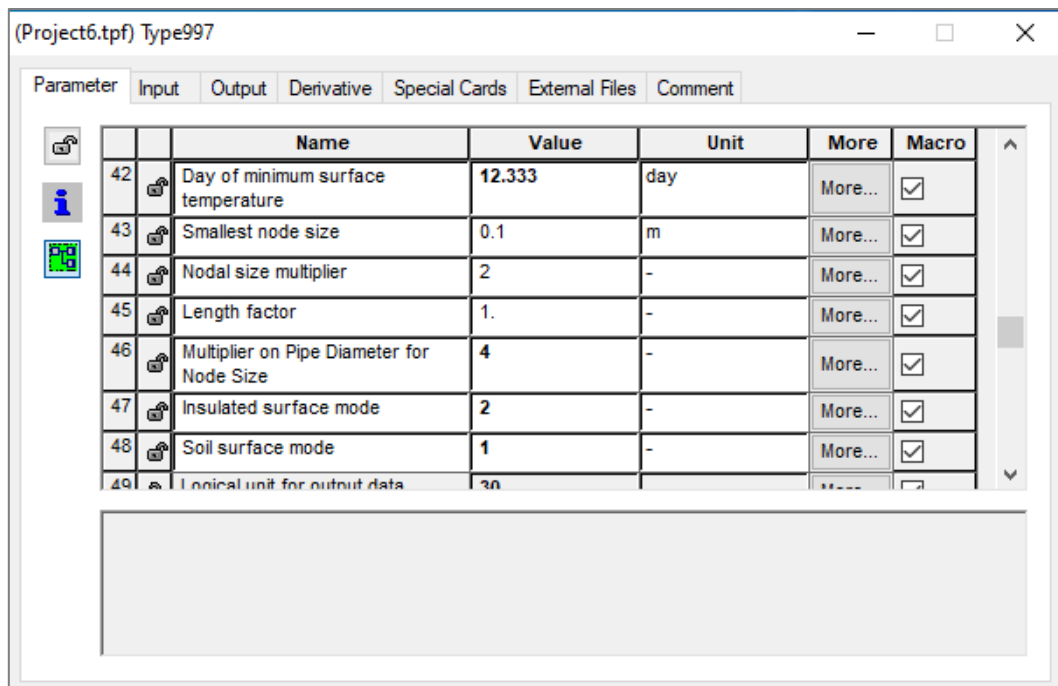
Slika 22. Izbornik definiranja ulaznih parametara

Za provedbu simulacije potrebno je definirati rubne uvjete na granicama simulacije. Kako je spomenuto u poglavlju 4.3.1.3., rubni uvjeti na granicama dubinske zemlje i dalekog polja definirani su pomoću Kusuda korelacije (21) preko koje definiramo temperature na granicama te posljedično i toplinske tokove kroz granice simulacije. Taj tip rubnog uvjeta je u TRNSYS-u nazvan *Conductive Mode* i u izborniku definiranja parametara ga se označava sa brojkom 1 kao što je prikazano na Slici 23. gdje su također prikazane vrijednosti termofizikalnih svojstava zraka.



Slika 23. Izbornik definiranja ulaznih parametara

Granični uvjet površine zemlje u poglavlju 4.3.1.3. je definirana preko energijske ravnotežne bilance između provođenjem izmijenjenog toplinskog toka kroz površinu zemlje s konvektivnim toplinskim tokom između površine i okoliša, toplinskim tokom izmijenjenim zračenjem između površine i okoliša i ukupnim sunčevim zračenjem na površinu. Taj tip rubnog uvjet je u TRNSYS-u nazvan *Energy Balance* i u izborniku definiranja parametara ga se označava sa brojkom 1 kao što je prikazano na Slici 24. Na njoj su također prikazane vrijednosti dana minimalne temperature površine te vrijednosti potrebne za definiranje veličine čvorova, odnosno za definiranje 3-D mreže simulacije sastavljene od tih čvorova.



