

Parametarska analiza izmjenjivača topline zemlja-zrak

Zelić, Fran

Undergraduate thesis / Završni rad

2024

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://um.nsk.hr/um:nbn:hr:235:618441>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-04-03**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Fran Zelić

Zagreb, 2024. godina.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Doc. dr. sc. Luka Boban, mag. ing. mech.

Student:

Fran Zelić

Zagreb, 2024. godina.

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

Zahvaljujem se svom mentoru na pruženoj pomoći pri pisanju rada, te obitelji i prijateljima, na potpori tijekom studija.

Fran Zelić



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



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

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

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: 602 – 04 / 24 – 06 / 1	
Ur.broj: 15 – 24 –	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Fran Zelić**

JMBAG: **0035225312**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Parametarska analiza izmjenjivača topline zemlja-zrak**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Parametric analysis of earth to air heat exchanger**

Opis zadatka:

Izmjenjivač topline zemlja-zrak sastoji se od jedne ili više cijevi vodoravno položenih u zemlju kroz koje se vanjski zrak usmjerava u zgradu kao dio sustava ventilacije. S obzirom na to da je tijekom godine temperatura tla najčešće povoljnija od vanjske temperature zraka, ovim sustavom moguće je iskoristiti obnovljivu toplinu tla za djelomično kondicioniranje zraka neovisno o dobu godine. Izlazna temperatura zraka iz takvog izmjenjivača ovisi o temperaturi vanjskog zraka, svojstvima tla, geometriji izmjenjivača i promjenjivoj temperaturi toplinski aktiviranog tla.

Diskretizacijom diferencijalne jednadžbe provođenja topline u dvije dimenzije moguće je simulirati toplinske promjene u tlu prilikom rada takvog izmjenjivača. Odnosno, korištenje takvog matematičkog modela omogućuje određivanje utjecaja geometrijskih značajki izmjenjivača na izlaznu temperaturu zraka iz tla, učinkovitost izmjenjivača topline, domenu toplinski aktiviranog tla te potrebnu snagu za pogon ventilatora.

U radu je potrebno:

1. Opisati način izvođenja izmjenjivača topline tlo-zrak
2. Implementirati matematički model u Matlab® okruženju
3. Odabrati shemu i parametre diskretizacije izmjenjivača i tla uzimajući obzir brzinu i točnost simulacije
4. Provesti parametarsku analizu izmjenjivača topline, namijenjenog za obiteljsku kuću smještenu na području grada Zagreba, s obzirom na geometrijske značajke izmjenjivača
5. Za odabrane parametre izmjenjivača prikazati vremensku i prostornu promjenu temperature tla za karakteristični tjedan u zimskom režimu rada

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

Zadatak zadan:

Datum predaje rada:

Predviđeni datumi obrane:

30. 11. 2023.

1. rok: 22. i 23. 2. 2024.
2. rok (izvanredni): 11. 7. 2024.
3. rok: 19. i 20. 9. 2024.

1. rok: 26. 2. – 1. 3. 2024.
2. rok (izvanredni): 15. 7. 2024.
3. rok: 23. 9. – 27. 9. 2024.

Zadatak zadao:

Predsjednik Povjerenstva:

Doc. dr. sc. Luka Boban

Prof. dr. sc. Vladimir Soldo

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA.....	IV
POPIS OZNAKA	V
SAŽETAK.....	VI
SUMMARY	VIII
1. UVOD.....	1
1.1. Tlo kao toplinski izvor/ponor	2
1.2. Izmjenjivač topline zemlja-zrak	5
2. OSNIVANJE MODELA	9
2.1. Diskretizacija domene tla i izmjenjivača.....	9
2.2. Toplinska bilanca elementa.....	12
2.3. Implementacija modela u MATLAB	15
3. Analiza prostorne i vremenske diskretizacije domene	16
3.1. Utjecaj vremenskog koraka na rezultate simulacije	16
3.2. Utjecaj broja elemenata na simulaciju.....	18
4. PARAMETARSKA ANALIZA IZMJENJIVAČA TOPLINE.....	20
4.1. Utjecaj materijala cijevi	21
4.2. Utjecaj brzine strujanja zraka.....	24
4.3. Utjecaj veličine cijevi.....	25
4.4. Utjecaj dubine polaganja cijevi	27
4.5. Utjecaj svojstava tla	29
4.6. Povećanje broja cijevi uz konstantan protok	30
5. RAD IZMJENJIVAČA KARAKTERISTIČNOM TJEDNU U ZIMSKOM REŽIMU RADA.....	33
5.1. Usporedba izmjenjivača s različitim dimenzijama cijevi.....	36
5.2. Vremenska i prostorna promjena temperature domene	38

6. ZAKLJUČAK.....	44
LITERATURA.....	46
PRILOZI.....	47

POPIS SLIKA

Slika 1	Pojednostavljena shema sustava za grijanje i ventilaciju sa izmjenjivačem topline zemlja-zrak za predpripremu zraka	2
Slika 2	Promjena temperature tla kroz godinu ovisno o dubini i dijelu godine	3
Slika 3	Toplinska bilanca površinskog sloja tla	4
Slika 4	Sustav izmjenjivača topline zemlja-zrak u obliku cijevi u tlu (LEWT-njem. Luft_Erdreichwärmetauscher – izmjenjivač topline zemlja-zrak) [15]	6
Slika 5	Primjer instalacije izmjenjivača topline zemlja-zrak kroz zid podruma [15]	7
Slika 6	Skica izgleda izmjenjivača sa karakterističnim dimenzijama	10
Slika 7	Podjela domene u niz poluprstenova.....	10
Slika 8	Detalj podjele domene u radijalnom i horizontalnom smjeru	11
Slika 9	Koordinate elemenata i karakteristične veličine toplinske bilance	13
Slika 10	Utjecaj vremenskog koraka na temperaturu zraka na izlazu i izmijenjenu toplinu	17
Slika 11	Utjecaj broja elemenata na temperaturu zraka na izlazu izmjenjivača i trajanje simulacije.....	18
Slika 12	Utjecaj materijala cijevi jednakih dimenzija na temperaturu zraka na izlazu izmjenjivača.....	21
Slika 13	Utjecaj materijala cijevi standardnih dimenzija na izmijenjenu toplinu	23
Slika 14	Utjecaj brzine strujanja zraka na temperaturu zraka na izlazu izmjenjivača i izmijenjenu toplinu.....	24
Slika 15	Utjecaj veličine cijevi na temperaturu zraka na izlazu izmjenjivača i izmijenjenu toplinu za konstantan protok zraka.....	26
Slika 16	Utjecaj dubine polaganja cijevi na temperaturu zraka na izlazu izmjenjivača i izmijenjenu toplinu.....	28
Slika 17	Utjecaj vrste tla na temperaturu zraka na izlazu i izmijenjenu toplinu	29
Slika 18	Utjecaj broja cijevi na rezultate simulacije	31
Slika 19	Prosječna satna temperatura zraka za odabranih 8 dana u mjesecu veljači.....	34
Slika 20	Prostorni prikaz razmatrane instalacije	35
Slika 21	Ovisnost izmijenjene topline o duljini izmjenjivača	37
Slika 22	Prikaz temperaturnog gradijenta zraka, cijevi i tla zadnjeg vremenskog koraka ..	39
Slika 23	Kretanje temperature zraka na ulazu i zraka na izlazu izmjenjivača, uključujući dan za temperiranje tla	40
Slika 24	Toplinski tok u svakom satu simulacije, uključujući dan za temperiranje tla.....	40
Slika 25	Vremenska promjena srednje temperature pet slojeva tla najbližih cijevi izmjenjivača.....	41
Slika 26	Temperatura elemenata domene na kraju odabranih dana	42
Slika 27	Oscilacija temperature tla i vanjskog zraka tijekom 24 sata trećeg dana.....	43

POPIS TABLICA

Tablica 1	Toplinska svojstva odabranih vrsta tla [4] [12].....	4
Tablica 2	Svojstva odabranih polimernih materijala [1]	7
Tablica 3	Normirane veličine cijevi najčešće korištenih materijala [10] [11] [13].....	8
Tablica 4	Osnovna termodinamička svojstva tvari korištenih u modelu [1] [4].....	12
Tablica 5	Početni i rubni uvjeti simulacije za analizu prostorne i vremenske diskretizaciji domene	16
Tablica 6	Utjecaj vremenskog koraka na rezultate simulacije	17
Tablica 7	Utjecaj broja elemenata na rezultate simulacije	19
Tablica 8	Početni i rubni uvjeti korišteni pri parametarskoj analizi izmjenjivača topline	20
Tablica 9	Utjecaj materijala cijevi jednakih dimenzija na rezultate simulacije [1] [3].....	22
Tablica 10	Utjecaj materijala cijevi standardnih dimenzija na rezultate simulacije	23
Tablica 11	Utjecaj brzine strujanja zraka na rezultate simulacije	25
Tablica 12	Standardne dimenzije odabranih PVC cijevi [11]	25
Tablica 13	Svojstva segmenata cijevi i ventilatora potrebnih za izračun snage za pogon ventilatora	26
Tablica 14	Utjecaj veličine cijevi na rezultate simulacije za konstantan protok zraka	27
Tablica 15	Utjecaj dubine polaganja na rezultate simulacije	28
Tablica 16	Tablica osrednjenih termodinamičkih svojstava za odabrana tla	29
Tablica 17	Utjecaj vrste tla na rezultate simulacije.....	30
Tablica 18	Dimenzije cijevi višecijevnog izmjenjivača korištene u analizi [11].....	31
Tablica 19	Utjecaj povećanja broja cijevi na izlazne podatke, uz konstantan ukupni protok	31
Tablica 20	Termodinamička svojstva tla za područje Zagreba	33
Tablica 21	Ulazni rubni i početni uvjeti simulacije	35
Tablica 22	Izlazni podaci simulacija sa stvarnim početnim i rubnim uvjetima	36
Tablica 23	Rezultati simulacije za cijevi DN90 i DN200 u ovisnosti o duljini izmjenjivača	37
Tablica 24	Rezultati simulacije izmjenjivača namijenjenog za obiteljsku kuću.....	38

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
A	-	Matrica sustava jednadžbi
c	$\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$	Specifični toplinski kapacitet
C	-	Slobodni vektor sustava jednadžbi
d	m	Promjer
f	-	Koeficijent Petukhove funkcije
h	J kg^{-1}	Specifična entalpija
L	m	Duljina
m	-	Broj aksijalnih podjela tla
n	-	Broj radijalnih podjela domene tla
Nu	-	Nusseltov broj
P	W	Snaga
Pr	-	Prandtllov broj
S	m^2	Površina
Q	J	Toplinska energija
q	W m^{-2}	Gustoća toplinskog toka
q_m	kg s^{-1}	Maseni protok
q_v	$\text{m}^3 \text{s}^{-1}$	Volumni protok
R	m K W^{-1}	Toplinski otpor po metru duljine
R	Pa m^{-1}	Specifični pad tlaka
r	m	Polumjer
Re	-	Reynoldsov broj
T	K	Termodinamička temperatura
t	s	Vrijeme
V	m	Visina
α	$\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$	Koeficijent prijelaza topline
ζ	-	Faktor trenja
η	-	Efikasnost
ϑ	$^{\circ}\text{C}$	Celzijeva temperatura
λ	$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$	Toplinska provodnost
v	$\text{m}^3 \text{kg}^{-1}$	Specifični volumen
ρ	kg m^{-3}	Gustoća
Φ	W	Toplinski tok
Φ_L	W m^{-1}	Toplinski tok po metru duljine

SAŽETAK

Izmjenjivač topline zemlja-zrak preuzima toplinu iz temperaturno stabilnog i široko dostupnog toplinskog izvora – tla, a kako bi se ista koristila za predpripremu zraka za potrebe ventilacije prostora. Sam izmjenjivač odlikuje jednostavna izvedba u obliku cijevi, kroz koju struji zrak, a koja preko stijenke ostvaruje kontakt s tlom. Tlo ima u sezoni grijanja višu temperaturu od zraka koji struji kroz izmjenjivač, pa se toplina prenosi s tla na stijenku cijevi kondukcijom, a zatim konvekcijom na zrak koji struji kroz izmjenjivač. Za potrebe analize takvog izmjenjivača razvijen je i implementiran model u računalnom programu MATLAB®. Domenu modela čine tlo, cijev ukopana u tlo i zrak koji struji kroz cijev. Podjela domene u elemente, oblika prilagođenog geometriji domene, vrši se automatski prema zadanom broju elemenata i veličini razmatrane domene tla. Svaki element domene definiran je s fizikalnim i termodinamičkim svojstvima materijala koji ga sačinjava. Veličina pojedinog elementa, zajedno sa svojstvima materijala, određuje masu, toplinski otpor i toplinski kapacitet elementa. Ove karakteristične veličine, zajedno sa temperaturom, određuju i toplinsku bilancu elementa u svakom vremenskom trenutku, a time i prijenos topline između susjednih elemenata. U svakom vremenskom koraku, temperatura svih elemenata ovako diskretiziranog modela izmjenjivača zemlja-zrak računa se metodom konačnih razlika unatrag, matricnim množenjem inverza matrice koeficijenata i vektora konstanti. Na temelju analize utjecaja parametara diskretizacije, određen je vremenski korak između 30 i 300 s i broj elemenata između 2000 i 4000, za parametarsku analizu izmjenjivača i simulaciju rada istog u karakterističnom tjednu, a pri tom uvažavajući potrebe za točnosti rješenja i trajanje simulacije. Materijal cijevi izmjenjivača je s gledišta izmjene topline, parametar koji ne utječe znatno na prijenos topline, pošto cijev izmjenjivača u pravilu ima mali otpor prolazu topline i dimenzije s obzirom na domenu, dok s tehno-ekonomskog gledišta odabir materijala znatno utječe na ostale zahtjeve koje sustav mora ispunjavati, kao što su higijena, trajnost i održavanje. Brzina strujanja zraka u cijevi direktno je povezana sa ventilacijskim i toplinskim zahtjevima građevine za koju je sustav namijenjen. Volumenski protok zraka je zadani parametar, kojem se dimenzije cijevi i duljina izmjenjivača moraju prilagoditi za postizanje optimalne izmjene topline, s obzirom na troškove ugradnje i pogona. Stoga se izmjenjivač dimenzionira za male brzine strujanja, od 1 do 3 ms⁻¹. Prijelaz topline s tla na zrak koji struji kroz izmjenjivač, ovisi o brzini strujanja, koja određuje koeficijent prijelaza topline na strani zraka, i veličini cijevi, odnosno površini izmjene topline. Ove dvije stavke se trebaju tako odrediti, kako bi se postigla najveća vrijednost izmijenjene

topline. Na prijenos topline može se efikasno utjecati i primjenom višecijevnog izmjenjivača, gdje se prijenos topline ostvaruje uz veće brzine strujanja, uz istovremeno povećanje površine izmjene topline. Ugradnja višecijevnog izmjenjivača zahtijeva ujedno i veću dostupnu površinu za ugradnju, dok istovremeno pada vrijednost toplinskog toka po metru cijevi izmjenjivača. Analizom simulacije rada izmjenjivača s realnim karakterističnim rubnim i početnim uvjetima, kao najbitniji parametri rada pokazali su se duljina izmjenjivača i brzina strujanja zraka u izmjenjivaču. Duljina izmjenjivača određuje maksimalnu vrijednost izmijenjene topline, a brzina strujanja zraka snagu za pogon ventilatora, odnosno jedinu komponentu sustava u ovoj konfiguraciji koja troši električnu energiju.

Ključne riječi: izmjenjivač topline zemlja-zrak, diskretizacija modela, simulacija rada, analiza simulacije

SUMMARY

A ground-to-air heat exchanger takes heat from a temperature-stable and widely available heat source - the ground and uses it for the preliminary preparation of air for needs of building ventilation. The exchanger itself is characterized by a simple design in the form of a pipe, through which the air flows and interacts with the ground through the pipe wall. During heating season, ground has a higher temperature than the air flowing through the exchanger, so heat is transferred from the ground to the pipe wall by conduction, and then by convection to the air flowing through the exchanger. For the purposes of analysing such an exchanger, a model was developed and implemented in MATLAB® computer program. The model domain consists of the soil, a pipe buried in the ground and air flowing through the pipe. Division of the domain into elements, the shape of which is adapted to the domain geometry, is done automatically according to a given number of elements and the size of the analysed soil domain. Each domain element is defined with its material's physical and thermodynamic properties. Element volume, together with material properties, determines mass, thermal resistance, and thermal capacity of an element. These characteristic values, together with temperature, determine an element's heat balance at every moment in time, and thus the heat transfer between neighbouring elements. In each time step, discretized earth-air exchanger element temperatures, in this model, are calculated using the backward finite difference method, by matrix multiplication of the inverse matrix of coefficients and the constants vector. Based on the analysis of the discretization parameters influence, a time step between 30 and 300 s and number of elements between 2000 and 4000 were determined for the parametric analysis of the exchanger and the simulation of its operation in a typical week, while taking into consideration the accuracy of the solution and the duration of the simulation. Heat exchanger pipe material is, from the point of view of heat exchange, a parameter that does not significantly affect heat transfer, since the heat exchanger pipe, as a rule, has a small resistance to heat transfer and smaller dimensions in relation to the domain, while from a technical and economic point of view, the choice of pipe material significantly affects other requirements that a system must meet, such as hygiene, durability and maintenance. Air flow speed in a pipe is directly related to building ventilation and thermal requirements for which a system is designed. Volumetric air flow is a given parameter, to which pipe dimensions and heat exchanger length must be adapted to achieve optimal heat transfer, considering installation and operation costs. Therefore, an exchanger is dimensioned for low air flow velocities, from 1 to 3 ms⁻¹. Heat transfer from ground to air flowing through an

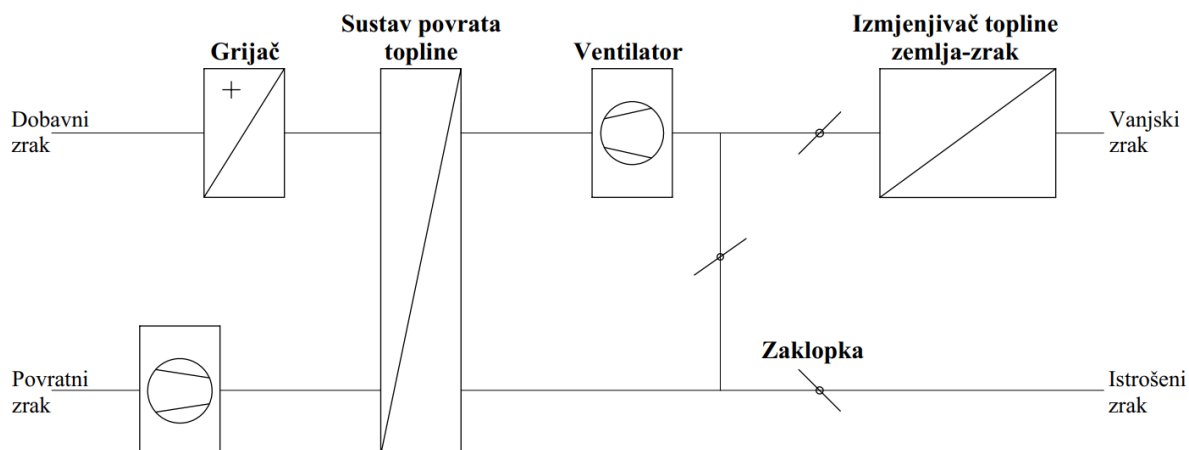
exchanger depends on air flow speed, which determines the air heat transfer coefficient, and pipe size, i.e. heat exchange surface. These two values should be determined in such a way, to achieve the highest transferred heat value. Heat transfer can be effectively influenced by using a multi-pipe exchanger, where heat transfer is achieved with higher air flow speeds, while simultaneously increasing heat exchange surface. Installation of a multi-tube exchanger requires a larger available installation area, while at the same time the value of heat flow per meter of an exchanger tube decreases. By analysing a simulation of heat exchanger's operation with realistic characteristic boundary and initial conditions, length of the exchanger and air flow speed in an exchanger were shown to be the most important operating parameters. Length of an exchanger determines the maximum value of exchanged heat, and air flow speed determines the power consumption of a fan, which is the only component of the system in this configuration that consumes electricity.

Key words: ground-air heat exchanger, model discretization, operating simulation, simulation analysis

1. UVOD

2021, prema Eurostat statistici [14], potrošnja energije u zgradarstvu iznosila je 27 % ukupne potrošnje. Istovremeno, 64,4 % potrošnje energije u kućanstvima otpada na grijanje. Iz statistike se uočava da je racionalna i učinkovita upotreba energije nužna za smanjenje potrošnje i da se znatne uštede mogu i trebaju ostvariti u grijanju (i hlađenju) zgrada. Implementacija raznih tehnologija, kao što je sustav s izmjenjivačem topline zemlja-zrak, omogućuje uštedu energije za kondicioniranje svježeg zraka za ubacivanje. Jedan od bitnih dijelova svakog sustava je toplinski spremnik, te značajke istog, kao što su stabilnost temperature tijekom rada sustava, isplativost korištenja, dostupnost i kapacitet toplinske energije. Izmjenjivač topline zemlja-zrak koristi upravo jedan od najrašireniji i najstabilnijih izvora topline, a to je tlo, za predkondicioniranje dobavnog zraka. U povoljnim uvjetima može raditi samostalno bez dodatnog izvora hlađenja ili grijanja. Jednostavnost komponenti i izvedbe izmjenjivača topline zemlja-zrak, omogućuje značajne uštede na klimatizaciji prostora tijekom većeg dijela godine. Jedina potrošnja energije izmjenjivača topline zemlja-zrak, jest potrošnja energije za pogon ventilatora. U nastavku su dani osnovni pregled i značajke sustava, kao što su optimalni radni uvjeti i potrebne dimenzije sustava s obzirom na tražene parametre rada.

