Primjena dizalice topline s kolektorima u tlu za grijanje i hlađenje obiteljske kuće

Draženović, Nikola

Master's thesis / Diplomski rad

2009

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:145991

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-28**

Repository / Repozitorij:

Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb







Sveučilište u Zagrebu
Fakultet strojarstva i brodogradnje

DIPLOMSKI RAD

Nikola Draženović

Zagreb, 2009.

Sveučilište u Zagrebu
Fakultet strojarstva i brodogradnje

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Prof. dr.sc. Igor Balen

Nikola Draženović

Zagreb, 2009.

Sažetak

U diplomskom radu bilo je potrebno napraviti analizu primjene dizalica topline s tlom kao toplinskim spremnikom za grijanje i hlađenje obiteljske kuće. Prikazani su načini eksploatacije sunčeve energije pohranjene u tlu Zemlje pomoću vertikalnih dubinskih sondi i horizontalnog kolektora. Navedene su prednosti i nedostaci dizalica topline s vertikalnim sondama kao i prednosti i nedostaci dizalica topline s horizontalnim kolektorom.

Dan je i prikaz proračunskih postupaka za određivanja veličine sustava za izmjenu topline s tlom.

Prikazano je tehničko rješenje izvedbe termotehničkog sustava grijanja i hlađenja sa dizalicom topline s vertikalnim sondama za obiteljsku kuću iz zadatka ovog diplomskog rada. Opisan je i način automatske regulacije rada takvog sustava.

Na kraju je dana analiza isplativosti primjene dizalica topline s tlom za grijanje obiteljske kuće u odnosu na konvencionalne sustave grijanja s kotlovima na tekuće i plinovito gorivo.

Summary

This thesis deals with the application of ground - coupled heat pump (GCHP) systems for the heating and cooling of a residential house. Exploitation of sun's energy stored in the Earth's soil by using ground probes and horizontal collector is presented. Advantages as well as disadvantages of vertical ground - coupled heat pumps and horizontal ground - coupled heat pumps are shown. Different calculating methods for determining the size of the ground-coupled heat exchangers are given. An example of installation of the vertical ground-coupled heat pump system for residential house is presented. Automatic regulation of such system is also presented. Cost-benefit analysis of the application of ground-coupled heat pump systems for residential house is given by compering costs of such systems with those of conventional heating systems.

SADRŽAJ

SAŽETAK **1**

SUMMARY **2**

SADRŽAJ **3**

POPIS SLIKA **5**

POPIS TABLICA **6**

POPIS TABLICA **6**

POPIS OZNAKA **7**

IZJAVA **10**

1.UVOD **11**

2. OPĆENITO O DIZALICAMA TOPLINE **13**

2.1 TERMODINAMIČKE OSNOVE DIZALICA TOPLINE 13
2.2 OSNOVNI DIJELOVI I PRIKAZ NAČINA RADA DIZALICA TOPLINE 14
2.3 UČINKOVITOST RADA DIZALICA TOPLINE 15
2.4 TOPLINSKI IZVORI ZA DIZALICE TOPLINE 17
2.4.1 Površinske vode kao toplinski izvor 17
2.4.2 Podzemne vode kao toplinski izvor 19
2.4.3 Okolišnji zrak kao toplinski izvor 20
2.4.4 Sunce kao toplinski izvor 20
2.4.5 Tlo kao toplinski izvor 21
2.5 RADNE TVARI DIZALICA TOPLINE 22
2.6 PRIMJENA DIZALICA TOPLINE 23

3. DIZALICE TOPLINE S TLOM KAO TOPLINSKIM IZVOROM **26**

3.1 ZNAČAJKE TLA KAO TOPLINSKOG IZVORA 26
3.2 TERMOTEHNIČKI SUSTAVI SA DIZALICOM TOPLINE S TLOM 28
3.2.1 Izvedbe termotehničkih sustava sa dizalicom topline s tlom 29
3.2.2 Direktna i indirektna izmjena topline s tlom 30
3.2.3 Vertikalno postavljen izmjenjivač topline sa tlom 31
3.3.3 Horizontalno postavljen izmjenjivač topline s tlom 34

4. DIMENZIONIRANJE IZMJENJIVAČA TOPLINE S TLOM DIZALICA TOPLINE **37**

4.1 OSNOVNE PRETPOSTAVKE POSTUPKA DIMENZIONIRANJA SUSTAVA IZMJENE TOPLINE S TLOM 37
4.1.1 Dimenzioniranje vertikalno postavljenog sustava izmjene topline s tlom 39
4.1.2 Dimenzioniranje horizontalno položenog sustava izmjene topline s tlom 41
4.2 PRORAČUN POTREBNE DULJINE VERTIKALNIH SONDI DIZALICA TOPLINE SA TLOM KAO TOPLINSKIM IZVOROM 42
4.2.1 Proračunski postupak prema Kavanaughu i Raffertyju 42
4.2.2 Proračunski postupak prema Ingersollu i Zobelu 51
4.2.3 Proračunski postupak prema Braudu 53
4.2.4 Proračunski postupak prema IGSHPA 54
4.3 PRORAČUN POTREBNE DULJINE CIJEVI HORIZONTALNOG KOLEKTORA DIZALICA TOPLINE S TLOM KAO TOPLINSKIM IZVOROM ... 57

5. TOPLINSKA BILANCA OBITELJSKE KUĆE **59**

5.1 PRORAČUN TOPLINSKIH GUBITAKA I TOPLINSKOG OPTEREĆENJA OBITELJSKE KUĆE 59
5.1.1 Proračun toplinskih gubitaka zgrade 59
5.1.2 Proračun toplinskog opterećenja zgrade 60

6. TEHNIČKI OPIS INSTALACIJE TERMOTEHNIČKOG SUSTAVA SA DIZALICOM TOPLINE S TLOM **62**

6.1 IZVEDBA INSTALACIJE TERMOTEHNIČKOG SUSTAVA 62
6.2 AUTOMATSKA REGULACIJA TERMOTEHNIČKOG SUSTAVA SA DIZALICOM TOPLINE S..... 63
TLOM 63

6.2.1 Regulacija ogrjevnog učinka *65*
6.2.2 Regulacija pripreme potrošne tople vode *67*
6.2.3 Regulacija rashladnog učinka *67*

7. ANALIZA ISPLATIVOSTI PRIMJENE DIZALICA TOPLINE S TLOM U TERMOTEHNIČKIM SUSTAVIMA 69

7.1 POLAZNE POSTAVKE ANALIZE 69
7.2 INVESTICIJSKI I POGONSKI TROŠKOVI TERMOTEHNIČKIH SUSTAVA SA DIZALICAMA TOPLINE S TLOM 70
7.3 ISPLATIVOST PRIMJENE DIZALICA TOPLINE S TLOM ZA GRIJANJE OBITELJSKE KUĆE 71

ZAKLJUČAK 75

LITERATURA 76

PRILOZI 77

Popis slika

Slika 1. Shematski prikaz rada rashladnog uređaja i toplinske pumpe [1] 14
Slika 2. Radni proces u dizalicama topline i shematski prikaz osnovne izvedbe dizalice topline 14
Slika 3. Dizalica topline s površinskim vodama kao izvorom topline [4] 19
Slika 4. Dizalica topline s podzemnim vodama kao izvorom topline [4] 19
Slika 5. Shematski prikaz dizalice topline s okolišnjim zrakom kao izvorom topline [4] 20
Slika 6. Dizalice topline sa sunčevom energijom kao izvorom topline [4] 21
Slika 7. Dizalica topline s tlom kao toplinskim izvorom [4] 21
Slika 8. Raspodjela ukupno dozračene sunčeve energije na površinu Zemlje [6] 26
Slika 9. Raspodjela temperatura tla tijekom godine u ovisnosti o dubina tla iskazana u centimetrima [7] 27
Slika 10. Prikaz osnovnih komponenata termotehničkih sustava sa dizalicom topline s tlom kao toplinskim izvorom [6] 30
Slika 11. Dizalica topline s tlom kao toplinskim spremnikom s vertikalno ukopanim dubinskim sondama [8] 32
Slika 12. Osnovni dijelovi izvedbe sustava dizalica topline s vertkalnim sondama [6] 33
Slika 13. Dizalice topline s horizontalnim kolektorom [8] 34
Slika 14. Različite varijante polaganja cijevi horizontalnog kolektora [6] 35
Slika 15. Horizontalni kolektor u obliku spirale te načini polaganja cijevi u kanale [6] 35
Slika 16. Primjer radnih karakteristika uređaja dizalice topline [10] 38
Slika 17. Shematski prikaz uređaja za provođenje toplinskog testiranja tla [11] 41
Slika 18. Ovisnost G-faktora o Fourierovom broju [12] 46
Slika 19. Utjecaj termofizikalnih karakteristika različitih tla na duljinu vertikalnih sondi 49
Slika 20. Utjecaj sadržaja vode u tlu na duljinu vertikalnih sondi 50
Slika 21. Utjecaj termofizikanih karakteristika materijala cijevi izmjenjivača topline na duljinu vertikalnih sondi 50
Slika 22. Utjecaj ulazne temperature sekundarnog radnog medija u uređaj dizalice topline na duljinu vertikalnih sondi 51
Slika 23. Usporedba dobivenih rezultata duljine vertikalnih sondi korištenjem različitih proračunskih postupaka 56
Slika 24. Ovisnost potrebne površine za polaganje cijevi horizontalnog kolektora o toplinskim svojstvima tla 58
Slika 25. Regulacijski modul WM HPC [16] 64
Slika 26. Regulacija temperature polaznog voda sustava grijanja u ovisnosti o vanjskoj temperaturi zraka [16] 65
Slika 27. Dijagramski prikaz načina regulacije rada dizalice topline u ovisnosti o vrijednosti integrala [16] 66
Slika 28. Regulacijski modul koji upravlja radom dizalice topline u režimu hlađenja [16] 68
Slika 29. Usporedba godišnje potrošnje energije potrebne za grijanje obiteljske kuće 72
Slika 30. Usporedba godišnjih troškova grijanja obiteljske kuće 72
Slika 31. Ušteda pogonskih troškova sustava grijanja u ovisnosti o sezonskom koeficijentu grijanja dizalice topline s tlom 73
Slika 32. Vrijeme otplate investicijskih troškova termotehničkih sustava sa dizalicama topline s tlom 74

Popis tablica

Tablica 1. Koeficijenti grijanja koje danas postižu dizalice topline različitih izvedbi [2] 16
Tablica 2. Toplinski izvori za dizalice topline [3] 18
Tablica 3. Svojstva radnih tvari dizalica topline [5] 22
Tablica 4. Radne temperature različitih sustava za grijanje i hlađenje dizalicama topline [3] 24
Tablica 5. Koeficijenti grijanja dizalica topline u sustavima grijanja voda-voda [3] 25
Tablica 6. Specifično odavanje topline tla u ovisnosti o vrsti tla [9] 36
Tablica 7. Specifično toplinsko opterećenje sondi u W/m za različita pogonska vremena dizalice topline tijekom godine izražena u satima po godini (VDI 4640) 40
Tablica 8. Specifično toplinsko opterećenje kolektora u W/m^2 za različita pogonska vremena dizalice topline tijekom godine izražena u satima po godini (VDI 4640) 42
Tablica 9. Toplinski gubitci prostorija zgrade zimi 60
Tablica 10. Toplinsko opterećenje prostorija zgrade ljeti 61
Tablica 11. Investicijski troškovi termotehničkog sustava dizalice topline s tlom [17] 70

Popis oznaka

ZNAK	JEDINICA	OPIS
α_g	m^2/dan	toplinska difuznost tla
ε		koeficijent grijanja
ε_g		koeficijent grijanja
λ	W/mK	koeficijent toplinske vodljivosti
λ_g	W/mK	koeficijent toplinske vodljivosti tla
τ	dan	vremenski interval u kojem se javlja puls toplinskog toka
τ_f	dan	vremenski period trajanja pulsa toplinskog toka, dnevni
τ_1	dan	vremenski period trajanja pulsa toplinskog toka, godišnji
τ_2	dan	vremenski period trajanja pulsa toplinskog toka, mjesečni
$A_{zem,kol,uk}$	m^2	ukupna površina zemljišta potrebna za polaganje cijvi horizontalnog kolektora
C_{fc}		korekcijski faktor za dizalicu topline – režim rada hlađenje
C_{fh}		korekcijski faktor za dizalicu topline – režim rada grijanje
COP_c		koeficijenti grijanja dizalice topline ovisan o ljetnom projektnom toplinskom opterećenju zgrade
COP_h		koeficijenti grijanja dizalice topline ovisan o zimskom projektnom toplinskom opterećenju zgrade
d_p	m	promjer U-cijevi
$EFLH_c$	h	vrijeme trajanja rada dizalica topline u režimu hlađenja pod punim opterećenjem
$EFLH_h$	h	vrijeme trajanja rada dizalica topline u režimu grijanja pod punim opterećenjem
F_c		faktor ljetnog toplinskog opterećenja zgrade
F_h		faktor zimskih toplinskih gubitaka zgrade
F_o		Fourier-ov broj
F_{of}		Fourier-ov broj; godišnji puls
F_{o1}		Fourier-ov broj; mjesečni puls

F_{o2}		Fourier-ov broj; dnevni puls
F_{sc}		faktor toplinskih gubitaka zbog izmjene topline između polaznog i povratnog toka struje radnog medija izmjenjivača topline
G		faktor utjecaja na toplinski otpor tla
G_f		faktor utjecaja na toplinski otpor tla; godišnji puls
G_1		faktor utjecaja na toplinski otpor tla; mjesečni puls
G_2		faktor utjecaja na toplinski otpor tla; dnevni puls
k_f	W/mK	koeficijent toplinske vodljivosti sekundarnog radnog medija
L_c	m	duljina sondi za zadovoljavanje potreba zgrade za rashladnim učinkom
L_h	m	duljina sondi za zadovoljavanje potreba zgrade za ogrjevnim učinkom
L_s	m	potrebna duljina sondi za namiravanje potreba zgrade za rashladnim i ogrjevnim učinkom
L_{sh}	m	ukupna duljina cijevi horizontalnog kolektora (zimski toplinski gubitci zgrade)
L_{uk}	m	ukupna duljina cijevi horizontalnog kolektora
L_{ukh}	m	ukupna duljina cijevi horizontalnog kolektora potrebna za namirivanje topl.opterećenja zgrade zimi
PLF_m	m	faktor toplinskog opterećenje zgrade tijekom proračunskog mjeseca
q	W	rashladni/ogrjevni kapacitet dizalica topline
q_a	W	rezultirajući godišnji toplinski tok prema zemlj
q_c	W	ljetno projektno opterećenje zgrade
$Q_{DT,r}$	W	rashladni učinak dizalice topline
Q_g	W	toplina grijanja
q_h	W	zimski projektni toplinski gubitci zgrade
q_{lc}	W	ljetno toplinsko opterećenje zgrade
q_{lh}	kW	zimski toplinski gubitci zgrade
q_{tlo}	W/m^2	specifično (površinsko) odavanje topline tla
R_g	mk/W	toplinski otpor tla Zemlje

R_{ga}	mk/W	efektivni toplinski otpor tla, godišnji puls
R_{gd}	mk/W	efektivni toplinksi otpor tla, dnevni puls
R_{gm}	mk/W	efektivni toplinksi otpor tla, mjesečni puls
R_p	mk/W	toplinski otpor sonde
s	m	razmak među cijevima horizontalnog kolektora
s_c	m	razmak među cijevima horizontalnog kolektora
$T_{ewt,max}$	ºC	najviša ulazna temperatura radnog medija u izmjenjivač topline
$T_{ewt,min}$	ºC	najmanja ulazna temperatura radnog medija u izmjenjivač topline
t_g	ºC	neporemećena temperatura tla
$T_{g,max}$	ºC	najviša neopterećena temperatura tla
$T_{g,min}$	ºC	najmanja neopterećena temperatura tla
t_p	ºC	temperatuni dodatak uslijed postojanja toplinske interferencije između susjednih sondi
t_w	ºC	srednja temperatura sekundarnog radnog medija u cijevima sonde
t_{wc}	ºC	srednja temperatura sekundarnog radnog tijela
t_{wh}	ºC	srednja temperatura sekundarnog radnog tijela
t_{wi}	ºC	temperatura radnog medija na ulazu u uređaj dizalice toopline
t_{wic}	ºC	temperatura vode na ulazu u uređaj dizalice topline
t_{wih}	ºC	temperatura radnog medija na ulazu u uređaj dizalice toopline
t_{wo}	ºC	temperatura radnog medija na izlazu iz uređaja dizalice toopline
t_{woc}	ºC	temperatura vode na izlazu iz uređaja topline (režim rada hlađenja)
t_{woh}	ºC	temperatura vode na izlazu iz uređaja topline (režim rada grijanje)
W_c	ºC	električna snaga za pogon kompresora potrebna za pokrivanje toplinskog opterećenja ljeti
W_h	ºC	električna snaga za pogon kompresora potrebna za pokrivanje toplinskih gubitaka zimi
W_k	ºC	kompenzacijski rad

IZJAVA

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno na temelju znanja stečenih na Fakultetu strojarstava i brodogradnje i služeći se navedenom literaturom.

Zahvaljujem se mentoru Prof.dr.sc. Igoru Balenu na pruženoj pomoći za vrijeme izrade ovog diplomskog rada.

I na kraju zahvaljujem se svojim roditeljima i svojoj sestri na nesebičnoj podršci tijekom cijelog studija.

Nikola Draženović

1.UVOD

Na kraju prvog desetljeća 21. stoljeća čovječanstvo je, možda više nego ikada u svojoj povijesti, suočeno s pitanjima održivoga razvoja, zaštite okoliša i usko s time povezano, pitanjima zaštite zdravlja ljudi. U mnogim međunarodnim dokumentima u kojim se na globalnoj razini pokušava odgovoriti na navedena pitanja, često se, barem deklarativno, govori o pravu čovjeka na pitku vodu, čist zrak, siguran po njegovo zdravlje okoliš, kao o pravima tzv. treće generacije. Unatoč tome, dok su građansko-političke slobode i socijalna prava čovjeka postale nepobitne vrijednosti i imperativ našeg doba, čini se da su spomenuta prava tzv. treće generacije još uvijek u sferi apstrakcije i teško dohvatljive stvarnosti. Pa ipak, spominjući samo nedavni primjer krize širih razmjera u isporuci plini većem broju zemalja Europe, „ povratak“ prirodi čini se da upravo u naše vrijeme postaje condicio sine qua non i to na svakom području ljudskog djelovanja.

Nedvojbeno je da je čovjek oduvijek za svoje najrazličitije potrebe iskorištavo prirodu, kao i da će to nastaviti činiti u svojoj budućnosti. To nije problematično. Ono što jest, je način na koji to čini, kao i s kakvom to odgovornošću radi. Slikovito rečeno, „kratki spoj“ na relaciji čovjek – priroda nastaje onda kada čovjek poželi imati, kao u staroj narodnoj izreci, i „ ovce i novce“. Kao što znamo iz svakodnevnog iskustva to je često vrlo teško, ali ne i sasvim nemoguće. Gotovo pa spasonosno rješenje za mnoge čovjekove potrebe koje ostvaruje zahvaljući raznim prirodnim bogatstvima, nalazimo u onome za što je danas uvriježena sintagma- obnovljivi izvori energije.

Permanentno isticanje važnosti obnovljivih izvora energije u današnjemu svijetu ponovno je , u posljednjih nekoliko i više godina, kad je riječ o zadovoljavanju čovjekovih potreba grijanja i hlađenja različitih namjena, aktualiziralo korištenje dizalica topline za te svrhe kao i nastojanja stručnjaka za usavršavanjem ove tehnologije.

Naime, dizalice topline iskorištavaju besplatnu sunčevu energiju pohranjenu u tlu, vodi i zraku da bi se potom ona mogla upotrijebiti u komforne kao i u industrijske svrhe. Osnovna prednost dizalica topline pred konvencionalnim termotehničkim sustavima postaje očita već ako spomenemo podatak da od ukupne toplinske energije potrebne za grijanje, hlađenje kao i za pripremu potrošne tople vode nekog objekta, tri četvrtine te energije dizalice topline dobavljaju iz gore navedenih toplinskih izvora(dakle, tla, vode i zraka). Posljedično, to znači znatne uštede u potrošnji primarnih energenata(plina, loživog ulja, nafte itd.) čije su zalihe ograničene i iscrpive, a njihova raspoloživost odnosno dostupnost, kao što to pokazuju posljednji razvoji događaja u svijetu, nesigurna i nestalna uslijed raznih manipulacija i spekulacija interesnih grupa. Naposlijetku, ali naravno ne manje važno, korištenje obnovljivih izvora energije kao toplinskg izvora znači djelotvorno oživotvorenje principa održivog razvoja i u skladu je sa zahtjevima očuvanja čovjekovog okoliša.
Dovoljno je spomenuti da komforna primjena tehnologije dizalica topline, uz pretpostavku pokrivanja toplinskih potreba na razini od 30%, dovodi do smanjenja globalne emisije CO_2 za 1 milijardu tona, a primjenom dizalica topline u industriji moguće je emisiju CO_2 reducirati za 0, 2 milijarde tona.

S druge strane, može se reći da je u osnovi korištenje dizalica topline tehnički nešto složeniji i investicijski skuplji pothvat. No u konačnici odnosno u praktičnoj eksploataciji, nakon što se savladaju tehničko-investicijske prepreke, dizalice topline pokazuju se kao ekonomski i ekološki isplativija opcija u zadovoljavanju potreba za grijanjem odnosno hlađenjem.

Na kraju ovoga uvoda možemo spomenuti nekoliko zanimljivih podataka o dizalicama topline i njihovoj upotrebi:

- prvu, praktično upotrebljivu, dizalicu topline kapaciteta 14 kW, korištenu u industrijske svrhe, izradio je još davne 1856./57. u Austriji Peter von Rittinger; prva pak velika dizalica topline puštena je u rad 1930./31. godine u Los Angelesu, a bila je u vlasništvu tvrtke za elektrodistribuciju,
- prva velika dizalica topline u Europi postavljena je 1938. godine za jednu vijećnicu u Zürichu, snaga joj je iznosila 190 kW, a služila se jezerskom vodom kao toplinskim izvorom,
- od 1948. godine u SAD-u se započinje s razvojom manjih jedinica dizalica topline odnosno klimatizacijskih uređaja s grijanjem i hlađenjem, učinka od 10 do 30 kW i to za individualne korisnike, a već 1976. godine proizvodnja tih uređaja dostiže brojku od 1, 6 milijuna komada godišnje,
- sve do 1950. godine dizalice topline se u pravilu koriste za grijanje kuća tj. neznatna je njihova upotreba u industrijske svrhe,
- prva energetska kriza sedamdesetih godina 20. stoljeća utječe na sve veći porast i popularizaciju upotrebe dizalica topline,
- sedamdesete godine prošlog stoljeća mogu se smatrati vremenom kada se i u našoj zemlji sve više počinje razmišljati o korištenju dizalica topline i to za grijanje zgrada pa se radi više prototipova te se ugrađuju modeli inozemnih proizvođača,
- 1979. je godina kada dolazi do ugradnje prve domaće dizalice topline i to za grijanje pomorsko-putničkog terminala u splitskoj luci, a proizvela ju je tvrtka „ Termofriz“. Njezin toplinski izvor bila je morska voda i imala je učinak od 700 kW, s temperaturom vode za grijanje od 45/40°C te rashladni učinak od 650 kW,
- danas su dizalice topline koje iskorištavaju enegiju tla i voda jedna od najbrže rastućih tehnologija u svijetu koja koristi obnovljive izvore energije , a taj je trend osobito izražen u SAD-u i u nekim državama članicama Europske Unije(npr. u Švedskoj). Prema podatcima s kraja 2004. godine, diljem svijeta instalirano je oko 1 milijun spomenutih dizalica topline,
- u Hrvatskoj je danas prodaja dizalica topline još uvijek u samim svojim počecima.

2. Općenito o dizalicama topline

2.1 Termodinamičke osnove dizalica topline

Dizalice topline (eng. heat pumps,njem. Wärmepumpen), koje se u našem jeziku još nazivaju i toplinskim crpkama ili toplinskim pumpama, toplinski su uređaji koji „*pumpaju*“ tj. prenose toplinu sa niže temperaturne razine na višu temperaturnu razinu s ciljem korisne primjene toplinske energije. Rad dizalica topline se zasniva na ljevokretnom kružnom procesu. Kako je prema Clausiusovoj formulaciji II. zakona termodinamike nemoguće konstruirati uređaj koji radi ciklički, transferirajući toplinu od tijela niže na tijelo više temperature, a da taj prijelaz nema efekta na okoliš, sasvim je jasno da i dizalica topline za obavljanje svoje zadaće mora koristiti kompenzacijsku energiju tj. kompenzacijski rad. Jedna od mogućih klasifikacija dizalica topline je upravo podjela prema vrsti kompenzacijske energije koju one troše za svoj rad.
Tako razlikujemo:

- kompresijske dizalice topline gdje je kompenzacijska energija mehanički rad kompresora ili pumpi kojima se ostvaruje strujanje radne tvari,

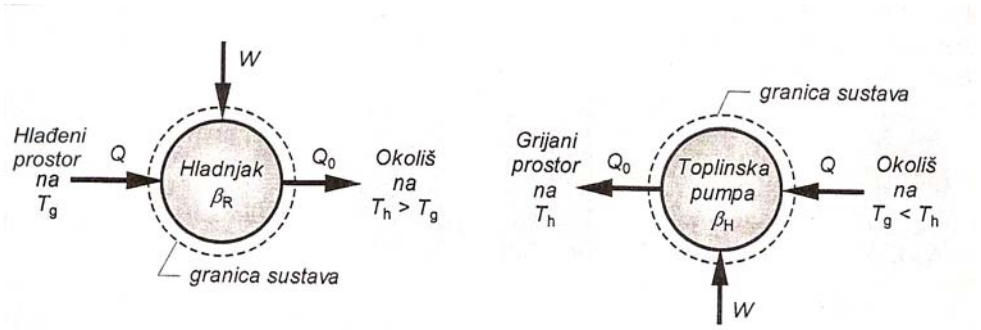
- difuzijsko-apsorpcijske dizalice topline koje koriste toplinu kao kompenzacijsku energiju potrebnu za strujanje radne tvari.