Slika 24. Izbornik definiranja ulaznih parametara

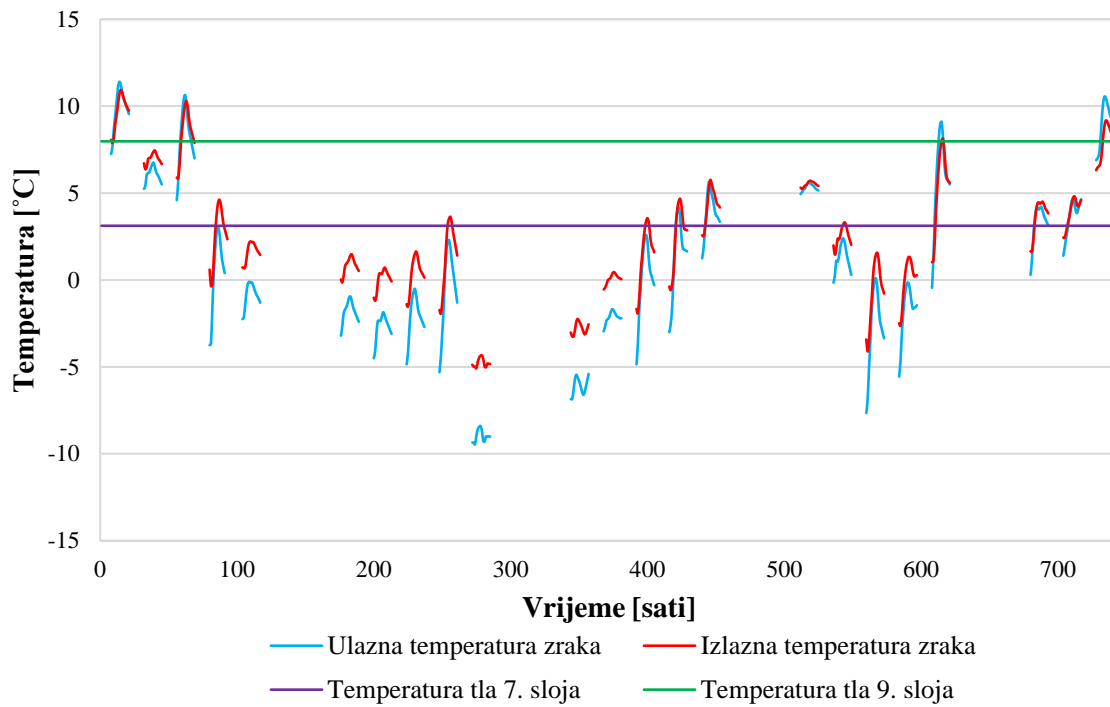
Sa definiranim ulaznim parametrima, komponentu izmjenjivača *Type997* povezuje se s komponentom *Type25c* do koje se dolazi preko *Output* → *Printer* → *Unformatted* → *No Units* → *Type25c*. Ova komponenta služi za ispis podataka traženih rezultata simulacije u obliku tekstualne datoteke koji su u ovom radu temperatura na izlazu iz podzemnog izmjenjivača topline. Nakon definiranja svih ulaznih parametara i povezivanja komponenti sustava, pokreće se simulacija te se dobivaju traženi rezultati temperature na izlazu iz podzemnog izmjenjivača na satnoj razini kroz cijelu godinu. Na temelju tih rezultata moguće je izračunati potencijal uštede energije pasivnim grijanjem.