Toplinski gubici građevine su gubici provođenja prema vanjskom okolišu (tlu ili atmosferi) kroz stijenku građevine, konvektivni gubici (infiltracijom i/ili ventilacijom) zbog ulaska hladnog vanjskog zraka i gubici zračenjem s ploha građevine. Sustav klimatizacije koji uključuje izmjenjivač topline zemlja-zrak, cilja upravo na smanjenje ventilacijskih gubitaka topline, tako što se zraku pri prolazu kroz izmjenjivač topline temperatura približava temperaturi u prostoriji, te se tako smanjuje potrošnja energije za grijanje, odnosno hlađenje. Slika prikazuje pojednostavljenu shemu sustava koji koristi izmjenjivač topline zemlja-zrak za predkondicioniranje zraka. Nakon što se zraku poveća temperatura prolaskom kroz izmjenjivač zemlja-zrak, može se miješati s povratnim zrakom iz prostora, da se dobije još povoljnije stanje zraka prije rekuperacije ili regeneracije topline iz povratnog zraka. Grijač služi za postizanje temperature zraka na zadanu vrijednost za ubacivanje.

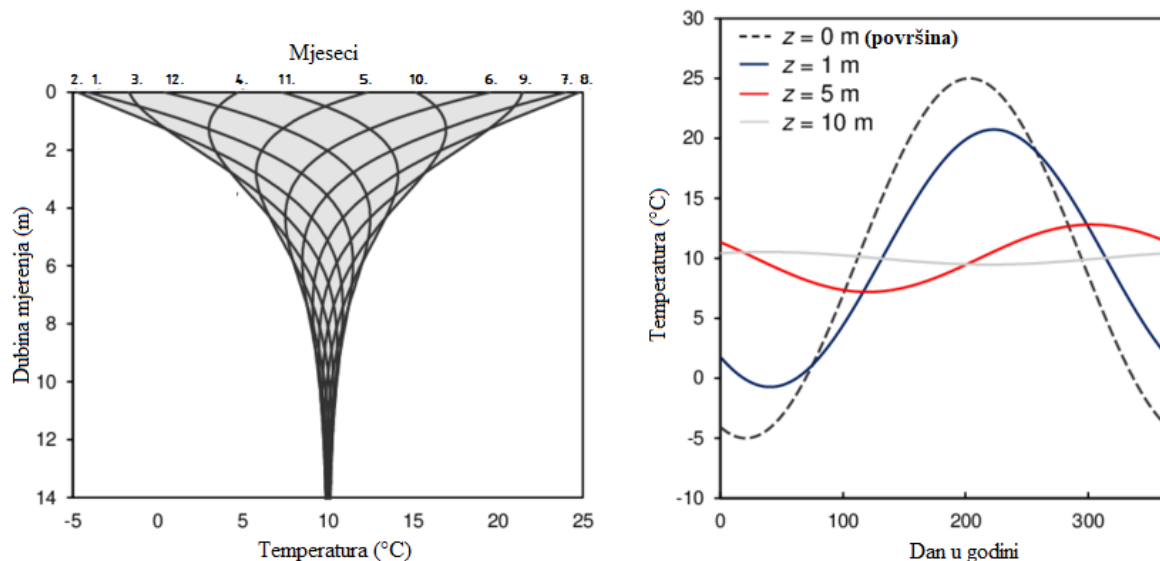


Slika 1 Pojednostavljena shema sustava za grijanje i ventilaciju sa izmjenjivačem topline zemlja-zrak za predpripremu zraka

1.1. Tlo kao toplinski izvor/ponor

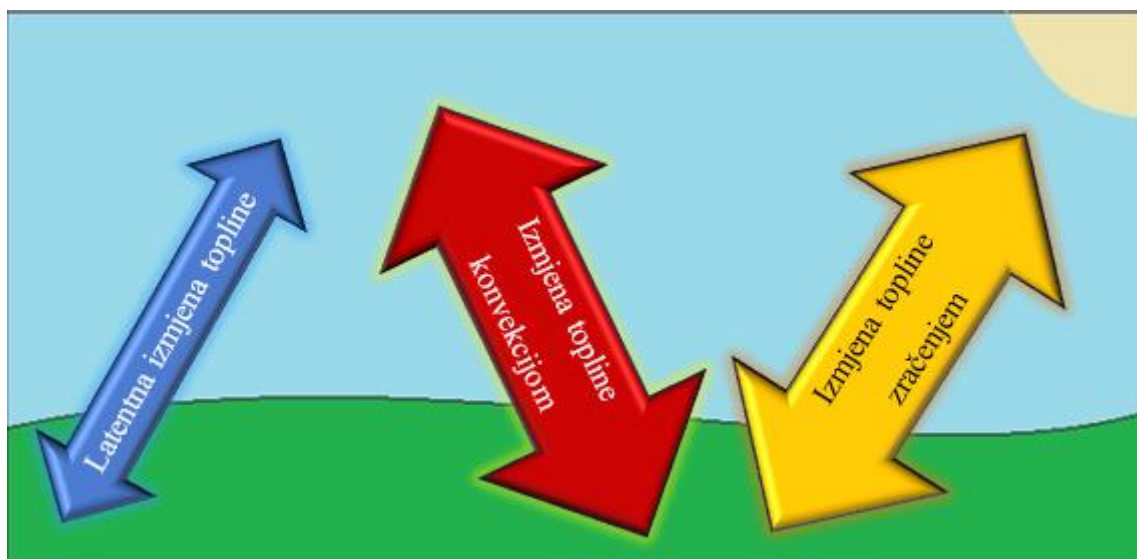
Stabilnost temperature tla ovisi i o njegovoj toplinskoj ravnoteži. U tlo se može unijeti disbalans ako su razlike topline koju tlo preuzima i odaje izmjenjivaču prevelike, što uzrokuje lokalno porast ili smanjenje temperature. Takva promjena temperature tla može umanjiti učinkovitost sustava i skratiti vijek trajanja instalacije. Tlo u pravilu zimi ima višu, a ljeti nižu temperaturu od okolišnog zraka što je pogodno za eksploataciju u GViK sustavima (sustavima grijanja ventilacije i klimatizacije).

Godišnja promjena temperature



Slika 2 Promjena temperature tla kroz godinu ovisno o dubini i dijelu godine

Tlo izmjenjuje toplinu konvekcijom, zračenjem i provođenjem s okolišem. Površinski sloj tla se u ljetnom periodu zagrijava. Temperatura tla raste s povećanjem dozračenog toplinskog toka Sunca, koje predaje toplinu tlu zračenjem i toplijim zrakom iznad tla koji konvekcijom i provođenjem predaje toplinu tlu. Plitki slojevi tla imaju u toplijim mjesecima neto pozitivan toplinski tok, što rezultira lokalnim porastom temperature. Zimi tlo ima višu temperaturu od okolnog zraka, a Sunčevo zračenje nije dovoljno da nadoknadi negativan toplinski tok tla zraku, i temperatura tla pada. Sve površine tla nisu jednako izložene Sunčevom zračenju pa tako tlo prekriveno vegetacijom ima manju dnevnu fluktuaciju temperature površine, sporije se zagrijava i sporije se hladi. Dnevne fluktuacije temperature tla ovise i o dobu dana. Tlo noću u pravilu predaje toplinu zraku, a danju preuzima toplinu. Izloženost tla Sunčevom zračenju po danu ovisi i o količinu naoblake. Tlo izmjenjuje i latentnu toplinu, isparavanjem vlage iz tla ili ovlaživanjem tla upijanjem oborina.



Slika 3 Toplinska bilanca površinskog sloja tla

Specifični toplinski kapacitet i toplinska provodnost tla ovise o sastavu. Najčešće se na mjestu predviđenom za ugradnju sustava koji iskorištavaju geotermalni potencijal tla nalazi više različitih slojeva tla. Tlo je heterogeni sustav, koji sačinjavaju sitnije i krupnije čestice stijena, minerala i biomase, između kojih se nalaze zrak i vlaga. Tlo sa većim udjelom vode ima veći toplinski kapacitet i toplinsku provodnost, a najveći kapacitet imaju tla sa visokim udjelom gline. Pri polaganju cijevi horizontalnih izmjenjivača topline, oko cijevi se nasipa sloj tla otporniji na sabijanje koji osigurava stabilno uporište za cijev, što dodatno mijenja karakteristike tla oko cijevi s obzirom da ovise o sabijenosti tla, a koje utječe i na količinu vode koje tlo može primiti. Promjenjiva svojstva tla kompliciraju postavljanje toplinske bilance slojeva, stoga se uzimaju uprosječena svojstva i primjenjuju jednoliko na dio promatranog tla.

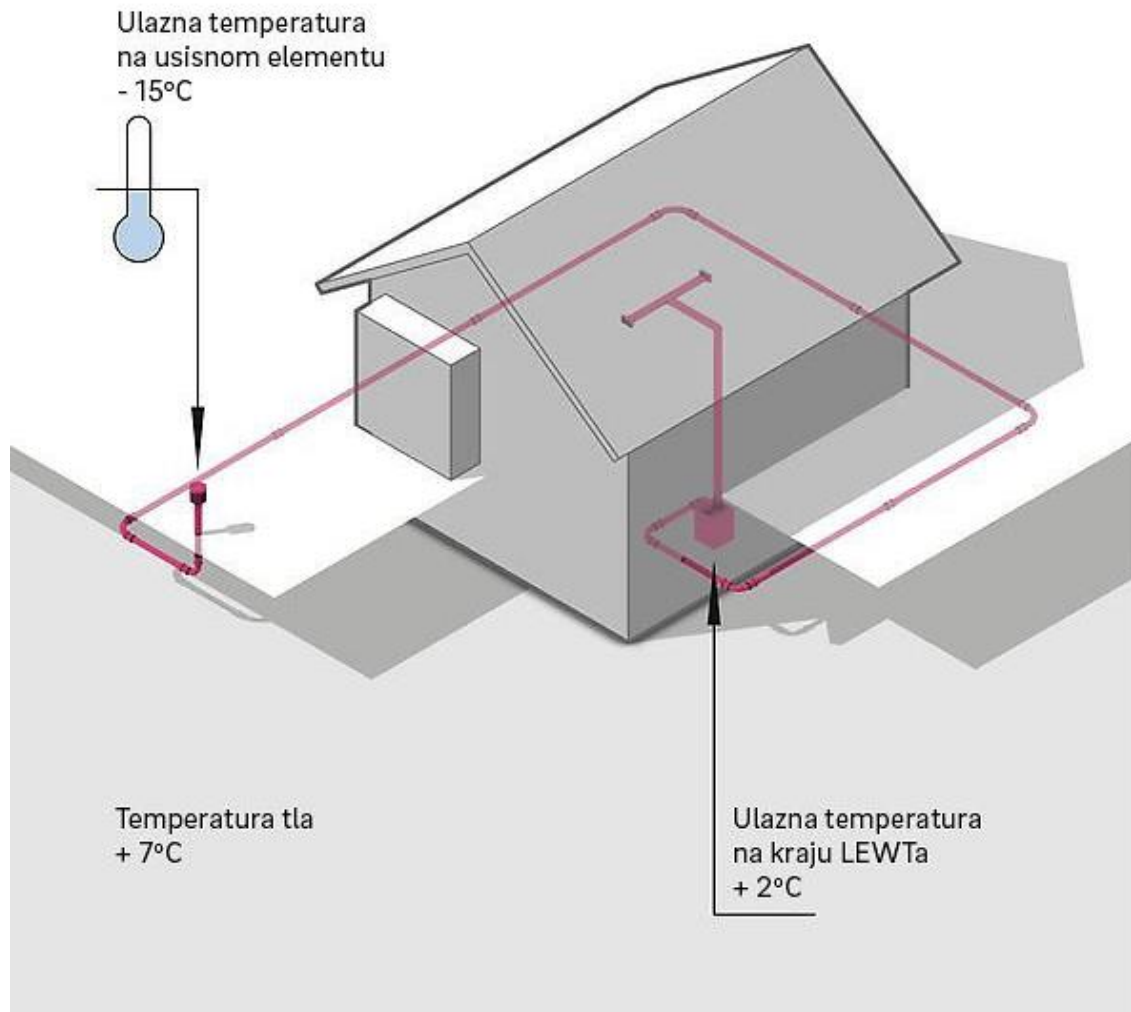
Tablica 1 Toplinska svojstva odabranih vrsta tla [4] [12]

Tip tla	Toplinska provodnost (W/m K)	Gustoća (kg/m ³)	Specifični toplinski kapacitet (J/kg K)
Šljunak	0,4 – 1,8	1000 – 2000	700 – 1000
Pijesak	1,46 – 3,22	1500 – 2200	500 – 700
Glina	1,17 – 2,34	1500 – 2000	1500 – 1800

1.2. Izmjenjivač topline zemlja-zrak

Osnovna značajka izmjenjivača topline zemlja-zrak jest jednostavnost. Zrak prolaskom kroz cijev položenu u tlu, konvekcijom sa stijenke cijevi preuzima toplinu iz tla, što omogućuje uštedu toplinske energije na konačnoj pripremi zraka. Ovisno o vanjskim uvjetima, ponajprije temperaturi i vlažnosti zraka, zrak preuzima na sebe dio topline tla, što znači smanjenje potrebne snage grijaćih elemenata. Uparen sa sustavom povrata topline, sustav postiže jako malu potrošnju energije za grijanje/hlađenje dobavnog svježeg zraka. Mogućnosti uštede ovise o lokaciji sustava i vremenskim uvjetima na lokaciji gdje se razmatra instalacija sustava.

Osim cijevi u tlu, sustav sadrži još nekoliko elemenata nužnih za siguran i trajan rad. Filter se smješta na ulazu u izmjenjivač i osigurava da zagađivači i prašina ne ulaze u izmjenjivač. Filtracijom se osigurava čistoća komponenti sustava i njegova dugotrajnost. Protu-kišna kapa sprječava ulaz vode direktno u izmjenjivač tijekom kišnih razdoblja. Ovisno o izvedbi i duljini izmjenjivača, postavljaju se određen broj revizijskih otvora, koji služe za inspekciju i čišćenje cijevi u tlu. Ventilator je jedini potrošač struje u sustavu izmjenjivača zemlja-zrak i mora biti pravilno dimenzioniran da omogući projektni volumni protok zraka kroz izmjenjivač. Cijev izmjenjivača mora biti opremljena sa odvodom kondenzata na najnižoj točki, koja je na slici iza ulaza u cijevi u unutrašnjost podzemnog dijela građevine. Ulaz cijevi kroz stijenku građevine mora biti pravilno brtvljen za sprječavanje prodora vlage.

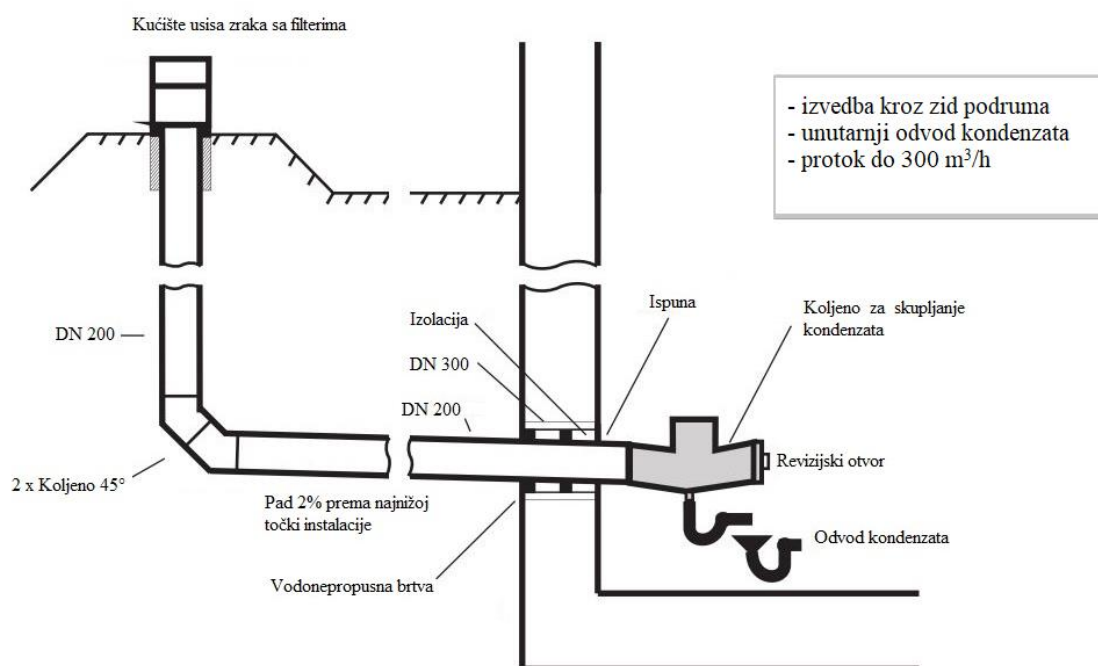


Slika 4 Sustav izmjenjivača topline zemlja-zrak u obliku cijevi u tlu (LEWT-njem.

Luft_Erdreichwärmetauscher – izmjenjivač topline zemlja-zrak) [15]

Sustav zahtijeva redovito održavanje, posebno zbog mogućeg nakupljanja vlage u režimu hlađenja, kada topli i vlažni vanjski zrak dolazi u kontakt sa stijenkama cijevi izmjenjivača te može doći do kondenzacije. Zbog kondenzata su predviđeni nagib za slijevanje kondenzata u odvod ili do pumpe kondenzata. Ovisno o duljini cijevi moraju se ugraditi i revizijski otvori za inspekciju i čišćenje, a razvoj mikroorganizama u cijevi se sprječava sa pravilnim odabirom materijala i premaza.

Primjer instalacije L-EWT, Tip A



Slika 5 Primjer instalacije izmjenjivača topline zemlja-zrak kroz zid podruma [15]

Na tržištu se za mrežu cijevi najčešće nude polimerne cijevi (PE, PVC ili PP), koje osiguravaju dobru toplinsku provodnost, čvrstoću i otpornost na koroziju, a pri tome polimerne cijevi osiguravaju najviše higijenske standarde. Relativno niske temperature eksploatacije omogućuju uporabu polimera, koji omekšavaju pri višim temperaturama. Betonske cijevi imaju najveću toplinsku provodnost, ali nisu vodonepropusne, što pogoduje razvoju mikroorganizama unutar cijevi i može uzrokovati neugodne mirise ili zdravstveno ugroziti korisnika.

Tablica 2 Svojstva odabranih polimernih materijala [1]

Materijal	Područje tališta °C	Toplinska rastezljivost $10^{-3} K^{-1}$	Toplinska provodnost W/(m K)
HDPE	125...135	0,2	0,5
LDPE	110...150	0,25	0,35
PP	157...170	0,16	0,22
PVC (tvrdi)	-	0,08	0,16

Ovisno o učinku GViK sustava na koji je spojen izmjenjivač topline zemlja-zrak i ventilacijskim zahtjevima građevine, odabrat će se odgovarajući promjer cijevi s obzirom na optimalnu izmjenu topline sa tlom. Na izmjenu topline u izmjenjivaču utječu mnogi čimbenici,

a oni glavni su analizirani u naknadnim poglavljima. Kako bi se dobio detaljniji uvid u utjecaj pojedinih čimbenika u sljedećem poglavlju prikazan je model izmjenjivača u tlu.

Tablica 3 Normirane dimenzije cijevi najčešće korištenih materijala[10] [11] [13]

HDPE PN10 (prema EN12201)		
Nazivni promjer	D (mm)	s (mm)
DN100	110	6,6
DN125	125	7,4
DN140	140	9,5
DN180	180	10,7
DN200	200	11,9
DN225	225	13,4
DN250	250	14,8
DN280	280	16,6
DN315	315	18,7
DN355	355	21,1
DN400	400	23,7
PVC SN4 (prema EN1401-1)		
DN100	110	3,2
DN125	125	3,2
DN150	160	4,0
DN200	200	4,9
DN250	250	6,2
DN300	315	7,7
Betonske cijevi		
DN100	156	28
DN125	185	30
DN150	212	31
DN200	264	32
DN250	316	33
DN300	380	40
DN400	500	50

2. OSNIVANJE MODELA

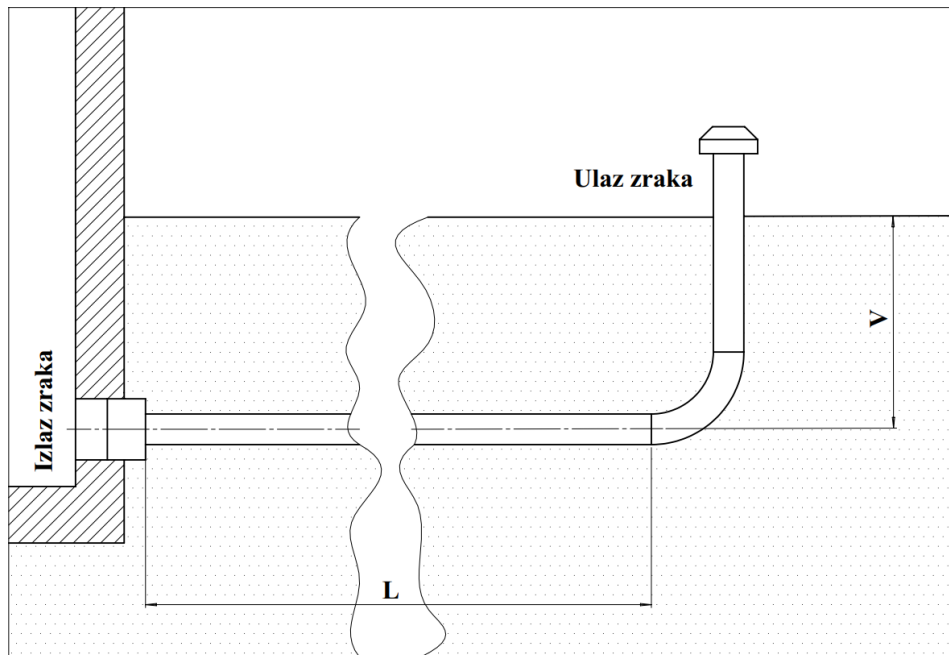
U ovom poglavlju opisan je model izmjenjivača i tla koji je izrađen sa svrhom modeliranja tranzijentnih promjena u tlu tijekom rada izmjenjivača. Cilj je da model izmjenjivača u tlu što realnije simulira ponašanje izmjenjivača i tla, a da pritom izračun temperaturnog polja, odnosno temperature zraka na izlazu iz izmjenjivača, ne bude računalno zahtjevan. Stoga se uvode određene pretpostavke koje pojednostavljuju izvođenje simulacije izmjenjivača topline zemlja-zrak:

- Tlo se smatra homogenim i izotropnim medijem s jednakim i konstantnim toplinskim svojstvima po cijeloj domeni
- Zanemaren je mehanizam latentne izmjene topline
- Prilikom određivanja koeficijenta konvektivnog prijenosa topline, srednja temperatura zraka u pojedinog elementa domene je aproksimirana sa izlaznom temperaturom zraka iz promatranog elementa
- Temperatura tla mijenja se samo pod utjecajem izmjene topline sa vanjskim zrakom i zrakom koji struji kroz izmjenjivač
- Modelom je obuhvaćena samo horizontalna sekcija izmjenjivača, odnosno zanemarena je izmjena topline u vertikalnim sekcijama izmjenjivača
- S obzirom na simetričnost domene, modelirana je samo polovica domene izmjenjivača
- Zanemaren je profil brzine zraka unutar cijevi, odnosno po cijelom presjeku cijevi zrak struji prosječnom brzinom
- Zanemaren je profil temperature zraka unutar cijevi, odnosno po cijelom presjeku cijevi, za pojedini element domene, zrak ima jednoliku temperaturu po presjeku

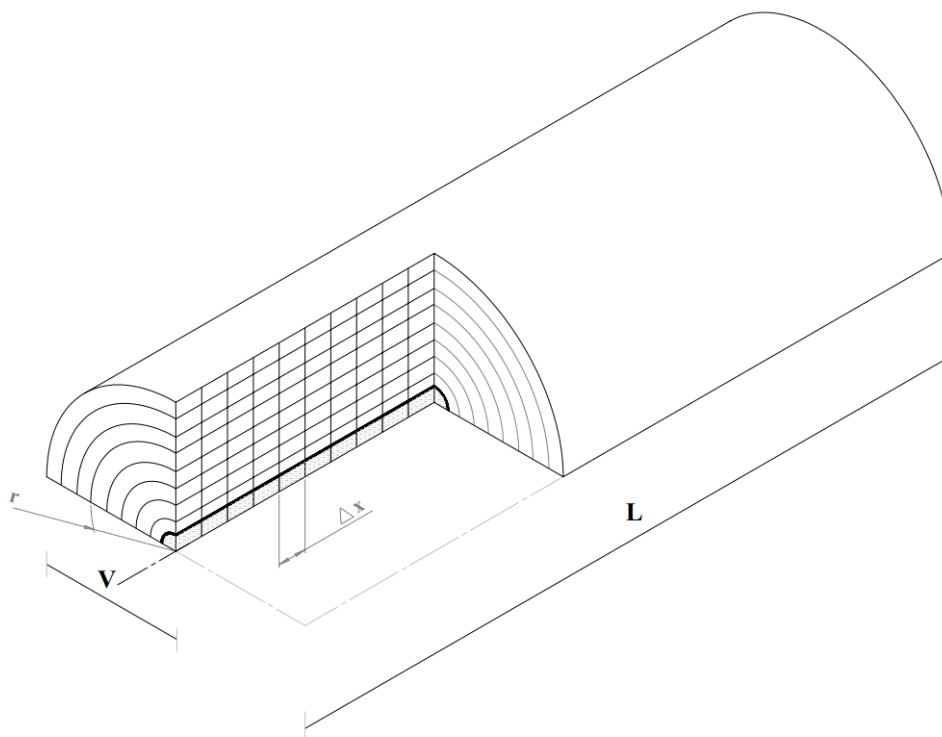
U nastavku je prikazana diskretizacija domene, osnovna toplinska jednadžba te način rješavanja u programskom paketu MATLAB®.