Ovdje treba spomenuti da je realizacija ljevokretnog kružnog procesa u dizalicama topline moguća samo ako nam na raspolaganju stoje dva toplinska spremnika različitih temperatura:

- toplinski izvor (toplinski spremnik niže temperature); niskotemperaturni toplinski spremnik koji predaje toplinu dizalici topline; najprikladniji toplinski izvori su: voda (riječna, jezerska, morska ili podzemne vode), tlo, Sunce, okolišnji zrak, istrošeni zrak iz prostorija i otpadna toplina u indstrijskim procesima,

- toplinski ponor (toplinski spremnik više temperature); visokotemperaturni toplinski spremnik kojemu dizalica topline predaje toplinu; toplinski ponori mogu biti: zrak u grijanim prostorima, voda(riječna, jezerska, morska), ogrjevni medij sustava grijanja, potrošna topla voda, voda koja se koristi u industijskim procesima itd.

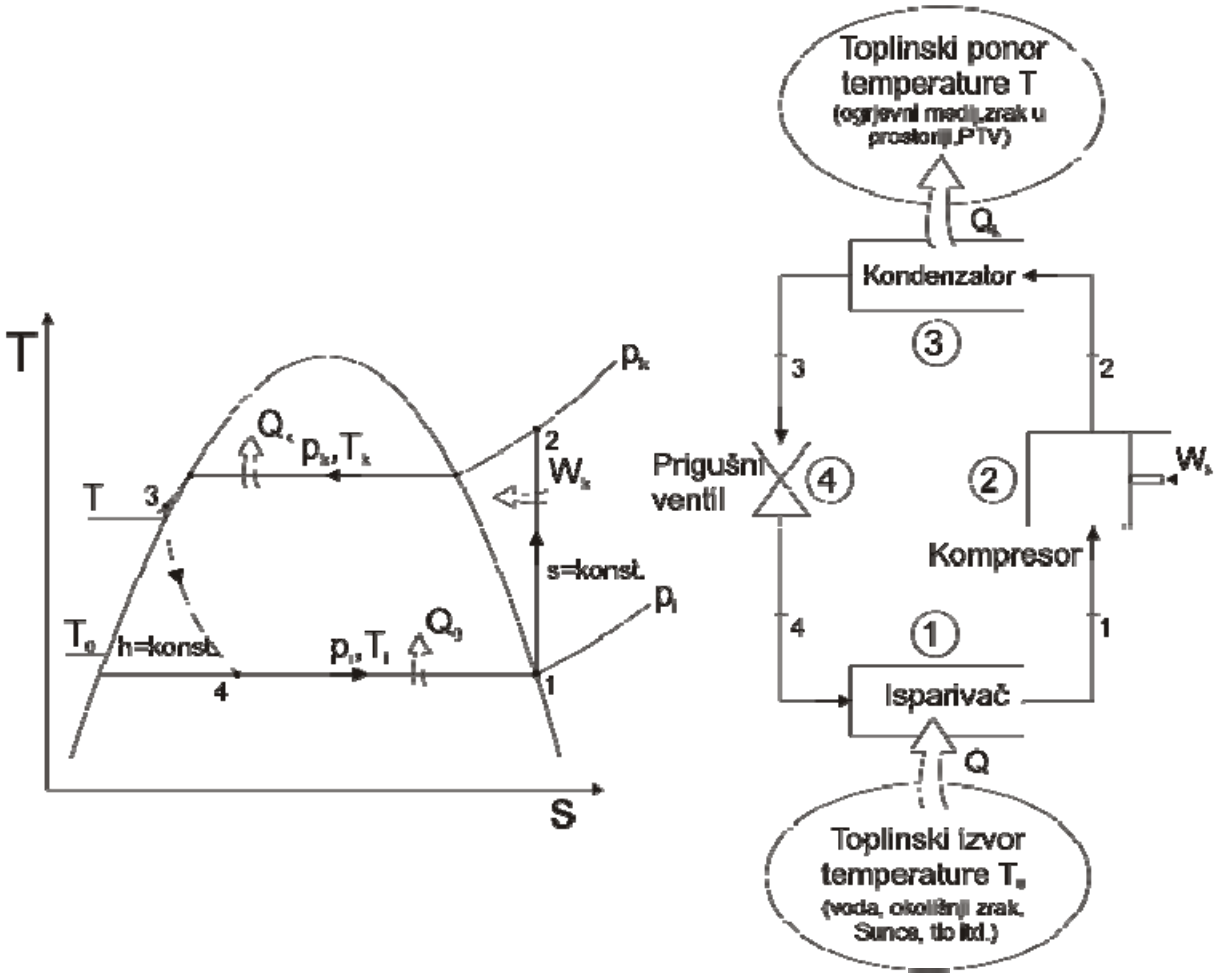
Osim dizalica topline isti princip rada nalazimo i kod rashladnih uređaja u kojima se također odvijaju ljevokretni kružni procesi. Ljevokretni kružni procesi se još nazivaju i *rashladnim procesima, ogrjevnim procesima i rashladno-ogrjevnim procesima,* ovisno o tome koja je osnovna namjena njihove primjene. Dizalice topline i rashladni uređaji su u načelu isti uređaji (osnovni dijelovi su im isti), samo je njihova namjena bitno različita. Ta se razlika vidi na shematskom prikazu dizalice topline i hladnjaka na slici 1. Dizalice topline se koriste radi zagrijavanja prostora ili nekog medija koji se npr. koristi u industrijskim procesima na temperaturu višu od okolišnje. S druge strane, rashladni uređaji se koriste za održavanje temperature nekog prostora ispod temperature okoliša.



Slika 1. Shematski prikaz rada rashladnog uređaja i toplinske pumpe [1]

2.2 Osnovni dijelovi i prikaz načina rada dizalica topline

Radi boljeg razumijevanja načina rada dizalica topline slijedi opis ljevokretnog kružnog procesa kojim dizalice topline dobavljaju toplinu sa niže na višu temperaturnu razinu. Prikaz radnog procesa kao i osnovni dijelovi kompresijske dizalice topline dani su na slici 2.



Slika 2. Radni proces u dizalicama topline i shematski prikaz osnovne izvedbe dizalice topline

Isparivač i kondenzator su izmjenjivači topline u kojima se odvija izmjena topline između radne tvari toplinskih pumpi i toplinskih spremnika. Kompresor i prigušni ventil omogućuju pak cikličko ponavljanje radnog procesa na način da dovode radnu tvar dizalice topline u ono termodinamičko stanje koje je pogodno za izmjenu topline sa toplinskim spremnicima.

Radni proces dizalica topline započinje u isparivaču gdje radna tvar izmjenjujući toplinu direkno ili indirektno sa toplinskim izvorom preuzima toplinsku energiju na sebe. Pritom ona mijenja svoje agregatno stanje i prelazi iz kapljevitog u plinovito. Po izlasku iz isparivača radna tvar ima temperaturu nižu od temperature toplinskog ponora kojemu bi ona trebala predati toplinu. Zbog toga je radnoj tvari potrebno povisiti termperaturni nivo, a tu zadaću ima kompresor. Električna energija elektromotora u kompresoru koji usisava radni medij pretvara se u mehanički rad tj.kompenzacijski rad kojim se radni medij dovodi na temperaturu višu od toplinskog ponora. Komprimirani radni medij potom odlazi u drugi izmjenjivač topline, kondenzator, gdje sad predaje toplinu direktno ili indirektno toplinskom ponoru pri čemu radni medij prelazi iz plinovitog u kapljevito agregatno stanje. Toplinu predanu toplinskom ponoru nazivamo još i *toplinom grijanja*.

Nakon izlaska iz kondenzatora radna tvar se uz pomoć prigušnog ventila(ekspanzijskog ventila) dovodi sa više temperature na nižu temperaturu koju je imala na početku radnog procesa te ulazi u isparivač gdje kružni proces u dizalicama topline započinje ponovno.

2.3 Učinkovitost rada dizalica topline

Veličina kojom se na najprikladniji način može ocijeniti ljevokretni proces koji se odvija u dizalicama topline jest tzv. *koeficijent grijanja* koji predstavlja odnos topline grijanja Q_g (koja se odvodi od radne tvari i predaje mediju koji se pritom grije) i kompenzacijskoga rada W_k tj.

$$\varepsilon_g = \frac{Q_g}{W_k}$$

Koeficijent grijanja ε_g (eng. coefficient of performance,kratica COP) se još naziva i *toplinski množitelj* i pokazuje nam koliko se topline izraženo u džulima može predati toplinskom ponoru(npr. prostoru koji se grije) na račun jednog džula uložene kompenzacijske energije.

Za zadane temperature niskotemperaturnog i visokotemperaturnog toplinskog spremnika najveća vrijednost omjera topline grijanja i kompenzacijskoga rada koja se može postići određena je teorijskim *Carnotovim* ljevokretnim kružnim procesom. Iz tog razloga Carnotov kružni proces može nam poslužiti kao etalon prema kojem se onda mogu vrednovati realni kružni procesi u dizalicama topline.

Vrijednosti koeficijenata grijanja koje se u današnje doba mogu postići realnim radnim procesima u dizalicama topline kao i one koje se teoretski mogu ostvariti Carnotovim radnim procesom prikazuje tablica 1.

Tablica 1. Koeficijenti grijanja koje danas postižu dizalice topline različitih izvedbi [2]

IZVEDBA DIZALICE TOPLINE I NJEZIN TOPLINSKI IZVOR	UOBIČAJENO PODRUČJE PRIMJENE	PROMJENA VRIJEDNOSTI KOEFICIJENTA GRIJANJA ε_{gr} U OVISNOSTI O TEMPERATURI TOPLINSKOG PONORA					
		35°	45°	55°	65°	75°	85°
Visokoučinska dizalica topline sa okolišnjim zrakom kao toplinskim izvorom.Temperatura zraka je - 20°C		2.2	2.0	_	_	_	
Dvostupanjska dizalica topline sa okolišjnim zrakom kao izvorom topline.Temperatura zraka je -20° C	Niskotemp. sustavi grijanja	2.4	2.2	1.9	_	_	
Visokoučinska dizalica topline sa okolišnjim zrakom kao toplinskim izvorom.Temperatura zraka je 0°C	Niskotemp. sustavi grijanja	3.8	2.8	2.2	2.0	_	
Dizalica topline sa vodom kao toplinskim izvorom.Temperatura vode je 0 °C		5.0	3.7	2.9	2.4	_	_
Dizalica topline sa tlom kao toplinskim izvorom.Temperatura tla je 10 °C	Niskotemp. sustavi grijanja	7.2	5.0	3.7	2.9	2.4	_
Idealni Carnotov ljevokretni kružni proces.Temperatura toplinskog izvora je -20°C		5.6	4.9	4.4	4.0	3.7	3.4
Idealni Carnotov ljevokretni kružni proces.Temperatura toplinskog izvora je 0°C		8.8	7.1	6.0	5.2	4.6	4.2
Idealni Carnotov ljevokretni kružni proces.Temperatura toplinskog izvora je 10°C		12.3	9.1	7.3	6.1	5.4	4.8

Godišnji koeficijent rada ili godišnji koeficijent učinkovitosti je još jedna veličina kojom se iskazuje efikasnost rada dizalice topline. Ova veličina pokazuje omjer ukupno isporučene topline nekoj zgradi i za tu svrhu ukupno potrošene energije (električne energije) tijekom godine. Godišnjim koeficijentom rada uzimaju se u obzir promjenljive potrebe zgrade za ogrjevnim i rashladnim učinkom, promjene temperatura toplinskih spremnika tijekom godine te potrošnja energije za potrebe eventualnog odmrzavanja površine isparivača dizalice topline.Vrijednosti godišnjeg koeficijenta rada koje ostvaruju dizalice topline mogu se isto tako upotrijebiti za usporedbu sa konvencionalnim sustavima grijanja zgrade(npr. s kotlovima na tekuće gorivo) po pitanju smanjenja potrošnje primarnih energenata i redukcije emisije CO_2. Ovdje treba napomenuti da kada se uspoređuje učinak električnih kompresijskih dizalica topline sa konvencionalnim izvedbama sustava grijanja potrebno je uzeti u obzir učinkovitost rada električne centrale u kojoj se proizvodi električna energija koju koriste dizalice topline.

Efikasnost rada dizalice topline izražena pomoću toplinskog množitelja ili koeficijenta grijanja ponajprije ovisi o svojstvima toplinskog izvora kao jednoga od dvaju toplinskih spremnika potrebnih za realizaciju radnog procesa. Najčešće korišteni toplinski izvori za dizalice topline prikazani su u tablici 2. Ovdje ćemo navesti i jedno načelno pravilo koje se tiče spomenute efikasnosti:

„ Dizalica topline radi onoliko dobro koliko je dobar njezin toplinski izvor “.

Dobrota ili kvaliteta nekog toplinskog izvora koja utječe na termodinamičku učinkovitost dizalice topline izravno je povezana sa načinom na koji toplinski izvor ispunjava zahtjeve koji

se pred njega postavljaju. Ima nekoliko osnovnih zahtijeva koji trebaju biti ispunjeni da bi se osigurala učinkovitost rada dizalica topline, a oni su:

- dovoljna količina topline pri što višoj temperaturi dostupna u svako doba(npr.tijekom cijele sezone grijanja),
- troškovi priključenja dizalice topline na toplinski izvor trebaju biti što manji,
- energija potrebna za transport topline izvora do samog isparivača dizalice topline treba biti što manja.

Osim gore spomenutih zahtjeva koji se odnose samo na toplinski izvor, postoje i neki drugi uvjeti koji također trebaju biti zadovoljeni u svrhu postizanja većih vrijednosti koeficijenta grijanja, kao npr.:

- mala udaljenost toplinskog izvora i ponora,
- temperatura toplinskog ponora treba biti umjerena radi manje potrošnje energije potrebne za pogon dizalice topline,
- vrijeme korištenja dizalice topline tijekom godine treba biti što veće.

Današnje dizalice topline u manjoj ili većoj mjeri ispunjavaju većinu ovdje navedenih uvjeta. Koliko dobro one to čine najbolje se vidi iz vrijednosti koeficijenta grijanja koje postižu, a što je ponajprije rezultat odabira toplinskog izvora kao onog čimbenika koji naviše utječe na konačnu izvedbu dizalice topline.

2.4 Toplinski izvori za dizalice topline

U daljnjem tekstu dan je kratki pregled osnovnih izvedbi dizalica topline s obzirom na odabrani toplinski izvor.

2.4.1 Površinske vode kao toplinski izvor

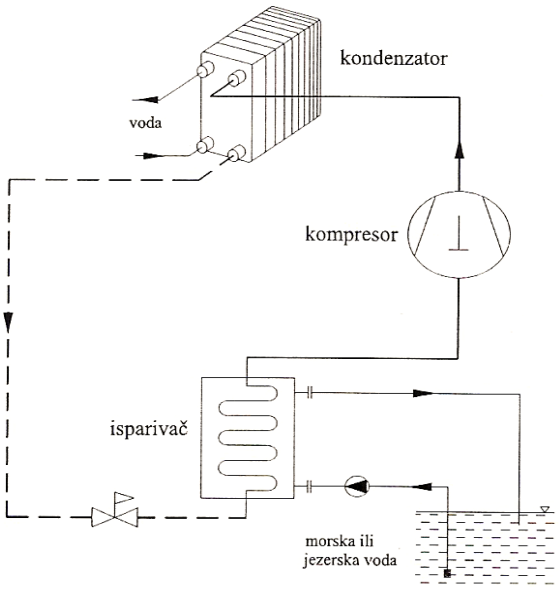
Povšinske vode tj. vode potoka,rijeka,jezera te mora i oceana koriste se u mnogim slučajevima kao toplinski izvori. Dizalice topline koje iskorištavaju toplinu takvih voda koriste se za grijanje i hlađenje upravo onih objekata koji se nalaze u njihovoj blizini, jer su investicijski troškovi i troškovi eksploatacije takvih izvora za udaljene potrošače vrlo visoki. Izmjena topline između dizalice topline i površinskih voda se odvija indirektno, pomoću posrednog kruga za prijenos topline. Radni medij posrednog kruga je obično voda ili pri nižim temperaturama mješavina vode i glikola.

Temperature površinskih voda se najčešće kreću u rasponu od 0°C do 10°C, a ponekad znaju biti i više. Više temperature u pravilu pripadaju jezerskim i riječnim vodama te one omogućuju postizanje većih vrijednosti toplinskih množitelja. Ograničavajući faktor primjene povšinskih voda kao toplinskog izvora za dizalice topline je činjenica da je potrebno. posjedovati dozvolu za njihovo iskorištavanje kao npr. u slučaju morske vode.

Tablica 2. Toplinski izvori za dizalice topline [3]

KRITERIJ ZA OCJENU VALJANOSTI	ZRAK		ZEMLJA	VODA					SUNCE
	okolišnji	povratni iz klimatiz.sust.		podzemna	riječna	jezerska	morska	otpadna, kućanska i industrijska	
Temperaturna (energijska) razina	-25 ÷ 20 °C	> 22 °C	-5 ÷ 15 °C	5 ÷ 15 °C	0 ÷ 10 °C	0 ÷ 10 °C	3 ÷ 8 °C	> 10 °C	
Lokacijska raspoloživost	posvuda	pri grijanju i/ili hlađenju zrakom	ponegdje, ovisno o terenu	ponegdje	ponegdje	ponegdje	ponegdje	ponegdje	posvuda
Vremenska raspoloživost	uvijek	ponekad, ovisno o radnom režimu	uvijek	uvijek	ne uvijek,radi niskih temper.< 2 C	ne uvijek, radi niskih temperatura	uvijek	uvijek	promjenjljivo i nepredvidivo
Vremenska podudarnost potrošnje i raspoloživost	nekoherentno (najviše potrebna -najviša raspoloživost)	koherentno (najviše potreba -najviša raspoloživost)	djelomično koherentno (raspoloživost opada prema krajau sezone grijanja)	koherentno (konstantna raspoloživost tijekom godine)	djelomično koherentno ili nekoherentno	djelomično koherentno	djelomično koherentno	koherentno	nekoherentno (najviša potreba - najmanja raspoloživost
Mogućnost samostalnog korištenja	da	djelomično	da	da	djelomično	djelomično	da	da	jedva moguće
Kemijska ili fizikalna svojstva koja otežavaju uporau	zaleđivanje	-	zaleđivanje korozija	korozija	korozija, prljavština, sol	prljavština, soli	prljavština , soli, alge	prljavština, korozija, neugodni mirisi	-
Utrošak energije za transport nositelja topline	velik	-	velik	velik	raznolik	raznolik	raznolik , često velik	raznolik	raznolik
Troškovi izvedbe postrojenja	mali do srednji	mali	velik	velik	srednje do velik	srednji do velik	srednji do velik	srednji do velik	velik
Utjecaj na energetsku ravnotežu okoliša	nema znatnog utjecaja	nema nikakva utjecaja	zanemarivo malen	nije zanemariv	zanemarivo malen	zanemarivo malen	zanemarivo malen	nema nikakva utjecaja	nema nikakva utjecaja
Utjecaj na zagađenje okoliša	nema	nema	neutralno	ima	djelomično	djelomično	neutralno	nema	nama
Prikladnost za masovnu proizvodnju	dobra	dobra	umjerena	dobra	dobra	dobra	dobra	umjerena	umjerena

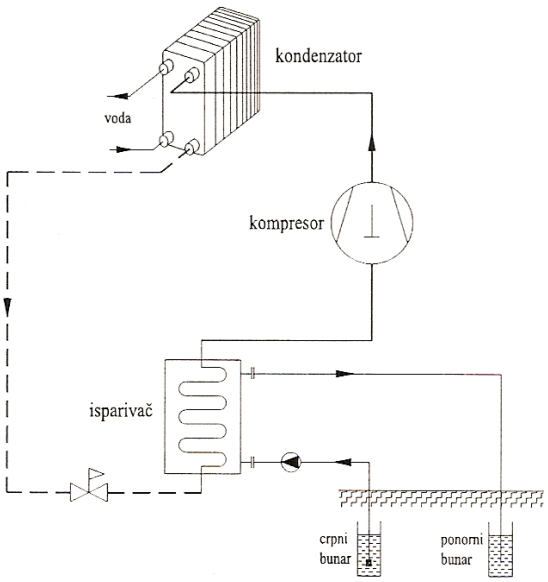
Shematski prikaz izvedbe dizalice topline s površinskim vodama kao izvorom topline dan je na slici 3.



Slika 3. Dizalica topline s površinskim vodama kao izvorom topline [4]

2.4.2 Podzemne vode kao toplinski izvor

Podzemne vode kao izvor topline omogućuju postizanje visokih vrijednosti koeficijenata grijanja od 3,5 pa do 4. Razlog tomu je pretežno konstantna i relativno visoka temperatura takvih voda, od 0 do +10 °C tijekom godine. Veće vrijednosti toplinskog množitelja se odnose na slučajeve u kojim se toplina podzemnih voda direkno iskorištava tj. kada nema posrednika u izmjeni topline između radne tvari dizalice topline i podzemne vode. Korištenje podzemnih voda moguće je samo ako su nam na raspolaganju dva bunara, jedan crpni i jedan ponorni pri čemu razmak između bunara ne bi smio biti manji od 10 m. Bunar iz kojega se crpi voda mora biti količinski izdašan kako pogon dizalice topline ne bi bio prekidan. Shematski prikaz izvedbe dizalice topline s podzemnim vodama kao izvorom topline dan je na slici 4.

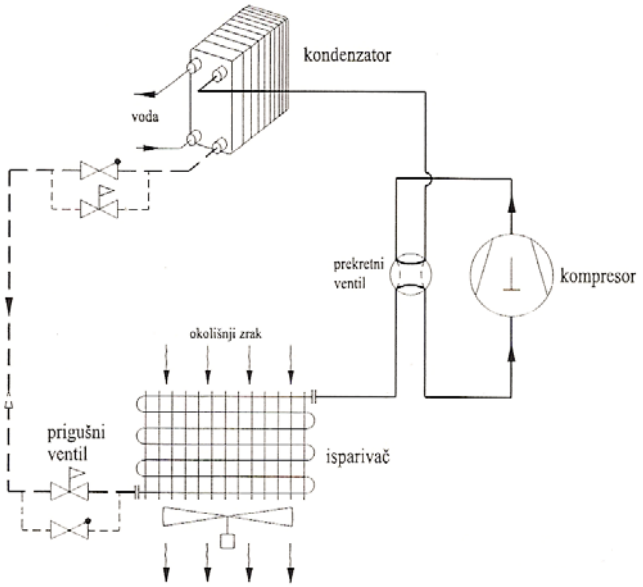


Slika 4. Dizalica topline s podzemnim vodama kao izvorom topline [4]

2.4.3 Okolišnji zrak kao toplinski izvor

Izvedbe dizalica topline sa okolišnjim zrakom kao izvorom topline vrlo su raširena pojava i često se primjenjuju diljem svijeta. To je naravno izravno povezano sa činjenjicom da je zrak zapravo najpristupačniji toplinski izvor. Iako je toplinska energija zraka praktički dostupna na svakome mjestu, mogućnost njezinog korištenja u datom trenutku je u najvećoj mjeri određeno temperaturom zraka. Naime pri vrlo niskim vanjskim temperaturama zraka (već od +2° pa do -5°C) dolazi do zaleđivanja površine isparivača te je potrebno prekinuti rad dizalice topline i provesti njezino odleđivanje. Takva ograničenja naravno znatno utječu na ekonomičnost rada dizalica topline sa zrakom kao toplinskim izvorom. Moderne izvedbe toplinskih crpki omogućuju iskorištavanje topline vanjskog zraka čak do temperatura od -20°C.

Jedan od nedostataka dizalica topline koje koriste okolišnji zrak jest i buka koja u mnogim situacijama može biti presudan faktor u odabiru toplinskog izvora istih. Buku proizvode ventilatori vanjskih jedinica uređaja dizalice topline kojima se pospješuje izmjena topline između radne tvari i vanjskog zraka. Shematski prikaz izvedbe dizalice topline s okolišnjim zrakom kao izvorom topline dan je na slici 5.



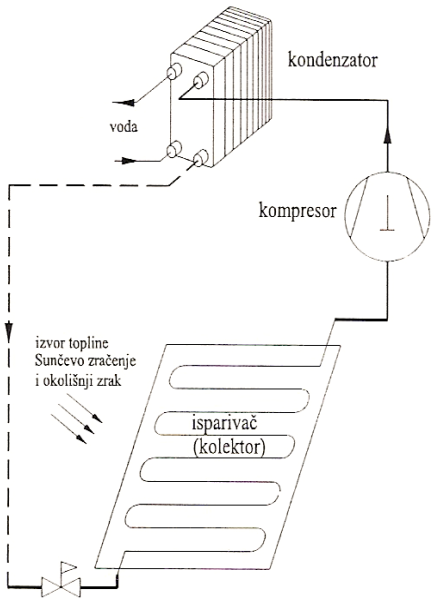
Slika 5. Shematski prikaz dizalice topline s okolišnjim zrakom kao izvorom topline [4]

2.4.4 Sunce kao toplinski izvor

Sunčeva energija još je jedan izvor toplinske energije za dizalice topline. Ona se može koristiti izravno ili neizravno u kombinaciji s drugim toplinskim izvorima. Upotrebom toplinske enregije Sunca u pravilu se postižu više temperature isparavanja radne tvari koje imaju za posljedicu veći rashladni učinak isparivača i u konačnici veće vrijednosti toplinskog množitelja. Vrijednosti koeficijenata grijanja koje se postižu pri izravnom korištenju sunčeve energije ovise o intenzitetu sunčeva zračenja i o vanjskoj temperaturi zraka.

Dizalice topline koje direktno iskorištavaju sunčevu energiju imaju solarni kolektor kroz koji struji radna tvar koja preuzimajući toplinu prelazi iz kapljevitog u plinovito agregatno stanje.