## 5. Rezultati simulacije i proračun uštede toplinske i električne energije

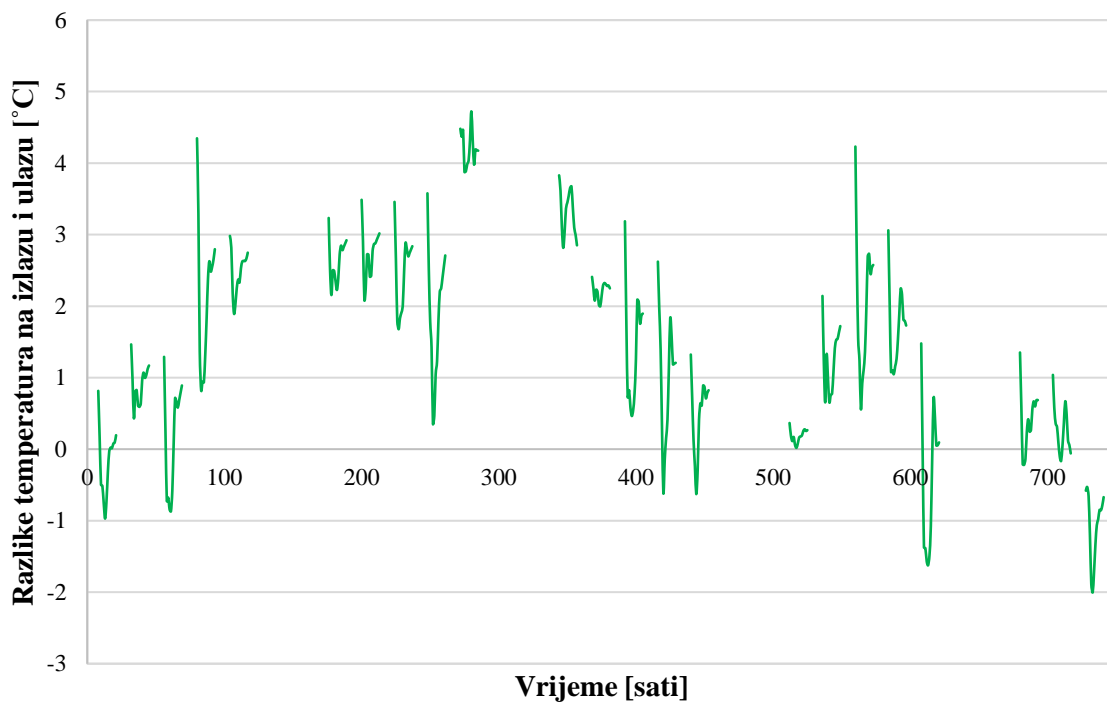
### 5.1. Rezultati simulacije

Nakon provedene računalne simulacije dobiveni su rezultati temperature zraka na izlazu iz podzemnog izmjenjivača topline na satnoj razini kroz godinu i prosječni temperaturni profili tla po dubini za domenu simulacije. Domena je od površine prema dubini tla podijeljena na 17 horizontalnih slojeva od kojih se izmjenjivač nalazi u 8. sloju. Rezultati temperature zraka na izlazu uspoređeni su s temperaturom zraka na ulazu u izmjenjivač, odnosno s vanjskom temperaturom zraka te s prosječnim temperaturama slojeva tla iznad i ispod izmjenjivača (7. i 9. sloj). Rezultati su prikazani na Slici 25. za mjesec siječanj u vremenu rada sustava mehaničke ventilacije. Vidljivo je da je za većinu sati temperatura zraka na izlazu iz izmjenjivača viša od temperature na ulazu, što znači da je došlo do zagrijavanja zraka prolaskom kroz izmjenjivač. Razlog tomu je što je vanjska temperatura zraka niža od temperature tla koje okružuje cijevi izmjenjivača, što potvrđuju prosječne vrijednosti temperatura slojeva tla oko izmjenjivača. U satima kada je temperatura zraka viša od temperature tla dolazi do hlađenja zraka, odnosno temperatura zraka na izlazu je u tim satima niža od temperature zraka na ulazu u izmjenjivač.

Na Slici 26. prikazane su temperaturne razlike zraka između izlaza i ulaza u izmjenjivač za mjesec siječanj. One u većini mjeseca imaju pozitivne vrijednosti, što znači da u većini mjeseca dolazi do porasta temperature zraka prolaskom kroz izmjenjivač.



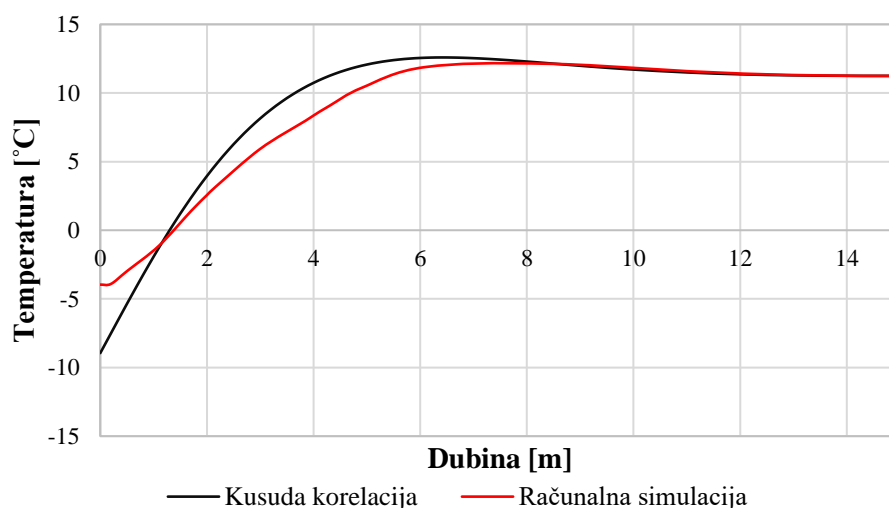
Slika 25. Usporedba izlazne temperature zraka s temperaturom zraka na ulazu i prosječnim temperaturama slojeva tla oko izmjenjivača za mjesec siječanj



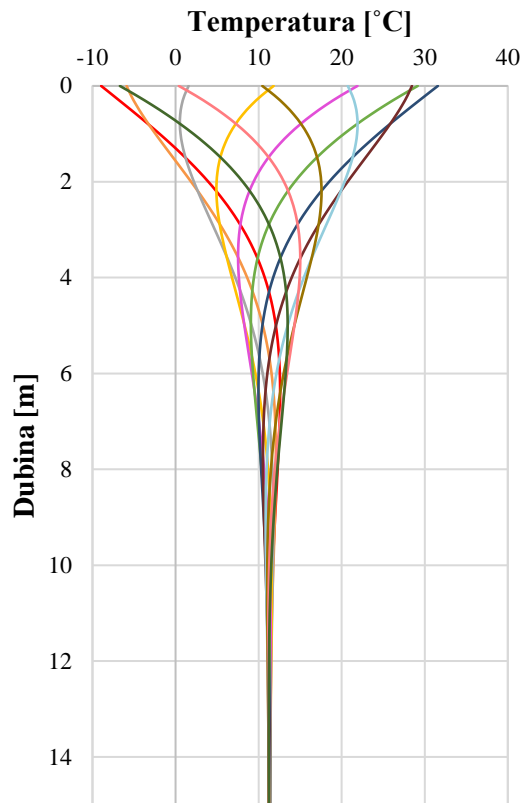
Slika 26. Razlike između temperatura zraka na izlazu i ulazu u izmjenjivač za mjesec siječanj