2.1. Diskretizacija domene tla i izmjenjivača

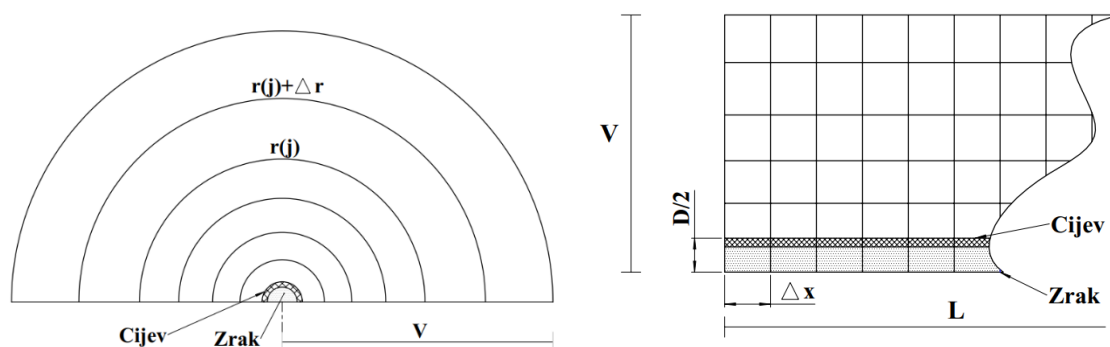
Promatrana domena sastoji se od zraka koji struji kroz cijev, stijenke cijevi i slojeva tla koji okružuju izmjenjivač. Kako je promatrana domena kružnog presjeka i simetrična, modelirana je samo polovica domene. Domena modela sastoji se od n (broj radijalnih podjela) cilindričnih polu-prstenova i m (broj horizontalnih podjela) horizontalnih segmenata tla. Navedeno čini mrežu elemenata koja je prikazana na slikama 7 i 8.



Slika 6 Skica izgleda izmjenjivača sa karakterističnim dimenzijama



Slika 7 Podjela domene u niz poluprstenova



Slika 8 Detalj podjele domene u radijalnom i horizontalnom smjeru

Veličinu domene definiraju visina (V) i duljina domene (L). Volumen pojedinog elementa određen je duljinom Δx i dvama koncentričnim polukružnim plohama poznatih radijusa ($r(j)$ i $r(j+1)$). U ovisnosti o zadanom broju elemenata, vrijednosti dimenzije svakog elementa se automatski prilagođavaju definiranoj veličini domene. Radijus poluprstena povećava se prema:

$$\Delta r = \sqrt[n-2]{\frac{r_0}{0.5 \cdot D_{cijev}}} \quad [m]$$

$$r_{j+1} = r_j + \Delta r \quad [m]$$

Gdje je r_0 (polumjer domene) ujedno i visina domene (V). D_{cijev} definira vanjski promjer cijevi izmjenjivača, a n broj radijalnih podjela domene. Veličina elementa u smjeru x-osi (horizontalno) ovisi o duljini izmjenjivača (L) i broju horizontalnih podjela domene (m):

$$\Delta x = \frac{L}{m} \quad [m]$$

Radijus elementa koji predstavlja zrak određen je unutarnjim promjerom cijevi (r_u), pri čemu je zrak opisan jednim redom elemenata. Elementi cijevi su određeni dimenzijama cijevi, odnosno unutarnjim promjerom (d) i vanjskim promjerom (D_{cijev}), tvoreći pritom red elemenata koji je jedini u kontaktu sa zrakom koji struji kroz izmjenjivač.

Odnos osnovnih termodinamičkih svojstava pojedinih elemenata modela prikazan je u tablici:

Tablica 4 Osnovna termodinamička svojstva tvari korištenih u modelu [1] [4]

	Toplinska provodnost ($W m^{-1} K^{-1}$)	Specifični toplinski kapacitet ($J kg^{-1} K^{-1}$)	Gustoća ($kg m^{-3}$)
Tlo	1,5	1500	2000
Cijev (PVC)	0,16	1250	1300
Zrak	0,023	1000	1,35

2.2. Toplinska bilanca elementa

Toplina se unutar domene, koju čine zrak u cijevi, stijenka cijevi i tlo, prenosi konvekcijom i kondukcijom. Konvektivna izmjena topline je uvjetovana termodinamičkim svojstvima zraka i brzinom strujanja zraka kroz cijev izmjenjivača, a odvija se od toplije stijenke cijevi na hladniji zrak (u režimu grijanja, kada je tlo na višoj temperaturi od vanjskog zraka). Nadalje, tlo izmjenjuje toplinu konduktivno sa stijenkom cijevi, koja ima nižu temperaturu od tla (u režimu grijanja).

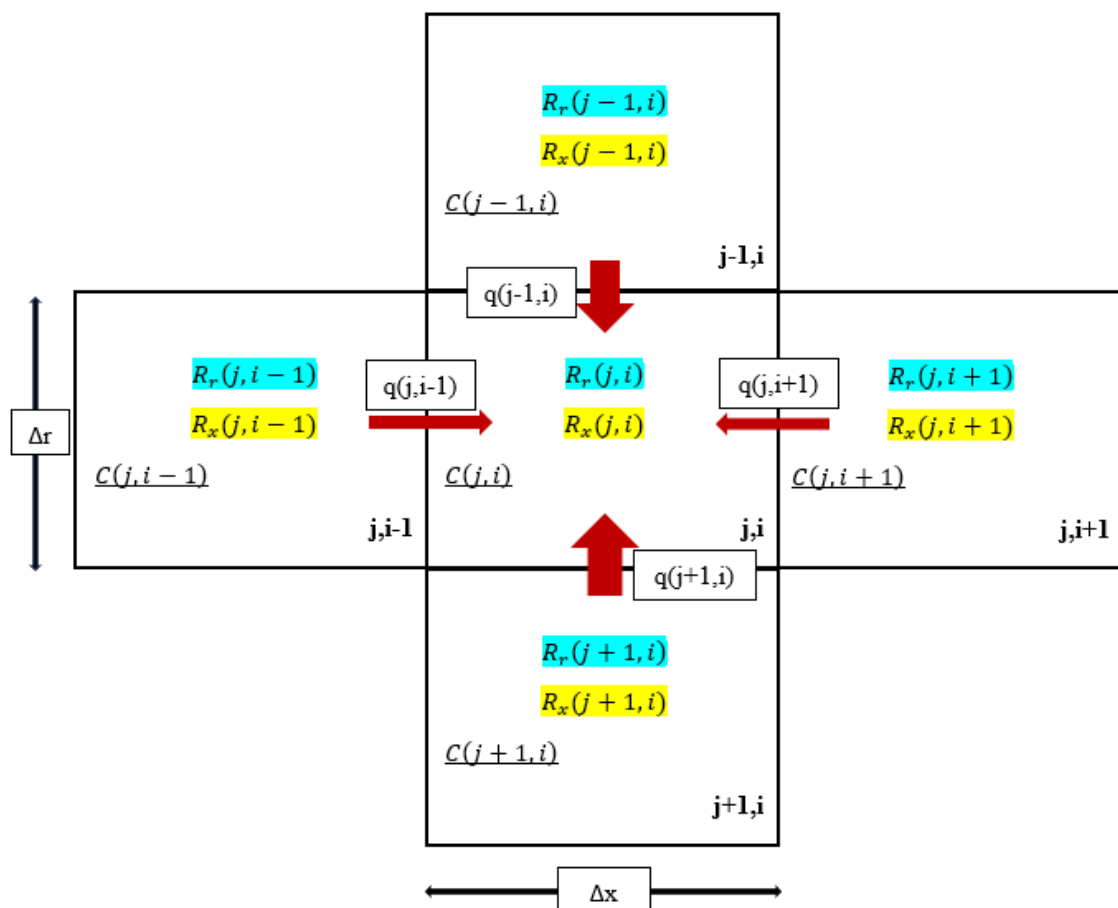
Toplinsku bilancu elementa u pojedinom vremenskom koraku definiraju karakteristične veličine: toplinski otpor u radijalnom smjeru (R_r), toplinski otpor u horizontalnom smjeru (R_x) i toplinski kapacitet (C),

$$R_r(j, i) = \ln\left(\frac{r_j}{r_{j+1}}\right) \frac{1}{\pi \Delta x \lambda_{tlo}} \quad \left[\frac{K}{W}\right]$$

$$R_x(j, i) = \frac{\Delta x}{\lambda_{tlo} (r_j^2 - r_{j-1}^2) \pi} \quad \left[\frac{K}{W}\right]$$

$$C(j, i) = 0,5 \Delta x (r_j^2 - r_{j+1}^2) \pi \rho(j, i) c_x(j, i) \quad \left[\frac{J}{K}\right]$$

prikazane na slici N. Toplinski kapacitet elementa ($C(j, i)$) umnožak je volumena elementa oblika poluprstena, i specifičnog toplinskog kapaciteta (c_x). Izmjena topline odvija se u između promatranog elementa i četiri susjedna elementa sa kojima graniči, kao što je prikazano na sljedećoj slici.



Slika 9 Koordinate elemenata i karakteristične veličine toplinske bilance

Opća toplinska bilanca elementa iskazana je jednadžbom:

$$q(j, i - 1) + q(j, i + 1) + q(j + 1, i) + q(j - 1, i) = C(j, i) \frac{d\vartheta}{dt} \quad [W]$$

Prethodni izraz raspisan za vremenski korak Δt i slučaj provođenja topline sa svim susjednim elementima je:

$$\begin{aligned} \frac{\vartheta_{j,i-1} - \vartheta_{j,i}}{R_x(j, i)} + \frac{\vartheta_{j,i+1} - \vartheta_{j,i}}{R_x(j, i)} + \frac{\vartheta_{j+1,i} - \vartheta_{j,i}}{\frac{R_r(j + 1, i) + R_r(j, i)}{2}} + \frac{\vartheta_{j-1,i} - \vartheta_{j,i}}{\frac{R_r(j - 1, i) + R_r(j, i)}{2}} \\ = \frac{C(j, i)}{\Delta t} (\vartheta_{j,i} - \vartheta_{j,i}^S) \end{aligned}$$

gdje $\vartheta_{j,i}^S$ predstavlja temperaturu elementa izračunatu u prethodnom vremenskom koraku.

Otpor u horizontalnom smjeru (R_x) jednak je među elementima za svaki pojedini materijal. Iz

raspisanog izraza toplinske bilance elementa vidljivo je da je otpor u radijalnom smjeru (R_r) između dva susjedna elementa srednja vrijednost zbroja radijalnih otpora elemenata. S obzirom na to da zrak sa stijenkom cijevi toplinu izmjenjuje isključivo konvekcijom, radijalni otpor na strani zraka ne ovisi o toplinskoj provodnosti zraka, nego o koeficijentu prijelaza topline (α). Koeficijent prijelaza topline na strani zraka (α) računa se prema korelaciji *Petukhova* za turbulentno strujanje plinova u cijevi [3]:

$$Nu = \frac{\left(\frac{f}{8}\right) Re Pr}{1,07 + 12,7 \left(Pr^{\frac{2}{3}} - 1\right) \left(\frac{f}{8}\right)^{\frac{1}{2}}}$$

$$f = (1,82 \log_{10} Re - 1,64)^{-2}$$

$$0,5 < Pr < 2000$$

$$10^4 < Re = \frac{\rho w D}{\mu} < 5 \cdot 10^6$$

Koeficijent prijelaza topline proizlazi iz Nusseltovog broja:

$$\alpha = \frac{Nu D}{\lambda} \left[\frac{W}{m^2 K} \right]$$

Vrijednost toplinskog otpora u radijalnom smjeru na strani zraka:

$$R_r(j, i) = r_{j,i} \pi \Delta x \alpha \left[\frac{K}{W} \right]$$

Otpor u radijalnom smjeru, između zraka i cijevi ovisi o toplinskoj provodnosti cijevi (λ_{cijev}) i koeficijentu prijelaza topline na strani zraka (α). Za elemente u gornjem sloju domene ($j=1$), tj. u gornjem rubnom sloju tla, definirana je konstantna vanjska temperatura zraka (ϑ_{vanj}) s kojim element graniči, a koja je implementirana direktno u jednadžbe bilance izmjene topline tih elemenata:

$$\frac{\vartheta_{j,i-1} - \vartheta_{j,i}}{R_x(j,i)} + \frac{\vartheta_{j,i+1} - \vartheta_{j,i}}{R_x(j,i)} + \frac{\vartheta_{j+1,i} - \vartheta_{j,i}}{\frac{R_r(j+1,i) + R_r(j,i)}{2}} + \frac{\vartheta_{vanj} - \vartheta_{j,i}}{R_r(j,i)} = \frac{c(j,i)}{\Delta t} (\vartheta_{j,i} - \vartheta_{j,i}^S)$$

Za dijelove domene koje se nalaze na lijevom rubu domene postavljen je adijabatski rubni uvjet, odnosno onemogućena je izmjena topline izvan granica domene. Za elemente domene koji se nalaze na lijevom rubu domene ($i=1$), jednadžba toplinske bilance ima oblik:

$$\frac{\vartheta_{j,i+1} - \vartheta_{j,i}}{R_x(j,i)} + \frac{\vartheta_{j+1,i} - \vartheta_{j,i}}{\frac{R_r(j+1,i) + R_r(j,i)}{2}} + \frac{\vartheta_{j-1,i} - \vartheta_{j,i}}{\frac{R_r(j-1,i) + R_r(j,i)}{2}} = \frac{c(j,i)}{\Delta t} (\vartheta_{j,i} - \vartheta_{j,i}^S)$$

Za elemente domene na desnom rubu domene ($i=m$), vrijedi:

$$\frac{\vartheta_{j,i-1} - \vartheta_{j,i}}{R_x(j,i)} + \frac{\vartheta_{j+1,i} - \vartheta_{j,i}}{\frac{R_r(j+1,i) + R_r(j,i)}{2}} + \frac{\vartheta_{j-1,i} - \vartheta_{j,i}}{\frac{R_r(j-1,i) + R_r(j,i)}{2}} = \frac{C(j,i)}{\Delta t} (\vartheta_{j,i} - \vartheta_{j,i}^S)$$

Za potrebe parametarske analize definira se jednadžba izračuna izmijenjene topline u svakom vremenskom koraku:

$$Q = q_{m,zrak} \cdot c_{p,zrak} (\vartheta_{ul,zrak} - \vartheta_{iz,zrak}) \cdot \Delta t \cdot \frac{1}{3600} \quad [Wh]$$

Izračunata izmijenjena toplina ovisi o razlici temperatura zraka na ulazu i izlazu izmjenjivača ($\vartheta_{ul,zrak} - \vartheta_{iz,zrak}$), masenom protoku, specifičnom toplinskom kapacitetu zraka i vremenskom koraku. Cijeli izraz se dijeli sa 3600 kako bi se rezultata iskazao u Wh. Za potrebe parametarske analize se definira i izraz za toplinski tok q :

$$\Phi = q_{m,zrak} \cdot c_{p,zrak} (\vartheta_{ul,zrak} - \vartheta_{iz,zrak}) \quad [W]$$

2.3. Implementacija modela u MATLAB

Broj jednadžbi koje se rješavaju matrično direktno ovisi o broju elemenata $m \cdot n$, tj. o broju čvorova čije se temperature traže. Rješenje, vektor $T[m \cdot n, 1]$, je umnožak inverza matrice koeficijenata $A[m \cdot n, m \cdot n]$ i vektora konstanti $C[m \cdot n, 1]$:

$$[T] = [A]^{-1}[C]$$

Rješenje toplinske bilance na kraju svakog koraka, u obliku vektora temperatura T , ovisi o temperaturama elemenata izračunatih u prethodnom koraku ($\vartheta_{j,1}^S$) i izmijenjenim toplinskim tokovima (q). Toplinska bilanca se radi za svak pojedini element u svakom vremenskom koraku.

Izračun svojstava zraka, koja se mijenjaju u svakom vremenskom koraku (Δt), provodi se pomoću program CoolProp, koji preko poznatih veličina zraka računa nepoznate veličine potrebne za simulaciju, neposredno u simulaciji. U sljedećem poglavlju provedena je analiza osjetljivosti modela na prostornu i vremensku diskretizaciju domene

3. Analiza prostorne i vremenske diskretizacije domene

Kako bi se provele potrebne analize definirane zadatkom, prethodno opisani model implementiran je u MATLAB-u®, te je provedena analiza utjecaja vremenskog koraka simulacije i broja elemenata. Uz točnost rezultata simulacije, pažnju treba posvetiti i racionalnoj uporabi računalnih resursa i vremena dostupnog za simulaciju. Ako drukčije nije navedeno, u svim slučajevima korišteni su sljedeći početni i rubni uvjeti:

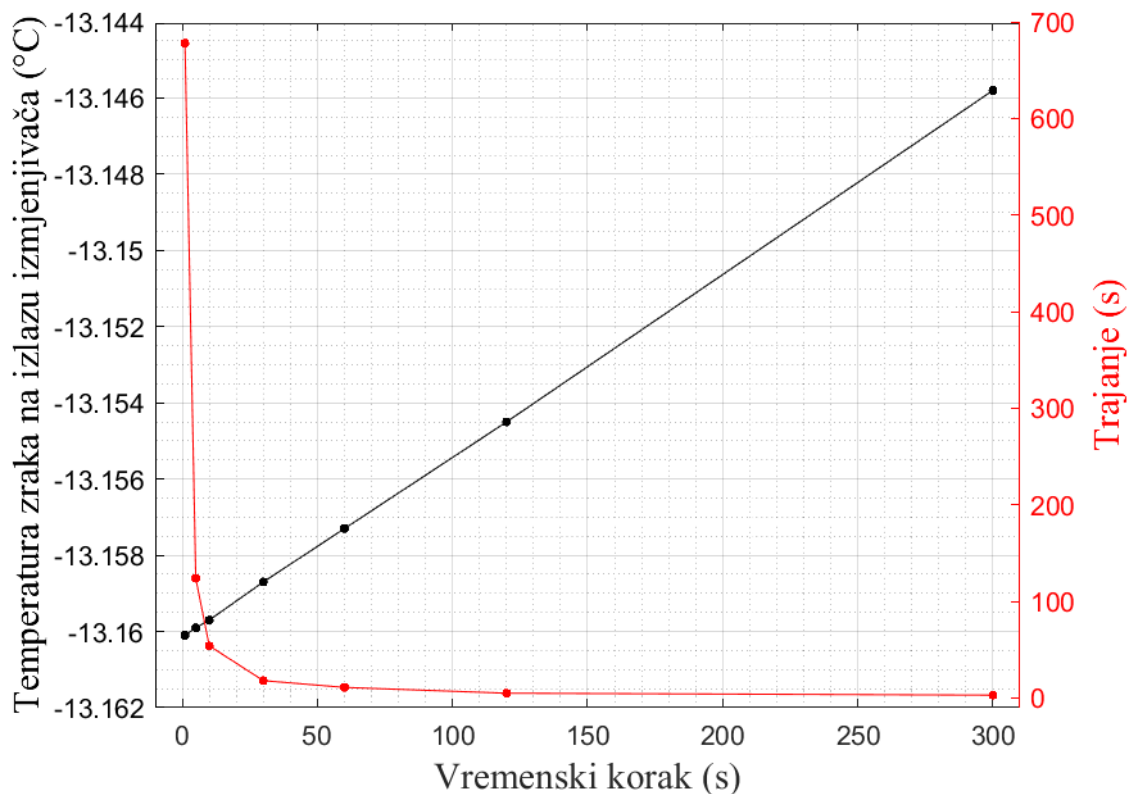
Tablica 5 Početni i rubni uvjeti simulacije za analizu prostorne i vremenske diskretizaciji domene