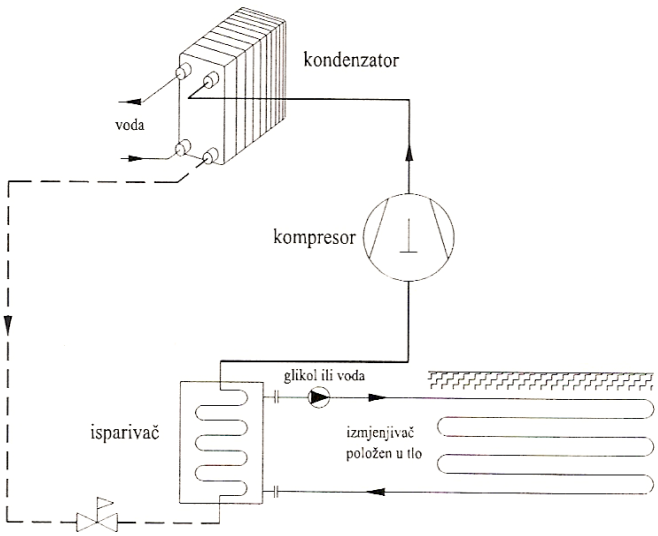
Pritom se dio topline gubi zbog izmjene sa okolišnjim zrakom.Shematski prikaz izvedbe dizalice topline s direktnim iskorištavanjem sunčeve energije dan je na slici 6.



Slika 6. Dizalice topline sa sunčevom energijom kao izvorom topline [4]

2.4.5 Tlo kao toplinski izvor

Tlo tj. površinski slojevi tla se također mogu koristiti kao toplinski izvor za dizalice topline. Naime temperatura tla je već pri malim dubinama razmjerno konstantna tijekom godine, što je jako poželjna karakteristika toplinskih izvora. Toplina tla u najvećoj mjeri potječe od dozračene sunčeve energije, a manjim dijelom iz dubinskih slojeva same zemlje. Izmjena topline između radnog medija dizalica topline i tla je indirektna i provodi se pomoću izmjenjivača topline smještenog na prikladan način u tlu. Mješavina glikola i vode se najčešće koristi kao posrednik u tom procesu izmjene topline. Postoje i izvedbe u kojima radna tvar direktno isparava u cijevima položenim u tlu, i u tom slučaju postižu se za 10 do 15% veće vrijednosti toplinskih množitelja.Slika 7. prikazuje shematski izvedbu dizalica topline s tlom kao toplinskim izvorom.



Slika 7. Dizalica topline s tlom kao toplinskim izvorom [4]

2.5 Radne tvari dizalica topline

Iz svega što je dosad rečeno može se zaključiti da vrlo važnu ulogu u radu svake dizalice topline osim toplinskih spremnika ima i radna tvar dizalica topline. Naime radna tvar je posrednik u procesu izmjene topline između dvaju toplinskih spremnika različitih temperatura te njezina termodinamička svojstva, od kojih ćemo ovdje istaknuti samo neka, u velikoj mjeri utječu na termodinamičku učinkovitost same toplinske pumpe:

- niska temperatura isparavanja pri atmosferskom tlaku (p_{ok}=0,0103 MPa),
- umjeren omjer tlakova kondenzacije i isparivanja $p/p_{0,}$
- velika specifična latentna toplina isparavanja $r_{0,}$
- što manji specifični volumen pare radne tvari tj. što veća gustoća pare pri usisavanju pare iz isparivača u kompresor,
- što više položena kritična točka (p_{Kr},T_{Kr}).

Ne smijemo zaboraviti da je izbor radne tvari za dizalice topline isto tako od presudne važnosti za očuvanje okoliša. Tu prije svega treba istaknuti da je očuvanje Zemljinog ozonskog omotača od posebne važnosti jer ozonski omotač upija UV zračenje koje je štetno za gotovo sve oblike života. Zbog toga današnje moderne izvedbe dizalica topline isključivo koriste radne tvari koje imaju mali ili nikakav utjecaj na razgradnju ozona kao npr.fluorirani ugljkovodici, što je bio navjeći problem prije upotrebljavanih radnih tvari koje su sadržavale klor (klorofluorougljici i klorofluorougljikovodici). No bez obzira što nove radne tvari iz skupine HFC ne utječu na razgradnju ozona, i dalje se njihovim korištenjem u dizalicama topline doprinosi povećanju stakleničkih plinova u atmosferi. U tablici 3. su navedene neke radne tvari koje su se prije koristile odnosno koje se danas koriste u dizalicama topline. Osim nekih termodinamičkih svojstava radnih tvari naveden je i njihov utjecaj na okoliš.

Tablica 3. Svojstva radnih tvari dizalica topline [5]

	COPth	kJ/m³	NKP	t25	t50	tcrit	ODP	GWP
R507	3.95	3553	-47.3	54.1	68	72.8	0	3900
R404A	4.01	3506	-46.7	55.1	69.4	72	0	3800
R410A	4.17	5150	-51.7	42.9	67.4	69.6	0	2000
R407C	4.45	3410	-43.9	57.1	82.9	86	0	1700
R134A	4.6	2265	-26.2	79.3	98.6	101	0	1300
R22	4.62	3677	-40.9	63.1	93.4	96	0.05	1700
R717	4.82	4241	-33.5	59.6	89.7	132.3	0	0
R600	4.89	898	-0.5	129.1	148.7	152	0	20

COPth = koeficijent grijanja dizalice topline ovisan o odabiru radne tvari

kJ/m³ = specifična toplina kondenzacije izražena po m^3 komprimirane radne tvari

NKP = temperatura vrenja pri standarnom atmosferskom tlaku

t25,t50 = temperatura kondenzacije radne tvari pri tlaku 25 i 50 bar

tcrit = kritična temperatura radne tvari

ODP = potencijal razgradnje ozona

GWP = potencijal globalnog zatopljavanja

Nove radne tvari dizalica topline iz skupine fluoriranih ugljikovodika (HFC, djelomično halogenirani derivati zasićenih ugljkovodika koji ne sadržavaju klor) su:

- R134a - koristi se kao zamjena za R12,
- R152a - koristi se kao zamjena za R12, ili kao komponenta u smjesama radnih tvari,
- R32 - radna tvar koja bi u potpunosti trebala zamijeniti R22;glavna komponenta u zeotropskoj smjesi R407C,
- R125 i R143a - komponente azeotropskih smjesa,
- R407C - zeotropska smjesa,
- R404a - pseudozeotropska smjesa,
- R410A - zeotropska smjesa.

2.6 Primjena dizalica topline

Uzevši u obzir osnovni zadatak dizalica topline,tj.osnovnu svrhu njihove primjene, spomenutu na samome početku ovoga rada, ovdje se navode osnovna područja primjene dizalica topline u današnje doba, a to su:

1. Komforna primjena u stambenim i poslovnim prostorima gdje se dizalice topline u pravilu koriste:

- za grijanje,
- za hlađenje,
- pripremu potrošne tople vode.

2. Industrijska primjena gdje se dizalice topline koriste:

- za grijanje industrijskih pogona pri čemu se kao toplinski izvor između ostalog koristi i otpadna toplina iz industrijskih procesa,
- za zagrijavanje industrijske vode u temperaturnom području od 40 do 90°C uz mogućnost hlađenja vode,
- za proizvodnju vodene pare temperature do 150°C modernim visokotemperaturnim dizalicama topline,
- u procesima sušenja i odvlaživanja u industriji papira i celuloznih prizvoda, drvnoj industriji te u industriji prerade i čuvanja namirnica,
- u procesima isparivanja i destilacije u kemijskoj i prehrambenoj industriji.

Primjena dizalica topline za dobavu korisne toplinske energije u sustavima grijanja, hlađenja i klimatizacije stambenih i poslovnih prostora znatno je više izražena nego li njihova eksploatacija u inustrijske svrhe. Iz tog razloga ćemo u daljnem tekstu pažnju usmjeriti samo na značajke primjene dizalica topline u komforne svrhe.

Kad govorimo o dobavi toplinske energije za potrebe komoforne primjene mnoge studije energetsko-ekonomskog karaktera rađene širom svijeta potvrdile su i još uvijek potvrđuju opravdanost korištenja tehnologije dizalica topline zbog niza prednosti koje ona ima s obzirom na konvencionalne tehnologije. Spomenut ćemo samo neke od tih prednosti:

- smanjenje potrošnje fosilnih goriva što doprinosi uštedi primarnih energetskih resursa, smanjuju cijene fosilnih goriva, manje zagađivanje okoliša
- mogućnost korištenja dizalica topline i za grijanje i za hlađenje objekata odnosno kao jedinog izvora ogrjevnog i rashladnog učinka tijekom godine; time se postižu znatne energetske tj. u konačnici i novčane uštede
- mogućnost dobave toplinske energije u širokom temperaturnom rasponu što proširuje mogućnost njihove primjene, npr.priprema potrošne tople vode u kućanstvima, ali i primjena u industrijskim procesima itd.

S obzirom da su toplinske pumpe u stanju isporučivati i preuzimati toplinsku energiju na različim temperaturnim nivoima moguće su različite izvedbe termotehničkih sustava grijanja i hlađenja ovisno o namjeni objekta. Za isporuku toplinske energije prostorima koji to zahtijevaju mogu se pritom koristiti različiti mediji kao npr. voda ili zrak, a upravo njihovo korištenje kao i izvedba sustava grijanja/hlađenja određuje njihovu radnu temperaturu.

Tablica 4. Radne temperature različitih sustava za grijanje i hlađenje dizalicama topline [3]

Sustav za grijanje/hlađenje prostora		**Radna temperatura, °C**
Zračno grijanje		30 - 45
Vodeno grijanje	podno	30 - 55
	ventilokonvektorsko	45 - 60
	konvencionalno radijatorsko	60 - 90
Daljinsko grijanje	toplom vodom	70 - 100
	vrelom vodom/parom	100 -180
Hlađenje	ohlađenim zrakom	10 - 15
	ohlađenom vodom	5 - 15
	daljinsko hlađenje	5 - 8

Izvedba sustava grijanja sa dizalicom topline kao izvorom ogrjevnog učinka bitno utječe i na koeficijent grijanja koji ona postiže. Tablica 5. zorno prikazuje vrijednosti koeficijenta grijanja koje dizalice topline ostvaruje u različitim sustavima grijanja voda-voda, tj.u onim sustavima u kojima je voda onaj medij koji izmjenjuje toplinu u isparivaču i kondenzatoru sa radnom tvari toplinske pumpe.

Tablica 5. Koeficijenti grijanja dizalica topline u sustavima grijanja voda-voda [3]

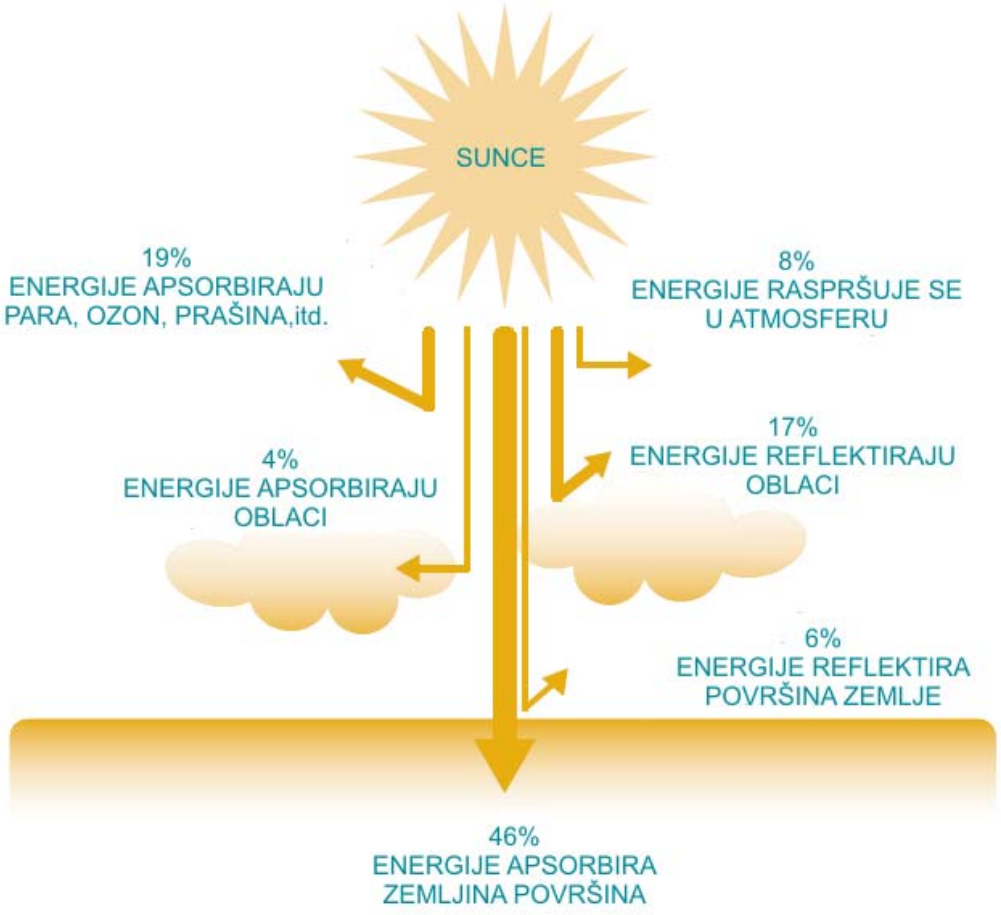
Sustav za grijanje prostora	**Koeficijent grijanja (ε_{gr})**
Konvencionalno radijatorsko grijanje (50/60 ºC)	2,5
Ventilokonvektorsko ili niskotemperaturno radijatorsko grijanje (45/35 ºC)	3,5
Podno grijanje (35/30 ºC)	4

U današnje doba kada racionalno korištenje i upravljanje energetskim resursima postaje imperativom održivog razvoja, upotreba čistih tehnologija i obnovljivih izvora energije te promicanje energetske učinkovitosti uzima sve više maha. Na tragu ovoga je i upotreba dizalica topline, koje ne samo da koriste obnovljive izvore toplinske energije iz okoliša, već se ova tehnologija može smatrati čistom sa stanovišta zaštite okoliša, ali i energetski učinkovitom sa aspekta energetske učinkovitosti.

3. Dizalice topline s tlom kao toplinskim izvorom

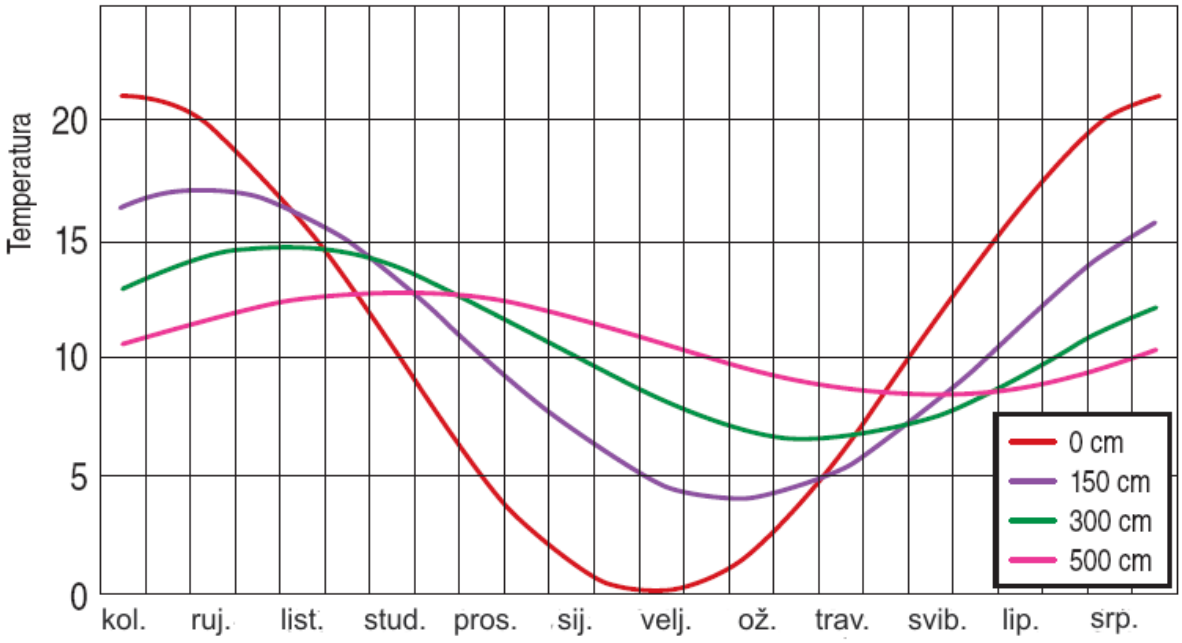
3.1 Značajke tla kao toplinskog izvora

Postizanje i održavanje odgovarajuće temperature zraka u prostorijama neke stambene ili poslovne zgrade koja je u skladu sa zahtijevima toplinske ugodnosti, iziskuje značajne količine toplinske energije, bilo da se radi o zimskom ili ljetnom razdoblju godine. Da bi se namirile potrebe zgrade za ogrjevnim i rashladnim učinkom nerijetko se u takvim situacijama termotehnički sustavi grijanja i hlađenja baziraju na zasebnim toplinskim izvorima ogrjevnog odnosno rashladnog učinka. Energija koja je potrebna za pogon takvih sustava u većini slučajeva dolazi iz neobnovljivih energetskih izvora pri čemu se u najvećoj mjeri radi o direktnom korištenju fosilnog goriva ili se pak radi o električnoj energiji koja je proizvedena upotrebom fosilnih goriva. Uzmemo li u obzir da količina takve energije nije neograničena i da je njezina cijena korištenja u današnje vrijeme poprilično visoka, sasvim je jasno da bi se trebalo u skorijoj budućnosti sve češće pribjegavati primjeni alternativnih izvora energije koje bi, između ostalog, koristili upravo neki nekonvencionalni termotehnički sutavi grijanja i hlađenja. Jedan od takvih alternativnih obnovljivih energetskih izvora je i Sunce tj. dozračena sunčeva energija koja je pohranjena u tlu zemlje. Slika 8. prikazuje raspodjelu ukupnog sunčevog zračenja, izraženog u postocima, koje dospijeva na vanjski rub zemljine atmosfere (tzv. ekstraterestričko zračenje).



Slika 8. Raspodjela ukupno dozračene sunčeve energije na površinu Zemlje [6]

Iz gornje slike lako se može uočiti da 46% ukupno dozračene sunčeve energije apsorbira Zemljina površina ili pretočeno u brojke, Zemlja od Sunca godišnje dobiva oko 4 x 10^{24} J energije što je nekoliko tisuća puta više nego li je ukupna godišnja potrošnja energije iz svih primarnih izvora. Dio te topline se apsorbira u tlu zemlje što tlo čini količinski vrlo izdašnim izvorom toplinske energije. Ta se energija onda korištenjem odgovarajućih tehnologija može iskorištavati za grijanje ili hlađenje zgrada tijekom čitave godine. Osim što je energija tla i više nego dostatna za različite svrhe upotrebe, ona je isto tako vrlo pristupačna tj. dostupna na samom mjestu njezine eksploatacije za razliku od nekih drugih toplinskih izvora.
Pored toga, tlo kao toplinski izvor je vrlo povoljno i zato jer već na malim dubinama ima gotovo stalnu temperaturu budući da provođenje topline kroz slojeve tla, a koje ima vrlo visoki toplinski kapacitet, teče razmjerno sporo. Temperatura tla na dubini od 1,3 do 1,8 m promatrana tijekom godišnjeg razdoblja kreće se u vrlo uskom temperaturnom rasponu od 5°C do 15°C, te možemo reći da je praktički konstantna. Uz to, mala vrijednost koeficijenta toplinske vodljivosti tla omogućuje da se dio topline pohranjene u tlu tijekom ljetnog razdoblja može efikasno koristiti tijekom zimskog razdoblja za potrebe grijanja zgrade. S druge strane, mala vrijednost koeficijenta toplinske vodljivosti znači da se tlo može smatrati vrlo dobrim toplinskim izolatorom. Naime, površinski sloj tla, debljine tek nekoliko metara, omogućuje vrlo dobru toplinsku izolaciju dubljih slojeva Zemlje te podzemnih voda, minimizirajući na taj način temperaturne oscilacije tih slojeva u odnosu na okolišnji zrak na površini Zemlje. Slika 9. prikazuje raspodjelu temperatura tla tijekom godine u ovisnosti o dubini tla u centimetrima.



Slika 9. Raspodjela temperatura tla tijekom godine u ovisnosti
o dubina tla iskazana u centimetrima [7]

Temperaturna razlika na relaciji tlo - okolišnji zrak tijekom godine upravo je zbog svih gore navedenih razloga takva da se toplinska energija pohranjena u tlu može zimi koristiti za grijanje, a ljeti za hlađenje zgrade. Naime, temperatura zraka okoliša je ljeti veća od temperature tla, a zimi je situacija obratna, tlo je toplije od vanjskog zraka.

3.2 Termotehnički sustavi sa dizalicom topline s tlom

Kako je već rečeno, iskorištavanje ovog besplatnog, i prije svega obnovljivog izvora energije, za potrebe grijanja i hlađenja objekta moguće je provesti primjenom za to adekvatne tehnologije. Jedna takva tehnnologija je i dizalica topline s tlom kao niskotemperaturnim toplinskim spremnikom. Dizalice topline s tlom kao toplinskim spremnikom se još nazivaju i *geotermalne toplinske pumpe sa zatvorenim krugom* (engl. Ground - Coupled Heat Pumps, kratica GCHPs). Ovdje se pod pojmom zatvoreni krug misli na sve one dizalice topline koje indirektno, pomoću odgovarajućih izmjenjivača topline smještenih u tlu, iskorištavaju toplinu tla.
Geotermalne toplinske pumpe sa otvorenim krugom koriste toplinu podzemnih tj. geotermalnih voda koja se nalazi u bunarima ili bušotinama u tlu. Geotermalna voda kojoj se oduzima toplina, utiskuje se natrag u slojeve zemlje ili ispušta u vodotoke ili kanalizacijske sustave.Zajednički naziv za dizalice topline koje eksploatiraju toplinu pohranjenu u samom tlu ili u podzemnim vodama jest *geotermalne toplinske pumpe.(*engl. Ground-Source Heat Pumps,kratica GSHPs)

Geotermalne toplinske pumpe sa zatvorenim krugom koriste toplinsku energiju pohranjenu u tlu i isporučuju je grijanim prostorima zgrade u većini slučajeva pomoću niskotemperaturnih sustava grijanja u dijelu godine kada postoji potreba za grijanjem. U režimu rada u kojemu je potrebno hladiti prostore zgrade, najčešće ljeti, toplinske pumpe jednostavnim prekretanjem radnog procesa tj. promjenom smjera odvijanja procesa oduzimaju toplinu zraku u hlađenim prostorima i predaju je tlu. Iako se geotermalne toplinske pumpe u prvom redu koriste za grijanje i hlađenje, one se također mogu upotrijebiti i za pripremu potrošne tople vode. Ovakav oblik primjene geotermalnih toplinskih pumpi sa zatvorenim krugom za potrebe grijanja, hlađenja i pripreme potrošne tople vode u stambenim i poslovnim objektima naziva se komforna primjena.

Kao i konvencionalni termotehnički sustavi grijanja i hlađenja, i dizalice topline s tlom zahtijevaju pogonsku energiju da bi mogli zimi tlu oduzeti odnosno ljeti predati toplinu. Obično je ta pogonska energija električna energija, a kao što smo već rekli veličina koja pokazuje koliko se toplinskog toka za potrebe grijanja izraženog u kilovatima može dobiti utroškom jednog kilovata električne snage je koeficijent grijanja ε_{gr}.
Ovdje možemo spomenuti pravilo koje vrijedi za sve dizalice topline pa tako i za dizalice topline s tlom kao toplinskim izvorom, a prema kojemu je pravilu koeficijent grijanja toliko veći koliko je manja temperaturna razlika između temperature toplinskog izvora i temperature ogrjevnog medija koji predaje toplinu grijanom prostoru. Iz tog razloga najveće vrijednosti koeficijenata grijanja mogu se postići primjenom dizalica topline kao izvora ogrjevnog učinka u niskotemperaturnim sustavima grijanja.

Prosječne vrijednosti godišnjeg koeficijenata grijanja koje danas postižu geotermalne toplinske pumpe sa zatvorenim krugom i koje se ponajviše koriste za grijanje i pripremu potrošne tople vode iznose oko 3. Postoje i izvedbe ovih dizalica topline koje mogu postići vrijednosti godišnjeg koeficijenta grijanja oko 4, a koje su izrađene od komponenata koje predstavljaju posljednja dostignuća na polju ove tehnologije te je njihov rad upravljan vrlo modernim upravljačkim komponentama. Kad je u pitanju rashladni učinak geotermalnih toplinskih pumpi on se kreće između 3.5 i 35 kW za jedan takav uređaj, što je i više nego dovoljno za potrebe obiteljske kuće ili manje poslovne zgrade.

Budući da dizalice topline sa tlom kao toplinskim spremnikom proizvode više toplinske energije nego što je njihova potrošnja eleketrične energije to je prosječna energetska učinkovitost po sezoni grijanja i hlađenja koju one ostvaruju od 2 do 5 puta veća od konvencionalnih sustava grijanja i hlađenja.U usporedbi sa konvencionalnim izvedbama sustava grijanja i hlađenja, geotermalne toplinske pumpe sa zatvorenim krugom ostvaruju visoku razinu toplinske ugodnosti u prostorima kojima isporučuju toplinsku energiju, ostvaruju znatne energetske uštede i imaju niže pogonske troškove. Ako pak uspoređujemo dizalice topline s tlom sa drugim dizalicama topline onda treba reći da su one stabilnije u svome radu i da imaju manje troškove održavanja. Kako su geotermalne toplinske pumpe sa zatvorenim krugom u cijelosti smještene unutar zgrade odnosno jedan dio i u tlu, sustav je u potpunosti zaštićen od oštećenja uslijed vremenskih nepogoda, što se ne može reći primjerice za dizalice topline sa zrakom.