Rezultatima računalne simulacije dobiveni su prosječni temperaturni profili tla po dubini za domenu simulacije za svaki mjesec. Ti temperaturni profili uspoređeni su s profilima neporemećene temperature tla razvijenim pomoću Kusuda korelacije (21). Usporedba je napravljena kako bi se vidio utjecaj vanjskih čimbenika poput vanjske temperature koji znatno utječu na profil temperature tla. Profili su prikazani i uspoređeni na Slikama 27. – 29. Na slikama su jasno vidljive razlike koje su najviše izražene između površine tla i dubine od 6 m. Daljnjim porastom dubine dolazi do smanjenja razlika i ustaljenja temperature, koja je jednaka srednjoj godišnjoj temperaturi zraka, na 15 m dubine. Ove razlike se javljaju zbog utjecaja vanjskih čimbenika kao što su dozračena sunčeva energija na površinu te izmijenjeni toplinski tokovi konvekcijom i zračenjem između površine i okoliša, a koji su zadani preko rubnog uvjeta postavljenog na površini tla. Utjecaj podzemnog izmjenjivača također je neizostavan čimbenik koji svojim radom utječe na temperaturu okolnoga tla na način da ga zagrijava ili hladi zbog razlike u temperaturama zraka u cijevima i tla.

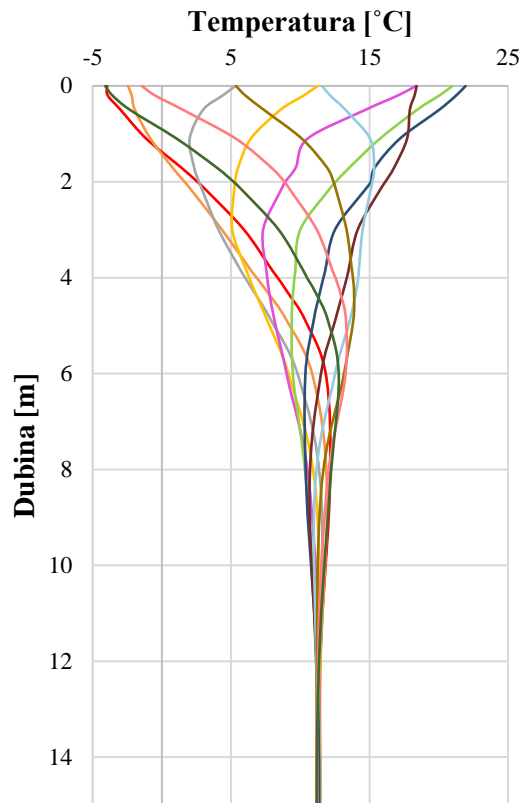


Slika 27. Usporedba temperaturnog profila tla računalne simulacije i profila neporemećene temperature tla prema Kusudi za mjesec siječanj



— Siječanj      — Veljača      — Ožujak  
 — Srpanj      — Kolovoz      — Rujan

Slika 28. Temperaturni profil tla razvijen pomoću Kusuda korelacije

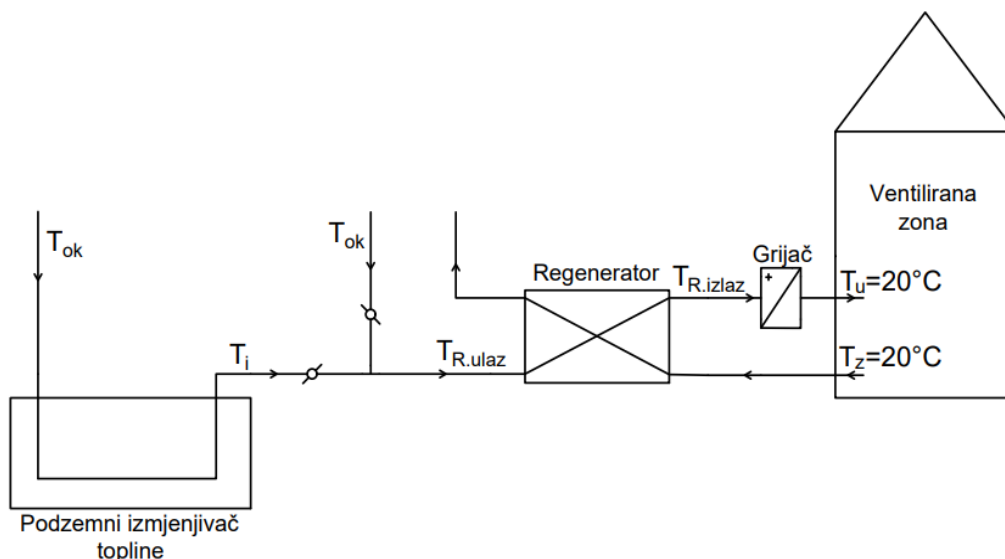


— Travanj      — Svibanj      — Lipanj  
 — Listopad      — Studeni      — Prosinac