Temperatura vanjskog zraka	$\vartheta_{zrak} = -15\text{ }^{\circ}\text{C}$
Temperatura tla	$\vartheta_{tlo} = 8\text{ }^{\circ}\text{C}$
Duljina izmjenjivača	$L = 2\text{ m}$
Visina domene/dubina polaganja cijevi	$V = 1,5\text{ m}$
Broj horizontalnih podjela domene	$m = 50$
Broj radijalnih podjela domene	$n = 40$
Vanjski promjer cijevi	$D_{cijev} = 250\text{ mm}$
Debljina stijenke cijevi	$s = 14,8\text{ mm}$
Hrapavost cijevi	$k = 0,0015 \cdot 10^{-3}\text{ m}$
Vremenski korak	$\Delta t = 30\text{ s}$
Simulirano vrijeme	$Vrijeme_{sim} = 30\text{ min}$
Brzina strujanja zraka	$v = 1,5\text{ m s}^{-1}$
Toplinska provodnost tla	$\lambda_{tlo} = 1,5\text{ W m}^{-2}\text{ K}^{-1}$
Gustoća tla	$\rho_{tlo} = 2000\text{ kg m}^{-3}$
Specifični toplinski kapacitet tla	$c = 1800\text{ J kg}^{-1}\text{ K}^{-1}$

3.1. Utjecaj vremenskog koraka na rezultate simulacije

U opseg analize utjecaja vremenskog koraka na simulaciju uzeti su koraci od 1 do 300 s. Kao glavni parametar usporedbe utjecaja razmatrana je izlazna temperatura izmjenjivača i trajanje

simulacije. Slika prikazuje krivulju izlazne temperature (crno) i krivulju trajanja simulacije (crveno):



Slika 10 Utjecaj vremenskog koraka na temperaturu zraka na izlazu i izmijenjenu toplinu

Tablica 6 Utjecaj vremenskog koraka na rezultate simulacije

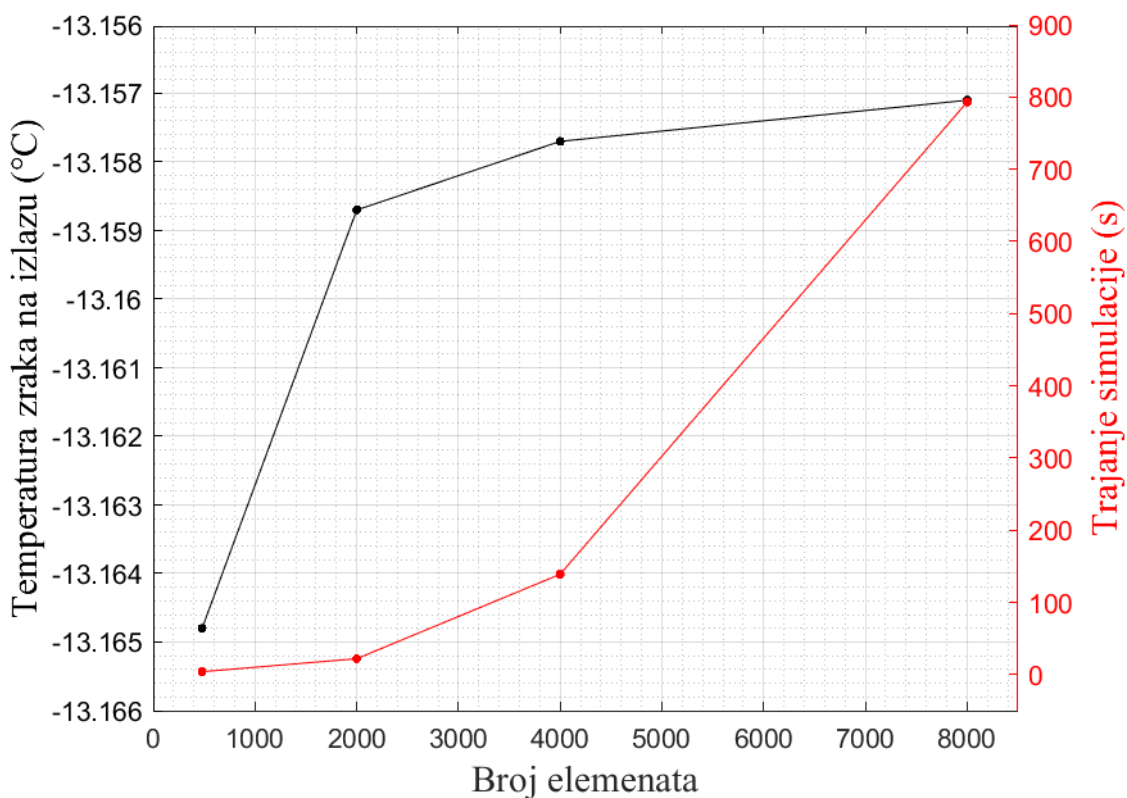
Vremenski korak (s)	Temperatura zraka na izlazu (°C)	Temperatura zraka na polovici izmjenjivača (°C)	Trajanje simulacije (s)	Izmijenjena toplina (Wh)
1	-13,1601	-14,0237	678	76,81
5	-13,1599	-14,0236	124	76,80
10	-13,1597	-14,0235	54	76,79
30	-13,1587	-14,0230	18	76,76
60	-13,1573	-14,0222	11	76,71
120	-13,1545	-14,0206	5	76,61
300	-13,1458	-14,0159	3	76,33

Zanemariv je porast temperature s produljenjem vremenskog koraka. S produljenjem vremenskog koraka od 1 do 30 s, temperatura zraka na izlazu izmjenjivača se povećala 0,01 %, a temperatura zraka na polovici cijevi izmjenjivača 0,005 %. Trajanje simulacije se skraćuje 38 puta, ako se usporedi trajanje simulacije sa vremenskim korakom od 1 s sa vremenskim

korakom od 30 s. Odstupanje od srednje vrijednosti izlazne temperature za razmatrane vremenske korake (-13,1566 °C) je +/- 0,02 %. Odstupanje izmijenjene topline za srednju vrijednost 76,69 Wh je +/- 0,5 %. Produljenjem izmjenjivača razlike se smanjuju jer se temperatura zraka asimptotski približava konačnoj temperaturi koju je moguće postići za definiranu temperaturu tla. U daljnjim simulacijama vremenski korak će se definirati za vrijednosti veće ili jednake 30 s.

3.2. Utjecaj broja elemenata na simulaciju

Broj elemenata u analizi utjecaja na simulaciju se kreće od 480 do 7500. Glavni parametar usporedbe utjecaja su temperatura zraka na izlazu iz izmjenjivača (crna krivulja) i trajanje simulacije (crvena krivulja).



Slika 11 Utjecaj broja elemenata na temperaturu zraka na izlazu izmjenjivača i trajanje simulacije

Tablica 7 Utjecaj broja elemenata na rezultate simulacije

Broj elemenata	Prosječni vol. elementa (dm ³)	Mreža elemenata	Temp. zraka na izlazu izmjenjivača (°C)	Temp. zraka na polovici izmjenjivača (°C)	Trajanje simulacije (s)
8000	0,88	100 · 80	-13,1571	-14,0405	793
4000	1,77	80 · 50	-13,1577	-14,0362	139
2000	3,53	50 · 40	-13,1587	-14,0230	22
480	14,75	24 · 20	-13,1648	-13,9866	4

Trajanje simulacije raste eksponencijalno s porastom broja elemenata, odnosno sa povećavanjem gustoće mreže elemenata domene. Ako se usporede izlazni podaci za broj elemenata 2000 i 8000, uočava se da je promjena temperature zraka na izlazu 0,01 %, dok se istovremeno trajanje simulacije produljilo 36 puta. Ako se u obzir uzima akumulacija greške za simulacije čije je vrijeme simulacije puno dulje od 30 min, podjela domene na 4000 elemenata donosi dobru ravnotežu između odstupanja i trajanja simulacije. Odstupanje izlazne temperature je 0,005 %, a trajanje je gotovo 6 puta kraće. U daljnjim simulacijama, broj elemenata će se uzimati između 2000 i 4000.

Izneseni rezultati daju smjernice postavljanja parametara diskretizacije domene s obzirom na veličinu domene i vrijeme kojim se raspolaže za simuliranje izmjene topline izmjenjivača zemlja-zrak. S obzirom da će se u sljedećim poglavljima analizirati parametri koji su relativno proizvoljni, a pravilnim odabirom može se poboljšati učinkovitost izmjene topline izmjenjivača sa tlom, koristit će se vremenski korak od 30 do 300 s i između 2000 i 4000 elemenata. Za simulacije stvarnih radnih uvjeta u simuliranom vremenskom trajanju od više dana, koje će biti razmatrane u kasnijim poglavljima, koristit će se vremenski korak od 300 do 600 s. Ovakav pristup omogućiti će vremenski učinkovito i prihvatljivo točno simuliranje rada izmjenjivača.

4. PARAMETARSKA ANALIZA IZMJENJIVAČA TOPLINE

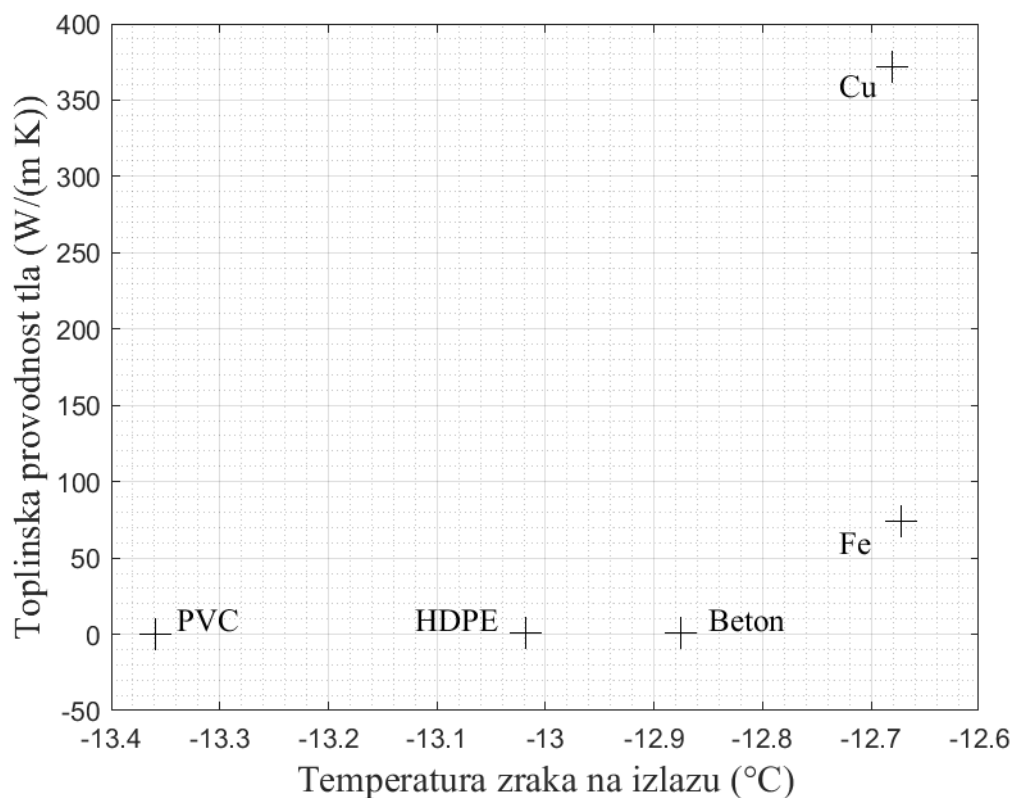
Parametarska analiza provodi se u cilju pronalaženja uvjeta ugradnje, rada i vrste materijala za što efikasniji rad izmjenjivača topline. Pri tome se teži da izmijenjena toplina bude što veća, a izlazna temperatura zraka što bliža temperaturi tla, s obzirom na konačnu određenu duljinu izmjenjivača. U stvarnim uvjetima ta je duljina uvjetovana površinom predviđenom za postavljanje sustava i tehno-ekonomskom opravdanosti povećanja duljine cijevi. U sklopu ovog poglavlja razmotrit će se i opcija višecijevnog izmjenjivača topline i potrebnog razmaka dviju susjednih cijevi prilikom ugradnje. Prilikom analize u ovom poglavlju, ako drugačije nije naznačeno, postavljeni su sljedeći početni i rubni uvjeti:

Tablica 8 Početni i rubni uvjeti korišteni pri parametarskoj analizi izmjenjivača topline

Temperatura vanjskog zraka	$\vartheta_{zrak} = -15\text{ }^{\circ}\text{C}$
Temperatura tla	$\vartheta_{tlo} = 8\text{ }^{\circ}\text{C}$
Duljina izmjenjivača	$L = 2\text{ m}$
Visina domene/dubina polaganja cijevi	$V = 1,5\text{ m}$
Broj horizontalnih podjela domene	$m = 80$
Broj radijalnih podjela domene	$n = 50$
Vanjski promjer cijevi	$D_{cijev} = 250\text{ mm}$
Debljina stijenke cijevi	$s = 14,8\text{ mm}$
Hrapavost cijevi	$k = 0,0015 \cdot 10^{-3}\text{ m}$
Vremenski korak	$\Delta t = 30\text{ s}$
Simulirano vrijeme	$Vrijeme_{sim} = 15\text{ min}$
Brzina strujanja zraka	$v = 1,5\text{ m s}^{-1}$
Korisnost ventilatora	$\eta_v = 0.6$
Materijal cijevi	<i>HDPE</i>
Gustoća tla	$\lambda = 1,5\text{ W m}^{-1}\text{ K}^{-1}$
Toplinska provodnost tla	$\rho = 2000\text{ kg m}^{-3}$
Specifični toplinski kapacitet	$c = 1500\text{ J kg}^{-1}\text{ K}^{-1}$

4.1. Utjecaj materijala cijevi

Pri analizi utjecaja materijala cijevi uzete su identične dimenzije cijevi za sve materijale - $\Phi 250 \times 14,8$. Unutarnji presjek cijevi, kao i debljina stijenke, inače ovise o normiranim dimenzijama za izradu cijevi iz tog materijala. Relativno kratko simulirano vrijeme (15 min) onemogućuje postizanje iste temperature zraka na izlazu kao kod simulacija sa duljim simuliranim vremenom, odnosno sprječava mogućnost približavanja stacionarnom stanju. Slika prikazuje odnos toplinske provodnosti materijala cijevi i temperature zraka na izlazu izmjenjivača:



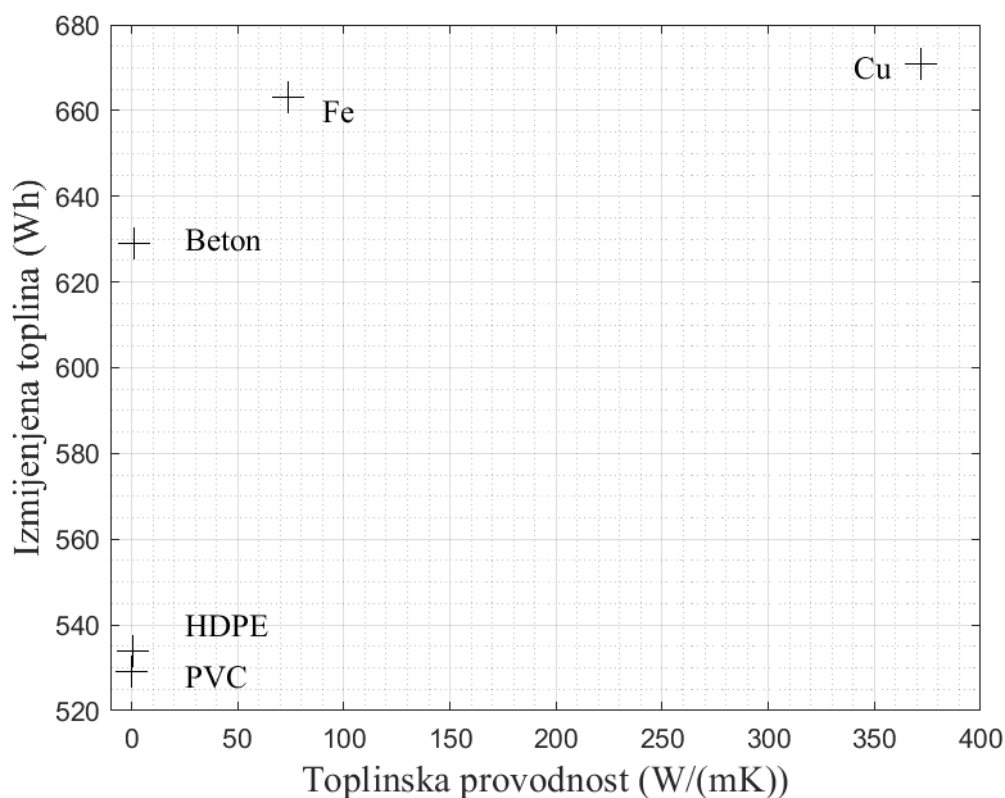
Slika 12 Utjecaj materijala cijevi jednakih dimenzija na temperaturu zraka na izlazu izmjenjivača

Tablica 9 Utjecaj materijala cijevi jednakih dimenzija na rezultate simulacije [1] [3]

Materijal	Toplinska provodnost ($\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$)	Gustoća (kg m^{-3})	Specifični toplinski kapacitet ($\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$)	Temp. zraka na izlazu ($^{\circ}\text{C}$)	Temp. zraka na polovici izmjenjivača ($^{\circ}\text{C}$)	Izmijenjena toplina (Wh)
HDPE	0,50	950	2000	-13,0182	-13,9614	41,05
PVC	0,16	1300	1250	-13,3590	-14,1436	34,70
Beton	1	2000	1100	-12,8761	-13,8850	43,46
Fe	74	7500	500	-12,6722	-13,7747	46,86
Cu	372	8300	400	-12,6810	-13,7792	46,74

Najlošija svojstva za izmjenu topline sa zrakom imaju polimerne cijevi. Temperatura zraka na izlazu PVC cijevi je za kratku simulaciju, trajanja 30 min, gotovo $0,5^{\circ}\text{C}$ niža od temperature zraka na izlazu iz betonske cijevi. Također je izmijenjena toplina izmjenjivača sa PVC cijevi 20 % manja u usporedbi s izmjenjivačem s betonskom cijevi. Željezo i bakar imaju više stotina puta veću vrijednost toplinske provodnosti u usporedbi sa PVC-om, ali se temperatura zraka na izlazu izmjenjivača od željeza i bakra ne razlikuje više od jednog stupnja ($+0,689^{\circ}\text{C}$ za željezo i $+0,678^{\circ}\text{C}$ za bakar). Međutim, izmijenjena toplina, u usporedbi sa izmjenjivačem od PVC-a, raste približno 35 % i za željezo i za bakar. Ipak, pri odabiru materijala cijevi, zahtjevi kao otpornost na vlagu, jednostavno održavanje i higijenski zahtjevi imaju veći utjecaj od zahtjeva za visokom toplinskom provodnosti cijevi. Stijenka cijevi izmjenjivača zemlja-zrak ne predstavlja veliki otpor prolazu topline zbog svojih malih dimenzija.

Analizom duljeg vremenskog razdoblja rada izmjenjivača (6 h) sa različitim materijalima cijevi, koje imaju približan unutarnji promjer, i smanjenim brojem elemenata (2000), te povećanom duljinom izmjenjivača (10 m), dobiva se graf ovisnosti temperature zraka na izlazu o toplinskoj provodnosti (slika 13) i niže navedeni izlazni podaci (tablica 10):



Slika 13 Utjecaj materijala cijevi standardnih dimenzija na izmijenjenu toplinu
(simulirano vrijeme 6 h)

Tablica 10 Utjecaj materijala cijevi standardnih dimenzija na rezultate simulacije
(simulirano vrijeme 6 h) [1] [10] [11] [13]

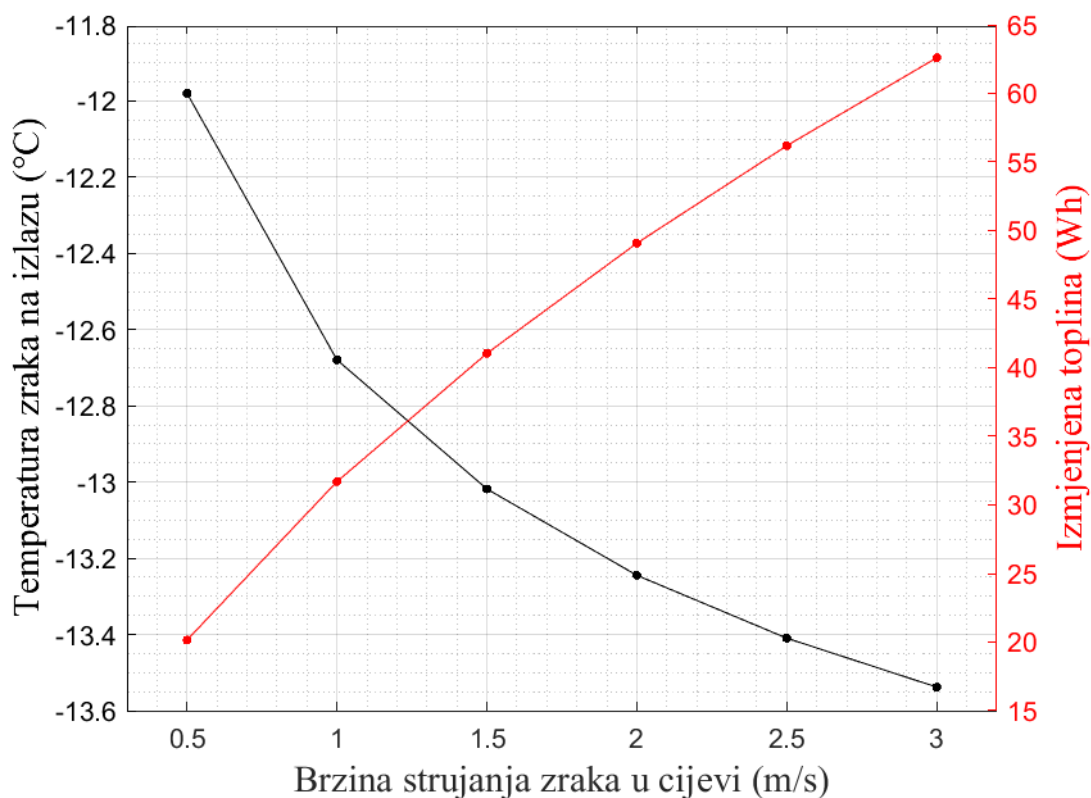
Materijal	Dimenzije cijevi	Temp. zraka na izlazu (°C)	Temp. zraka na polovici izmjenjivača (°C)	Izmijenjena toplina (Wh)	Toplinski tok (W)
HDPE	φ250x14,8	-8.7930	-11.5308	3174	529
PVC	φ250x6,2	-9.5762	-11.9982	3205	534
Beton	φ316x33	-9.3322	-11.8552	3776	629
Fe	φ267x8	-9.1460	-11.7461	3978	663
Cu	φ267x4	-9.4351	-11.9172	4026	671

Za polimerne cijevi izmijenjena toplina je do 20 % manja nego za metalne cijevi. Izmjenjivač sa bakrenom cijevi postiže najveću izmijenjenu toplinu, a koja je u usporedbi sa PVC-om 27 % veća. U praksi dobra fizikalna svojstva i otpornost plastičnih cijevi na razne tvari okoliša, uz povoljniju cijenu, imaju prednost nad dobrim termodinamičkim svojstvima metalnih cijevi.