Ovdje treba još spomenuti da zbog postojanosti temperature tla ove dizalice topline nemaju nikakvih problema sa zamrzavanjem izmjenjivačke površine isparivača dizalice topline, a koji se nedostatak često pokazuje kod dizalica topline sa zrakom kako toplinskim izvorom.Vrlo važna prednost ove tehnologije je naravno i njezin vrlo malen utjecaj na zagađenje okoliša, pri čemu je njezin najvažniji doprinos očuvanju okoliša povezan sa smanjenjem emisije štetnih tvari i smanjenjem potrošnje fosilnih goriva. Geotermalne toplinske pumpe sa zatvorenim krugom se najviše primjenjuju u SAD-u i zemljama Europske Unije.

Slijedi opis izvedbe sustava grijanja i hlađenja sa dizalicama topline s tlom kao toplinskim spremnikom.

3.2.1 Izvedbe termotehničkih sustava sa dizalicom topline s tlom

Termotehnički sustavi grijanja i hlađenja sa dizalicama topline s tlom kao toplinskim izvorom sastavljeni su iz tri osnovna dijela (slika 10.): toplinske pumpe, sustava za izmjenu topline s tlom i sustava za distribuciju ogrjevnog i rashladnog učinka smještenog unutar građevine.

Prema načinu izvedbe termotehničkog sustava postoji nekoliko vrsta podjele dizalica topline s tlom kao toplinskim izvorom:

1. prema načinu izmjene topline između tla i radnog medija toplinske pumpe:

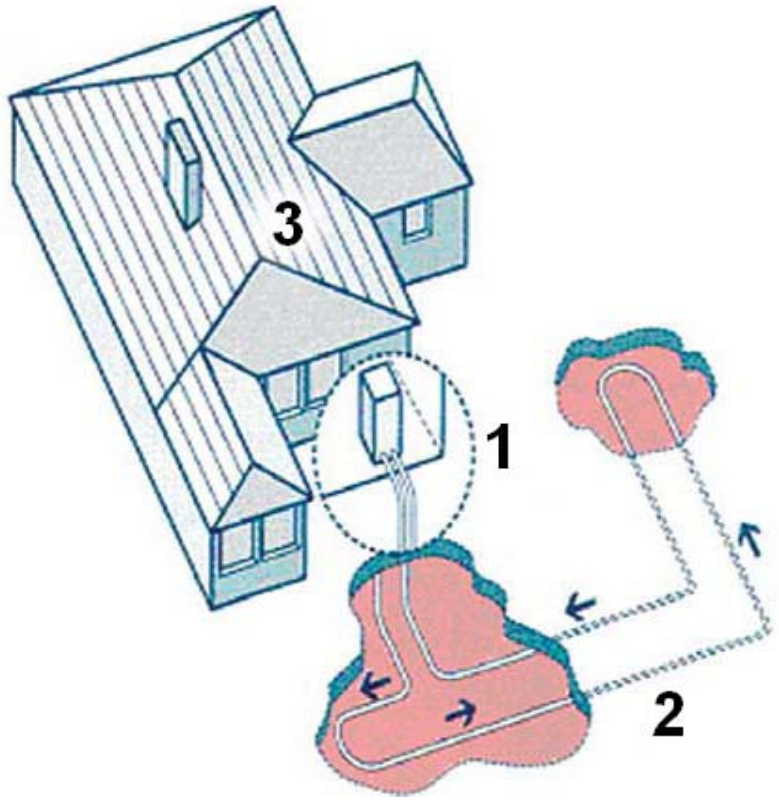
   - direktna izmjena topline
   - indirektna izmjena topline

2. prema načinu izvedbe sustava za izmjenu topline sa tlom:

   - vodoravno položen izmjenjivač topline
   - vertikalno postavljen izmjenjivač topline

3. prema prijenosniku ogrjevnog i rashladnog učinka:

   - sustavi sa vodom
   - sustavi sa zrakom



Slika 10. Prikaz osnovnih komponenata termotehničkih sustava sa dizalicom topline s tlom kao toplinskim izvorom [6]

1. Toplinska pumpa
2. Sustav izmjene topline sa tlom
3. Sustav za distribuciju toplinske energije unutar objekta

3.2.2 Direktna i indirektna izmjena topline s tlom

Toplinska energija tla se u najvećem broju slučajeva iskorištava posredno, pomoću sekundarnog radnog medija ili kako se još često zove, pomoćni prijenosnik energije. Obično je taj sekundarni medij voda ili glikolna mješavina (mješavina etilen-glikola ili propilen glikola i vode) koja ima nižu temperaturu zaleđivanja. Glikolna smjesa se rabi u situacijama kad postoji potencijalna opasnost od vrlo niskih temperatura tla te se želi izbjeći zaleđivanje sekundarnog medija u cijevima kolektora. Strujeći kroz cijevnu mrežu obično izrađenu od polimernog materijala, sekundarni medij preuzima toplinu tla i potom je predaje radnoj tvari u isparivaču dizalice topline.

Osim posrednog načina razmjene topline, toplinske pumpe mogu toplinu s tlom izmjenjivati direktno, pri čemu radni medij izravno struji kroz izmjenjivač topline izrađen od bakrenih cijevi smještenih u tlu. Specifično obilježje ovako izvedenog sustava dizalice topline s tlom je direktna ekspanzija radnog medija u cijevima izmjenjivača (engl. Direct-Expansion Ground-Coupled Heat Pump Systems,kratica DX GCHP). Zbog činjenice da ovakve izvedbe dizalice topline koriste samo jedan izmjenjivač topline za prijenos toplinske energije između tla i radnog medija, toplinske pumpe sa direktnom ekspanzijom mogu izmijeniti više topline sa tlom zimi što u konačnici rezultira i većim vrijednostima koeficijenata grijanja koje one postižu.

Ovome treba još pridodati da sustavi sa direktnom izmjenom topline s tlom zahtijevaju manje pogonske energije za svoj rad zbog toga što nije potrebna pumpa koja omogućuje cirkulaciju sekundarnog nosioca energije te je održavanje sustava u cjelini jednostavnije i jeftinije. Mane ovakve izvedbe sustava za izmjenu topline su moguće zagađenje tla Zemlje i podzemnih voda radnom tvari kao i veća količina radne tvari potrebna za rad same dizalice topline.

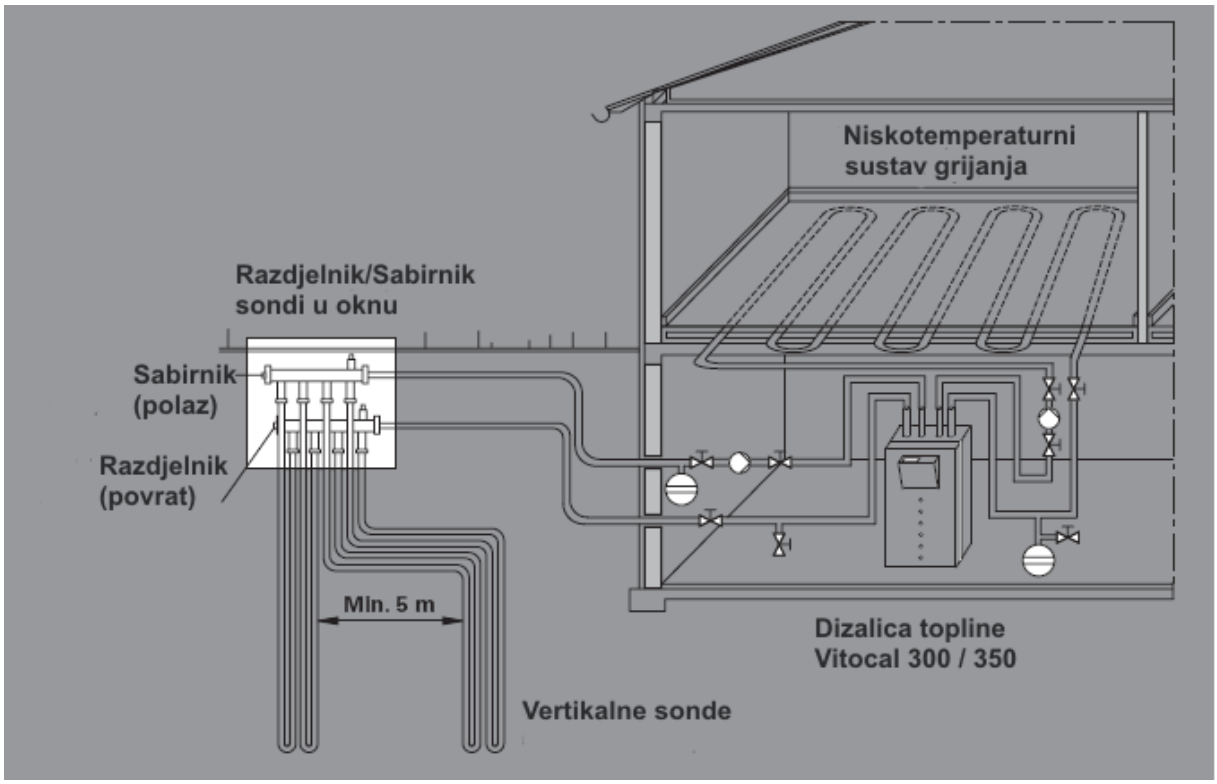
Pored ovih nedostataka, pri planiranju izvođenja sustava sa direktnom izmjenom topline treba voditi računa i o tehničkim poteškoćama koje se mogu pojaviti u radu sustava kao npr. pokretanje kompresora ili povrat ulja za podmazivanje kompresora. Ukoliko se takvim potencijalnim problemima ne posveti dovoljno pažnje te se oni ne riješe na adekvatan način, rad cijelog sustava može biti doveden u pitanje.

3.2.3 Vertikalno postavljen izmjenjivač topline sa tlom

Možda najprepoznatljivija klasifikacija geotermalnih toplinskih pumpi sa zatvorenim krugom jest ona prema načinu izvedbe izmjenjivača topline s tlom. Tu razlikujemo dvije varijante postavljanja sustava za izmjenu topline u tlu: vodoravno postavljanje i okomito postavljanje. Koji će od ova dva tehnička principa izvedbe sustava za izmjenu topline s tlom biti primjenjen najviše dakako ovisi o raspoloživoj površini tla na mjestu izgradnje samog sustava, zatim o strukturi tla i o troškovima iskopa zemlje.

Od važnog značaja za odabir izvedbe sustava je i poznavanje njihove učinkovitosti glede topline koju je pojedinim sustavom moguće oduzeti odnosno predati zemlji. Prema nekim izvorima za vertikalno izvedeni sustav izmjene topline vrijednosti toplinskog toka se kreću između 38-91 W/m (vata po metru duljine cijevi izmjenjivača topline) odnosno od 38-59 W/m za horizotalnu izvedbu [6].

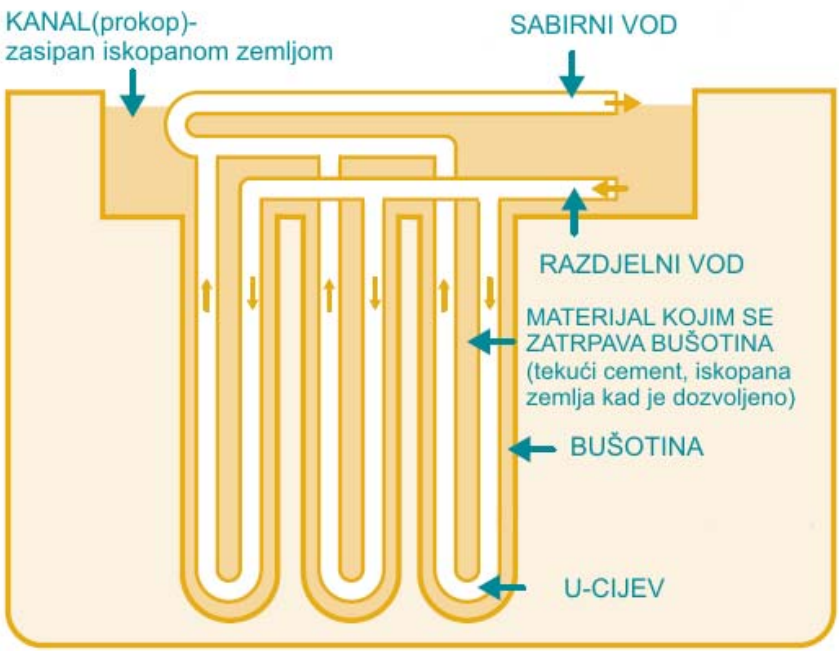
Vertikalna izvedba sustava za izmjenu topline s tlom sastoji se od vertikalno ukopanih dubinskih sondi (slika 11.). Prije postavljanja sondi u tlo potrebno je prvo izraditi bušotine u koje će sonde biti smještene. Bušotine promjera od 100 do 150 mm izvode se vertikalno u tlu pri čemu njihova dubina varira od 15 do 150 m. Dubina izrade bušotina ovisi u prvom redu o sastavu tla odnosno o njegovim toplinskim karakteristikama od kojih su najvažnije koeficijent toplinske vodljivosti i toplinski kapacitet tla te o veličini ogrjevnog i rashladnog učinka koji je sustavom potrebno ostvariti. Postoje i slučajevi u kojima izrada bušotina većih dubina nije moguća jer već struktura tla to ne dopušta pa se u tom slučaju izvodi nekoliko provrta manjih dubinskih dosega.



Slika 11. Dizalica topline s tlom kao toplinskim spremnikom s vertikalno ukopanim dubinskim sondama [8]

Sonde izrađene od polietilena visoke gustoće (HDPE) umeću se u bušotine te se potom sve zalijeva suspenzijom dobre toplinske vodljivosti kojom se pospješuje izmjena topline između tla i sondi, ali i sprječava prodor površinskih ili podzemnih voda u bušotinu kao i izljev vode iz jedne sonde u drugu. Promjer cijevi kreće se od 20 do 50 mm, a isporučivati se mogu u duljini do 350 m. Kako bi se izbjegla toplinska interferencija pojednih sondi razmak među njima ne bi smio biti manji od 5 m iako može ukoliko se sonde polažu u jednom redu, ukoliko je toplinsko opterećenje objekta veće zimi nego ljeti ili je pak prisutan vertikalni tok podzemnih voda u blizini sondi koji poništava ovu toplinsku interferenciju. Po završetku postavljanja sondi u bušotine, sonde se spajaju na geotermalne razdjelnike/sabirnike također izrađene od visokokvalitetnog polietilena.

Cijevi razdjelnika/sabirnika spojene su sa isparivačem geotermalne toplinske pumpe te njima struji sekundarni radni medij koji zimi donosi toplinu tla radnom mediju u isparivaču. Ljeti pak sekundarni radni medij tlu predaje toplinu kondenzacije. Prikaz osnovnih dijelova izvedbe sustava dizalice topline s vertikalnim sondama u tlu dan je na slici 12.



Slika 12. Osnovni dijelovi izvedbe sustava dizalica topline s vertkalnim sondama [6]

Dimenzioniranje sustava i izvedba instalacije geotermalnih sondi zahtjeva u prvom redu poznavanje svojstava tla, raspored slojeva tla, prisutnost podzemnih voda ili drugih vodenih slojeva u tlu te smjer strujanja voda.Uzme li se obzir da u tlu vladaju normalni hidrološki uvjeti može se pretpostaviti da je prosječna vrijednost toplinskog toka koji sonde oduzimaju tlu oko 50 W/m. Na osnovu ovog podatka može se zaključiti da je za namirivanje toplinskih potreba nekog objekta potrebno izraditi nekoliko bušotina u koje se onda ugrađuju sonde jednake dužine. Pritom treba voditi računa o udaljenosti pojedine sonde od razdjelnika/sabirnika kako bi se postigli ujednačeni padovi tlaka na sondama.

Prednosti dizalice topline s vertikalnim sondama u tlu naspram onih s horizontalnim kolektorom su:

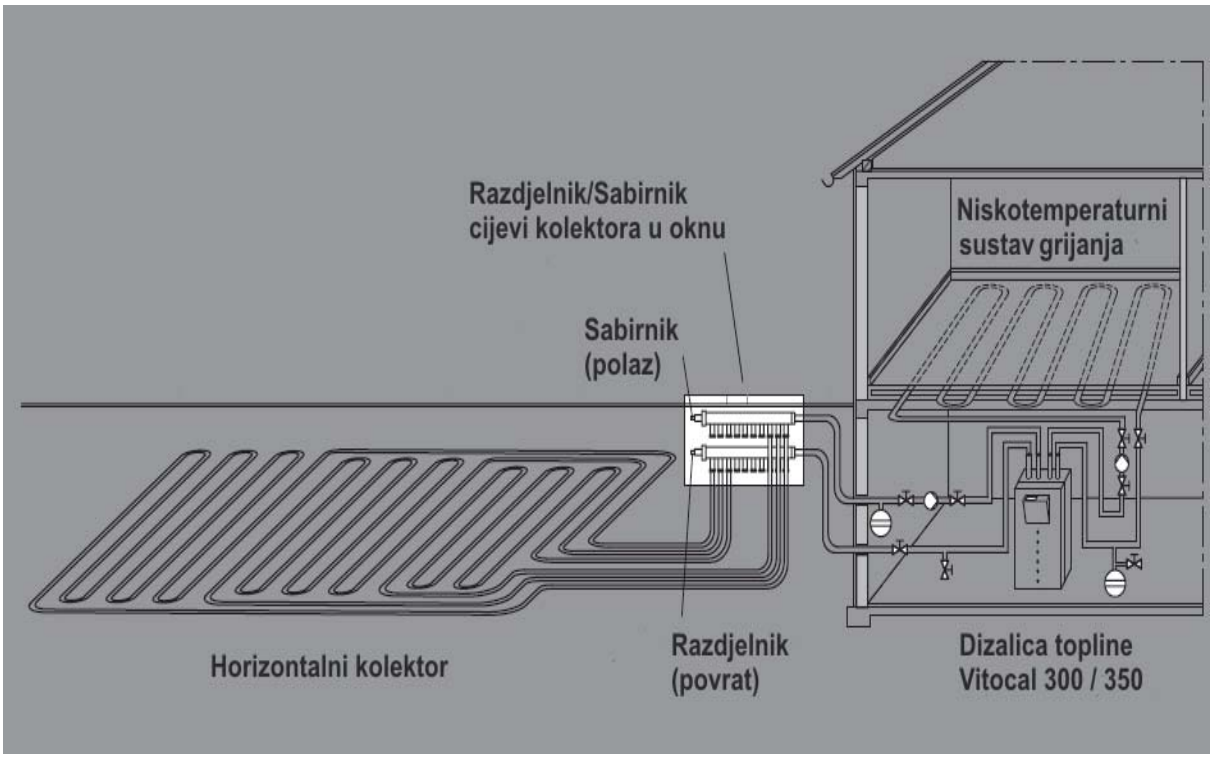
- zahtjevaju manje raspoložive površine tla za ugradnju izmjenjivača topline u tlu,
- sonde su čitavo vrijeme u dodiru s tlom čija temperatura tijekom godine malo varira i čija su toplinska svojstva postojana,
- izvedba sustava za izmjenu topline s tlom zahtijeva najmanju količinu cijevi te najmanji iznos energije koju troši pumpa za strujanje sekundarnog radnog medija postižu najveće vrijednosti koeficijenata grijanja.

Nedostaci dizalice topline s vertikalnim sondama u tlu naspram onih s horizontalnim kolektorom su:

- investicijski troškovi su najveći zbog visoke cijene izrade bušotina,
- mali broj tvrtki koje se bave izvođenjem instalacija dizalica topline s vertikalnim sondama.

3.3.3 Horizontalno postavljen izmjenjivač topline s tlom

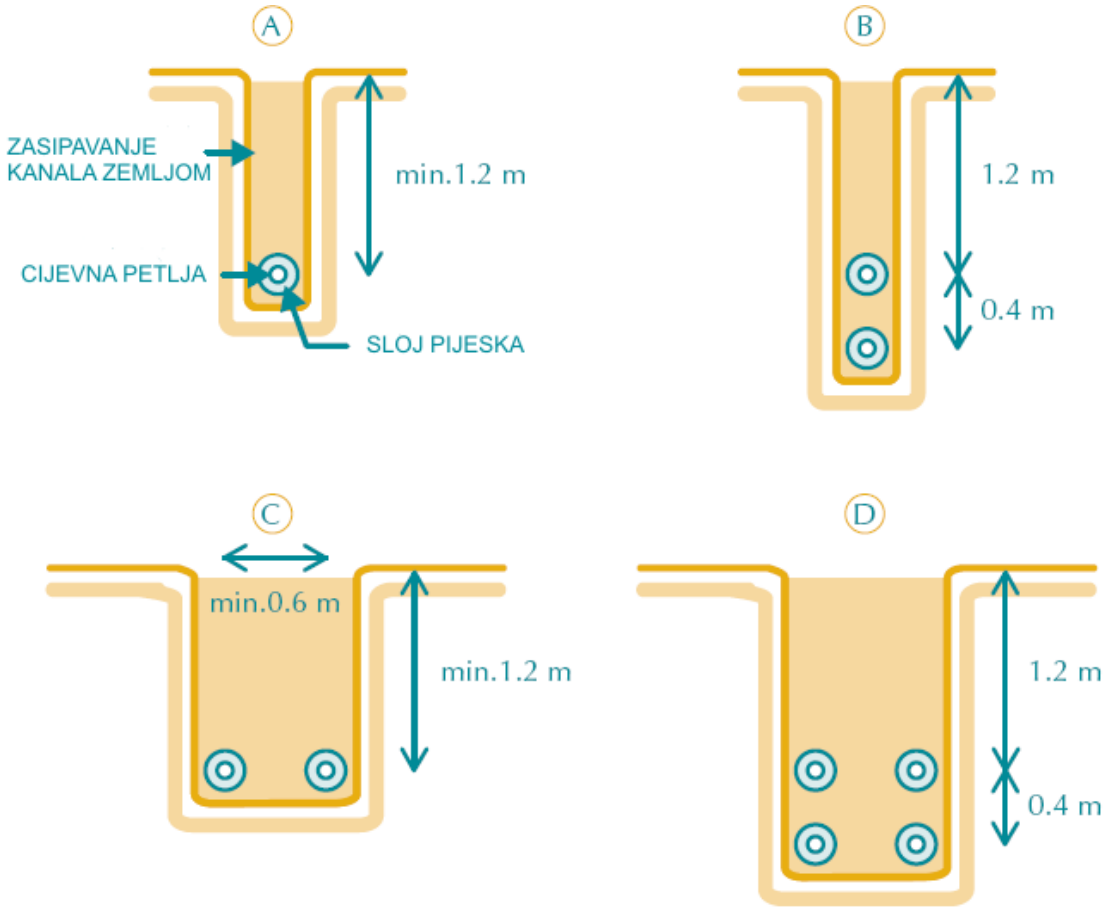
Dizalice topline s horizontalno postavljenim kolektorom u tlu zahtijevaju vrlo veliku raspoloživu površinu za izgradnju sustava za izmjenu topline s tlom te se one primjenjuju za objekte izgrađene na dovoljno velikim parcelama zemljišta (slika 13.).



Slika 13. Dizalice topline s horizontalnim kolektorom [8]

Kolektor za izmjenu topline s tlom je izmjenjivač topline koji može biti sastavljen od jedne ili više cijevi ili može biti izveden u obliku spirale. Cijevi od polietilena obično se polažu u prethodno iskopane plitke kanale i to na način da cijevi leže usporedo jedna pored druge ili se pak cijevi nalaze jedna iznad druge (slika 14.).

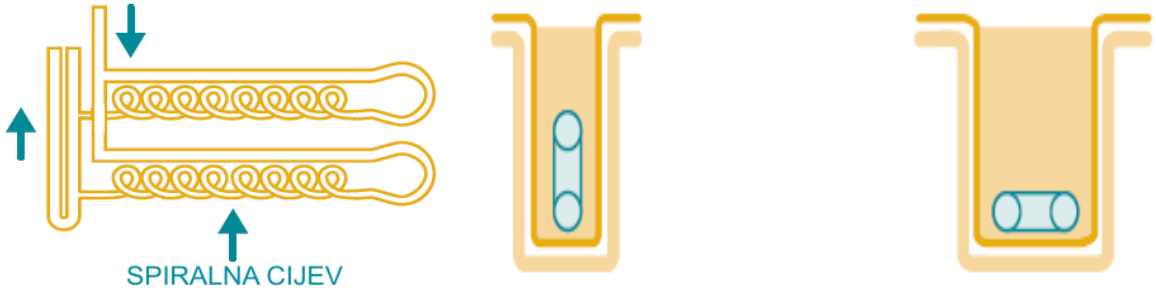
Kanali se kopaju u dubinama od 1.2m do 2.1m te su široki između 15 i 60 cm. Zbog opasnosti od toplinske interfernecije kanali su međusobno udaljeni minimalno 2m, a i same cijevi unutar kanala ne bi se smjele nalaziti preblizu pa se među njima nastoji održati razmak od minimalno 60 cm. Po polaganju cijevi se obično posipaju slojem pijeska debljine 15 cm, a potom se kanali zatrpavaju zemljom koja je prethodno bila iskopana radi njihove izrade.



Slika 14. Različite varijante polaganja cijevi horizontalnog kolektora [6]

A Jedna cijev
B Dvije cijevi postavljene usporedo jedna iznad druge
C Dvije cijevi postavljene usporedo jedan uz drugu
D Četiri cijevi poslagane (kombinacija B i C)

Horizontalni kolektor može biti izveden i od cijevi izrađenih od polietilena koje se u prethodno iskopane kanale horizontalno ili vetikalno polažu u obliku spirale (slika 15.).



Slika 15. Horizontalni kolektor u obliku spirale te načini polaganja cijevi u kanale [6]

Ovakva izvedba sustava za izmjenu topline s tlom gdje se cijevi u iskopane kanale polažu u obliku spirale, primjenjuje se u slučajevima kada je raspoloživa površina tla za postavljanje cijevi manjih dimenzija. Istraživanja su pokazala da se primjenom spiralnih kolektora mogu postići uštede od 20 do 30% u pogledu duljine kanala u koje se cijevi stavljaju u odnosu na horizontalne kolektore sa jednom cijevi.