Slika 29. Temperaturni profil tla dobiven računalnom simulacijom

## 5.2. Proračun uštede toplinske energije

Kako bi se izračunala potrebna toplinska energija i ušteda toplinske energije na grijaču klimatizacijske jedinice uslijed korištenja podzemnog izmjenjivača topline, odabrane su komponente sustava mehaničke ventilacije. Također su odabrane projektne vrijednosti temperature ventiliranih zona i temperature zraka koji se ubacuje u ventilirani prostor. Na Slici 30. prikazana je pojednostavljena shema pretpostavljenog sustava mehaničke ventilacije. Sustav se sastoji od podzemnog izmjenjivača topline u kojemu dolazi do predgrijavanja zraka, regeneratora pomoću kojega se vrši povrat topline iz ventiliranog prostora te grijača klimatizacijske jedinice koji dodatno zagrijava zrak na temperaturu ubacivanja. U slučaju kada ne dolazi do zagrijavanja vanjskoga zraka prolaskom kroz podzemni izmjenjivač, sustavom zaklopki prekida se dovod zraka na izlazu iz izmjenjivača te se prema ulazu u regenerator propušta vanjski zrak bez prethodnog prolaska kroz podzemni izmjenjivač. Na taj se način podzemni izmjenjivač isključuje iz rada sustava ventilacije u vremenu kada ne dolazi do željenog efekta zagrijavanja vanjskoga zraka prolaskom kroz njega. Odabrani projektni parametri temperatura i stupnja povrata topline regeneratora prikazani su Tablici 14.



Slika 30. Pojednostavljena shema pretpostavljenog sustava mehaničke ventilacije

Tablica 15. Vrijednosti projektnih parametara

| Temperatura ventilirane zone $T_z$ [°C] | Temperatura zraka ubacivanog u ventiliranu zonu $T_u$ [°C] | Stupanj povrata topline regeneratora |
|---|--|--------------------------------------|
| 20                                      | 20   | 0,8                                  |

Stupanj povrata topline regeneratora definiran je kao:

$$\eta_R = \frac{T_{R.izlaz} - T_{R.ulaz}}{T_z - T_{R.ulaz}} \quad (28)$$

Preko kojega se može izraziti  $T_{R.izlaz}$  :

$$T_{R.izlaz} = \eta_R(T_z - T_{R.ulaz}) + T_{R.ulaz} \quad (29)$$

gdje su:

$T_{R.ulaz}$  temperatura zraka na ulazu u regeneratora [°C],

$T_{R.izlaz}$  temperatura zraka na izlazu iz regeneratora [°C].

Toplinski tok predan na grijaču klimatizacijske jedinice računa se prema:

$$\Phi_{Gr} = q_{tot}\rho_z c_{pz}(T_u - T_{R.izlaz}) \quad (30)$$

gdje su:

|           |  |
|-----------|--|
| $q_{tot}$ | volumni protok zraka dobiven iz ventilacijskih potreba zgrade [ $m^3/s$ ], |
| $\rho_z$  | gustoća zraka [ $kg/m^3$ ],  |
| $c_{pz}$  | specifični toplinski kapacitet zraka [ $kJ/kgK$ ].                         |

Potrebna toplinska energija grijača klimatizacijske jedinice kroz godinu, bez korištenja podzemnog izmjenjivača topline, računa se pomoću jednadžba (29) i (30) gdje se za vrijednost temperature na ulazu u regenerator uzima vanjska temperatura zraka koja je poznata iz meteoroloških podataka za svaki sat u godini. Dobiveni rezultati po mjesecima prikazani su u Tablici 15. iz koje je vidljivo da se najveće potrebe za toplinskom energijom javljaju u siječnju (4796 kWh) i prosincu (4258 kWh) kao najhladnijim mjesecima u godini. U ostalim mjesecima potrebe za toplinskom energijom padaju te su najniže u svibnju (694 kWh) i rujnu (606 kWh). Ukupna godišnja potrebna toplinska energija za zagrijavanje ventilacijskog zraka bez sustava pasivnog grijanja iznosi 23421 kWh, odnosno  $14,47 \text{ kWh/m}^2$ .