Betonske cijevi imaju dobra svojstva za prolaz topline i otpornost na tvari okoliša, ali ne ispunjavaju dobro higijenske zahtjeve sustava.

4.2. Utjecaj brzine strujanja zraka

Brzina strujanja zraka ima značajan utjecaj na izlaznu temperaturu i izmijenjenu toplinu u izmjenjivaču. Povećanjem brzine strujanja izlazna temperatura pada, dok istovremeno raste izmijenjena toplina. Sa povećanjem brzine povećava se i protok zraka kroz izmjenjivač. Dok se količina zraka povećava sa kvadratom radijusa, rast vrijednosti izmijenjene topline je približno linearan, jer se površina cijevi povećava linearno. Slika prikazuje krivulju ovisnosti temperature zraka na izlazu o brzini strujanja zraka (crno) i ovisnost izmijenjene topline o brzini strujanja zraka (crveno):



Slika 14 Utjecaj brzine strujanja zraka na temperaturu zraka na izlazu izmjenjivača i izmijenjenu toplinu

Tablica 11 Utjecaj brzine strujanja zraka na rezultate simulacije

Brzina (m/s)	Temp. zraka na izlazu (°C)	Temp. zraka na polovici izmjenjivača (°C)	Izmjenjena toplina (Wh)	Specifični pad tlaka (Pa m ⁻¹)	Koeficijent prijelaza topline (W m ⁻² K ⁻¹)
0.5	-11,9796	-13,3973	20,15	0,03	3,0398
1	-12,6793	-13,7740	31,70	0,08	4,9631
1.5	-13,0182	-13,9614	41,05	0,17	6,6824
2	-13,2447	-14,0826	49,08	0,28	8,2711
2.5	-13,4098	-14,1706	56,19	0,41	9,7774
3	-13,5381	-14,2386	62,60	0,57	11,2224

Povećanjem brzine strujanja zraka raste koeficijent prijelaza topline na strani zraka (α) i dovodi do povećanja specifičnog pada tlaka u cjevovodu (R). Male brzine rezultiraju višom izlaznom temperaturom zraka i manjim volumenskim protokom zraka. Treba uočiti da je izmijenjeni toplinski tok recipročan koeficijentu izmjene topline. Ako se uspoređuju brzina strujanja zraka od 1 i 3 m s⁻¹, za trostruko povećanje brzine se izmijenjena toplina povećala dvostruko, a izlazna temperatura zraka smanjila za 0,89 °C. Daljnjim povećanjem brzine, usporava se rast koeficijenta prijelaza topline na strani zraka (α), a pad tlaka (R) se povećava eksponencijalno. Za brzinu strujanja zraka od 0,5 m s⁻¹, nije ostvaren dovoljno veliki Reynoldsov broj, da bi se koeficijent zraka pouzdano mogao izračunati *Petukhovom* relacijom, koja se koristi za turbulentna strujanja tekućina u cijevi, kakvo se sa većim odabranim brzinama ostvaruje u cijevi izmjenjivača.

4.3. Utjecaj veličine cijevi

U ovom podpoglavlju promatra se utjecaj veličine cijevi na izlazne podatke simulacije kada se protok drži konstantnim. Odabrana je PVC cijev normiranih dimenzije prema tablici:

Tablica 12 Standardne dimenzije odabranih PVC cijevi [11]

PVC SN4 (prema EN1401-1)		
Nazivni promjer	Vanjski promjer D (mm)	Debljina stijenke cijevi s (mm)
DN100	110	3,2
DN125	125	3,2
DN150	160	4,0
DN200	200	4,9
DN250	250	6,2

Protok zraka je fiksiran na $150 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$. Snaga ventilatora izračunata je za pad tlaka na filtru od 150 Pa, učinkovitost ventilatora (η) 0,4 i lokalne koeficijente pada tlaka za segmente cjevovoda (ζ) kojeg čine jedna protukišna kapa, 3 koljena i zaklopka zraka:

Tablica 13 Svojstva segmenata cijevi i ventilatora potrebnih za izračun snage za pogon ventilatora

Protu-kišna kapa / ulaz zraka	$\zeta = 1,5$
Koljeno	$\zeta = 0,5$
Zaklopka	$\zeta = 0,5$
Učinkovitost ventilatora	$\eta = 0,6$

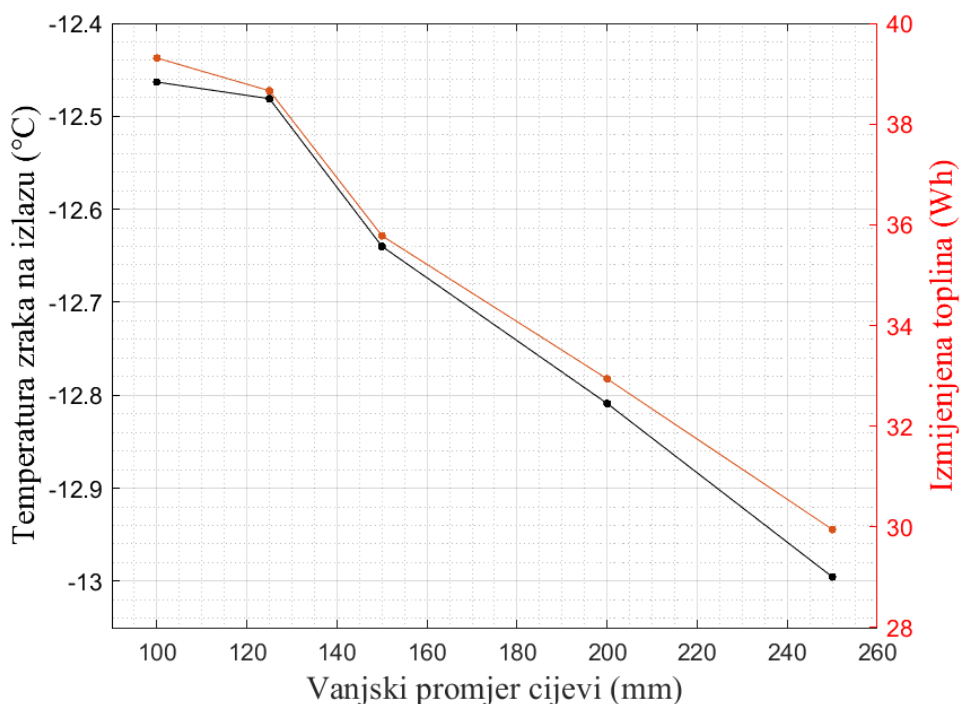
Ukupni pad tlaka se računa prema formuli:

$$\Delta p = \left(\zeta + \lambda \cdot \frac{L}{d} \right) \frac{\rho \cdot v^2}{2} \quad [Pa]$$

Potrebna snaga na ventilatoru:

$$P_{vent} = \frac{\Delta p \cdot q_v}{\eta} \quad [W]$$

Na slici je prikazana ovisnost temperature zraka na izlazu izmjenjivača (crno) i izmijenjene topline (crveno) o dimenzijama cijevi:



Slika 15 Utjecaj veličine cijevi na temperaturu zraka na izlazu izmjenjivača i izmijenjenu toplinu za konstantan protok zraka

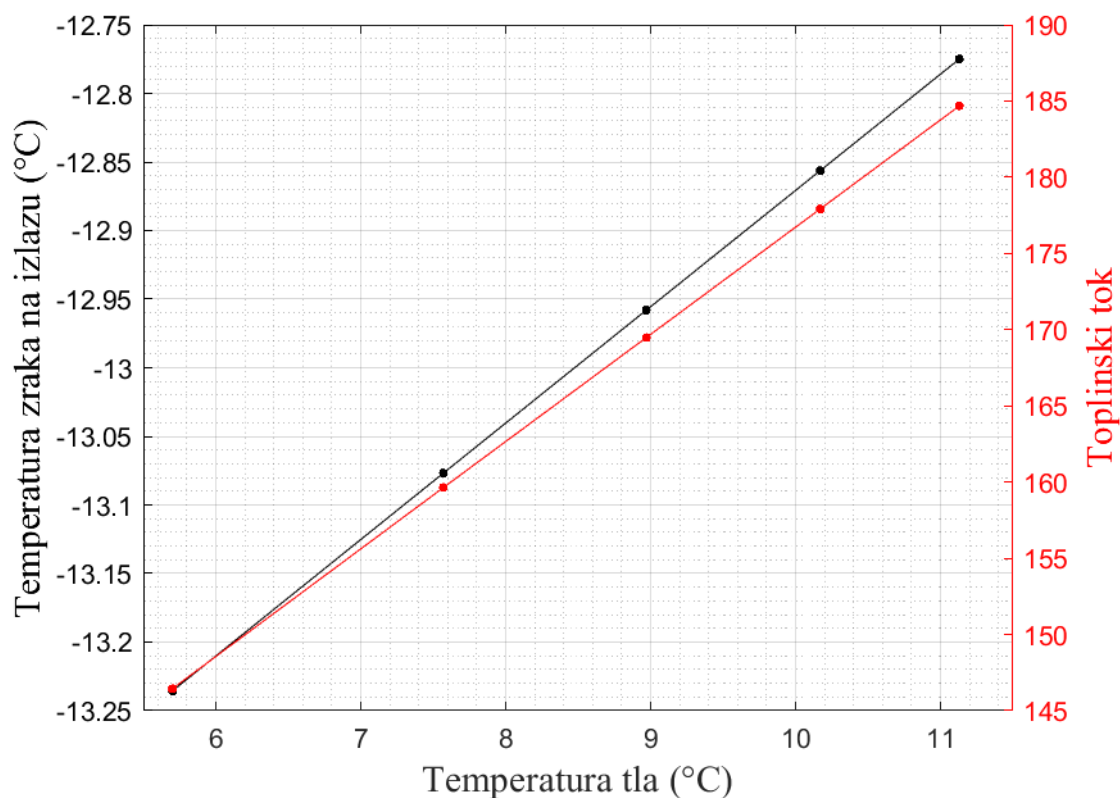
Tablica 14 Utjecaj veličine cijevi na rezultate simulacije za konstantan protok zraka

DN	Brzina strujanja zraka (m s^{-1})	Temp. zraka na izlazu ($^{\circ}\text{C}$)	Temp. zraka na polovici cijevi ($^{\circ}\text{C}$)	Koeficijent prijelaza topline ($\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$)	Izmijenjena toplina (Wh)	Potrebna snaga ventilatora(W)
100	4,94	-12,4632	-13,6625	19,6668	39,31	15,5
125	3,77	-12,4811	-13,6720	15,5272	38,66	13,4
150	2,30	-12,6400	-13,7579	10,0805	35,78	11,5
200	1,47	-12,8089	-13,8490	6,8354	32,94	10,9
250	0,94	-12,9954	-13,9492	4,6571	29,95	10,6

Ako se usporede toplinski tokovi za cijevi DN100 i DN250, izmijenjena toplina je za cijev manjeg poprečnog presjeka 31 % veća, uz 46 % veću potrebnu snagu za pogon ventilatora. Kada bi se brzina strujanja zraka nastavila povećavati, odnosno kada bi se smanjile dimenzije cijevi, uz konstantan protok, počela bi padati temperatura zraka na izlazu, zbog većeg utjecaja smanjenja površine cijevi na izmjenu topline. Izlazna temperatura zraka cijevi DN100 i DN250 se razlikuje za $0,53^{\circ}\text{C}$, a brzina strujanja zraka je 5 puta veća u cijevi DN100. Povećanje brzine upravo uzrokuje povećanje snage potrebne za pogon ventilatora. Izmijenjena toplina opada sa povećanjem promjera cijevi, jer se koeficijent prijelaza topline smanjuje brže nego što raste površina za izmjenu topline. Dva suprotna mehanizma djeluju u ovom slučaju – povećanje površine izmjene topline koje dolazi sa smanjenjem koeficijenta prijelaza topline na strani zraka i obratan slučaj – kada se brzina povećava, a površina izmjene topline smanjuje. Rješenje optimiziranja izmjenjivača može biti paralelni višecijevni izmjenjivač, što se razmotrilo u analizi u kasnijem poglavlju.

4.4. Utjecaj dubine polaganja cijevi

Temperatura tla raste s povećanjem dubine stoga se pri analizi utjecaja dubine cijevi mijenja temperatura tla domene. Na slici je prikazana krivulja temperature zraka na izlazu (crno) i krivulja toplinskog toka (crveno) u ovisnosti o temperaturi tla domene, koja se povećava sa povećanjem dubine.



Slika 16 Utjecaj dubine polaganja cijevi na temperaturu zraka na izlazu izmjenjivača i izmijenjenu toplinu

Tablica 15 Utjecaj dubine polaganja na rezultate simulacije

Dubina (m)	Temp. tla (°C)	Temp. zraka na izlazu (°C)	Temp. zraka na polovici izmjenjivača (°C)	Toplinski tok (W)	Radius toplinski zahvaćenog tla (m)
1	5,7	-13,2356	-14,0757	146,44	0,2244
1.5	7,57	-13,0768	-13,9924	159,64	0,2269
2	8,97	-12,9580	-13,9302	169,48	0,2294
2.5	10,17	-12,8563	-13,8768	177,92	0,2264
3	11,13	-12,7749	-13,8342	184,68	0,2347

Temperatura zraka na izlazu izmjenjivača duljine 2 m, vrijednost mijenja u rasponu ± 0.255 °C. Toplinski tok i temperatura zraka na izlazu pokazuju linearni rast sa povećanjem dubine polaganja, odnosno povećanjem temperature tla na dubini polaganja cijev. Toplinski tok na dubini polaganja 2 m je 15,7 % veći od toplinskog toka na dubini polaganja 1 m. Treba uzeti u

obzir da se nije dostiglo približno stacionarno stanje izmjene topline, pa se vrijednosti toplinskog toka i temperature zraka na izlazu mogu uspoređivati jedino u okviru rubnih i početnih uvjeta ove analize.

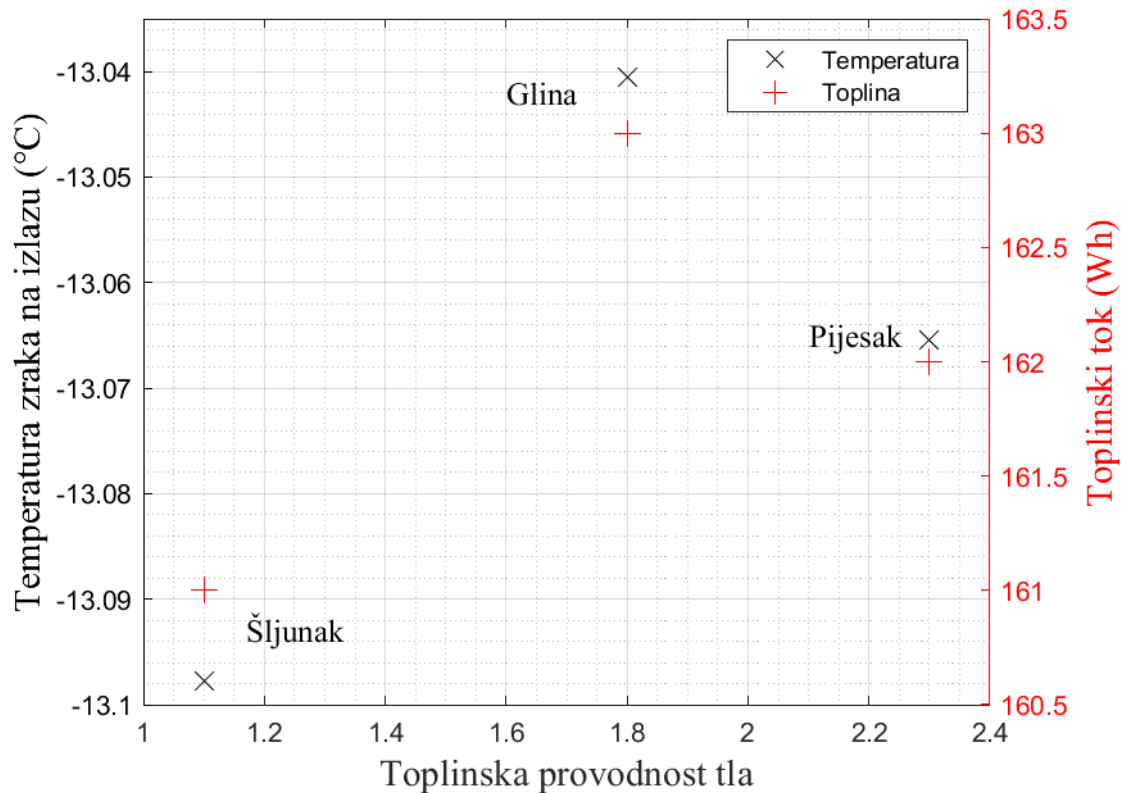
4.5. Utjecaj svojstava tla

U sklopu analize utjecaja svojstava tla na simulaciju, uzete su srednje vrijednosti termodinamičkih svojstava za ranije navedena tri karakteristična tla: šljunak, pijesak i glina.

Tablica 16 Tablica osrednjenih termodinamičkih svojstava za odabrana tla

Tip tla	Toplinska provodnost (W m ⁻¹ K ⁻¹)	Gustoća (kg m ⁻³)	Specifični toplinski kapacitet (J kg ⁻¹ K ⁻¹)
Šljunak	1,1	1500	850
Pijesak	2,3	1850	600
Glina	1,8	1750	1650

Slika 17 prikazuje ovisnost temperature zraka na izlazu izmjenjivača (označene sa 'X') i izmijenjene topline ('+') o toplinskoj provodnosti tla.



Slika 17 Utjecaj vrste tla na temperaturu zraka na izlazu i izmijenjenu toplinu

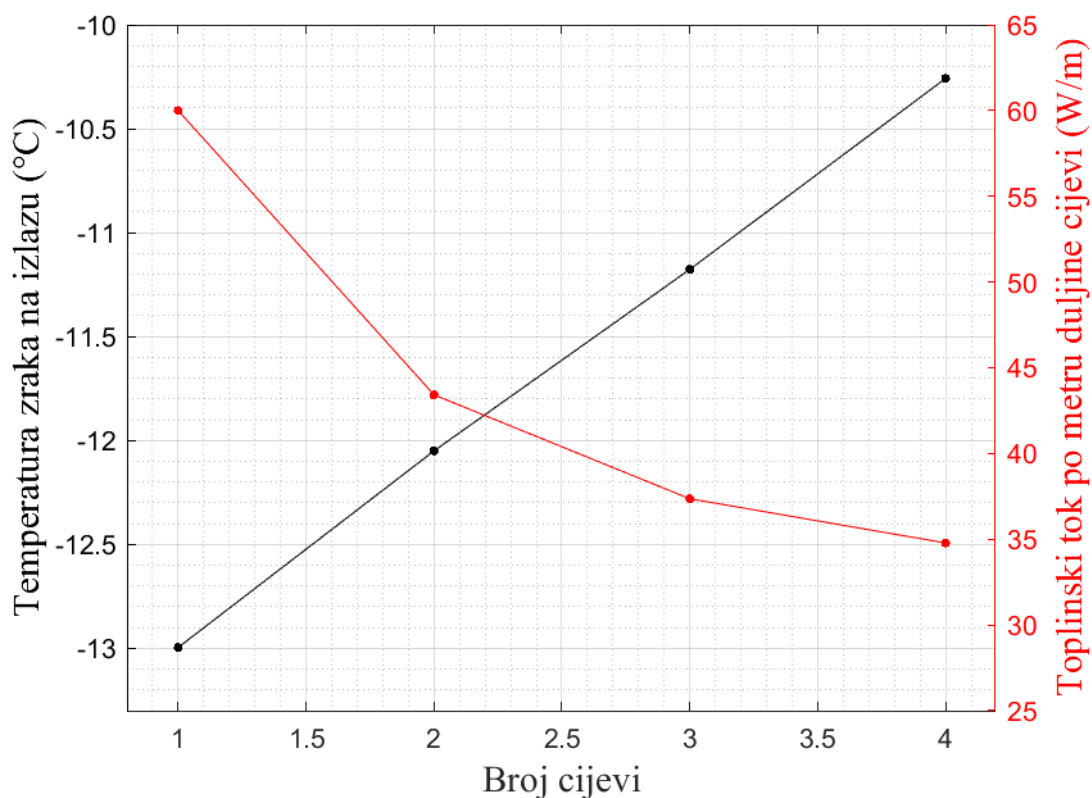
Tablica 17 Utjecaj vrste tla na rezultate simulacije

Tip tla	Temperatura zraka na izlazu (°C)	Temperatura cijevi na pola izmjenjivača (°C)	Izmijenjena toplina (kWh)	Toplinski tok (W)
Šljunak	-13,0977	-14,0042	40,20	161
Pijesak	-13,0654	-13,9868	40,46	162
Glina	-13,0405	-13,9734	40,67	163

Temperatura zraka na izlazu izmjenjivača položenog u glini dostiže najvišu temperaturu u odnosu na ostala tla, zbog dobre toplinske provodnosti i, od razmatranih tla, najvećeg specifičnog toplinskog kapaciteta. Potonje svojstvo tla doprinosi temperaturnoj stabilnosti tla u blizini izmjenjivača. Šljunak ima mali specifični toplinski kapacitet i najmanju toplinsku provodnost od tri uspoređivana tla, stoga temperatura zraka na izlazu iz izmjenjivača položenog u šljunak ima najnižu vrijednost za simulirani vremenski period. Treba istaknuti da za početne i rubne uvjete simulacije, niti toplina niti temperatura zraka na izlazu iz izmjenjivača ne mijenjaju se više od 1 % za razmatrane vrste tla.