Iznos toplinskog toka koji oduzimaju cijevi postavljene u tlo ovisi prije svega o toplinskim i fizikalnim karakteristikama tla te o količini dozračene sunčeve energije. Osim tih faktora na apsorpciju topline utječu i vlažnost tla, prisutstvo minerala te poroznost tla. Što je tlo vlažnije i bogatije mineralnim sastojcima te manje porozno to će iznosi apsorbirane topline biti veći. Vrijednosti izmjenjenog toplinskog toka izražene po kvadratnom metru površine tla prekrivene horizontalnim kolektorom prikazane su u tablici 6.

Tablica 6. Specifično odavanje topline tla u ovisnosti o vrsti tla [9]

Sastav tla	**Faktor postavljanja**	**Učinak oduzimanja**
Središnja vrijednost: kompaktno tlo s udjelom preostale vlage	25 m^2/kW	30 W/m^2
Suho, nekompaktno tlo	75 m^2/kW	10 W/m^2
Kompaktno tlo, vlažno	25 m^2/kW	20-30 W/ m^2
Vodom zasićeni pijesak, šljunak	20 m^2/kW	40 W/ m^2

Prednosti dizalice topline s horizontalnim kolektorom naspram onih s vertikalnim sondama su:

- troškovi provedbe instalacije horizontalnog kolektora su manji jer se koristi oprema koja nije skupa i koja je uvijek dostupna,
- mnoge stambene zgrade imaju dovoljno prostora za ugradnju ovakvog sustava za izmjenu topline s tlom,
- veći broj tvrtki koje pružaju usluge izvedbe instalacija dizalica topline sa horizontalnim kolektorom.

Nedostaci dizalice topline s horizontalnim kolektorom naspram onih s vertikalnim sondama su:

- veća osjetljivost pogonskih karakteristika sustava na vanjske klimatske promjene,
- potrebna je veća energija za pogon pumpe kojom se ostvaruje strujanje sekundarnog radnog medija,
- niže vrijednosti koeficijenata grijanja koje sustav postiže.

4. Dimenzioniranje izmjenjivača topline s tlom dizalica topline

4.1 Osnovne pretpostavke postupka dimenzioniranja sustava izmjene topline s tlom

Jedan od važnijih koraka u postupku projektiranja sustava grijanja i hlađenja sa dizalicom topline s tlom jest i određivanje veličine izmjenjivača topline s tlom. Izmjenjivači topline imaju važnu ulogu u prijenosu topline između tla i nosioca toplinske energije termotehničkog sustava.Ukoliko sustav za izmjenu topline nije ispravno dimenzioniran dizalica topline neće biti u stanju zadovoljiti zahtjeve zgrade za ogrjevnim i rashladnim učinkom te će se u tom slučaju sustav grijanja i hlađenja morati dopuniti s dodatnim izvorima odgovarajućeg toplinskog učinka. Troškovi ugradnje dodatnih toplinskih uređaja mogu biti vrlo visoki i ponajviše ovise o tome koliko je sustav izmjene topline s tlom poddimenzioniran. Još ako tome pridodamo visoke troškove pogona i održavanja takvog jednog kombiniranog termotehničkog sustava kao cjeline jasno je da se dosta pažnje mora posvetiti pravilnom dimenzioniranju izmjenjivača topline s tlom.

Dimenzioniranje sustava za izmjenu topline s tlom dizalica topline moguće je provesti ukoliko nam na raspolaganju stoje slijedeći podatci:

a) potrebe zgrade za ogrjevnim i rashladnim učinkom

b) temperaturni nivoi toplinskog izvora i toplinskog ponora tj. poznavanje temperature tla i temperatura ogrjevnog i rashladnog medija sustava grijanja i hlađenja

c) radna karakteristika uređaja dizalice topline

d) termofizikalne karakteristike materijala od kojeg su izrađene cijevi izmjenjivača topline

e) geološke i hidrološke karakteristika tla u koje će biti postavljeni izmjenjivači topline

Ad a)

Poznavanje toplinskog opterećenja prostorija zgrade kojima se isporučuje toplinska energija tijekom godine od presudne je važnosti za ispravno dimenzioniranje izmjenjivača topline s tlom. Kako toplinsko opterećenje prostorija zgrade nije isto u zimskom i ljetnom razdoblju godine tako su i njihove potrebe za ogrjevnim odnosno rashladnim učinkom različite. Sustav za izmjenu topline s tlom uvijek se dimenzionira tako da dizalica topline može zadovoljiti one toplinske zahtjeve zgrade koji su uvjetovani najvećim toplinskim gubitcima odnosno najvećim toplinskim opterećenjem. Razlog tomu je nastojanje da se potrebe za toplinskom energijom namire samo pomoću jednog izvora ogrjevnog i rashladnog učinka tj. samo pomoću dizalice topline.

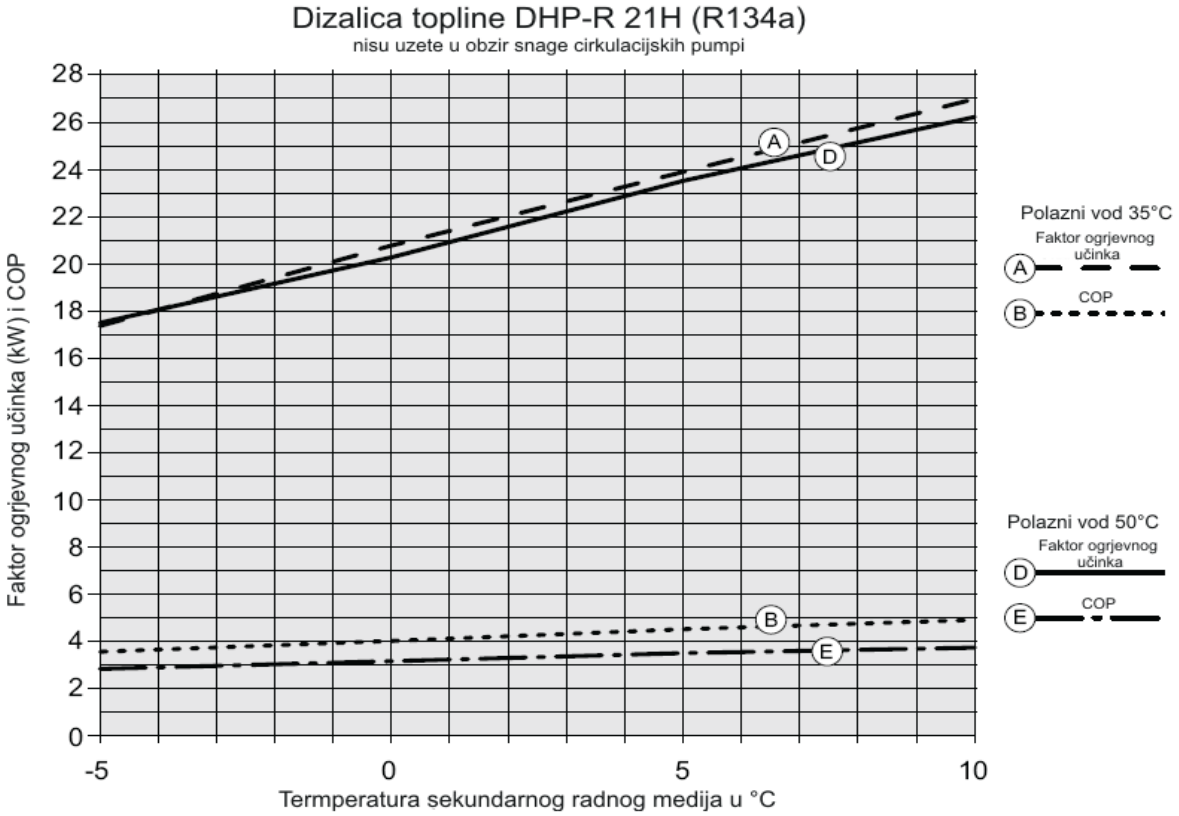
Ad b)

Temperaturna razlika između tla i sekundarnog radnog medija koji struji u cijevima izmjenjivača topline također utječe na njegove dimenzije.Pošto se temperatura tla može smatrati približno konstantnom tijekom godine to su najmanja i najveća ulazna temperatura sekundarnog radnog medija u uređaj dizalice topline oni parametri koji u velikoj mjeri

određuje dimenzije izmjenjivača. Najmanja i najveća temperatura sekundarnog radnog medija određene su radnim karakteristikama samog uređaja dizalice topline tj. u izravnoj su svezi sa najnižom dopuštenom temperaturom isparavanja i najvišom dopuštenom temperaturom kondenzacije radne tvari dizalice topline. Manja temperaturna razlika između tla i sekundarnog radnog medija u pravilu omogućuje postizanje viših vrijednosti koeficijenata grijanja, ali i veće dimenzije izmjenjivača topline. S druge strane, odabir niže ulazne temperature sekundarnog medija omogućuje smanjenje dimenzija izmjenjivača topline, ali to će onda rezultirati smanjenjem koeficijenta grijanja dizalice topline

Ad c)

Pravilno dimenzioniranje sustava za izmjenu topline s tlom zahtjeva poznavanje radnih karakteristika uređaja dizalice topline koje se obično mogu naći u katalogu proivođača uređaja ili ih se može za potrebe proračuna naknadno izračunati pomoću odgovarajućih izraza. Najvažnije radne karakteristike su ovinost koeficijenta grijanja i učinka grijanja o ulaznoj temperaturi sekundarnog radnog medija u uređaj dizalice topline uz različite konstantne temperature ogrjevnog medija sustava grijanja(slika 16.).



Slika 16. Primjer radnih karakteristika uređaja dizalice topline [10]

Ad d)

Najznačajnije termofizikalno svojstvo materijala od kojeg su izrađene cijevi izmjenjivča topline jest koeficijent toplinske vodljivosti odnosno specifični toplinski otpor cijevi. Manji toplinski otpor i znači bolje provođenje topline kroz stijenku cijevi što će u konačnici rezultirati manjim dimenzijama sustava za izmjenju topline. Ovi podaci mogu se obično

pronaći u katalogu proizvođača cijevi ili u literaturi koja je posvećena projektiranju termotehničkih sustava sa dizalicama topline.

Ad e)

Ne manje važan utjecaj na ispravno određivanje veličine izmjenjivača topline imaju i toplinska svojstva tla koja proizlaze iz njegovih geoloških i hidroloških karakteristika. Najbolji način određivanja toplinskih svojstava tla je provođenje odgovarajućih geotehničkih istraživanja. Na osnovu rezultata tih istraživanja moguće je ponajprije sa većom pouzdanošću odrediti temperaturno polje tla, ali i koeficijent toplinske vodljivosti tla, specifični toplinski kapacitet tla i toplinsku difuzivnost tla.

Proračunski postupci razvijeni za potrebe pravilnog određivanja veličine sustava za izmjenu topline s tlom obično se mogu podijeliti u dvije kategorije:

- proračun izmjenjivača topline s tlom uz zanemarenje promjene temperaturnog polja tla uslijed dugogodišnje eksploatacije toplinske energije pohranjene u tlu (eng. short-term influence),

- proračun izmjenjivača topline s tlom pri čemu se uzimaju u obzir varijacije temperaturnog polja tla tijekom dugogodišnjeg pogona dizalica topline (eng. long-term influence).

Zbog postojanja toplinske neravnoteže koja se stvara tijekom duljeg niza godina kao posljedica značajne razlike između topline koja se oduzima tlu u sezoni grijanja i topline koja se predaje tlu u sezoni hlađenja, temperaturno polje tla podložno je promjenama. U situacijama kada u blizini sustava za izmjenu topline s tlom postoji kretanje podzemnih voda promjene temperatura tla mogu se zanemariti.

4.1.1 Dimenzioniranje vertikalno postavljenog sustava izmjene topline s tlom

Dimenzioniranje sustava za izmjenu topline s tlom geotermalnih pumpi sa zatvorenim krugom zapravo se svodi na određivanje potrebne duljine cijevi kojima struji sekundarni radni medij tj. pomoćni prijenosnik energije kao što je objašnjeno u prethodnom poglavlju. Ako govorimo o dizalicama topline s vertikalnim sondama onda je provođenjem proračunskog postupka potrebno iznaći duljinu sondi odnosno iz tog podatka odrediti broj vertikalnih bušotina koje će se izraditi u tlu. Proračunski postupak određivanja potrebne duljine vertikalnih sondi koje se koriste za potrebe dobave toplinske energije obiteljskim kućama ili manji poslovnim zgradama je jednostavan budući da takve zgrade nemaju velike zahtijeve za ogrjevnim i rashladnim učinkom. Proračun se može provesti pomoću proračunskih tablica koje se nalaze u većini kataloga proizvođača uređaja dizalica topline, temeljem iskustvenih vrijednosti ili primjenom odgovarajućih smjernica koje izdaju ustanove nadležne za projektiranje i izvođenje sustava sa dizalicama topline. U praksi se vrlo često potrebna duljina sondi u ovim slučajevima određuje pomoću vrijednosti specifičnog toplinskog opterećenja tj. podatka o toplinskom toku koji izmjenjuju sekundarni radni medij i tlo na jednom metru duljine sonde. U tablici 7. navedene su neke vrijednosti ove veličine i uvjeti pri kojima se te vrijednosti mogu smatrati točnima.

Određivanje potrebne duljine sondi dizalica topline koje isporučuju toplinsku energiju zgradama većih dimenzija, a ujedno i većih zahtijeva za ogrjevnim i rashladnim učinkom,

mora biti argumentirano odgovarajućim proračunskim postupkom. Razlog tome je velik broj sondi koje se moraju postaviti u tlu i bilo kakve pogreške kod dimenzinoranja takvih sustava izmjene topline mogu ozbiljno dovesti u pitanje funkcionalnost termotehničkog sustava zgrade u cjelini. Zbog složenosti provedbe proračunskog postupka razvijeni su odgovarajući računalni programi bazirani na numeričkim simulacijama kojima se postupak iznalaženja dimenzija sondi pojednostavnjuje.

Ispravnost podatka o dimenzijama sondi koje se mogu dobiti korištenjem računalnih programa ovisi najviše o pouzdanosti ulaznih podataka. Najvažniji ulazni parametri se odnose na toplinske karakteristike tla te se u ovakvim slučajevima obično provode detaljna geološka i hidrološka istraživanja tla. Ona su prije svega potrebna kako bi se izbjeglo poddimenzioniranje sustava izmjene topline s tlom. Za određivanja toplinskih karakteristika tla mogu se koristiti i posebni uređaji kojim se provodi toplinsko testiranje tla (Thermal Response Test). Testiranje se provodi pomoću probnih sondi čija je duljina približno jednaka onima koje se planiraju postaviti u tlo. Sonda dobavlja tlu konstantan toplinski tok po metru duljine sonde te se mjere promjene temperature ispitnog radnog medija. Na osnovu rezultata promjene temperature ispitnog radnog medija poslije je moguće odrediti toplinske karakteristike tla. Shematski izgled ovog uređaja dan je na slici 17.

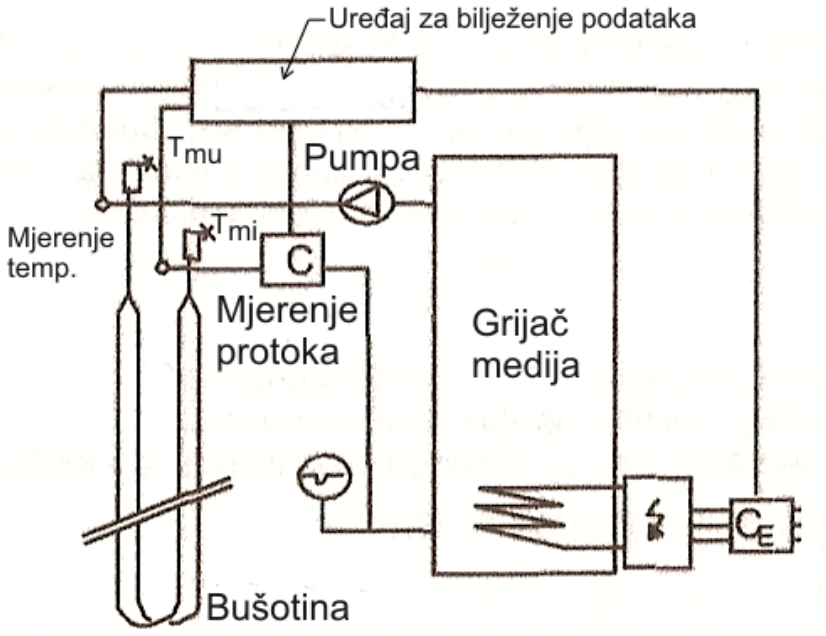
Tablica 7. Specifično toplinsko opterećenje sondi u W/m za različita pogonska vremena dizalice topline tijekom godine izražena u satima po godini (VDI 4640)

Vrsta tla	Specifično toplinsko opterećenje	
	za 1800 h/god	za 2400 h/god
Općenite smjernice za projektiranje		
Siromašno podzemlje (suhe sedimentne naslage) (λ<1.5 W/mK)	25 W/m	20 W/m
Obično stjenovito podzemlje s vodom zasićenim naslagama (λ <1.5 ÷ 3 W/mK)	60 W/m	50 W/m
Konsolidirano stjenovito podzemlje koje se odlikuje vrlo dobrom toplinskom vodljivošću (λ<3.0 W/mK)	84 W/m	70 W/m
Vrste stijena		
Šljunak, pijesak, bez prisutnosti vode	<25W/m	<20 W/m
Šljunak, pijesak, prisutnost vode	65-80 W/m	55-65 W/m
Šljunak, pijesak, prisutnost značajnih količina podzemnih tokova vode	80-100 W/m	80-100 W/m
Glina,ilovača, prisutnost vlage	35-50 W/m	30-40 W/m
Vapnenac	55-70 W/m	45-60 W/m
Šljunak	65-80 W/m	55-65 W/m
Granit	65-85 W/m	55-75 W/m
Basalt	40-65 W/m	35-55 W/m
Gnajs	70-85 W/m	60-70 W/m

Navedene vrijednosti mogu značajno varirati zbog različitih strukturnih karakteristika stijena kao što su napukline u stijenama, foliacija stijene, raspadanje stijene itd.
Navedene vrijednosti su točne uz slijedeće uvjete:

- toplina se oduzima tlu (toplina tla se koristi za grijanje i pripremu potrošne tople vode)
- duljina pojednične sonde sustava za izmjenu topline je između 40 i 100 m
- najmanje udaljenosti između dviju susjednih sondi moraju biti:
  najmanje 5 metara za duljine sondi između 40 i 50 m
  najmanje 6 metara za duljine sondi između 50 i 100 m

- sonde se sastoje od dviju U - cijevi ili koaksijalnih cijevi čiji promjer nije manji od 60mm
- vrijednosti se ne mogu smatrati točnim ukoliko se dimenzionira više pojedinačnih sustava izmjene topline na ograničenom prostoru



Slika 17. Shematski prikaz uređaja za provođenje toplinskog testiranja tla [11]

4.1.2 Dimenzioniranje horizontalno položenog sustava izmjene topline s tlom

Određivanje veličine sustava za izmjenu topline kod dizalica topline s horizontalnim kolektorom položenim u površinskim slojevima zemlje svodi se na pronalaženje ukupne duljine cijevi koje sačinjavaju horizontalni kolektor. Na osnovu tog podatka moguće je onda provesti analizu optimalnog načina polaganja cijevi u tlu, a s ciljem što efikasnijeg iskorištavanja raspoložive površine tla za ugradnju kolektora i smanjenja pogonske energije potrebne za strujanje sekundarnog radnog medija kroz cijevi kolektora.

Proračunska procedura za određivanje potrebne duljine cijevi kolektora za manje zgrade tj. manje sustave grijanja i hlađenja slična je kao i kod dizalica topline s vertikalnim sondama. Dimenzioniranje izmjenjivača može se provesti pomoću proračunskih tablica danih u katalogu proizvođača toplinskih pumpi (tablica 8.), pomoću iskustvenih vrijednosti ili korištenjem odgovarajućih smjernica. Za veće sustave grijanja i hlađenja kao što je već rečeno koriste se računalni programi radi složenosti postupka izrade proračuna ali i nekih dodatnih utjecajnih čimbenika koji se moraju uzeti u obzir radi preciznijeg dimenzioniranja izmjenjivačkog sustava.

Tablica 8. Specifično toplinsko opterećenje kolektora u W/m^2 za različita pogonska vremena dizalice topline tijekom godine izražena u satima po godini (VDI 4640)

Dizalica topline s horizontalnim kolektorom	Specifično toplinsko opterećenje (W/m^2)	
Vrsta tla	1.800 h/god	2.400 h/god
Nekoherentno tlo, suho	10	8
Koherento tlo, vlažno	20-30	16 -24
Šljunak/Pijesak, natopljeni vodom	40	32

U stručnoj literaturi posvećenoj tehnologiji primjene geotermalnih toplinski pumpi sa zatvorenim krugom moguće je pronaći različite proračunske metode za dimenzioniranje sustava za izmjenu topline s tlom. Pojedini proračunski modeli zanemaruju promjene temperature tla u vremenu tj. uzimaju stacionarne uvjete pri kojima se odvija izmjena topline između tla i radnog medija sustava za izmjenu topline. Složenije proračunske metode nastale su razmatranjem tranzijentnog fizikalnog modela izmjene topline tla i radnog medija izmjenjivača topline.

Slijedi prikaz primjera nekoliko proračunskih jednadžbi koje se mogu koristiti za dimenzioniranje izmjenjivača topline s tlom.

4.2 Proračun potrebne duljine vertikalnih sondi dizalica topline sa tlom kao toplinskim izvorom

4.2.1 Proračunski postupak prema Kavanaughu i Raffertyju

Proračun potrebne duljine vertikalnih sondi napravljen je prema jednadžbi Kavanaugha i Raffertyja (1997) [12]. Glavno obilježje ovog proračunskog modela jest vremenska promjena toplinskog toka koji izmjenjuju tlo i sekundarni radni medij izmjenjivača topline u tlu. To je učinjeno uvođenjem tzv.pulseva toplinskog toka koji korespondiraju sa godišnjim, mjesečnim i dnevnim vremenskim razdobljem.

Duljina sondi za potrebe pokrivanja ljetnog toplinskog opterećenja i zimskih toplinskih gubitaka zgrade može se izračunati prema slijedećim izrazima:

- za ljetno toplinsko opterećenje zgrade:

$$L_c = \frac{q_a \cdot R_{ga} + (q_{lc} - W_c) \cdot (R_p + PLF_m \cdot R_{gm} + R_{gd} \cdot F_{sc})}{t_g - \frac{t_{wi} + t_{wo}}{2} - t_p}$$

- za zimske toplinske gubitke zgrade:

$$L_h = \frac{q_a \cdot R_{ga} + (q_{lh} - W_h) \cdot (R_p + PLF_m \cdot R_{gm} + R_{gd} \cdot F_{sc})}{t_g - \frac{t_{wi} + t_{wo}}{2} - t_p}$$

gdje su :

F_{sc} = faktor toplinskih gubitaka zbog izmjene topline između polaznog i povratnog toka struje radnog medija izmjenjivača topline

L_c = potrebna duljina sondi za zadovoljenje potreba zgrade za rashladnim učinkom, m

L_h = potrebna duljina sondi za zadovoljenje potreba zgrade za ogrjevnim učinkom, m

PLF_m = faktor toplinskog opterećenja zgrade tijekom proračunskog mjeseca

q_a = rezultirajući godišnji toplinski tok prema zemlji (godišnji puls toplinskog toka), W

q_{lc} = ljetno toplinsko opterećenje zgrade, W

q_{lh} = zimski toplinski gubitci zgrade,W

R_{ga} = efektivni toplinski otpor tla (godišnji puls), (mK/W)

R_{gm} = efektivni toplinski otpor tla (mjesečni puls), (mK/W)

R_{gd} = efektivni toplinski otpor tla (dnevni puls), (mK/W)

R_p = toplinski otpor sonde, (mK/W)

t_g = neporemećena temperatura tla, °C

t_p = temperaturni dodatak uslijed postojanja toplinske interferencije između susjednih sondi,°C

t_{wi} = temperatura radnog medija na ulazu u uređaj dizalice topline, °C

t_{wo} = temperatura radnog medija na izlazu iz uređaja dizalice topline, °C

W_c = električna snaga za pogon kompresora potrebna za pokrivanje toplinskog opterećenja ljeti, °C

W_h = električna snaga za pogon kompresora potrebna za pokrivanje toplinskih gubitaka zimi, °C

Temperaturno polje tla se tijekom višegodišnjeg pogona dizalice topline može promijeniti ukoliko postoje značajne razlike između toplinskih tokova koji se zimi odvode od tla tj. Ljeti predaju tlu. Kako bi se uzeo u obzir utjecaj promjene temperaturnog polja tla tijekom duljeg vremenskog perioda pogona dizalice topline na dimenzije izmjenjivača topline u gornje jednadžbe su uvedena tri različita „pulsa toplinskog toka“: (1) q_a, (2) prosječni toplinski tok tijekom projektnog mjesečnog razdoblja i (3) maksimalni iznos toplinskog toka u trajanju od nekoliko sati tijekom projektnog dana.