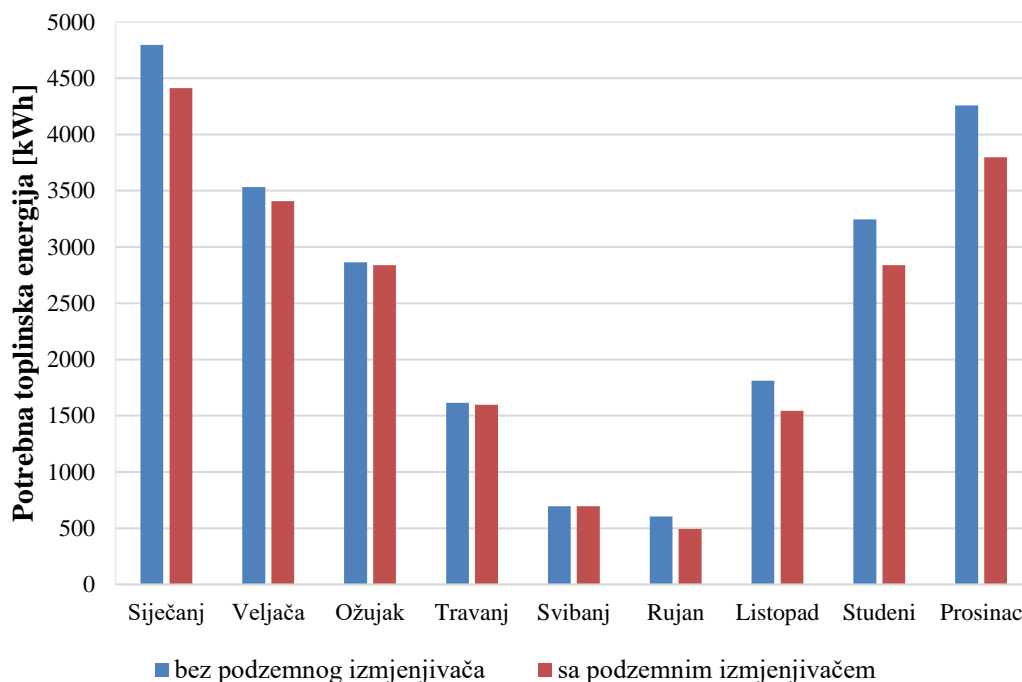
*Tablica 15. Potrebna toplinska energija sustava ventilacije bez korištenja podzemnog izmjenjivača topline*

| <b>Mjesec</b> | <b>Potrebna toplinska energija<br/>[kWh]</b> |
|---------------|--|
| Siječanj      | 4796   |
| Veljača       | 3534   |
| Ožujak        | 2863   |
| Travanj       | 1614   |
| Svibanj       | 694  |
| Rujan         | 606  |
| Listopad      | 1811   |
| Studeni       | 3245   |
| Prosinac      | 4258   |

Nakon što je izračunata potrebna toplinska energija grijača klimatizacijske jedinice bez korištenja podzemnog izmjenjivača topline, na isti način je izračunata potrebna toplinska energija kroz godinu s korištenjem podzemnog izmjenjivača topline. Ovdje se za vrijednost temperature na ulazu u regenerator uzima temperatura na izlazu iz podzemnog izmjenjivača, dobivena iz rezultata računalne simulacije na satnoj razini kroz godinu. U slučaju kada se zrak prolaskom kroz izmjenjivač ne zagrije, za vrijednost temperature na ulazu u regenerator uzima se vanjska temperatura zraka. Dobiveni rezultati po mjesecima prikazani su u Tablici 16. i uspoređeni su s rezultatima potrebne toplinske energije za slučaj bez korištenja podzemnog izmjenjivača na Slici 31.

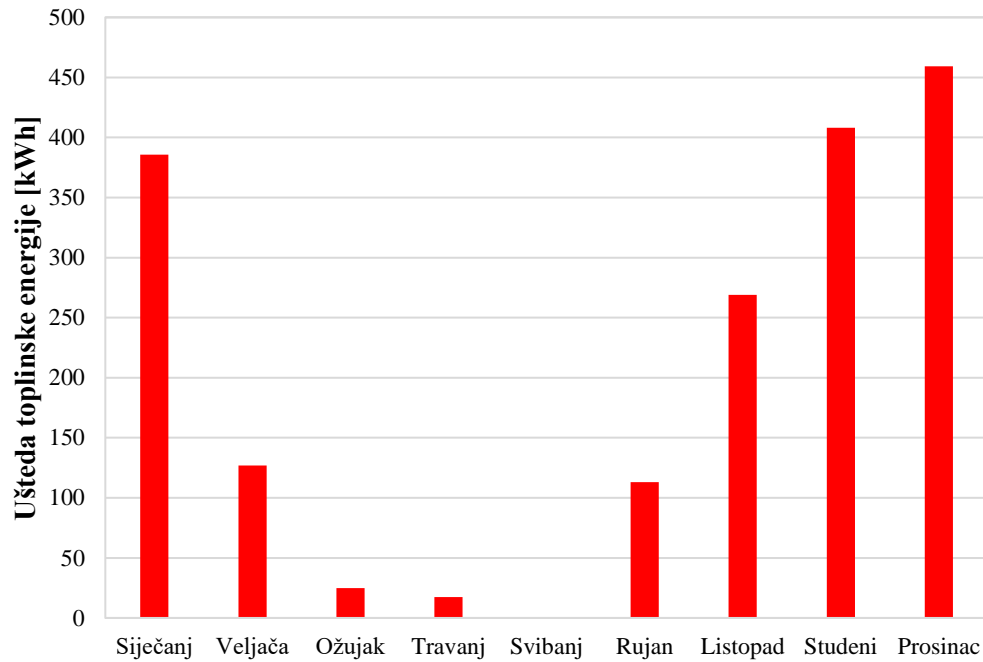
*Tablica 16. Potrebna toplinska energija sustava ventilacije sa korištenjem podzemnog izmjenjivača topline*

| <b>Mjesec</b> | <b>Potrebna toplinska energija<br/>[kWh]</b> |
|---------------|--|
| Siječanj      | 4410   |
| Veljača       | 3406   |
| Ožujak        | 2838   |
| Travanj       | 1597   |
| Svibanj       | 694  |
| Rujan         | 493  |
| Listopad      | 1542   |
| Studeni       | 2837   |
| Prosinac      | 3799   |