4.6. Povećanje broja cijevi uz konstantan protok

Povećanje broja cijevi uz konstantan protok rezultira većom ukupnom površinom cijevi za izmjenu topline sa zrakom i s tlom. Nedostatak ovakvog pristupa je povećanje potrebne površine zemljišta za ugradnju i potrebna investicija. Tijekom analize korištene su standardne dimenzije cijevi, a odabrane su tako da brzine strujanja ostaju približno iste. Na slici je prikazana ovisnost temperature zraka na izlazu (crno) i toplinskog toka po metru duljine cijevi (crveno) o broju cijevi izmjenjivača.



Slika 18 Utjecaj broja cijevi na rezultate simulacije

Tablica 18 Dimenzije cijevi višecijevnog izmjenjivača korištene u analizi [11]

PVC SN4 (prema EN1401-1)		
Nazivni promjer	Vanjski promjer D (mm)	Debljina stijenke cijevi s (mm)
DN125	125	3,2
DN150	160	4,0
DN200	200	4,9
DN250	250	6,2

Tablica 19 Utjecaj povećanja broja cijevi na izlazne podatke, uz konstantan ukupni protok

Broj cijevi	DN	Brzina strujanja zraka (m/s)	Temp. zraka na izlazu (°C)	Izmijenjena toplina (Wh)	Toplinski tok po metru duljine (W m ⁻¹)	Snaga za pogon ventilatora (W)	Koeficijent prijelaza topline na strani zraka (W/m ² K)
1	250	0,94	-12,9958	29,95	60,00	11	4,6571
2	200	0,73	-12,0500	43,42	43,42	5	4,1587
3	150	0,77	-11,1766	56,04	37,36	4	4,5827
4	125	0,94	-10,2578	69,56	34,78	3	5,7102

Povećanjem broja cijevi povećava se i ukupno izmijenjena toplina. S povećanjem broja cijevi raste površina izmjene topline, a koeficijent prijelaza topline na strani zraka ne mijenja vrijednost. To se može vidjeti usporedbom izmjenjivača sa dvije DN200 cijevi i onog sa 4 DN125 cijevi. Četverocijevni izmjenjivač ima 29 % veću brzinu i 37 % veći koeficijent prijelaza, što rezultira povećanjem toplinskog toka za 60 %. No ako se usporede toplinski tokovi po metru duljine izmjenjivača, dobiva se pad od 20 %. Temperatura zraka na izlazu izmjenjivača znatno se povećava upotrebom višecijevnog izmjenjivača. Razlika izlaznih temperatura jednocijevne i dvocijevne izvedbe je gotovo 1 °C, a pad temperature je linearan u odnosu na povećanje broja cijevi. Pri odabiru izvedbe sustava treba procijeniti isplativost postavljanja višecijevnog izmjenjivača u odnosu na jednocjevni. Dok jednocjevni izmjenjivač može iskoristiti površinu male širine i velike duljine, višecijevni izmjenjivač treba površinu koja ima manji omjer duljine i širine.

Sve prethodno provedene analize dobro predaju mogućnosti poboljšanja izmjene topline u izmjenjivaču zemlja-zrak. Odabir materijala izmjenjivača je prilično ograničen s obzirom na zahtjeve održavanja i higijenske zahtjeve, ako se zrak koristi izravno u zoni boravka ljudi, ali i zahtjeve trajnosti pogona. U svrhu poboljšanja izmjene topline koristit će se uglavnom pravilan odabir dimenzija cijevi i protoka zraka, odnosno brzine strujanja zraka u cijevi. Protok zraka se mora podrediti zahtjevima ventilacije građevine i stoga preostaje pravilno dimenzionirati samu cijev izmjenjivača zemlja-zrak, da bi se postigla što veća vrijednost izmijenjene topline, a koja u konačnici znači i uštedu energije za grijanje, uz tehnički i ekonomski prihvatljive uvjete ugradnje.

5. RAD IZMJENJIVAČA KARAKTERISTIČNOM TJEDNU U ZIMSKOM REŽIMU RADA

Za analizu rada izmjenjivača u karakterističnim uvjetima zimskog tjedna, tj. rad sustava u sezoni grijanja, definirani su osnovni parametri za koje se simulacija provodi. Izmjenjivač je smješten u Zagrebu te se koriste poznata svojstva tla [8],[9]:

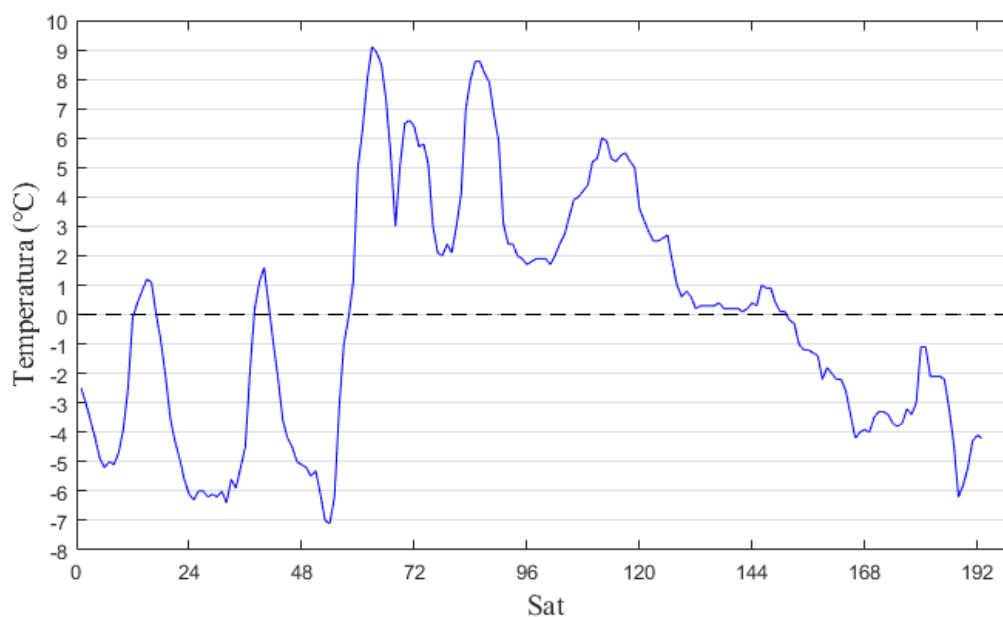
Tablica 20 Termodinamička svojstva tla za područje Zagreba

Gustoća tla	$\rho = 1950 \text{ kg m}^{-3}$
Specifični toplinski kapacitet tla	$c = 1420 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$
Toplinska provodnost tla	$\lambda = 1,5 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$

Protok zraka kroz izmjenjivač ($q_{v,zrak}$) određen je prema projektnim ventilacijskim zahtjevima za obiteljsku kuću na području Zagreba:

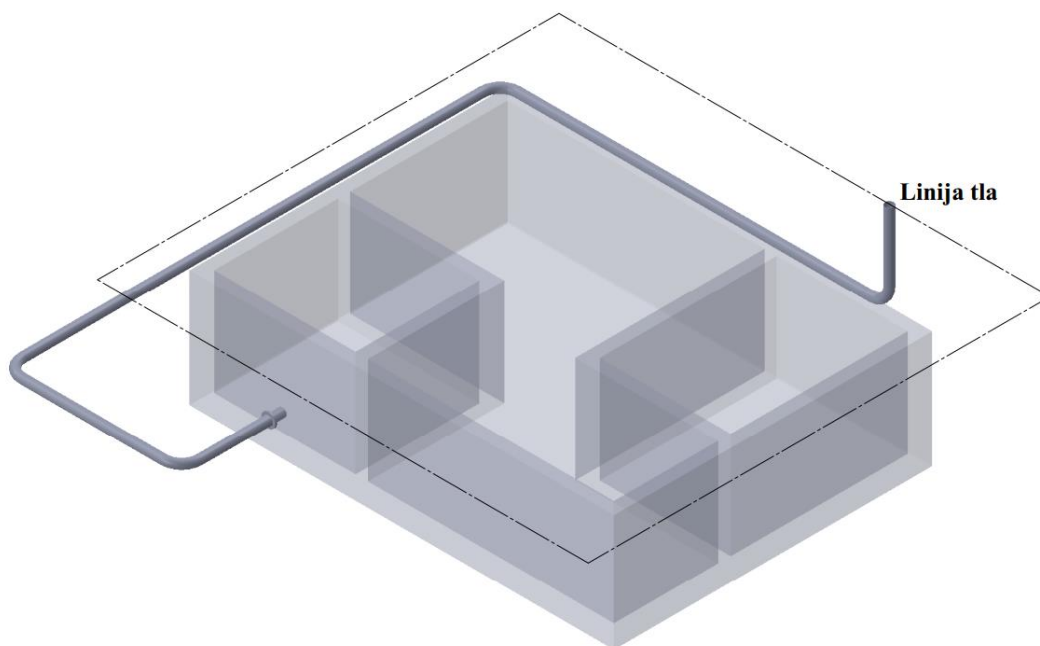
Površina poda	$A = 90 \text{ m}^2$
Visina od poda do stropa	$h = 2,6 \text{ m}$
Broj izmjena zraka na sat ('Air changes per hour')	$ACH = 0,5 \text{ h}^{-1}$
Volumni protok zraka	$q_{v,zrak} = A \cdot h \cdot ACH$ $= 117 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$

Simulacijom rada izmjenjivača potrebno je odrediti izlaznu temperaturu zraka iz izmjenjivača, radijus toplinski aktivirane domene, izmijenjeni toplinski tok i pad tlaka, za odabrane parametre izmjenjivača. Simulacija se provodi za ranije definiranu prostornu i vremensku diskretizaciju te niže navedene parametre rada i izvedbe izmjenjivača i to za karakterističan zimski tjedan u mjesecu veljači, prema satnim podacima za tipičnu meteorološku godinu [16]. Temperatura ulaza zraka je ujedno i temperatura s kojom graniči gornji rub domene tla izmjenjivača. Simulacija obuhvaća 8 dana, pri čemu prvi dan simulacije ne ulazi u parametarsku analizu, već služi za temperiranje domene.



Slika 19 Prosječna satna temperatura zraka za odabranih 8 dana u mjesecu veljači

Treba uzeti u obzir da izmjenjivač ima i segmente koji nisu uzeti u analizu izmjene topline s ciljem pojednostavljenja model, kao što je vertikalni ulaz zraka od protukišne kape i sklop cijevi koji vodi do ulaza u uređaj za daljnju obradu predgrijanog zraka. Vertikalna komponenta izmjenjivača značajno je manja, odnosno kraća od horizontalne sekcije. Izmjenjivač se može izvesti kao cijev koja obilazi kuću, tj. nije pravocrtna, što također nije uzeto u obzir unutar modela, zbog zanemarivih promjena na količinu izmijenjene topline, ali su u proračun pada tlaka u izmjenjivaču uzeti lokalni padovi tlaka na spojnim koljenima izmjenjivača.



Slika 20 Prostorni prikaz razmatrane instalacije

Temperatura tla je za cijelu domenu jednaka prosječnoj temperaturi tla na dubini polaganja u mjesecu veljači. Tijekom svakog vremenskog koraka računa se izlazna temperatura ($\vartheta_{iz,zrak}$), izmijenjena toplina (Q) i toplina potrebna za zagrijavanje zraka sa vanjske na unutrašnju temperaturu (Q_N), za usporedbu uštede sa GViK sustavom koji uzima izravno vanjski zrak.

Tablica 21 Ulazni rubni i početni uvjeti simulacije

Dubina polaganja cijevi	2	m
Broj radijalnih podjela domene	40	-
Broj horizontalnih podjela domene	75	-
Vremenski korak	300	s
Temperatura neporemećenog tla	8.97	°C
Simulirano vrijeme	192	h

5.1. Usporedba izmjenjivača s različitim dimenzijama cijevi

Produljenje simuliranog vremena na 8 dana utječe na izlazne podatke simulacije, zbog približavanja izmjene topline stacionarnom stanju. U tablici je predstavljen pregled odrađenih simulacija za različite dimenzije cijevi s ranije navedenim ulaznim parametrima:

Tablica 22 Izlazni podaci simulacija sa stvarnim početnim i rubnim uvjetima

DN	L (m)	w ($m\ s^{-1}$)	Δp (Pa)	P_{vent} (W)	Q (kWh)	$\vartheta_{iz,zrak}$ ($^{\circ}C$)	Q_N (kWh)
90	30	6,6	505	23	44,9	5,54	179,6
90	40	6,6	584	27	52	6,46	179,3
90	50	6,6	662	31	57	7,11	179
100	30	4,72	317	14,7	44,8	5,53	179
100	40	4,72	353	16,4	52	6,45	179
100	50	4,72	388	18	57	7,10	179
150	30	2,05	176	8,2	44,4	5,48	179,6
150	40	2,05	181	8,4	52,2	6,47	179,3
150	50	2,05	186	8,6	57,1	7,12	179
200	30	1,14	157	7,3	44,7	5,52	179,6
200	40	1,14	158	7,4	51,9	6,43	179,3
200	50	1,14	160	7,4	56,2	7	179

L – duljina izmjenjivača

w – brzina strujanja zraka

Δp – ukupni pad tlaka

P_{vent} – snaga potrebna za pogon ventilatora

Q – ukupno izmijenjena toplina

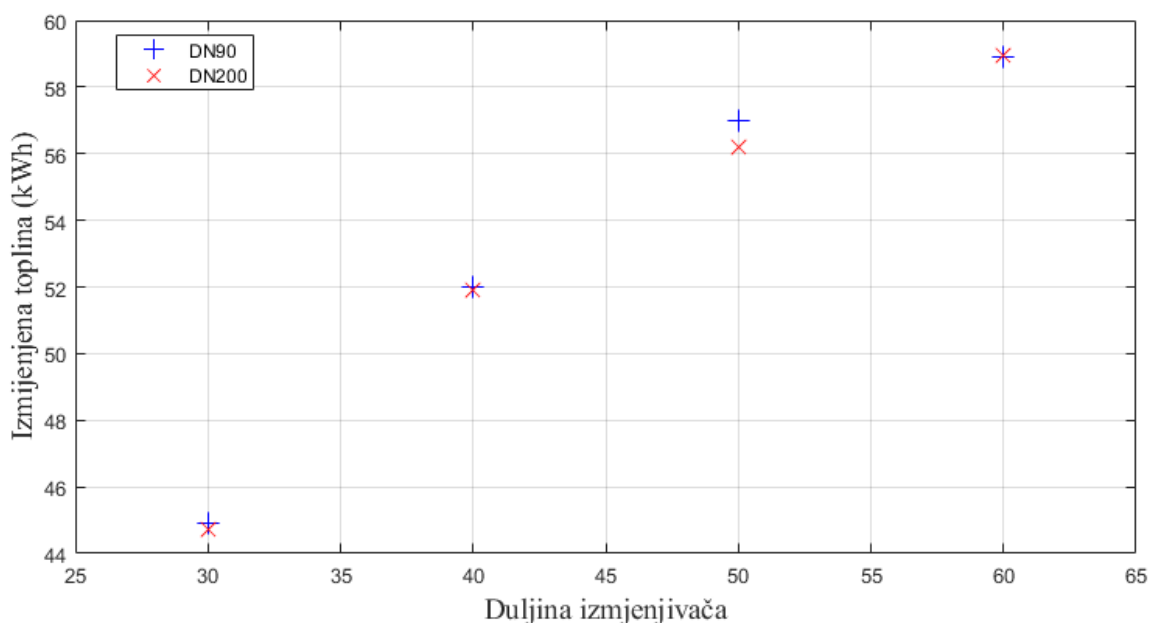
$\vartheta_{iz,zrak}$ – prosječna temperatura zraka na izlazu izmjenjivača

$\vartheta_{ul,zrak}$ – prosječna temperatura zraka na ulazu u izmjenjivač

Q_N – energija potrebna za zagrijavanje vanjskog zraka na temperaturu prostora ($22\ ^{\circ}C$)

Uočeno je za korišteni model te postavljene rubne i početne uvjete, da su temperatura zraka na izlazu ($\vartheta_{iz,zrak}$) i izmijenjena toplina (Q) gotovo neovisni o promjeru cijevi. Iz toga se zaključuje da se za ovako postavljen model, ušteda u radu izmjenjivača može postići samo odabirom većeg promjera, a s kojim će se za istu duljinu izmjenjivača, postići manji pad tlaka

(Δp), odnosno manja potrebna snaga za pogon ventilatora (P_{vent}). Istovremeno odabirom cijevi većeg promjera, treba uzeti u obzir i cijenu izvedbe takvog sustava, koji zbog većih dimenzija zahtijeva opsežnije radove. Povećanje izmijenjene ukupne topline i izlazne temperature može se postići, temeljem ovog modela, isključivo povećanjem duljine izmjenjivača (L), pri čemu se povećanjem duljine vrijednosti navedenih parametara asimptotski približavaju vrijednostima koje ograničava temperatura okolnog tla (slika 20). Povećanje duljine cijevi praćeno je povećanjem pada tlaka, odnosno većom potrošnjom energije za pogon ventilatora. Iz slike 21 se vidi da su izmijenjene topline za ovako postavljen model, za različite dimenzije cijevi približno iste.



Slika 21 Ovisnost izmijenjene topline o duljini izmjenjivača

Tablica 23 Rezultati simulacije za cijevi DN90 i DN200 u ovisnosti o duljini izmjenjivača

DN	L (m)	w ($m s^{-1}$)	Δp (Pa)	P_{vent} (W)	Q (kWh)	$\vartheta_{iz,zrak}$ ($^{\circ}C$)
90	30	6,6	505	23	44,9	5,54
90	40	6,6	584	27	52,0	6,46
90	50	6,6	662	31	57,0	7,11
90	60	6,6	741	36	58,9	7,29
200	30	1,14	157	7,3	44,7	5,52
200	40	1,14	158	7,4	51,9	6,43
200	50	1,14	160	7,4	56,2	7,00
200	60	1,14	161	7,5	58,9	7,36

5.2. Vremenska i prostorna promjena temperature domene

Za odabrane parametre rada potrebno je prikazati vremensku i prostornu promjenu temperature tla za karakteristični tjedan u zimskom režimu rada. Za analizu se koristi nazivni promjer cijevi DN150, koji se pokazao kao najučinkovitiji s obzirom na snagu potrebnu za pogon ventilatora i izmijenjenu toplinu. Volumni protok zraka je $117 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$. Duljina izmjenjivača određena je na 50 m, u svrhu postizanja približno stacionarnog stanja. Rezultati simulacije za 7 dana poslije prvog dana temperiranja dani su u tablici:

Tablica 24 Rezultati simulacije izmjenjivača namijenjenog za obiteljsku kuću

Δp (Pa)	P_{vent} (W)	Q (kWh)	η	π_1	Q_N (kWh)	$\vartheta_{iz,zrak}$ (°C)	$\vartheta_{ul,zrak}$ (°C)	Φ (W)
176	9,6	45,395	24,63	0,755	153,921	6,86	0,36	270,21

gdje je η , omjer toplinsko toka i potrebne snage za pogon ventilatora:

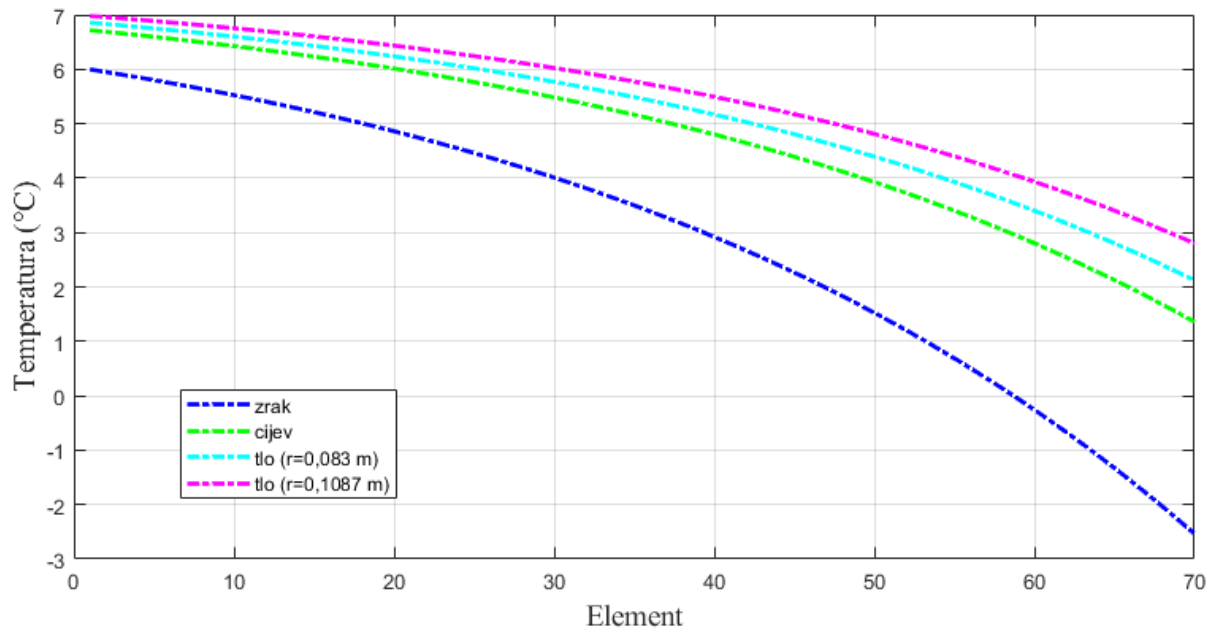
$$\eta = \frac{\Phi}{P_{vent}}$$

Učinkovitost izmjenjivača topline π_1 :

$$\pi_1 = \frac{\vartheta_{ul,zrak} - \vartheta_{iz,zrak}}{\vartheta_{ul,zrak} - \vartheta_{tlo}}$$

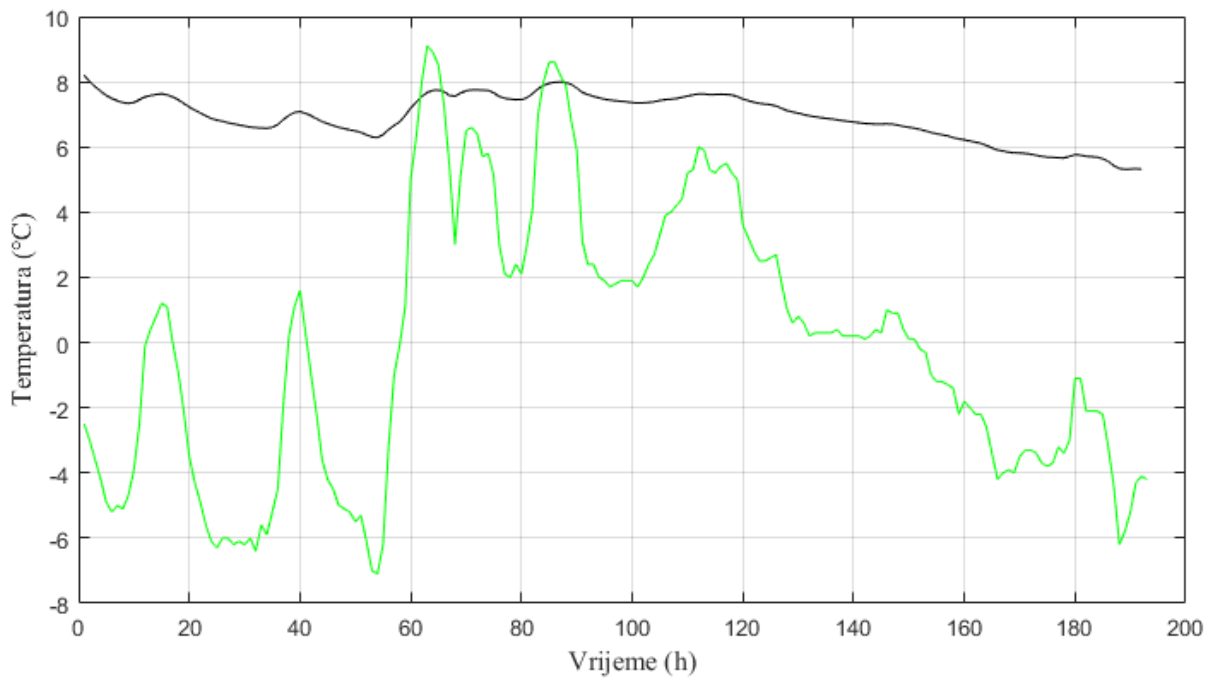
gdje je ϑ_{tlo} neporemećena temperatura tla za mjesec veljaču.