Proračunski podatci:

Slijedeći proračunski podatci odnose se na obiteljsku kuću opisanu u tekstu ovog diplomskog zadatka:

q_{lh} = 17974 W -zimski projektni toplinski gubitci obiteljske kuće
q_{lc} = 18786 W -ljetno projektno toplinsko opterećenje obiteljske kuće
W_h = 4048 W -električna snaga potrebna za pogon sustava u režimu grijanja;COP=3,1- očitano iz kataloga uređaja dizalice topline prizvođača Danfoss;
W_c = 5350W -električna snaga potrebna za pogon sustava u režimu hlađenja;COP=4,5- očitano iz kataloga uređaja dizalice topline prizvođača Danfoss

Navedene vrijednosti za snage ne uzimaju u obzir snage potrebne za pogon cirkulacijskih crpki

t_g = 15 °C -neporemećena temperatura tla
t_{wih} = 4.6 °C -temperatura vode na ulazu u uređaj dizalice topline; režim rada dizalice topline - grijanje
t_{woh} = 1.6 °C -temperatura vode na izlazu iz uređaja dizalice topline; režim rada dizalice topline – grijanje

$$t_{wh} = \frac{t_{wih} + t_{woh}}{2};$$

t_{wh} = 3.1 °C -srednja temperatura sekundarnog radnog medija

t_{wic} = 35 °C -temperatura vode na ulazu u uređaj dizalice topline;režim rada dizalice topline - hlađenje
t_{woc} = 40 °C -temperatura vode na izlazu iz uređaja dizalice topline;režim rada dizalice topline – hlađenje

$$t_{wc} = \frac{t_{wic} + t_{woc}}{2};$$

t_{wc} = 37.5 °C - srednja temperatura sekundarnog radnog medija

t_p = 0 °C - pretpostavka je da je temperaturni dodatak zanemariv s obzirom da toplinsko opterećenje nije veliko i ne izaziva značajne promjene temperaturnog polja tla (detaljnije u 2007 ASHRAE HANDBOOK HVAC Applications (SI))

$R_p = 0.087 \frac{mK}{W}$ - toplinski otpor polietilenske U-cijevi; promjer cijevi 32mm; vrijednost toplinskog otpora cijevi može se očitati iz [13], Tablica 2

Efektvni toplinski otpori tla R_{ga}, R_{gm} i R_{gd} ovisni su o toplinskim svojstvima zemlje, promjeru sonde i odgovarajućem vremenskom intervalu (godišnji, mjesečni i dnevni) odnosno ovisni su o vrijednosti Fourierova broja:

$R_{ga}, R_{gm}, R_{gd} = f(\lambda_g, \alpha_g, d_p, \tau)$
tj.

$R_{ga}, R_{gm}, R_{gd} = f(G(Fo))$

Vrijednost Fourierovog broja se računa prema slijedećem izrazu:

$$Fo = \frac{4 \cdot \alpha_g \cdot \tau}{d_p^{\,2}}$$

gdje su:

$\boldsymbol{\alpha_g}$ = toplinska difuzivnost tla, m^2/dan
$\boldsymbol{\tau}$ = vremenski interval u kojem se javlja puls toplinskog toka, dan
$\boldsymbol{d_p}$ = unutarnji promjer cijevi sonde, m

$\lambda_g = 2.8 \ \frac{W}{mK}$ -koeficijent toplinske vodljivosti tla; tvrda glina sa 15% udjelom vode

$\alpha_g = 0.084 \ \frac{m^2}{dan}$ -toplinska difuzivnost tla

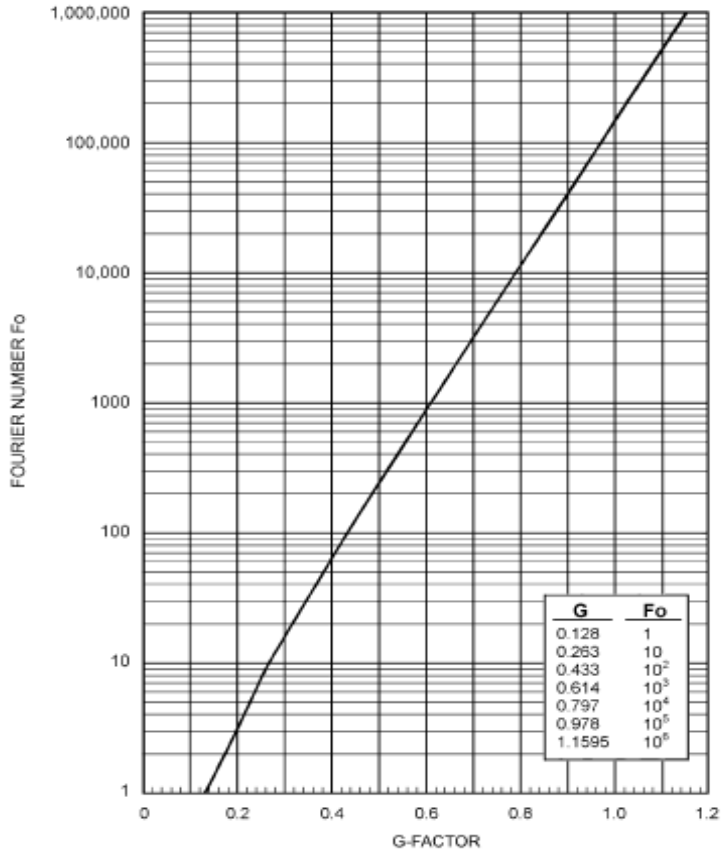
$\tau_1 = 3650$ dan -vremenski period trajanja pulsa toplinskog toka; godišnji puls – 10 godina
$\tau_2 = 3680$ dan -vremenski period trajanja pulsa toplinskog toka; mjesečni puls – 30 dana
$\tau_f = 3680.25$ dan -vremenski period trajanja pulsa toplinskog toka; dnevni puls – 6 sati
$d_p = 32$ mm - promjer U-cijevi

$$Fo_f = \frac{4 \cdot \alpha_g \cdot \tau_f}{d_p^{\,2}} \qquad Fo_f = 1.2076 \times 10^6$$

$$Fo_1 = \frac{4 \cdot \alpha_g \cdot (\tau_f - \tau_1)}{d_p^{\,2}} \qquad Fo_1 = 9925.7813$$

$$Fo_2 = \frac{4 \cdot \alpha_g \cdot (\tau_f - \tau_2)}{d_p^{\,2}} \qquad Fo_2 = 82.0313$$

G-faktor je pomoćna veličina koja se koristi za određivanje toplinskog otpora tla, a mogu se očitati iz dijagrama koji prikazuje ovisnost G-faktora o Fo (Slika 18.)



Slika 18. Ovisnost G-faktora o Fourierovom broju [12]

$G_f = 0.075 \ln (Fo_f) + 0.100 \qquad G_f = 1.1503$

$G_1 = 0.075 \ln (Fo_1) + 0.100 \qquad G_1 = 0.7902$

$G_2 = 0.075 \ln (Fo_2) + 0.100 \qquad G_2 = 0.4305$

$$R_{ga} = \frac{G_f - G_1}{\lambda_g} \quad R_{ga} = 0.1286 \ \frac{mK}{W}$$

$$R_{gm} = \frac{G_1 - G_2}{\lambda_g} \quad R_{gm} = 0.1285 \ \frac{mK}{W}$$

$$R_{gd} = \frac{G_2}{\lambda_g} \quad R_{gd} = 0.1538 \ \frac{mK}{W}$$

Rezultirajući toplinski tok prema tlu računa se prema slijedećem izrazu:

$$q_a = \frac{C_{fc} \cdot q_{1c} \cdot EFLH_c + C_{fh} \cdot q_{1h} \cdot EFLH_h}{8760 \cdot h}$$

gdje su C_{fc} i C_{fh} korekcijski faktori za dizalicu topline za režime rada grijanja/hlađenje i mogu se očitati iz [13], Tablica 1

$C_{fc} = 1.18$

$C_{fh} = 0.815$

$EFLH_c$ i $EFLH_h$ (eng. Equivalent Full-Load Hours) su vremena trajanja rada dizalica topline pod punim opterećenjem i mogu se izraziti za pojedinu zgradu određene namjene u ovsinosti o veličini stupanj-dan za grijanje i hlađenje tj. HDD (eng. Heating Degree Days) i CDD (eng. Cooling Degreee Days) ili se mogu izračunati na osnovu ukupnog toplinskog opterećenja zgrade tijekom godine izraženog u kilovat satima; pri tome treba uzeti u obzir unutarnje toplinske dobitke zgrade.

Za obiteljsku kuću mogu se primijeniti slijedeći izrazi [13]:

$EFLH_h = 0.36$ HDD - uz unutarnje toplinske dobitke u iznosu od 6,5 W/m^2
$EFLH_h = 1080$ hr uz HDD = 3000
$EFLH_c = 670 + 0.81$ CDD - uz unutarnje toplinske dobitke u iznosu od 27 W/m^2
$EFLH_c = 1030$ hr uz CDD = 495

Za ostale tipove zgrada mogu se primjeniti slijedeći izrazi:

Škola: okupiranost radnim danom od 8 do 15 h:

$EFLH_h$

Za unutarnje toplinske dobitke od 6.5 W/m^2:
$EFLH_h = 0,16 \times HDD_{18}$ za $HDD_{18} < 2,800$
ili
$EFLH_h = 500$ za $HDD_{18} > 2,800$

Za unutarnje toplinske dobitke od 27 W/m^2:
$EFLH_h = 0,11 \times HDD_{18}$ za $HDD_{18} < 5,500$

$EFLH_c$

Za unutarnje toplinske dobitke od 6.5 W/m^2:
$EFLH_c = 160 + 0,50 \times CDD_{18}$

Za unutarnje toplinske dobitke od 27 W/m^2:
$EFLH_c = 320 + 0,45 \times CDD_{18}$

Bolnice: konitnuirana okupiranost:

$EFLH_h$

Za unutarnje toplinske dobitke od 6.5 W/m^2:
$EFLH_h = 0,22 \times HDD_{18}$ za $HDD_{18} < 3,300$

ili
$EFLH_h = 720$ za $HDD_{18} > 3300$

Za unutarnje toplinske dobitke od 27 W/m^2:
$EFLH_h = 0{,}11 \times HDD_{18}$ za $HDD_{18} < 5{,}500$

$EFLH_c$

Za unutarnje toplinske dobitke od 6.5 W/m^2:
$EFLH_c = 690 + 1{,}35 \times CDD_{18}$

Za unutarnje toplinske dobitke od 27 W/m^2:
$EFLH_c = 1770 + 1{,}03 \times CDD_{18}$

$$q_a = \frac{C_{fc} \cdot q_{1c} \cdot EFLH_c + C_{fh} \cdot q_{lh} \cdot EFLH_h}{8760\ h} \quad q_a = 1436.2818\ W$$

$PLF_m = 0.45$ - faktor toplinskog opterećenja zgrade tijekom projektnog mjeseca; može se izračunati iz omjera vremena rada dizalice topline pod punim opterećenjem izraženog u satima tijekom projektnog mjeseca i ukupnog broja sati u projektnom mjesecu.

$F_{sc} = 1.05$ - očitano iz 2007 ASHRAE HANDBOOK HVAC Applications (SI) str. 32.15

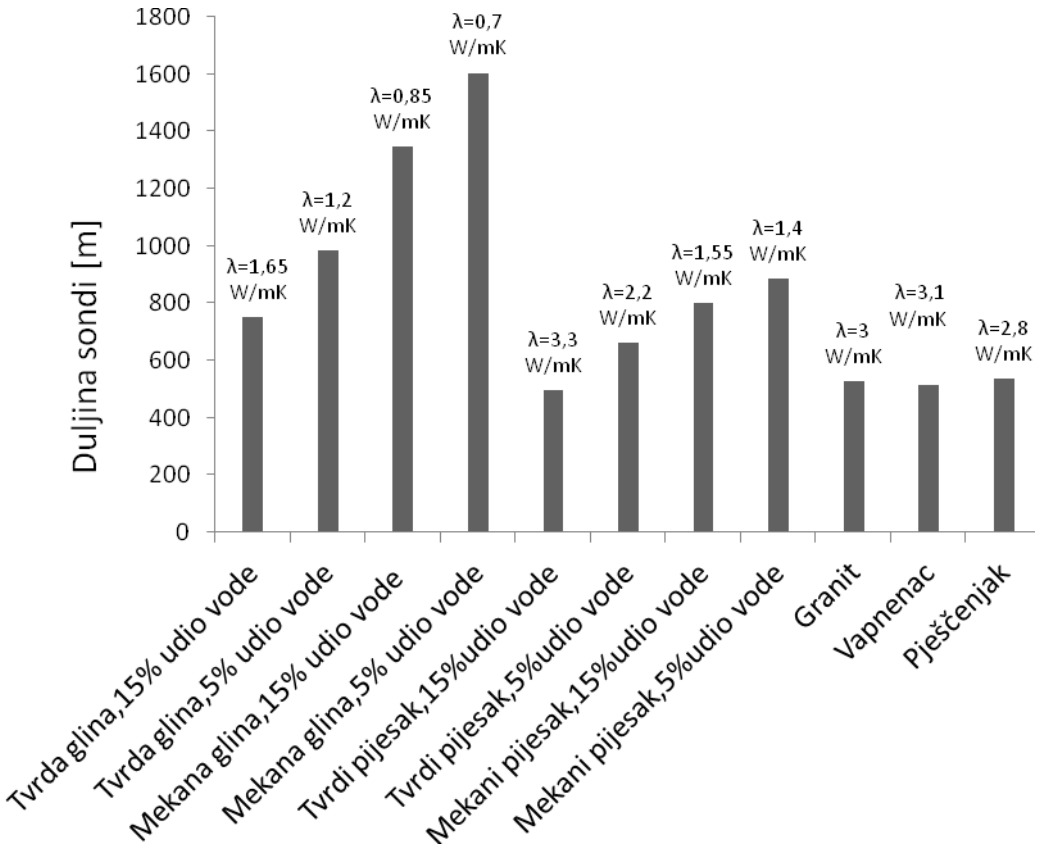
$$L_c = \frac{q_a \cdot R_{ga} + (q_{1c} - W_c) \cdot (R_p + PLF_m . R_{gm} + R_{gd} \cdot F_{sc})}{t_g - t_{wc}}$$

$L_c = 335.7407$ m

$$L_h = \frac{q_a \cdot R_{ga} + (q_{1h} - W_h) \cdot (R_p + PLF_m . R_{gm} + R_{gd} \cdot F_{sc})}{t_g - t_{wh}}$$

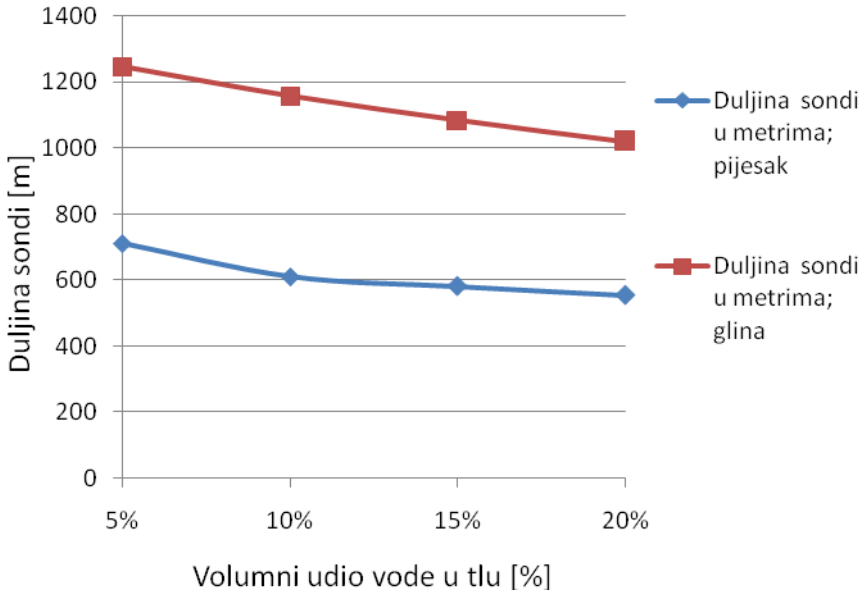
$L_h = 345.4748$ m

Dimenzije sustava za izmjenu topline s tlom ovise o nizu različitih utjecajnih veličina kao što to i prikazuje ovaj proračunski model. Na slijedećim dijagramima dan je prikaz ovisnosti vertikalne duljine sondi o nekim od tih veličina korištenjem proračunskih jednadžbi Kavanaugha i Raffertyja.



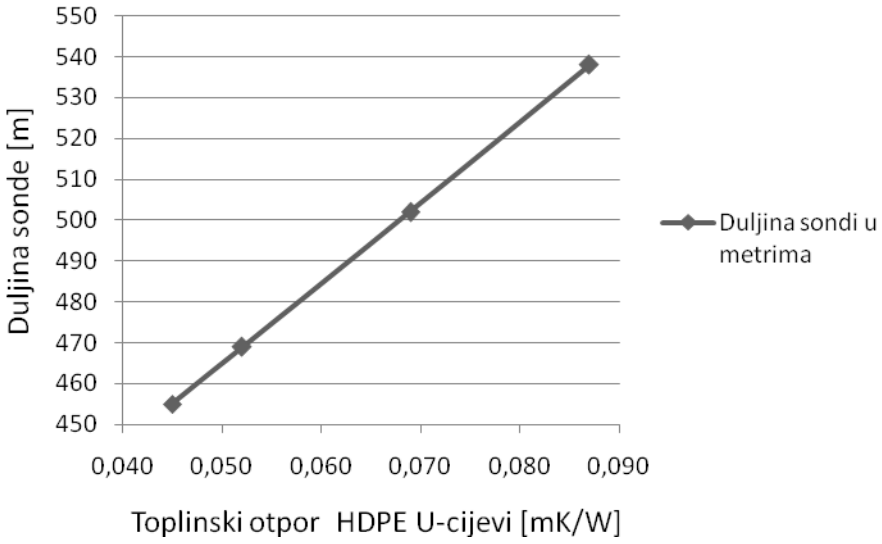
Slika 19. Utjecaj termofizikalnih karakteristika različitih tla na duljinu vertikalnih sondi

Na prikazanome dijagramu(slika 19.) jasno se može vidjeti da je toplinska vodljivost tla vrlo utjecajan čimbenik kad je u pitanju veličina sustava za izmjenu topline s tlom. Veće vrijednosti toplinske vodljivosti tla znače da će dimenzije izmjenjivača topline u tlu biti manje. Kompaktnija tj.manje porozna i vlažnija tla kao primjerice pješčana tla u pravilu bolje provode toplinu nego suha i nekohezivna tla. Stijene koje se nalaze u dubljim slojevima tla Zemlje odlikuju se također dobrim toplinskim svojstvima tj. dobrom vodljivosti topline. Osim toplinske vodljivosti, toplinska difuzivnost tla još je jedna termofizikalna veličina tla koja utječe na dimenzije izmjenjivača topline. Može se reći da tla koja se odlikuju dobrim provođenjem topline imaju i veće vrijednosti toplinske difuzivnosti pa dijagram na slici 19. može poslužiti i kao pokazatelj kako ova veličina utječe na duljinu vertikalnih sondi.



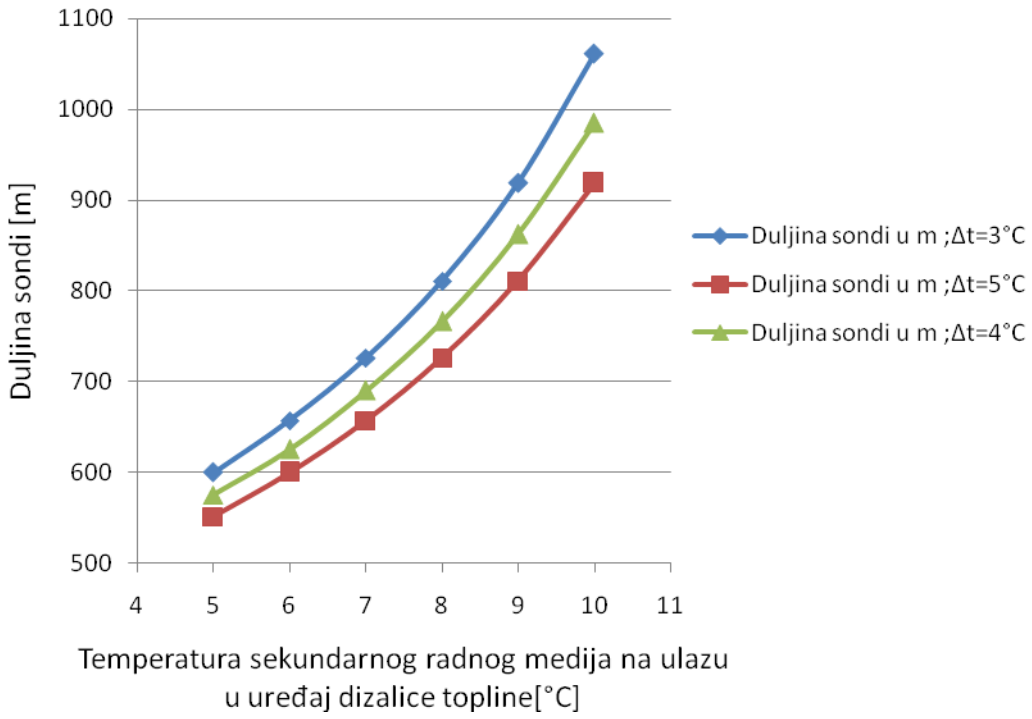
Slika 20. Utjecaj sadržaja vode u tlu na duljinu vertikalnih sondi

Dijagram na slici 20. prikazuje kako sadržaj vlage tla utječe na veličinu vertikalnih sondi. Veća vlažnost tla znači i manje dimenzije sustava za izmjenu topline sa tlom.



Slika 21. Utjecaj termofizikanih karakteristika materijala cijevi izmjenjivača topline na duljinu vertikalnih sondi

Niže vrijednosti toplinskog otpora cijevi znače bolje provođenje topline kroz stijenku cijevi što u konačnici ima za rezultat manje dimenzije izmjenjivača topline u tlu.



Slika 22. Utjecaj ulazne temperature sekundarnog radnog medija u uređaj dizalice topline na duljinu vertikalnih sondi

Ulazna temperatura radnog medija izmjenjivača topline u uređaj dizalice topline u velikoj mjeri utječe na duljinu vertikalnih sondi. Nižim ulaznim temperaturama radnog medija pripadaju manje duljine vertikalnh sondi, ali će to ujedno značiti i niži koeficijent grijanja dizalice topline. Viša ulazna temperatura utjecati će na povećanje koeficijenta grijanja, ali i na povećanje potrebne duljine vertikalnih sondi.

4.2.2 Proračunski postupak prema Ingersollu i Zobelu

Proračunski postupak koji su razvili Ingersoll i Zobel bazira se na pretpostavci da je toplinski tok koji izmjenjuju tlo i sekundarni radni medij izmjenjivača topline tijekom vremena konstantan.