Slika 31. Usporedba potrebne toplinske energije sa i bez podzemnog izmjenjivača topline

Na temelju dobivenih satnih rezultata potrebne toplinske energije sa i bez korištenja podzemnog izmjenjivača topline izračunata je ušteda toplinske energije koja predstavlja njihovu razliku. Rezultati uštede toplinske energije na grijaču klimatizacijske jedinice kroz godinu po mjesecima prikazani su na Slici 32. Najveće uštede toplinske energije javljaju se u prosincu s 459 kWh (10,79% mjesečne uštede), studenom s 408 kWh (12,58% mjesečne uštede) te u siječnju s 368 kWh (8,04% mjesečne uštede). U ovim mjesecima najveće je iskorištenje podzemnog izmjenjivača topline zbog najvećih razlika između temperatura tla i vanjskoga zraka. Godišnja ušteda toplinske energije postignuta korištenjem pasivnog sustava grijanja iznosi 1804 kWh, što predstavlja uštedu od 7,7% .



Slika 32. Ušteda toplinske energije postignuta korištenjem pasivnog sustava grijanja

### 5.3. Proračun uštede električne energije

U radu je pretpostavljeno da se potrebna toplinska energija na grijaču klimatizacijske jedinice dobiva pomoću dizalice topline zrak-voda sa sezonskim faktorom grijanja  $COP = 3$ . Na temelju ovih podataka procijenjena je potrošnja električne energije prema:

$$COP = \frac{Q_{potr}}{W_{potr}} \quad (31)$$

$$W_{potr} = \frac{Q_{potr}}{COP} = \frac{23421}{3} = 7807 \text{ kWh} \quad (32)$$

gdje su:

$Q_{potr}$  ukupna godišnja potrebna toplinska energija [kWh],

$W_{potr}$  ukupna godišnja potrebna električna energija za pogon dizalice topline [kWh].



Na isti način procijenjena je ušteda električne energije korištenjem sustava pasivnog grijanja. Pod pretpostavkom cijene električne energije od 1 kn/kWh, na godišnjoj razini postiže se ušteda električne energije od oko 600 kWh, odnosno 600 kn. Potrebno je naglasiti da u ovome radu nije uzeta u obzir potrošnja električne energije na ventilatoru koji dobavlja zrak kroz podzemni izmjenjivač.

## 6. Proračun isplativosti

Procjena financijske isplativosti sustava pasivnog grijanja, korištenjem podzemnog izmjenjivača topline, u ovom radu procijenjena je preko vremena povrata investicije za izvedeni izmjenjivač topline. Odabrane stavke, s najvećim financijskim troškovima, su cijena cijevi izmjenjivača topline i cijena iskopa. Cijene su uzete iz kataloga proizvođača te su prikazane u Tablici 17.

Tablica 17. Cijene cijevi izmjenjivača i iskopa [8], [12]

|                      |                      |
|----------------------|----------------------|
| <b>Cijena cijevi</b> | 1400 kn/m            |
| <b>Cijena iskopa</b> | 20 kn/m <sup>3</sup> |

Vrijednosti proračuna ukupne cijene za svaku od navedenih stavki i njihova zbrojena vrijednost prikazane su u Tablici 18. Sa godišnjom uštedom od 600 kn vrijeme povrata investicije, za ukupnu cijenu stavki, iznosi preko 600 godina.

Tablica 18. Ukupni investicijski troškovi

| <b>Stavka</b>               | <b>Iznos</b>        | <b>Ukupno<br/>[kn]</b> |
|-----------------------------|---------------------|------------------------|
| Ukupna duljina cijevi       | 240 m               | 336.000,00             |
| Ukupna količina zemlje rova | 1404 m <sup>3</sup> | 28.080,00              |
|                             |                     | <b>364.080,00</b>      |

## 7. Zaključak

Svrha ovoga rada je procjena potencijala za pasivno grijanje Tehničke škole Ruđera Boškovića u Zagrebu korištenjem izmjenjivača topline zemlja-zrak. Analiza je provedena za sustav mehaničke ventilacije na satnoj razini za cijelu godinu, a potencijal korištenja pasivnog sustava grijanja procijenjen je na temelju izračuna godišnje uštede toplinske i električne energije te vremena povrata investicije izmjenjivača topline zemlja-zrak.

Ventilacijske potrebe škole izračunate su sukladno normi EN 16798-1 te predstavljaju količinu vanjskog zraka koja prolazi kroz podzemni izmjenjivač topline. Simulacija i izračun promjene temperature vanjskoga zraka prolaskom kroz izmjenjivač topline proveden je za svaki sat u godini korištenjem računalnog programa za energetska modeliranje, TRNSYS. U njemu su, preko glavnog korisničkog sučelja Simulation Studio, definirani ulazni parametri izmjenjivača topline i parametri potrebni za provedbu simulacije. Računalni program MATLAB korišten je za generiranje ulaznih parametara kao što je vrijeme rada sustava mehaničke ventilacije kroz godinu.