Slika 22 prikazuje promjenu temperature zraka (plavo), cijevi (zeleno), tla uz cijev (svijetlo-plavo) i tla podalje od cijevi (ružičasto) po elementima izmjenjivača u horizontalnoj podjeli (po duljini izmjenjivača) za zadnji vremenski korak simulacije. Ulaz u izmjenjivač je desno, gdje je temperatura zraka najniža.



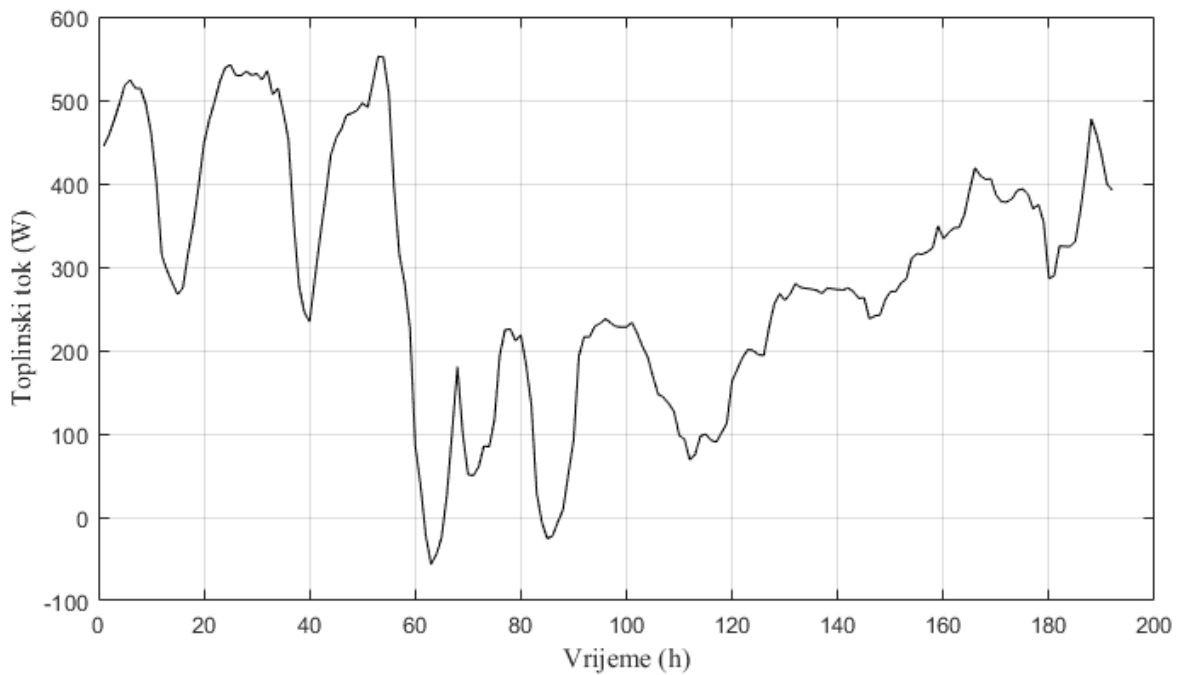
Slika 22 Prikaz temperaturnog gradijenta zraka, cijevi i tla zadnjeg vremenskog koraka

Slika 23 prikazuje temperature zraka na ulazu (zeleno) i zraka na izlazu izmjenjivača (crno). Na dva mjesta između šezdesetog i stotog sata, temperatura vanjskog zraka je veća nego zrak na izlazu, što znači da je vanjski zrak predavao toplinu tlu, a što se može vidjeti i iz slike toplinskog toka za svaki sat simulacije niže. U tim satima temperatura vanjskog zraka viša je od prosječne temperature tla u veljači.



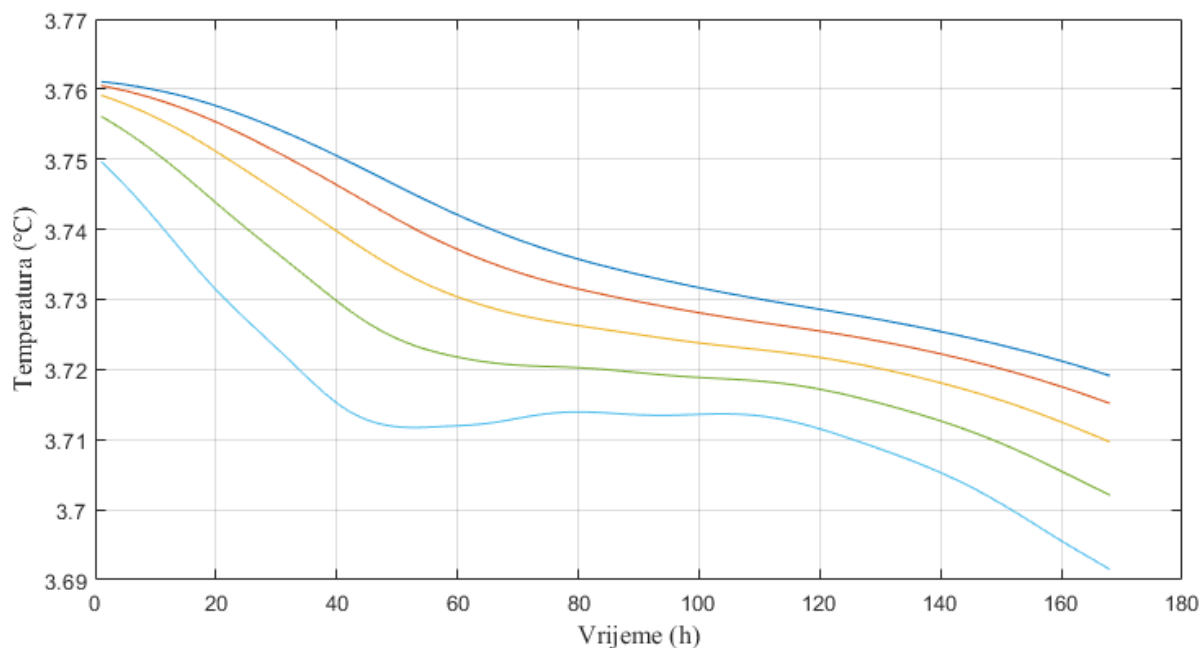
Slika 23 Kretanje temperature zraka na ulazu i zraka na izlazu izmjenjivača, uključujući dan za temperiranje tla

Slika 24 prikazuje toplinski tok za svaki sat simulacije. Kao što je istaknuto, toplinski tok je negativan za vrijeme trajanja dva ekstrema temperature vanjskog/ulaznog zraka.



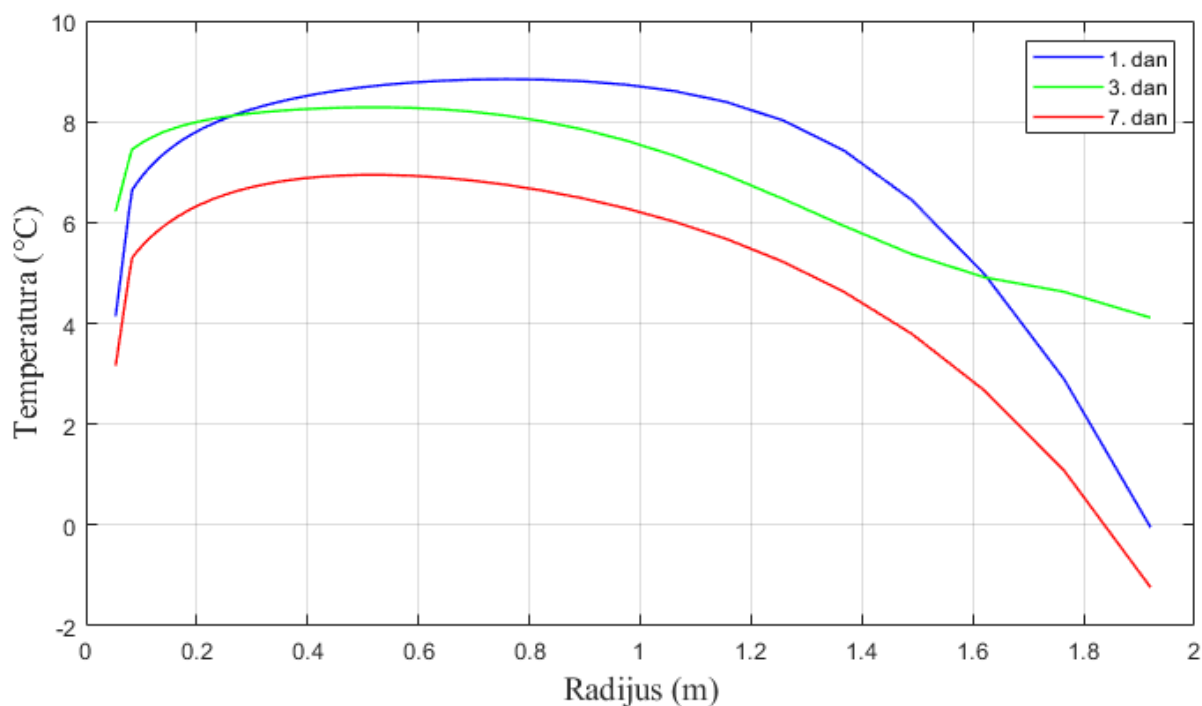
Slika 24 Toplinski tok u svakom satu simulacije, uključujući dan za temperiranje tla

Slika 25 prikazuje promjenu srednje temperature pet slojeva tla (tj. redova elemenata tla) najbližih cijevi izmjenjivača. Uočljiv je ekstrem temperature vanjskog zraka, u vidu povećanja temperature sloja tla najbližeg izmjenjivaču između pedesetog i stodvadesetog sata. Slojevi tla se većinu vremena hlade izmjenjujući toplinu sa hladnom stijenkom cijevi, odnosno temperatura tla se kontinuirano smanjuje.



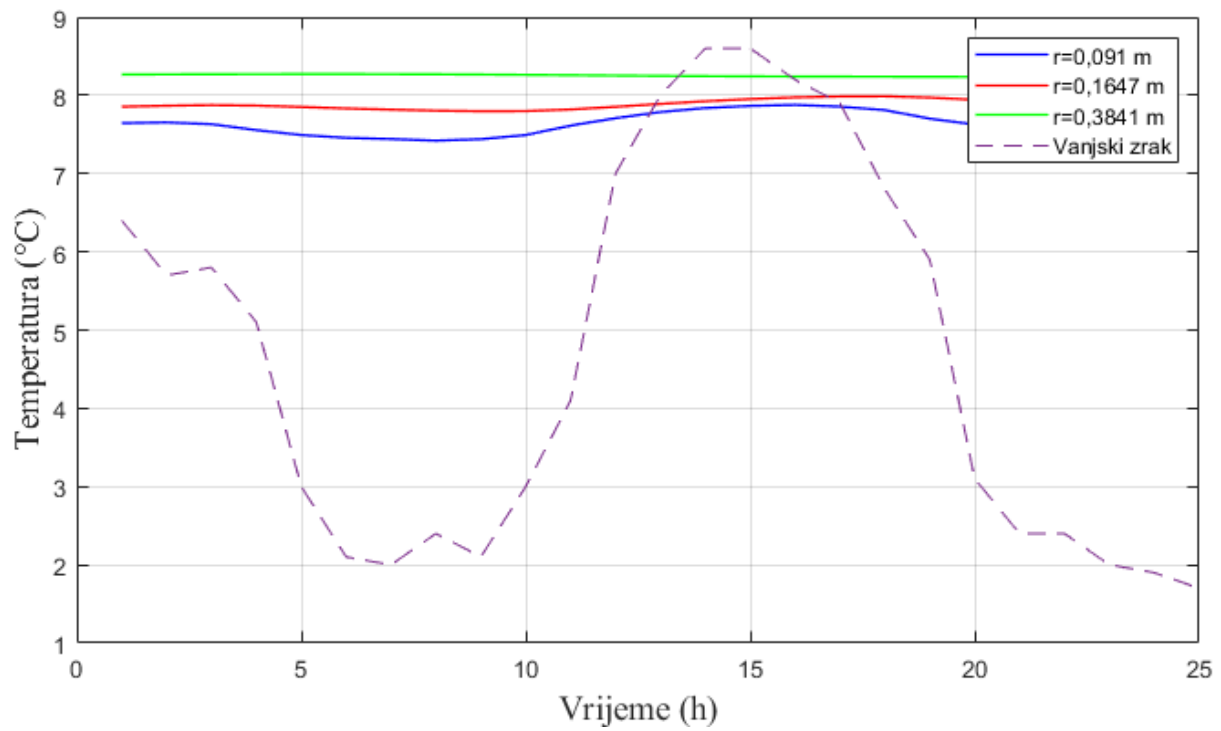
Slika 25 Vremenska promjena srednje temperature pet slojeva tla najbližih cijevi izmjenjivača

Za svaki element je na kraju svakog dana izračunata temperatura pojedinog elementa. Slika 26 prikazuje temperaturnu elemenata svakog reda na polovici izmjenjivača za odabrane dane. Na desnoj strani slike se nalazi rub domene u doticaju sa vanjskim zrakom, a s lijeve strane se nalazi zrak. Krivulja trećeg dana (zeleno) pokazuje rast temperature elemenata zraka, cijevi i ruba domene u doticaju sa vanjskim zrakom, kao posljedicu viših satnih temperatura u tom danu.



Slika 26 Temperatura elemenata domene na kraju odabranih dana

Slika 27 prikazuje satnu oscilaciju temperature tla na odabranim polumjerima (r) na polovici izmjenjivača topline za treći simulirani dan. U trećem danu se pojavljuje i ranije spomenuti ekstrem temperature zbog kojeg se tlu temperatura povećava. Ista oscilacija temperature se može usporediti sa vanjskim zrakom gdje se jasno vidi da je oscilacija temperature tla puno manja u odnosu na oscilaciju temperature zraka te da već na radijusu 0,3841 m od cijevi iščezava vidljiva oscilacija temperature u vremenu. Produljenjem vremena simulacije, odnosno rada sustava, moguće je i dodatno širenje toplinskog poremećaja



Slika 27 Oscilacija temperature tla i vanjskog zraka tijekom 24 sata trećeg dana

6. ZAKLJUČAK

Rezultati analize diskretizacije domene daju jasne vrijednosti parametara diskretizacije za brz i prihvatljivo točan rad simulacije modela. Za vremenski korak u rasponu od 30 do 300 s, dobiju se rezultati simulacije koji ne odstupaju značajno od rezultata simulacija s vremenskim korakom od 1 do 10 s, a trajanje simulacije je skraćeno više desetaka puta. Nadalje broj elemenata a za optimalni rad simulacije, s obzirom na točnost izlaznih podataka i brzinu izvođenja, kreće se u rasponu od 2000 do 4000 elemenata. Trajanje simulacije s većim brojem elemenata eksponencijalno raste, a izlazni podaci ne mijenjaju značajno vrijednost.

Parametarska analiza provodi se s kratkim simuliranim vremenom rada izmjenjivača topline, kako bi se bolje razumjele tranzijentne pojave u radu izmjenjivača. Takva analiza u konačnici služi kako bi se razumjeli i osnovni mehanizmi izmjene topline i njihov utjecaj u nestacionarnom stanju, a to su mehanizam povećanja vrijednosti izmijenjene topline zbog povećanja površine izmjene topline povećanjem dimenzije cijevi i povećanje vrijednosti izmijenjene topline zbog povećanja koeficijenta prijelaza topline na strani zraka, što je uzrokovano povećanjem brzine strujanja. Razmatrani materijali cijevi koji bi se mogli koristiti za izmjenjivač pokazali implementacijom u model očekivane rezultate, gdje su polimerne cijevi izmijenile manje, a betonske i metalne cijevi više topline. Zbog ostalih tehno-ekonomski zahtjeva na materijal cijevi, kao prvi izbor za ugradnju koriste se polimerne cijevi. Analizom dubine polaganja, također su se dobili očekivani rezultati simulacije, gdje se za veću dubinu, te posljedično, veću temperaturu okolnog tla dobiju veće vrijednosti izmijenjene topline. Za različite vrste tla u koja se polaže izmjenjivač, u parametarskoj analizi nije došlo do značajne promjene rezultata, no treba ukazati na veliki specifični toplinski kapacitet tla kao poželjno svojstvo tla na mjestu ugradnje izmjenjivača. Rješenje oprečnog djelovanja dvaju mehanizama – povećanja dimenzije cijevi s kojim se smanjuje brzina strujanja zraka za konstantni protok – razmatrano je upotrebom višecijevnog sklopa, gdje je pokazano kako je povećana ukupno izmijenjena toplina upotrebom višecijevnog izmjenjivača topline, ali i da toplinski tok po metru duljine izmjenjivača opada. Zbog toga se mora za ugradnju višecijevnog izmjenjivača provesti dodatna analiza ekonomske isplativosti.

Analizom simulacije sa zadanim karakterističnim početnim i rubnim uvjetima za napravljeni model, dolazi se do zaključka da u radu izmjenjivača najbitniji parametri za ovaj model jesu duljina izmjenjivača – koja određuje vrijednost izmijenjene topline i brzina strujanja zraka u

izmjenjivaču – koja određuje snagu potrebnu za pogon ventilatora, koji je jedini potrošač električne energije u razmatranoj konfiguraciji sustava. Rezultati za simulaciju sa cijevima DN90 i DN200 iz prethodnog poglavlja, jasno pokazuju da se vrijednost izmijenjene topline nije značajno smanjila (najviše -1,4 %, ako se uspoređuju izmjenjivači istih duljina), kao ni prosječna temperatura zraka na izlazu (najviše -1,6 %) za izmjenjivač sa većom cijevi, odnosno sporijim strujanjem zraka. Istovremeno je se potrebna snaga na ventilatoru smanjila 68 % za izmjenjivač duljine 30 m, te 80 % za izmjenjivač duljine 60 m.