Jednadžba Ingersolla i Zobela za proračun potrebne duljine vertikalnih sondi ima oblik [12]:

$$L_s = \frac{q \cdot R_g}{t_g - t_w}$$

gdje su:

L_s = potrebna duljina sondi za namiravanje potreba zgrade za rashladnim i ogrjevnim učinkom, m
q = rashladni/ogrjevni kapacitet dizalice topline, W
R_g = toplinski otpor tla, (mK/W)
t_g = neporemećena temperatura tla, °C
t_w = srednja temperatura sekundarnog radnog medija u cijevima sonde,°C

Proračunski podatci:

Slijedeći proračunski podatci odnose se na obiteljsku kuću opisanu u tekstu ovog diplomskog zadatka:

$q_h = 17974$ W -zimski projektni toplinski gubitci zgrade
$q_c = 18786$ W -ljetno projektno toplinsko opterećenje zgrade
$R_g = 0.282 \ \frac{mK}{W}$ -toplinski otpor tla
$t_g = 288.15$ K -neporemećena temperatura tla

$t_{wih} = 4.6$ °C -temperatura radnog medija na ulazu u uređaj dizalice topline; režim rada dizalice topline - grijanje
$t_{woh} = 1$ °C -temperatura radnog medija na izlazu iz uređaja dizalice topline; režim rada dizalice topline - grijanje
$t_{wic} = 35$ °C -temperatura vode na ulazu u uređaj dizalice topline; režim rada dizalice topline - hlađenje
$t_{woc} = 40$ °C -temperatura vode na izlazu iz uređaja dizalice topline; režim rada dizalice topline - hlađenje

$$t_{wh} = \frac{t_{wih} + t_{woh}}{2};$$

$t_{wh} = 3.1$ °C - srednja temperatura sekundarnog radnog medija

$$L_{sh} = \frac{(q_h - W_h) \cdot R_g}{t_g - t_{wh}} \qquad L_{sh} = 314.1706 \text{ m}$$

$$t_{wc} = \frac{t_{wic} + t_{woc}}{2};$$

$t_{wc} = 37.5$ °C - srednja temperatura sekundarnog radnog medija

$$L_{sc} = \frac{(q_c - W_h) \cdot R_g}{t_g - t_{wc}} \qquad L_{sc} = 302.5405 \text{ m}$$

4.2.3 Proračunski postupak prema Braudu

Proračunski postupak prema Braudu za pronalaženje potrebne duljine vertikalnih sondi temelji se na slijedećem izrazu [13]:

$$q = L_s \cdot k_f \cdot \Delta\vartheta$$

gdje su:

$\boldsymbol{L_s}$ = potrebna duljina sondi za namiravanje potreba zgrade za rashladnim i ogrjevnim učinkom, m
$\boldsymbol{q}$ = toplinsko opterećenje zgrade
$\boldsymbol{k_f}$ = koeficijent toplinske vodljivosti sekundarnog radnog medija, (W/mK)
$\Delta\vartheta$ = temperaturna razlika između tla i sekundarnog radnog medija (°C)

Proračunski podatci:

Slijedeći proračunski podatci odnose se na obiteljsku kuću opisanu u tekstu ovog diplomskog zadatka:

q_h = 17974 W -zimski projektni toplinski gubitci
q_c = 18786 W -ljetno projektno toplinsko opterećenje
$k_f = 4 \frac{W}{mK}$ -koeficijent toplinske vodljivosti sekundarnog radnog medija
t_g = 288.15K -neporemećena temperatura tla

t_{wih} = 4.6 °C -temperatura radnog medija na ulazu u uređaj dizalice topline; režim rada dizalice topline - grijanje
t_{woh} = 1 °C -temperatura radnog medija na izlazu iz uređaja dizalice topline; režim rada dizalice topline - grijanje
t_{wic} = 35 °C -temperatura vode na ulazu u uređaj dizalice topline; režim rada dizalice topline - hlađenje
t_{woc} = 40 °C -temperatura vode na izlazu iz uređaja dizalice topline; režim rada dizalice topline - hlađenje

$$L_{sh} = \frac{q_h - W_h}{k_f \cdot (t_g - t_{wh})} \qquad L_{sh} = 278.52 \text{ m}$$

$$L_{sc} = \frac{q_c - W_c}{k_f \cdot (t_g - t_{wc})} \qquad L_{sc} = 268.18 \text{ m}$$

4.2.4 Proračunski postupak prema IGSHPA

Proračun potrebne duljine vertikalnih sondi prema IGSHPA (International Ground Source Heat Pump Association) može se napraviti prema slijedećem izrazu [6]:

- za zimske toplinske gubitke zgrade

$$L_{sh} = q_h \cdot \left[\frac{\left(\frac{COP_h - 1}{COP_h} \right) \cdot \left(R_p + R_g \cdot F_h \right)}{T_{g,\min} - T_{ewt,\min}} \right]$$

- za ljetno toplinsko opterećenje zgrade:

$$L_{sc} = q_c \cdot \left[\frac{\left(\frac{COP_c + 1}{COP_c} \right) \cdot \left(R_p + R_g \cdot F_h \right)}{T_{ewt,\max} - T_{g,\max}} \right]$$

gdje su:

$\boldsymbol{COP_c}$ = koeficijent hlađenja dizalice topline ovisan o ljetnom projektnom toplinskom opterećenju zgrade
$\boldsymbol{COP_h}$ = koeficijent grijanja dizalice topline ovisan o zimskim projektnim toplinskim gubitcima zgrade
$\boldsymbol{q_c}$ = ljetno projektno toplinsko opterećenje zgrade, W
$\boldsymbol{q_h}$ = zimski projektni toplinski gubitci zgrade, W
$\boldsymbol{T_{g,\,min}}$ = najmanja neporemećena temperatura tla, °C
$\boldsymbol{T_{g,\,max}}$ = najviša neporemećena temperatura tla, °C
$\boldsymbol{T_{ewt,\,min}}$ = najmanja ulazna temperatura radnog medija u izmjenjivač topline, °C
$\boldsymbol{T_{ewt,\,max}}$ = najviša ulazna temperatura radnog medija u izmjenjivač topline, °C
$\boldsymbol{F_c}$ = faktor ljetnog toplinskog opterećanje zgrade
$\boldsymbol{F_h}$ = faktor zimskih toplinskih gubitaka zgrade
$\boldsymbol{R_p}$ = toplinski otpor sonde, (mK)/W
$\boldsymbol{R_g}$ = toplinski otpor tla, (mK)/W

Proračunski podatci:

Slijedeći proračunski podatci odnose se na obiteljsku kuću opisanu u tekstu ovog diplomskog zadatka:

q_h = 17974W - zimski projektni toplinski gubitci
q_c = 18786W - ljetno projektno toplinsko opterećenje

$T_{g,min} = T_{g,max} = t_g = 15°C$ -minimalna i maksimalna temperatura tla; na većim dubinama temperatura tla se uzima konstantnom
$T_{ewt,max} = t_{wic}$ - najveća ulazna temperatura sekundarnog radnog medija u uređaj dizalice topline
$T_{ewt,min} = t_{wih}$ - najmanja ulazna temperatura sekundarnog radnog medija u uređaj dizalice topline

$COP_h = 3.2$ - koeficijent grijanja
$COP_c = 3.8$ - koeficijent hlađenja

$R_g = 0.282 \ \frac{mK}{W}$ -toplinski otpor tla

$R_p = 0.087 \ \frac{mK}{W}$ - toplinski otpor polietilenske U-cijevi; promjer cijevi 32mm

$F_c = 0.44$ - faktor toplinskog opterećenje zgrade ljeti
$F_h = 0.62$ - faktor toplinskih gubitaka zgrade zimi

$$L_{sh} = q_h \cdot \left[\frac{\left(\frac{COP_h - 1}{COP_h} \right) \cdot \left(R_p + R_g \cdot F_h \right)}{T_{g,min} - T_{ewt,min}} \right] \qquad L_{sh} = 294.14 \text{ m}$$

$$L_{sc} = q_c \cdot \left[\frac{\left(\frac{COP_c + 1}{COP_c} \right) \cdot \left(R_p + R_g \cdot F_h \right)}{T_{ewt,max} - T_{gmax}} \right] \qquad L_{sc} = 250.4431 \text{ m}$$

Na kraju pregleda proračunskih postupaka namijenjenih za određivanje potrebne duljine vertikalnih sondi dan je dijagramski prikaz usporedbe rezultata dobivenih njihovim korištenjem(slika 23.).U svim proračunskim postupcima korišteni su isti proračunski podaci što je bio osnovni uvjet kojega je trebalo zadovoljiti kako bi se dobiveni rezultati mogli međusobno uspoređivati.

Slijedeći proračunski podatci zajednički su svim proračunskim postupcima za određivanje potrebne duljine vertikalnih sondi:

$q_h = 17974W$ - zimski projektni toplinski gubitci
$q_c = 18786W$ - ljetno projektno toplinsko opterećenje
$COP_h = 3.2$ - koeficijent grijanja
$COP_c = 3.8$ - koeficijent hlađenja
$R_g = 0.282 \ \frac{mK}{W}$ -toplinski otpor tla

$R_p = 0.087 \frac{mK}{W}$ - toplinski otpor polietilenske U-cijevi; promjer cijevi 32mm

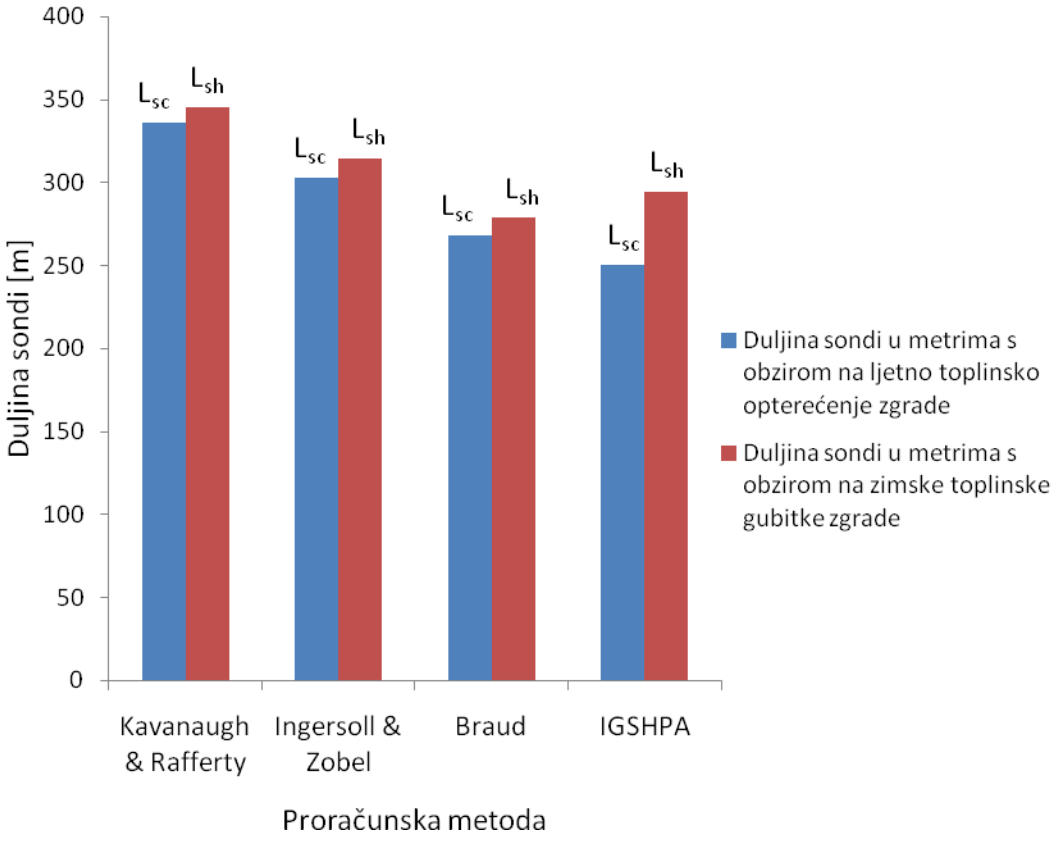
$t_{wih} = 4.6$ °C -temperatura radnog medija na ulazu u uređaj dizalice topline;
režim rada dizalice topline - grijanje

$t_{woh} = 1$ °C -temperatura radnog medija na izlazu iz uređaja dizalice topline;
režim rada dizalice topline - grijanje

$t_{wic} = 35$ °C -temperatura vode na ulazu u uređaj dizalice topline;
režim rada dizalice topline - hlađenje

$t_{woc} = 40$ °C -temperatura vode na izlazu iz uređaja dizalice topline;
režim rada dizalice topline - hlađenje

$t_g = 15$ °C -neporemećena temperatura tla



Slika 23. Usporedba dobivenih rezultata duljine vertikalnih sondi korištenjem različitih proračunskih postupaka

Na osnovu gornjeg dijagramskog prikaza(slika 23.) može se uočiti da je duljina vertikalnih sondi najveća u slučaju korištenja proračunskog postupka koji su razvili Kavanaugh i Rafferty. To je i bilo za očekivati s obzirom da ovaj proračunski model uzima u obzir promjenu temperaturnog polja tla u vremenu odnosno opadanje toplinskog toka koji izmjenjuju tlo i radni medij izmjenjivača topline tijekom višegodišnjeg pogona dizalice topline. Ostali proračunski modeli baziraju se na pretpostavci da je toplinski tok koji izmjenjuju tlo i radni medij konstantan pa su zbog toga i duljine sondi manje.

4.3 Proračun potrebne duljine cijevi horizontalnog kolektora dizalica topline s tlom kao toplinskim izvorom

Ukupna duljina cijevi horizontalnog kolektora može se izračunati prema slijedećem izrazu [7]:

$$L_{uk} = \frac{A_{zem,kol,uk}}{s} = \frac{Q_{DT,r}}{q_{tlo} \cdot s}$$

gdje su:

$\boldsymbol{L_{uk}}$ = ukupna duljina cijevi horizontalnog kolektora, m
$\boldsymbol{A_{zem,kol,uk}}$ = ukupna površina zemljišta potrebna za polaganje cijevi horizontalnog kolektora, m^2
$\boldsymbol{s}$ = razmak među cijevima horizontalnog kolektora, m
$\boldsymbol{Q_{DT,r}}$ = rashladni učinak dizalice topline (isparivača), W
$\boldsymbol{q_{tlo}}$ = specifično (površinsko) odavanje topline tla, W/m^2

Proračunski podatci:

Slijedeći proračunski podaci odnose se na obiteljsku kuću opisanu u tekstu ovog diplomskog zadatka:

q_h = 17974W - zimski projektni toplinski gubitci
q_c = 18786W - ljetno projektno toplinsko opterećenje
$q_{tlo} = 25 \frac{W}{mK}$ - specifično odavanje topline tla; vrijednost je očitana iz Tablice 8.
s_c = 0.7 m - razmak među cijevima horizontalnog kolektora

Ukupna potrebna duljina cijevi iznosi:

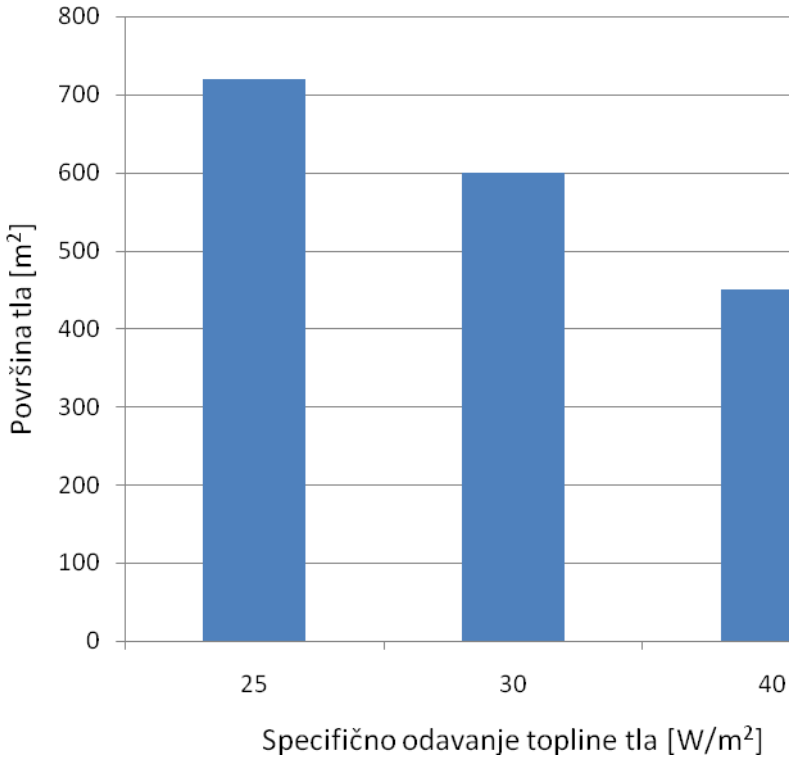
-za pokrivanje zimskih toplinskih gubitaka uz $q_{lh}=Q_{DT,r}$:

$$L_{ukh} = \frac{q_{lh}}{q_{tlo} \cdot s_c} \quad L_{ukh} = 1027.086\text{m}$$

$$A_{zem,kol,uk} = \frac{q_{lh}}{q_{tlo}} \quad A_{zem,kol,uk} = 718.96\text{m}^2$$

Nedostatak ovog proračunskog modela je što se on može primjeniti samo za izračun potrebne duljine cijevi horizontalnog kolektora s obzirom na zimske toplinske gubitke.

Dimenzije horizontalnog kolektora najviše ovise o termofizikalnim svojstvima tla odnonosno o specifičnom površinskom odavanju topline tla (slika 24.).



Slika 24. Ovisnost potrebne površine za polaganje cijevi horizontalnog kolektora o toplinskim svojstvima tla

5. Toplinska bilanca obiteljske kuće

5.1 Proračun toplinskih gubitaka i toplinskog opterećenja obiteljske kuće

Proračun toplinskih gubitaka zimi i toplinskog opterećenja ljeti obiteljske kuće napravljen je pomoću računalnog programa IntegraCAD 2005 Professional, a u skladu sa proračunom toplinskog opterećenja zgrade tj. toplinskih gubitaka prema EN 12831 i proračunom toplinskih opterećenja zgrade prema VDI 2078.

Za potrebe proračuna toplinskih gubitaka i dobitaka korišteni su koeficijenti prolaza topline za pojedine elemente građevinske konstrukcije.Vrijednosti korištenih koeficijenata prolaza topline iznose:

- vanjski zid k_{vz} = 0,30 W/m2K
- unutarnji zid k_{uz} = 1,30 W/m2K
- međukatna konstrukcija k_{mk} = 1,20 W/m2K
- krov k_k = 0,25 W/m2K
- pod prema zemlji k_p = 0,45 W/m2K
- prozori k_{pr} = 1,40 W/m2K
- vrata k_{vr} = 1,40 W/m2K

5.1.1 Proračun toplinskih gubitaka zgrade

Proračun toplinskih gubitaka zgrade napravljen je prema slijedećim projektnim uvjetima:

Zimski vanjski projektni uvjeti:

- II klimatska zona: vanjska projektna temperatura -15°C

Vrijednosti izračunatih toplinskih gubitaka pojedine prostorije zgrade navedeni su u tablici 9. gdje su :

Qn = transmisijski gubitci prostorije, W
PhiT = ventilacijski gubitci prostorije, W
Qost = ukupni toplinski gubitci prostorije,W

Tablica 9. Toplinski gubitci prostorija zgrade zimi

Naziv kata:	PODRUM			
Prostorija	Unutarnja temperatura [°C]	Qn [W]	PhiT [W]	Qost [W]
0.1 Stepenište	20	494	347	494
0.2 Prostorija	20	749	454	749
Ukupno: PODRUM		1243	801	1243
Naziv kata:	PRIZEMLJE			
Prostorija	Unutarnja temperatura [°C]	Qn [W]	PhiT [W]	Qost [W]
1.1 Hodnik	20	294	194	294
1.2 Garderoba	20	109	24	109
1.3 Hodnik	20	452	196	452
1.4 WC	20	163	117	163
1.5 Vešeraj	20	510	368	510
1.6 Kuhinja & Blagavaona	20	1943	1401	1943
1.7 Dnevni boravak	20	3338	2433	3338
1.8 Stepenište	20	597	401	597
1.9 Soba	20	1010	647	1010
Ukupno: PRIZEMLJE		8416	5781	8416
Naziv kata:	KAT			
Prostorija	Unutarnja temperatura [°C]	Qn [W]	PhiT [W]	Qost [W]
2.1 Stepenište	20	603	413	603
2.2 Soba	20	1199	847	1199
2.3 Hodnik	20	1247	904	1247
2.4 Soba	20	1091	775	1091
2.5 Kupaona	24	541	391	541
2.6 Soba	20	1056	755	1056
2.7 Soba	20	1356	940	1356
2.8 Garderoba	20	408	301	408
2.9 Kupaona	24	814	618	814
Ukupno: KAT		8315	5944	8315
Ukupno:		17974	12526	17974

5.1.2 Proračun toplinskog opterećenja zgrade

Proračun toplinskog opterećenja zgrade napravljen je prema slijedećim projektnim uvjetima:

Ljetni vanjski i unutarnji projektni uvjeti:
- vanjska projektna temperatura: 32ºC
- relativna vlažnost vanjskog zraka: 60 %
- unutarnja projektna temperatura: 26ºC
- relativna vlažnost u prostoriji: 45-55 %

Vrijednosti izračunatih toplinskih dobitaka pojedine prostorije zgrade navedeni su u tablici 10 gdje su:

Qsuho = ukupno osjetno (senzibilno) toplinsko opterećenje prostorije, W
Qvlazno = ukupno latentno toplinsko opterećenje prostorije, W
Qukupno = ukupno toplinsko opterećenje prostorije, W

Tablica 10. Toplinsko opterećenje prostorija zgrade ljeti

Naziv kata:	PODRUM			
Prostorija	Unutarnja temperatura [°C]	Qsuho [W]	Qvlazno [W]	Qukupno [W]
0.1 Stepenište	26	19	0	19
0.2 Prostorija	26	204	0	204
Ukupno: PODRUM		0	0	0
Naziv kata:	PRIZEMLJE			
Prostorija	Unutarnja temperatura [°C]	Qsuho [W]	Qvlazno [W]	Qukupno [W]
1.1 Hodnik	26	50	0	50
1.2 Garderoba	26	0	0	0
1.3 Hodnik	26	-3	0	-3
1.4 WC	26	198	0	198
1.5 Vešeraj	26	978	0	978
1.6 Kuhinja & Blagavaona	26	3403	0	3403
1.7 Dnevni boravak	26	4695	215	5180
1.8 Stepenište	26	1029	0	1029
1.9 Soba	26	990	83	1073
Ukupno: PRIZEMLJE		8416	5781	8416
Naziv kata:	KAT			
Prostorija	Unutarnja temperatura [°C]	Qsuho [W]	Qvlazno [W]	Qukupno [W]
2.1 Stepenište	26	127	0	127
2.2 Soba	26	908	41	949
2.3 Hodnik	26	1562	0	1562
2.4 Soba	26	1601	1	1602
2.5 Kupaona	24	0	0	0
2.6 Soba	26	1882	42	1924
2.7 Soba	26	441	42	483
2.8 Garderoba	26	172	0	172
2.9 Kupaona	24	107	0	170
Ukupno: KAT		8315	5944	8315
Ukupno:		17974	12526	17974

6. Tehnički opis instalacije termotehničkog sustava sa dizalicom topline s tlom

6.1 Izvedba instalacije termotehničkog sustava

Na osnovu zadatka diplomskog rada izrađeno je tehničko rješenje instalacije termotehničkog sustava grijanja i hlađenja pomoću dizalice topline s vertikalnim sondama u tlu. Grijanje je izrađeno kao niskotemperaturni sustav s maksimalnim temperaturnim režimom polaza/povrata tople vode 35/30ºC, a hlađenje s maksimalnim temperaturnim režimom polaza/povrata vode 16/18ºC. Dizalica topline s tlom je izvor ogrjevnog i rashladnog učinka. Kao ogrjevna/rashladna tijela koristi se podni sustav i zidni cijevni registri.

Ovisno o toplinskom opterećenju zgrade zimi i ljeti koje je pokriveno dizalicom topline s vertikalnim sondama te o potrebi zgrade za potrošnom toplom vodom, izabrana je dizalica topline, vertikalne sonde i spremnik potrošne tople vode kako slijedi:

- Dizalica topline Danfoss DHP-R 21, snage 20 kW kom. 1
- Spremnik potrošne tople vode Danfoss DWH 300, V=300 l kom. 1
- Vertikalne sonde - Haka Gerodur - dužine 110m kom. 3

Sustav za izmjenu topline s tlom izveden je pomoću vertikalnih sondi Haka Gerodur EWS 4x32mm. Sonde su izrađene iz visokokvalitetnog polietilena otpornog na kemikalije. Prije ugradnje sondi potrebno je napraviti tri bušotina promjera 152 mm u koje se postavljaju sonde i ispunjuju ekološki neutralnom injekcionom smjesom – Bentonitom. Ukupna dužina sondi iznosi 330m tj. dužina pojedinačne sonde iznosi 110 m.

Sonde se spajaju na razdjelnike/sabirnike vertikalnih sondi. Razdjelnik/sabirnik smješten je u za to odgovarajućem oknu, a njegova veličina ovisi o broju krugova. Razdjelnik i sabirnik izrađeni su od visokokvalitetnog polietilena sa integriranim odzrakama te opremljeni kuglastim slavinama i spojnicama na polazu svakog kruga. Razdjelnik/sabirnik se montiraju na najvišu točku instalacije radi odzračivanja sustava. Priključni vod razdjelnika do dizalice topline vrši se sa polietilenskim cijevima Ø PEd40. Prodor cijevi u građevinu potrebno je zabrtviti radi spriječavanja ulaza vode.Gotove sonde potrebno je prije i za vrijeme punjenja podvrgnuti ispitivanju tlaka.

Dizalica topline proizvođača Danfoss, tip DHP-R, zajedno sa spremnikom potrošne tople vode DWH 300, volumena 300 litara, koristi se kao izvor energije za grijanje i pripremu potrošne tople vode.

Toplinsku energiju pohranjenu u tlu, na niskoj temperaturi, uređaj pomoću električne energije i ljevokretnog kružnog procesa “podiže“ na višu temperaturu (do 60°C) i na taj način je pretvara u korisnu energiju koja se može iskoristiti za grijanje zgrade i pripremu potrošne tople vode.

Sustav se sastoji od:

- dizalice topline sa "scroll" kompresorom, pločastim isparivačem i kondenzatorom (freon/voda) i freonske armature; radna tvar je freon R407C,
- cirkulacijske crpke koja sa kondenzatora odvodi toplinu kondenzacije za grijanje i pripremu PTV-a; u režimu rada hlađenje odvodi toplinu sekundarnom radnom mediju sustava za izmjenu topline sa tlom,
- cirkulacijske crpke sustava za izmjenu topline s tlom,
- troputnog ventila za prioritet pripreme PTV-a,
- pomoćnog izvora ogrjevnog učinka u obliku plinskog kondenzacijskog kotla,
- tri vertikalne sonde dubine 110m,
- instalacije panelnog sustava grijanja (podno i zidno),
- cijevnog razvoda, ekspanzijskih posuda, sigurnosne i zaporne armature,
- automatike i regulacije rada toplinske crpke i termostata za regulaciju temperature u prostorijama.

Dizalica topline spaja se bakrenim cijevima na razdjelnike/sabirnike u podžbuknim ormarićima odgovarajuće veličine, ovisno o broju ogrjevnih/rashladnih krugova koji se spajaju na razdjelnik.

Sustav podnog grijanja/hlađenja izveden je Harreither Euroval cijevima 24/17, a sustav zidnog grijanja/hlađenja Harreither klima zid registrima. Krugovi podnog/zidnog grijanja i hlađenja spajaju se na odgovarajuće razdjelnike/sabirnike, a veličine krugova određene su ovisno o potrebi grijanja/hlađenja pojedine prostorije zgrade. Razvod se polaže na panele od sinterirane polistirenske pjene, koji služe za vođenje i učvršćivanje cijevi podnog grijanja. Isti se zatvara u estrih minimalne visine 65 mm, a zidni registri u žbuku debljine 30–35 mm. Za potrebe kompenziranja toplinskih dilatacija podnog grijanja, ugrađuju se dilatacijske trake od polietilenske pjene i rubne trake, a u estrih se dodaje aditiv koji povećava mehaničke sposobnosti istog. Kompenziranje toplinskih dilatacija zidnog grijanja/hlađenja rješava se putem armaturnih mrežica koje se postavljaju preko zidnih registara prilikom žbukanja zida. Ormarići razdjelnika/sabirnika za sustav grijanja/hlađenja opremljeni su kuglastim slavinama, prigušnicama na polazu svakog kruga grijanja, topmetrima i elektro-motornim glavama ventila.

Kao dodatna ogrjevna tijela u kupaonama, izabrani su električni dekorativni radijatori, tipa DELLA, proizvođač VOGEL&NOOT. Radijatori su odabrani na osnovu izračunatih gubitaka topline za svaku prostoriju.