Simulirani izmjenjivač topline sastoji se od snopa 12 paralelnih polietilenskih cijevi duljine 20 m, zakopanih na dubinu od 3 m, s horizontalnim razmakom između cijevi od 2 m. Dubina od 3 m odabrana je kako bi se smanjio utjecaj vanjskih čimbenika, kao što su dozračena sunčeva energija i temperatura zraka, a koji utječu na oscilacije temperature tla po dubini i u vremenu. Dimenzije poprečnog presjeka cijevi odabrane su sukladno preporukama proizvođača kako brzina zraka u cijevima ne bi prelazila brzinu od 3 m/s. Pretpostavljeni period rada sustava mehaničke ventilacije je 5 dana u tjednu od 6 do 20 sati. Za analizu su korišteni meteorološki podaci za tipičnu meteorološku godinu za grad Zagreb.

Analizirani sustav mehaničke ventilacije sastoji se od podzemnog izmjenjivača topline, regeneratora topline i grijača klimatizacijske jedinice. Za grijač klimatizacijske jedinice izračunata je godišnja potrebna toplinska energija za slučaj bez korištenja sustava pasivnoga grijanja te godišnja ušteda toplinske energije postignuta korištenjem podzemnog izmjenjivača. U radu je pretpostavljeno da se potrebna toplinska energija na grijaču klimatizacijske jedinice dobiva pomoću dizalice topline zrak-voda, na temelju čega je izračunata godišnja ušteda električne energije. U ovome radu nije uzeta u obzir potrošnja električne energije na ventilatoru koji dobavlja zrak kroz podzemni izmjenjivač.

Provedbom simulacije dobivene su temperature zraka na izlazu iz podzemnog izmjenjivača topline te su izračunate godišnje uštede toplinske i električne energije. Najveće uštede toplinske energije postižu se u prosincu (459 kWh), nakon čega slijede studeni (408 kWh) i siječanj (368 kWh). Rezultati su očekivani s obzirom da je za većinu sati u ovim mjesecima temperatura vanjskoga zraka osjetno niža od temperature tla koje okružuje podzemni izmjenjivač. Uštede toplinske energije smanjuju se u ostalim mjesecima zbog manjih temperaturnih razlika između vanjskog zraka i tla. Zaključno, godišnja ušteda toplinske energije postignuta korištenjem pasivnog sustava grijanja iznosi 1804 kWh, što predstavlja uštedu od 7,7%. Godišnja ušteda električne energije iznosi oko 600 kWh, odnosno 600 kn. Sa tom godišnjom uštedom, procijenjeno vrijeme povrata investicije iznosi preko 600 godina.

# Literatura

- [1] World Economic Forum, <https://www.weforum.org/agenda/2021/02/why-the-buildings-of-the-future-are-key-to-an-efficient-energy-ecosystem/> (22.2.2022.)
- [2] International Energy Agency, Heating and Cooling, <https://www.irena.org/heatingcooling> (22.2.2022.)
- [3] REHAU: AWADUKT Thermo Sales Brochure, <http://www.geodasostenibilidad.es/media/download/1100> (22.2.2022.)
- [4] TRNSYS: Transient System Simulation Tool, <https://www.trnsys.com/> (22.2.2022.)
- [5] Florides G., Kalogirou S.: Ground heat exchangers: A review, [https://www.researchgate.net/publication/30500369\\_Ground\\_Heat\\_Exchangers-A\\_Review](https://www.researchgate.net/publication/30500369_Ground_Heat_Exchangers-A_Review) (22.2.2022.)
- [6] TESSLibs 17: Component Libraries for the TRNSYS Simulation Environment: GHP Library Mathematical Reference
- [7] Boban L.: Eksperimentalno i teorijsko istraživanje geotermalne dizalice topline, Sveučilište u Zagrebu, 2019.
- [8] Pipelife, PE100, katalog, <https://www.pipelife.hr/content/dam/pipelife/croatia/marketing/dokumenti/katalozi/niskogradnja/vodoopskrba/pe100-vodoopskrba-katalog.pdf> (22.2.2022.)
- [9] Halasz B., Galović A., Boras I.: Toplinske tablice, Sveučilište u Zagrebu, 2017.
- [10] Kurevija T.: Energetsko Vrednovanje Plitkih Geotermalnih Potencijala Republike Hrvatske, Sveučilište u Zagrebu, 2010.
- [11] ScienceDirect, Convection Heat Transfer Coefficient, <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/convection-heat-transfer-coefficient> (22.2.2022.)
- [12] Pipelife, PE100, cjenik, <https://www.pipelife.hr/content/dam/pipelife/croatia/marketing/dokumenti/katalozi/niskogradnja/vodoopskrba/pe100-voda-cjenik.pdf> (22.2.2022.)