LITERATURA

- [1] Kraut, B.: Strojarski priručnik, Tehnička knjiga Zagreb, 1970.
- [2] Galović, A.: Termodinamika I, Zagreb, 2018.
- [3] Galović, A.: Termodinamika II, Zagreb, 2022.
- [4] Halasz, B., Galović, A., Boras, I., Toplinske tablice, Zagreb, 2017.
- [5] Virag, Z., Šavar, M., Džijan, I., Mehanika fluida I, Zagreb, 2021.
- [6] Virag, Z., Šavar, M., Džijan, I., Mehanika fluida II, Zagreb, 2021.
- [7] Recknagel/Šprenger, Grejanje i klimatizacija, Beograd, 1984.
- [8] Kurevija, T., Vulin, D., Krapec, V., Influence of Undisturbed Ground Temperature and Geothermal Gradient on the Sizing of Borehole Heat Exchangers Linkoping, Švedska, 2020.
- [9] Boban L., Soldo V., Bertović I., Undisturbed Ground Temperature in Urban Environment, Zagreb, 2020.
- [10] Cijevi za vodu, Polietilen visoke gustoće, Hlad u.t.o., Benkovac, 2009.
- [11] Vuković Ž., Bekić D., PVC cijevi za odvodnju, Građevinski fakultet, Zagreb, 2020.
- [12] Malvić T., Velić J., Geologija ležišta fluida, Zagreb, 2013.
- [13] Klasične cijevi dužine 1000 mm (BD – betodan), Samoborka d.d., Samobor, 2013.
- [14] URL: [Energy consumption in households - Statistics Explained \(europa.eu\)](https://ec.europa.eu/eurostat/tgm/table.do?tab=table&init=1&language=en&code=sdg_7.1.1)
- [15] URL: <https://www.rehau.com/hr-hr/izmjenjivaci-topline-zraka-i-tla>
- [16] URL: [Ministarstvo prostornoga uređenja, graditeljstva i državne imovine - Satne prosječne vrijednosti meteoroloških podataka za referentne lokacije u RH \(gov.hr\)](https://www.gov.hr/ministarstvo-prostornoga-uredjenja-graditeljstva-i-drzavne-imovine-satne-prosječne-vrijednosti-meteoroloških-podataka-za-referentne-lokacije-u-rh)

PRILOZI

I. MATLAB® Kod

```
clearvars
clc
addpath('C:\Program Files\CoolProp\matlab');
%addpath('C:\CoolProp\matlab') %za provjeru modela na računalu mentora
T_satna=importdata('T_8dana2mjesec.mat');

temperatura_zrak=T_satna(1,1);
temperatura_tlo=8.97; %iz tablica
temperatura_povrsine=T_satna(1,1);

T_zrak=273.15+temperatura_zrak;
T_nep=273.15+temperatura_tlo;
T_pov=273.15+temperatura_povrsine;

L=50;
V=2; %ukupna visina domene od središta cijevi
r_0=V; %promjer domene

m=75; %stupaca
n=40; %redaka
A_c=(L*V)/(m*n);

%TLO%
lambda_tlo=1.5;
ro_tlo=1950;
c_tlo=1420;

%CIJEV% PVC DN200
ro_cijev=1300;
D=200; %mm
s=0.0049; %debljina cijevi
r_u=D*1e-3/2-s;
lambda_cijev=0.16;
k_cijev=0.0015e-3; %hrapavost
c_cijev=1250;

delta_t=300; %sekundi
Vrijeme_sim=8*1440; %min
N_It=Vrijeme_sim*60/delta_t;

%Brzina zraka%
q_v=117;
v_zrak=q_v/(3600*r_u^2*pi);

%PAD TLAKA% Recknagel
dp_filter=150; %fini filter
zeta_kolj=0.5;
zeta_klapna=0.5;
zeta_kapa=1;
zeta_ulaz=0.7;
suma_zeta=3*zeta_kolj+2*zeta_klapna+zeta_kapa+zeta_ulaz;
Re_x=(CoolProp.PropsSI('D','T',T_zrak,'P',101325,'Air')*v_zrak*2*r_u)/CoolProp.PropsSI(
('VISCOSITY','T',T_zrak,'P',101325,'Air'));
faktor_trenja=1.325/(log(k_cijev/(3.7*2*r_u)+5.74/(Re_x)^0.9))^2;
delta_p_cijev=faktor_trenja*L/(2*r_u)*CoolProp.PropsSI('D','T',T_zrak,'P',101325,'Air')
*v_zrak^2/2;
delta_p=(suma_zeta+faktor_trenja*L/(2*r_u))*CoolProp.PropsSI('D','T',T_zrak,'P',101325,'Air')
*v_zrak^2/2+dp_filter;
eta_vent=0.6;
P_vent=delta_p*q_v/(3600*eta_vent);
```

```

T=zeros(n*m,1);
T_iz=ones(N_It/(3600/delta_t),1);
C=zeros(n*m,1);
c=zeros(n,m);
R_x=zeros(n,m);
R_r=zeros(n,m);
A=zeros(n*m,n*m);
r=zeros(n+1,1);
r_m=ones(n,1);
alpha_zrak=zeros(n,m);
c_zrak=zeros(n,m);
D=ones(1,m);

q_satna=ones(Vrijeme_sim/60,1);
T_tlo_pros=ones(10,Vrijeme_sim/60);
T_zrak_mjerena=ones(Vrijeme_sim/60,10);
q_m2=ones(Vrijeme_sim/60,1);
q_L=ones(Vrijeme_sim/60,1);
delta_x=L/m;

for i=1:m
D(1,i)=(m-i)*delta_x+delta_x/2;
end

povecanje_r=nthroot(r_0/(r_u+s),n-2);
q_v_zrak=v_zrak*(r_u^2*pi)/2; %površina presjeka pola cijevi
q_m_zrak=q_v_zrak*CoolProp.PropsSI('D','T',T_zrak,'P',101325,'Air');

r(1)=0;
r(2)=r_u;
r(3)=r_u+s;

for j=4:1:n+1
    r(j)=r(j-1).*povecanje_r;
end

r=flipud(r);

for j=1:1:n
    r_m(j)=sqrt((r(j,1)^2+r(j+1,1)^2)/2);
end

for j=1:1:n-1
    for i=1:1:m
        if j<=n-2
            R_x(j,i)=delta_x*(lambda_tlo*pi*(r(j)^2-r(j+1)^2)).^-1;
            R_r(j,i)=log(r(j).*r(j+1)^-1)*(pi*delta_x*lambda_tlo)^-1;
            c(j,i)=0.5*ro_tlo*pi*delta_x*c_tlo*(r(j)^2-r(j+1)^2);
        elseif j==n-1
            R_x(j,i)=delta_x*(lambda_cijev*pi*(r(j)^2-r(j+1)^2)).^-1;
            R_r(j,i)=log(r(j).*r(j+1)^-1)*(pi*delta_x*lambda_cijev)^-1;
            c(j,i)=0.5*ro_cijev*pi*delta_x*c_cijev*(r(j)^2-r(j+1)^2);
        end
    end
end

%početne temperature

for j=1:1:m*n

```

```

    if j<=(n-1)*m
        T(j,1)=T_nep;
    else
        T(j,1)=T_zrak;
    end
end
Iter=0;
Q=0; Q_N=0; Q_ITER=0; Q_N_ITER=0;

tic
fprintf('Duljina izmjenjivača %d m\n',L);
fprintf('Vrijeme %.1f minuta\n',Vrijeme_sim);
fprintf('Brzina zraka %.2f m/s\n',v_zrak);
fprintf('Količna zraka %.2f m3/h\n',q_v_zrak*7200);
fprintf('Broj ćelija %d\n',m*n);
fprintf('Broj iteracija %d\n',N_It);
fprintf('Pad tlaka u cijevi %.2f Pa\n',delta_p_cijev);
fprintf('Ukupni pad tlaka %.2f Pa\n',delta_p);
fprintf('Snaga ventilatora %.2f W\n',P_vent);
fprintf('Prosječni volumen ćelije %.3f cm3\n',V^2*pi/2*L*1e-3/(m*n));

while (Iter<N_It)
    Iter=Iter+1;

dd=ceil(Iter/(3600/delta_t))-Iter/(3600/delta_t);
if dd==0
    T_zrak=T_satna(Iter/(3600/delta_t)+1,1)+273.15;
    T_pov=T_satna(Iter/(3600/delta_t)+1,1)+273.15;
end

%Koefficient prijelaza topline na strani zraka%
j=n;
for i=1:1:m
    ro_zrak=CoolProp.PropsSI('D','T',T((j-1)*m+i,1),'P',101325,'Air');
    c_zrak(j,i)=CoolProp.PropsSI('CPMASS','T',T((j-1)*m+i,1),'P',101325,'Air');
    mi_zrak=CoolProp.PropsSI('VISCOSITY','T',T((j-1)*m+i,1),'P',101325,'Air');
    Pr=CoolProp.PropsSI('Prandtl','T',T((j-1)*m+i,1),'P',101325,'Air');
    lambda_zrak=CoolProp.PropsSI('L','T',T((j-1)*m+i,1),'P',101325,'Air');
    Re_zrak=(ro_zrak*v_zrak*2*r_u)*(mi_zrak)^-1;
    AB=(1/8)*(1.82*log10(Re_zrak)-1.64).^-2;
    Nu_zrak=(AB*Re_zrak*Pr)*(1.07+12.7*sqrt(AB)*(Pr^(2/3)-1))^-1; %T2 str.117 Petukhova
korelacija
    alpha_zrak(j,i)=(Nu_zrak*lambda_zrak)*(r_u*2)^-1;
    R_r(j,i)=(r_u*pi*delta_x*alpha_zrak(j,i)).^-1;
    c(j,i)=0.5*ro_zrak*pi*c_zrak(j,i)*delta_x*(r(j)^2-r(j+1)^2);
end

i=1; j=1;

for i=1:1:m
    for j=2:1:n-1
        if i==1 %ćelije lijeve granice
            C((j-1)*m+i,1)=T((j-1)*m+i,1).*(-c(j,i)/delta_t);
            A((j-1)*m+i,(j-1)*m+i)=-1/R_x(j,i)-2/(R_r(j+1,i)+R_r(j,i))-2/(R_r(j-1,i)+R_r(j,i))
            -c(j,i).*(delta_t)^-1;
            A((j-1)*m+i,(j-1)*m+i+1)=1/R_x(j,i+1);
            %A((j-1)*m+i,(j-1)*m+i-1)=1/R_x(j,i-1);
            A((j-1)*m+i,(j-1)*m+i+m)=2/(R_r(j+1,i)+R_r(j,i));
            A((j-1)*m+i,(j-1)*m+i-m)=2/(R_r(j-1,i)+R_r(j,i));
        elseif i<m %ćelije unutar granica

```



```

C((j-1)*m+i,1)=-c(j,i)/delta_t*T((j-1)*m+i,1);
A((j-1)*m+i,(j-1)*m+i)=-2/R_x(j,i)-2/(R_r(j+1,i)+R_r(j,i))-2/(R_r(j-1,i)+R_r(j,i))
-c(j,i).*(delta_t)^-1;
A((j-1)*m+i,(j-1)*m+i+1)=1/R_x(j,i+1);
A((j-1)*m+i,(j-1)*m+i-1)=1/R_x(j,i-1);
A((j-1)*m+i,(j-1)*m+i+m)=2/(R_r(j+1,i)+R_r(j,i));
A((j-1)*m+i,(j-1)*m+i-m)=2/(R_r(j-1,i)+R_r(j,i));
elseif i==m %čeliije lijeve granice
C((j-1)*m+i,1)=-c(j,i)/delta_t*T((j-1)*m+i,1);
A((j-1)*m+i,(j-1)*m+i)=-1/R_x(j,i)-2/(R_r(j+1,i)+R_r(j,i))-2/(R_r(j-1,i)+R_r(j,i))
-c(j,i).*(delta_t)^-1;
%A((j-1)*m+i,(j-1)*m+i+1)=1/R_x(j,i+1);
A((j-1)*m+i,(j-1)*m+i-1)=1/R_x(j,i-1);
A((j-1)*m+i,(j-1)*m+i+m)=2/(R_r(j+1,i)+R_r(j,i));
A((j-1)*m+i,(j-1)*m+i-m)=2/(R_r(j-1,i)+R_r(j,i));
end
end
end

i=1 ; j=1;

for j=1:1:n
for i=2:1:m-1
if j==n %donji sloj čeliija/zrak u cijevi bez kutnih
C((j-1)*m+i,1)=-c(j,i)/delta_t*T((j-1)*m+i,1);
A((j-1)*m+i,(j-1)*m+i)=-1/(R_r(j-1,i)/2+R_r(j,i))-c(j,i).*(delta_t)^-1-
q_m_zrak*c_zrak(j,i); %promjena r. otpora, nema kond. i dodatni q
A((j-1)*m+i,(j-1)*m+i+1)=q_m_zrak*c_zrak(j,i+1); % ulaz struje zraka
%A((j-1)*m+i,(j-1)*m+i-1)=1/R_x(j,i-1); nema kondukcije
%A((j-1)*m+i,(j-1)*m+i+m)=2/(R_r(j+1,i)+R_r(j,i)); ne postoji
A((j-1)*m+i,(j-1)*m+i-m)=1/(R_r(j-1,i)/2+R_r(j,i)); %promjena racunanja otpora
elseif j==1 %gornji sloj čeliija bez kutnih
C((j-1)*m+i,1)=-c(j,i)/delta_t*T((j-1)*m+i,1)-T_pov/R_r(j,i);
A((j-1)*m+i,(j-1)*m+i)=-2/R_x(j,i)-2/(R_r(j+1,i)+R_r(j,i))-1/R_r(j,i)-c(j,i).*(
(delta_t)^-1; %dodan otpor
A((j-1)*m+i,(j-1)*m+i+1)=1/R_x(j,i+1);
A((j-1)*m+i,(j-1)*m+i-1)=1/R_x(j,i-1);
A((j-1)*m+i,(j-1)*m+i+m)=2/(R_r(j+1,i)+R_r(j,i));
%A((j-1)*m+i,(j-1)*m+i-m)=2/(R_r(j-1,i)+R_r(j,i));
end
end
end

i=1; j=1;

for i=1:1:m
for j=1:1:n
if i==1
if j==1 %element GL kut
C((j-1)*m+i,1)=-c(j,i)/delta_t*T((j-1)*m+i,1)-T_pov/R_r(j,i); %sa temp površine
A((j-1)*m+i,(j-1)*m+i)=-1/R_x(j,i)-2/(R_r(j+1,i)+R_r(j,i))-1/R_r(j,i)-c(j,i).*(
(delta_t)^-1; %dodan otpor
A((j-1)*m+i,(j-1)*m+i+1)=1/R_x(j,i+1);
%A((j-1)*m+i,(j-1)*m+i-1)=1/R_x(j,i-1);
A((j-1)*m+i,(j-1)*m+i+m)=2/(R_r(j+1,i)+R_r(j,i));
%A((j-1)*m+i,(j-1)*m+i-m)=2/(R_r(j-1,i)+R_r(j,i));
elseif j==n %element DL kut /izlaz zraka
C((j-1)*m+i,1)=-c(j,i)/delta_t*T((j-1)*m+i,1);
A((j-1)*m+i,(j-1)*m+i)=-1/(R_r(j-1,i)/2+R_r(j,i))-c(j,i).*(delta_t)^-1-
q_m_zrak*c_zrak(j,i); %nema kond., promjena otpora i dod q

```

```

A((j-1)*m+i, (j-1)*m+i+1)=q_m_zrak*c_zrak(j,i+1);
%A((j-1)*m+i, (j-1)*m+i-1)=1/R_x(j,i-1);
%A((j-1)*m+i, (j-1)*m+i+m)=2/(R_r(j+1,i)+R_r(j,i));
A((j-1)*m+i, (j-1)*m+i-m)=1/(R_r(j-1,i)/2+R_r(j,i));
end
elseif i==m
if j==1 %element GD kut
C((j-1)*m+i,1)=-c(j,i)/delta_t*T((j-1)*m+i,1)-T_pov/R_r(j,i); %sa temp površine
A((j-1)*m+i, (j-1)*m+i)=-1/R_x(j,i)-2/(R_r(j+1,i)+R_r(j,i))-1/R_r(j,i)-c(j,i).*(
(delta_t)^-1; %dodan otpor
%A((j-1)*m+i, (j-1)*m+i+1)=1/R_x(j,i+1);
A((j-1)*m+i, (j-1)*m+i-1)=1/R_x(j,i-1);
A((j-1)*m+i, (j-1)*m+i+m)=2/(R_r(j+1,i)+R_r(j,i));
%A((j-1)*m+i, (j-1)*m+i-m)=2/(R_r(j-1,i)+R_r(j,i));
elseif j==n %element DD kut ulaz zraka
C((j-1)*m+i,1)=-c(j,i)/delta_t*T((j-1)*m+i,1)-q_m_zrak*c_zrak(j,i)*T_zrak; %koef.
ćelija ulaza zraka, dod. q
A((j-1)*m+i, (j-1)*m+i)=-1/(R_r(j-1,i)/2+R_r(j,i))-c(j,i).*(delta_t)^-1-
q_m_zrak*c_zrak(j,i); %promjena otpora, nema kond., dodani q
%A((j-1)*m+i, (j-1)*m+i+1)=1/R_x(j,i+1); ne postoji ćelija
%A((j-1)*m+i, (j-1)*m+i-1)=1/R_x(j,i-1); nema kond.
%A((j-1)*m+i, (j-1)*m+i+m)=2/(R_r(j+1,i)+R_r(j,i));
A((j-1)*m+i, (j-1)*m+i-m)=1/(R_r(j-1,i)/2+R_r(j,i)); %promjena otpora
end
end
end
fprintf('\b\b\b\b\b%d', Iter);

T=mldivide(A,C);

%Izmijenjena toplina
Q_ITER=Q_ITER+2*q_m_zrak*CoolProp.PropsSI('CPMASS','T', (T((n-1)*m+1,1)+T((n-1)*m+m,1))/2, 'P',
101325, 'Air')*(T((n-1)*m+1,1)-T((n-1)*m+m,1))*delta_t/3.6e3; %Wh
Q_N_ITER=Q_N_ITER+2*q_m_zrak*CoolProp.PropsSI('CPMASS','T', ((273.15+22)+T((n-1)*m+m,1))/2, 'P',
101325, 'Air')*((273.15+22)-T((n-1)*m+m,1))*delta_t/3.6e3; %Wh

kk=Iter/(3600/delta_t)-ceil(Iter/(3600/delta_t));

if kk==0 %_Satne vrijednosti izlaznih podataka_
Q(Iter/(3600/delta_t),1)=Q_ITER;
Q_N(Iter/(3600/delta_t),1)=Q_N_ITER;
T_iz(Iter/(3600/delta_t),1)=T((n-1)*m+1,1)-273.15;
q_satna(Iter/(3600/delta_t),1)=Q(Iter/(3600/delta_t),1)*3600/3600; %Wh/h=W
q_m2(Iter/(3600/delta_t),1)=q_satna(Iter/(3600/delta_t),1)/(r_u^2*pi*L);
q_L(Iter/(3600/delta_t),1)=q_satna(Iter/(3600/delta_t),1)/L;
Q_ITER=0; %Resetiranje vrijednosti nakon svakog sata%
Q_N_ITER=0;
end

if kk==0
for gg=1:1:10
T_zrak_mjerena(Iter/(3600/delta_t),gg)=T((n-1)*m+ceil(m/gg),1);
end
end

if kk==0
for i=1:1:m
for hh=1:1:10

```

```

        T_tlo_pros(hh,Iter/(3600/delta_t))=mean(T((ceil(n/hh)-1)*m+i,1))/m;
    end
end
end

fprintf('\n');

end %kraj petlje

toc;
Trajanje=toc;

Temperature=transpose(reshape(T,m,n))-273.15;
T_iz_pros=mean((T_iz)+273.15)-273.15;
T_ul_pros=mean(T_satna+273.15)-273.15;

fprintf('Izmijenjena toplina %.4f Wh\n',sum(Q(25:end,1)));
fprintf('Toplina za izravno zagrijavanje na 22 °C %.4f Wh\n',sum(Q_N(25:end,1)));
%fprintf('Prosječna izlazna temperatura %.2f °C\n',mean(T_iz(25:end,1)));
%fprintf('Prosječna ulazna temperatura %.2f °C\n',mean(T_satna(25:end,1)));
fprintf('Temperatura cijevi na L/2 m %.2f °C\n',Temperature(n-1,ceil(m/2))); %zadnje iteracije
fprintf('Alfa zraka %.2f W/m2K\n',mean(alpha_zrak(n,:)));
%fprintf('Toplinski tok %.2f W\n',mean(q_satna(25:end,1)));
fprintf('Specifični toplinski tok %.2f W/m2\n',mean(q_m2(25:end,1)));
fprintf('Duljinski toplinski tok %.2f W/m\n',mean(q_L(25:end,1)));

%%--Vizualizacija--%%

plot(Temperature(n,1:m-5),"LineStyle","-.", "LineWidth",2, 'Color', "b");
hold on
plot(Temperature(n-1,1:m-5),"LineStyle","-.", "LineWidth",2, 'Color', "g");
plot(Temperature(n-2,1:m-5),"LineStyle","-.", "LineWidth",2, 'Color', "cyan");
plot(Temperature(n-5,1:m-5),"LineStyle","-.", "LineWidth",2, 'Color', "magenta");
legend('zrak','cijev','tlo (r=0,083 m)','tlo (r=0,1087 m)');
%title('Temperaturni gradijent posljednje iteracije')
xlabel('Element',"FontName","Times New Roman","FontSize",14);
ylabel('Temperatura (°C)', "FontName", "Times New Roman", "FontSize", 14);
grid ON
hold off

[X,Y]=meshgrid(D,r_m);
contourf(X,Y,(fliplr(Temperature)),"LineStyle","none");
hold on
[X,Y]=meshgrid(D,r_m);
plot(X,Y,"LineJoin","round","Color","black","LineWidth",0.2);
plot(X.',Y.', "LineJoin", "round", "Color", "black", "LineWidth", 0.2);
%title('Raspodjela temperatura po ćelijama posljednje iteracije')
colormap("parula");
xlabel('Duljina (m)', "FontName", "Times New Roman", "FontSize", 12);
ylabel('Radijus (m)', "FontName", "Times New Roman", "FontSize", 12);
hold off

plot(T_iz,"LineStyle","-", "LineWidth",0.1, "Color", 'black');
hold on
plot(T_satna,"LineStyle","-", "LineWidth",0.1, "Color", "green");
xlabel('Vrijeme (h)', "FontName", "Times New Roman", "FontSize", 12);
ylabel('Temperatura (°C)', "FontName", "Times New Roman", "FontSize", 12);
%title('Promjena izlazne temperature');
grid ON
hold off

```

```
[X,Y]=meshgrid(D,r_m);
surf(X,Y,fliplr(Temperature),"LineStyle","none");
colormap("parula");
title('Raspodjela temperature u 3D');
xlabel('Duljina (m)', 'FontName', 'Times New Roman', 'FontSize', 12);
ylabel('Radijus (m)', 'FontName', 'Times New Roman', 'FontSize', 12);
zlabel('Temperatura (°C)');
hold off

plot(q_satna, "LineStyle", "-", "LineWidth", 0.1, "Color", 'black');
xlabel('Vrijeme (h)', 'FontName', 'Times New Roman', 'FontSize', 12);
ylabel('Toplinski tok (W)', 'FontName', 'Times New Roman', 'FontSize', 12);
%title('Promjena izlazne temperature');
grid ON
hold off

plot(r_m(:,1), Temperature(:,ceil(m/2)), "LineStyle", "-", "LineWidth", 1, "Color", 'blue');
xlabel('Radijus (m)', 'FontName', 'Times New Roman', 'FontSize', 14);
ylabel('Temperatura (°C)', 'FontName', 'Times New Roman', 'FontSize', 14);
set(gca, 'YLim', [-2 8]);
%title('Promjena izlazne temperature');
grid on
hold off
```