6.2 Automatska regulacija termotehničkog sustava sa dizalicom topline s tlom

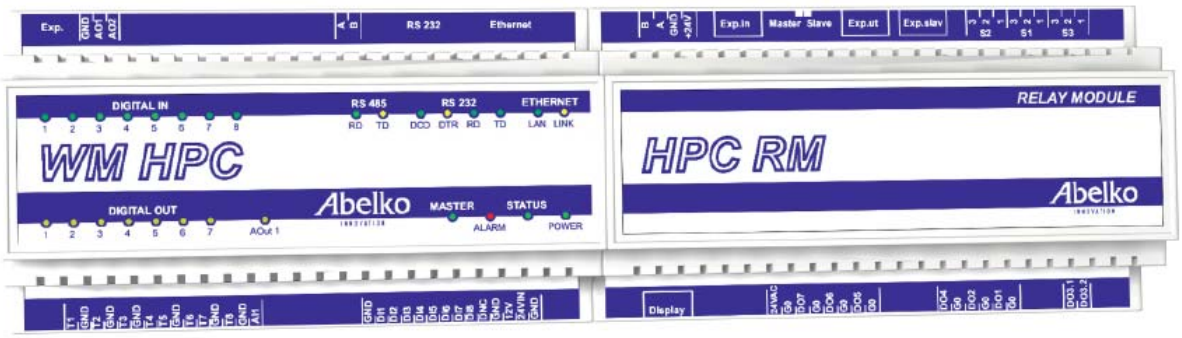
Upravljanje radom termotehničkog sustava grijanja i hlađenja zgrade ima iznimno važnu ulogu sa aspekta toplinske ugodnosti osoba koje borave u zgradi kao i aspekta energetske učinkovitosti pogona sustava grijanja i hlađenja. Primjenom odgovarajućih regulacijskih mjera potrebno je provoditi kontinuirano upravljanje veličinama koje utječu na toplinsku ugodnost. Najvažnije utjecajne veličine su temperatura i vlažnost zraka u kondicioniranim prostorima i jedan od prioriteta djelovanja regulacijskog sustava jest održavanje unaprijed postavljenih vrijednosti ovih veličina, a koje su podložne promjeni uslijed djelovanja vanjskih utjecaja. Pored toga sustav regulacije ima za zadatak prilagoditi ogrjevni i rashladni kapacitet termotehničkog postrojenja toplinskoj bilanci zgrade. Većina termotehničkih postrojenja

zgrade projektirana je na način da postrojenje može proizvesti dovoljno toplinske energije kako bi se pokrile toplinske potrebe zgrade u najnepovoljnijim tj. projektnim radnim uvjetima postrojenja. Tijekom godišnjeg pogona, sustav grijanja i hlađenja radit će pod punim opterećenjem tek kraći dio vremena. Preostali dio vremena postrojenje mora raditi u uvjetima kada su toplinske potrebe zgrade manje nego li je toplinski učinak ugrađenih toplinskih uređaja. Stoga je važan zadatak koji regulacijski sustav mora obavljati upravljanje radom ugrađenih toplinskih uređaja postrojenja pod djelomičnim opterećenjem kako bi se udovoljilo zahtjevima toplinske ugodnosti i unaprijedila energetska učinkovitost pogona postrojenja. Treba napomenuti da se u današnje vrijeme ovakve vrlo zahtjevne zadaće postavljene pred termotehničko postrojenje mogu ispunjavati samo uz pomoć visoko sofisticiranih sustava automatske regulacije.

Automatska regulacija sustava grijanja i hlađenja sa dizalicom topline s tlom kao toplinskim izvorom ima za zadatak osigurati pravodobnu isporuku toplinske energije pohranjenu u tlu u svrhu pokrivanja toplinskog opterećenja zgade na energetski najefikasniji način tj. uz što manju potrošnju pogonske energije. Pritom je od najveće važnosti održavanje vrijednosti temperature i ljeti vlažnosti zraka u prostorijama zgrade u uskim granicama radi postizanja toplinske ugodnosti osoba koje u tim prostorijama borave. U prilogu diplomskog rada dana je shema spajanja i automatske regulacije sustava sa dizalicom topline s vertikalnim sondama.

Značajke regulacijskog sustava grijanja i hlađenja sa dizalicom topline s tlom kao toplinskim izvorom biti će prikazane na primjeru automatskog regulacijskog sustava tvrtke Danfoss. Inače ovaj regulacijski sustav može se primijeniti kako za regulaciju rada sustava dizalica toplina s tlom tako i za regulaciju rada sustava dizalica toplina sa podzemnim vodama kao toplinskim izvorom.

Osnovu ovog regulacijskog sustava čini regulacijski modul WM HPC koji upravlja proizvodnjom ogrjevnog učinka dizalice topline, pri čemu jedan WM HPC modul može upravljati i radom postrojenja koje ima najviše osam dizalica topline (slika 25.)



Slika 25. Regulacijski modul WM HPC [16]

Pritom jedna od osam dizalica topline mora biti podešena kao glavna, a preostale dizalice topline podešavaju se kao pomoćne. Osim što WM HPC regulacijski modul upravlja pogonom pomoćnih dizalica topline, on ima mogućnost upravljanja radom dodatnih regulacijskih modula koji proširuju kapacitete regulacijskog sustava. Radi se o ekspanzijskim modulima za regulaciju pripreme potrošne tople vode, ekspanzijskom modulu za regulaciju rashladnog učinka postrojenja i ekspanzijskim modulima koji upravljaju radom miješajućih ventila dodatnih krugova grijanja i hlađenja.

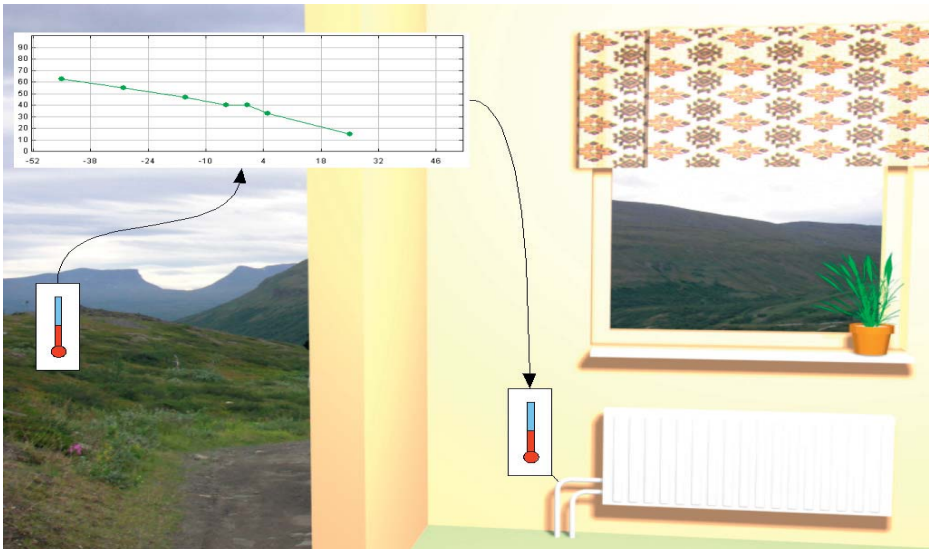
Regulacijski modul WM HPC ima radnu ploču smještenu na prednjoj strani uređaja dizalice topline na kojoj korisnik uređaja može vidjeti i promijentiti način regulacije rada postrojenja, zvučnu signalizaciju nepovoljnih stanja rada uređaja, postavljene vrijednosti temperatura itd. Pored toga WM HPC modul omogućuje daljinski nadzor rada dizalice topline.

6.2.1 Regulacija ogrjevnog učinka

Upravljanje ogrjevnim učinkom koji proizvodi dizalica topline pomoću WM HPC modula u svrhu održavanja konstantne temperature polaznog voda sustava grijanja omogućava postizanje i održavanje odgovarajuće temperature zraka u prostoriji koja je u skladu sa zahtijevima toplinske ugodnosti. Ukoliko uređaj dizalice topline nije u stanju namiriti toplinske potrebe zgrade, modul po potrebi uključuje i upravlja radom toplinskog uređaja koji proizvodi dodatni ogrjevni učinak.

U režimu grijanja sekundarni radni medij (etilen-glikol) pomoću cirkulacijske crpke *PI* donosi toplinu tla radnoj tvari u isparivaču dizalice topline. Pri tome su troputni regulacijski ventili *TVA* i *TVP* kojima upravlja regulacijski modul WMHPC otvoreni prema isparivaču dizalice topline. U uređaju dizalice topline odvija se ljevokretni kružni proces i radna tvar predaje toplinu kondenzacije ogrijevnom mediju sustava grijanja (voda).WM HPC modul upravlja radom cirkulacijskih crpki *PK* i *P1* te truoputnim ventilima *TV1* i *TV2* čime se omogućuje cirkulacija ogrijvenog medija kruga grijanja odnosno distribucija toplinske enrgije grijanim prostorijama zgrade.

Temperatura polaznog voda *Tpol* sustava grijanja održava se na određenoj vrijednosti u ovisnosti o temperaturi vanjskog zraka *Tv*. Na osnovu mjerenja vrijednosti vanjske temperature zraka, regulacijski modul WM HPC odabire vrijednost temperature polaznog voda prema krivulji ovisnosti promjene temperature polaznog voda o vanjskoj temperaturi. Krivulja prema kojoj se mijenja temperatura polaznog voda mora biti prilagođena specifičnim toplinskim potrebama zgrade.Odabrana vrijednost se postavlja kao vodeća vrijednost temperature polaznog voda *Tpol* (slika 26.).



Slika 26. Regulacija temperature polaznog voda sustava grijanja u ovisnosti o vanjskoj temperaturi zraka [16]

Vodeća vrijednost temperature polaznog voda koristi se potom za određivanja integralne vrijednosti (regulacijska veličina) koja upravlja radom dizalica topline na način da ih uključuje ili isključuje iz pogona. S obzirom da dizalica topline kada je izvan pogona ne proizvodi ogrjevni učinak odnosno kada je u pogonu proizvodi ogrjevni učinak veći od toplinskog opterećenja zgrade, zadatak regulacijskog sustava je održavanje vrijednosti temeprature polaznog voda što bliže vodećoj vrijednosti.

Integralna vrijednost se izračunava na način da se razlika između vrijednosti temperature polaznog voda i vodeće vrijednosti temperature polaznog voda tijekom svake minute pribraja vrijednosti integrala iz prethodne minute.Iz tog razloga integralna vrijednost se izražava u jedinicama °Cmin (čitaj stupanj minuta) i između ostalog prestavlja stanje energetske bilance rada postrojenja.

Kada je temperatura polaznog voda manja od postavljene temperature, vrijednost integrala će se s vremenom smanjivati i naposlijetku će postati negativna. Regulacijski modul WM HPC pokreće uređaj dizalice topline u onom trenutku kada integralna vrijednost postigne postavljenu negativnu vrijednost. Po uključivanju dizalice topline u pogon temperatura polaznog voda će rasti i približavati se postavljenoj temperaturi polaznog voda, vrijednost integrala će se približavati nuli i u jednom trenutku postati jednaka nuli. Potom će uslijediti isključivanje dizalice topline iz pogona. Kako se temperatura zgrade mijenja polako, ove razlike u temperaturama polaznog voda neće imati primjetan utjecaj na temperaturu zraka u prostorijama.

Regulaciju proizvodnje ogrjevnog učinka termotehničkog postrojenja koje u svom pogonu ima veći broj dizalica topline, regulacijski modul provodi na način da ovisno o vrijednosti integrala uključuje odnosno isključuje iz pogona jednu po jednu dizalicu topline.
U slučaju kada bi vrijednost integrala za vrijeme pogona dizalice topline poprimala sve manje negativne vrijednosti, regulacijski modul stavlja u pogon pomoćni toplinski uređaj koji proizvodi dodatni ogrjevni učinak (slika 27.). Postoji postavka regulacijskog sustava kojom se određuje vrijednost integrala pri kojoj će regulacijski sustav uključiti odnosno isključiti pomoćni toplinski uređaj. Pomoćni toplinski uređaj može biti kotao na kruto, kapljevito ili plinovito gorivo ili električni grijač.



Slika 27. Dijagramski prikaz načina regulacije rada dizalice topline u ovisnosti o vrijednosti integrala[16]

Start HP 1 = vrijednost integrala pri kojoj regulacijski sustav uključuje dizalicu topline u pogon
Start extra heater = vrijednost integrala pri kojoj regulacijski sustav uključuje u pogon pomoćni toplinski uređaj

Osim regulacije temperature polaznog voda kruga grijanja prema temperaturi vanjskog zraka, moguća je i dodatna regulacija tj. korekcija temperature polaznog voda koju se odvija pomoću osjetnika temperature *WRF04* postavljenog u prostoriji u kojoj se održava određena vrijednost temperature.

Nakon završetka sezone grijanja regulacijski modul uključuje opciju sezonskog prekida rada dizalice topline. Ova regulacijska postavka prekida pogon dizalice topline tijekom toplijeg vremenskog razdoblja, iako tijekom noći vanjske temperature mogu poprimiti vrijednosti pri kojima bi zgrada imala odgovarajuće toplinske potrebe. Međutim, ova se opcija uključuje samo ukoliko je vanjska temperatura tijekom dužeg vremenskog perioda bila dovoljno visoka. Pritom treba istaknuti da se duljina vremenskog perioda tijekom kojega se prati vanjska temperatura, a na osnovu čega se uključuje postavka sezonskog prekida rada, može podesiti prema potrebama korisnika.

Tijekom prekida rada uređaja dizalice topline, glavna cirkulacijska pumpa *P1* je izvan pogona. Kako bi se spriječio kvar cirkulacijske pumpe regulacijski modul svaki dan pokreće pumpe u trajanju od jedne minute.

6.2.2 Regulacija pripreme potrošne tople vode

WM HPC modul upravlja i pripremom potrošne tople vode prema određenim postavkama regulacijskog sustava dizalice topline na način da pomoću troputnog ventila *TV1* mijenja smjer cirkulacije ogrijevnog medija prema spremniku potrošne tople vode.

Svaka dizalica topline ima regulirane postavke na temelju kojih se odlučuje da li se dizalica topline može u određenom trenutku koristiti za pripremu potrošne tople vode, pri čemu treba istaknuti da priprema potrošne tople vode ima prioritet nad pripremom ogrjevnog medija sustava grijanja. Razlog tomu je činjenica da se temperatura zraka u prostorijama neće značajno promijeniti za vrijeme trajanja pripreme potrošne tople vode.

Pripremom potrošne tople vode upravlja osjetnik temperature potrošne tople vode *T1*.Ukoliko je ta temperatura iznad postavljene vrijednosti regulacijski modul WM HPC pomoću troputnog ventila *TV1* ponovno mijenja smjer cirkulacije ogrijevnog medija prema ogrijevnim tijelima kruga grijanja.

6.2.3 Regulacija rashladnog učinka

Hlađenjem zgrade, bilo da se radi o pasivnom ili aktivnom načinu rada dizalice topline tijekom ljetne sezone, upravlja regulacijski modul za hlađenje HPC CM (slika 28.).



Slika 28. Regulacijski modul koji upravlja radom dizalice topline u režimu hlađenja [16]

Rashladni učinak dizalice topline koristi se za hlađenje rashladnog medija sustava grijanja koji se pohranjuje u spremniku rashladne vode. Kao i kod rada dizalice topline u režimu grijanja i ovdje regulacijski modul HPC CM upravlja načinom na koji će se provoditi hlađenje rashladnog medija u spremniku.Rashladni medij je ista tvar kao i sekundarni radni medij izmjenjivača topline s tlom (etilen-glikol)

Na osnovu razlike temperature rashladnog medija i postavljene vrijednosti temperature rashladnog medija u spremniku izračunava se vrijednost integrala prema kojoj se najprije provodi pasivno hlađenje rashladnog medija.

Pasivno hlađenje rashladnog medija se provodi na način da kroz spremnik rashladnog medija struji direktno sekundarni radni medij izmjenjivača topline s tlom. To znači da se proces hlađenja ne mora vršiti uključivanjem dizalice topline u pogon, već se koristi samo cirkulacijska crpka *PI* potrebna za pokretanje sekundarnog radnog medija.Pri tome su truputni regulacijski ventil *TVP* i *TVA* kojim upravlja HPC CM otvorni prema spremniku rashladnog medija i prema izmjenjivaču topline u tlu.Osnovni preduvjet koji mora biti ispunjen kako bi se moglo vršiti pasivno hlađenje jest da temperatura sekundarnog radnog medija bude niža od temperature rashladnog medija u spremniku.

Ukoliko vrijednost integrala raste tijekom pasivnog hlađenja, regulacijski modul HPC CM uključuje dizalicu topline u pogon i započinje aktivno hlađenje. Pritom regulacijski modul prekida protok određene količine sekundarnog radnog medija kroz izmjenjivač topline s tlom pomoću troputnog regulacijskog ventila *TPA*. Preostala količina sekundarnog radnog medija pomoću cirkulacijske crpke *PI* cirkulira između isparivača dizalice topline i spremnika rashladnog medija kako bi se skratilo vrijeme potrebno za hlađenje rashladnog medija.

Ohlađeni rashladni medij pomoću cirkulacijske crpe *P2* struji kroz izmjenjivač topline *IZ1* i oduzima toplinu vodi kruga hlađenja.

Toplina kondenzacije radnog medija dizalice topline koju je potrebno odvoditi tijekom aktivnog hlađenja najprije se koristi za pripremu potrošne tople vode ukoliko za time postoji potreba.Regulacijski modul upravlja troputnim ventilom TV1 i ogrijevni medij usmjerava prema spremniku potrošne tole vode. U suprotnom se toplina kondenzacije predaje sekundarnom radnom mediju izmjenjivača topline u tlu pomoću dodatnog izmjenjivača *IZ2* i regulacijskog troputnog ventila *TV2*.

7. Analiza isplativosti primjene dizalica topline s tlom u termotehničkim sustavima

7.1 Polazne postavke analize

U ovom poglavlju biti će prikazana usporedba investicijskih i pogonskih troškova sustava grijanja obiteljske kuće opisane u tekstu diplomskog zadatka koji se zasniva na dizalici topline s vertikalnim sondama u tlu i horizontalnim kolektorom s jedne strane i konvencionalnim sustavima grijanja s kotlovima na kapljevito i plinovito fosilno gorivo s druge strane. Pritom je potrebno uzeti u obzir odgovarajuće pretpostavke na osnovu kojih je moguće napraviti pravilnu komparaciju sustava grijanja s različitim izvorima ogrjevnog učinka.

Ekonomska analiza investicijskih i pogonskih troškova sustava grijanja za potrebe ovog rada bazirana je na slijedećim pretpostavkama:

- sustav grijanja obiteljske kuće neovisan je o izvoru ogrjevnog učinka tj. pretpostavlja se da su svi toplinski uređaji prikazani u ovoj analizi u mogućnosti isporučiti ogrjevni medij na temperaturnim nivoima polaz/povrat 35/30°C,

- ogrjevni učinak dizalice topline i odabranih kotlova pri projektnim temperaturama polaza/povrata ogrjevnog medija sustava grijanja je isti,

- dizalica topline s vertikalnim sondama u tlu u stanju je sama isporučiti onu količinu toplinske energije kojom će se moći pokriti toplinsko opterećenje obiteljske kuće tijekom sezone grijanja.

Pretpostavka neovisnosti sustava grijanja o izvoru ogrjevnog učinka nam omogućuje da na jednostavan način odredimo investicijske i pogonske troškove termotehničkog sustava baziranog na različitim toplinskim uređajima. Sustav grijanja obiteljske kuće kao što je navedeno u prethodnom poglavlju izveden je kao niskotemperaturni, a sačinjavaju ga podni sustav i zidni cijevni registri sa temperaturom polaza/povrata ogrjevnog medija 35/30°C.

Također, pretpostavka da dizalica topline sama može podnijeti teret toplinskog opterećenja obiteljske kuće važna je iz razloga što se time pojednostavljuje izvedba samog termotehničkog sustava tj. nije potrebna ugradnja pomoćnog toplinskog uređaja za grijanje. Time se naravno olakšava izračunavanje troškova investicija i pogona sustava grijanja s dizalicama topline.

7.2 Investicijski i pogonski troškovi termotehničkih sustava sa dizalicama topline s tlom

Investicijski troškovi termotehničkih sustava sa dizalicom topline s tlom sastoje se od troškova uređaja dizalice topline, troškova sustava izmjene topline s tlom, troškova opreme i materijala potrebnog za izvedbu sustava distribucije toplinske energije. Ovome treba još pridodati i troškove instalacije ovih dijelova termotehničkog sustava (tablica 11.).

Od ukupnog iznosa 20 do 50 % investicijskih troškova otpada na izvedbu sustava za izmjenu topline s tlom. Izvedba sustava izmjene topline uključuje između ostalog i izradu bušotina za postavljanje vertiklanih sondi odnosno kopanje kanala za polaganje cijevi horizontalnog kolektora. Sama izrada bušotina i kopanje kanala investicijski gledano je skuplje negoli materijal i oprema potrebni za postavljanje sustava izmjene topline u tlu. U SAD-u cijena izrade bušotine iznosi od 35 do 50 eura po metru dubine bušotine, a u Europi oko 50 eura po metru dubine. Ove cijene ponajviše ovise o geološkim i hidrološkim karakteristikama tla u kojemu se izrađuju bušotine kao i o opremi za bušenje koja se pritom koristi.

Kad je u pitanju grijanje zgrade, pogonski troškovi termotehničkih sustava sa dizalicom topline s tlom manji su od takvih troškova konvencionalnih termotehničkih sustava. Ti troškovi ponajprije ovise o koeficijentu grijanja koji dizalica topline ostvaruje tijekom sezone grijanja. Nadalje, koliko će pogonski troškovi sustava sa dizalicom topline s tlom biti manji u odnosu na sustave grijanja koji koriste fosilno gorivo ovisi dakako i o cijeni samog fosilnog goriva. Više cijene primarnih energenata kao npr. nafte i plina uvelike doprinose kraćem vremenskom periodu povrata investicijskih troškova sustava sa dizalicom topline s tlom.

Tablica 11. Investicijski troškovi termotehničkog sustava dizalice topline s tlom [17]

Tip sustava prema izvoru topline	**10 kW**	**20kW**
Horizontalni kolektor	Izrada tehničkog rješenja sustava, iskop i povrat zemlje, cijevi, vanjski radovi na opremi, toplinska pumpa, spremnik sanitarne vode, puffer spremnik, armatura toplinske stanice, montažerski radovi u toplinskoj stanici, puštanje u pogon	
	17 000 €	**23 000 €**
Vertikalne sonde	Izrada tehničkog rješenja sustava, bušenje, postavljanje sondi, vanjski radovi na opremi, toplinska pumpa, spremnik sanitarne vode, puffer spremnik, armatura toplinske stanice, montažerski radovi u toplinskoj stanici, puštanje u pogon	
	21 000 €	**33 000 €**

Napomena: - cijena ne sadrži razvod i opremu sustava grijanja unutar objekta

7.3 Isplativost primjene dizalica topline s tlom za grijanje obiteljske kuće

Uzmemo li u obzir da se dizalice topline i kotlovi na plin i loživo ulje koriste u sustavima grijanja koji imaju isti cijevni razvod ogrjevnog medija i ista ogrjevna tijela jasno je da su investicijski troškovi instalacije istih (cijevnog razvoda i ogrjevnih tijela) jednaki za sve tri izvedbe sustava.

Zbog nepoznavanja točnih cijena prethodno navedenih troškova izvedbe sustava grijanja sa dizalicom topline s tlom, vrlo je teško napraviti preciznu analizu investicijskih troškova jednog takvog sustava te ćemo se stoga koristiti procjenom troškova pojedine investicije kako su oni navedeni u tablici 11.

Procjena isplativosti primjene dizalica topline s tlom za grijanje obiteljske kuće kao alternative kotlovima na plin i loživo ulje, napravljena je pomoću računalnog programa Excel.

Pri tome su korišteni slijedeći proračunski podatci:

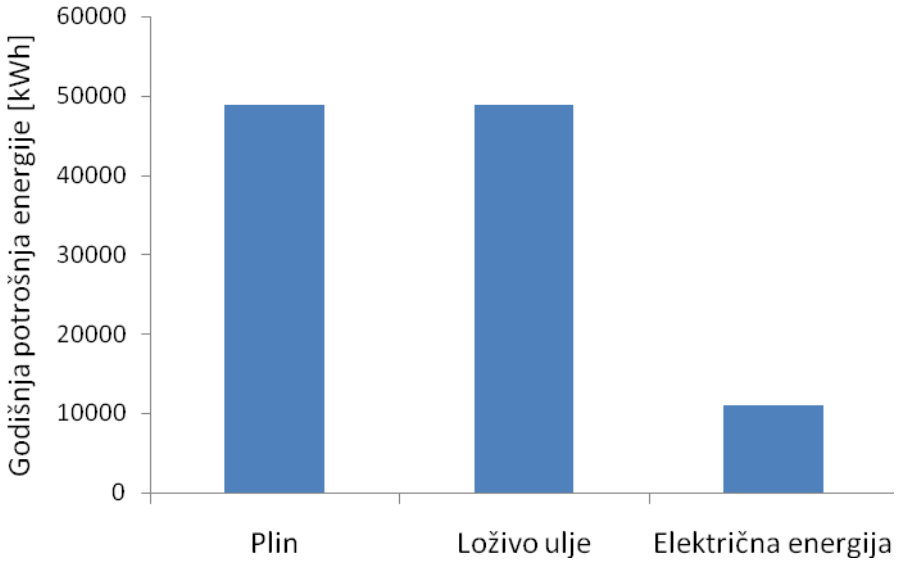
ogrjevni učinak dizalice topline za grijanje obiteljske kuće	18 kW
koeficijent grijanja dizalice topline s tlom tijekom sezone grijanja	3,5
godišnja potrošnja toplinske energije za grijanje obiteljske kuće	43000 kWh
cijena investicije dizalice topline sa horizontalnim kolektorom	23000 €
cijena investicije dizalice topline s vertikalnim sondama	33000 €
energetska vrijednost prirodnog plina	9,2606 kWh/m^3
cijena prirodnog plina	2,31 kn/m^3
energetska vrijednost ekstra lakog loživog ulja	10,3 kWh/l
cijena ekstra lakog loživog ulja	3,58 kn/l
stupanj korisnosti kotlova na prirodni plin i loživo ulje	0,9

Vremenski period tijekom kojega se promatra isplativost primjene dizalica topline s tlom za grijanje obiteljske kuće jedank je prosječnom vijeku trajanja uređaja dizalice topline. Može se uzeti da prosječni vijek trajanja dizalica topline iznosi 25 godina [18].

Rezultati analize isplativosti vrijede uz slijedeće uvjete:

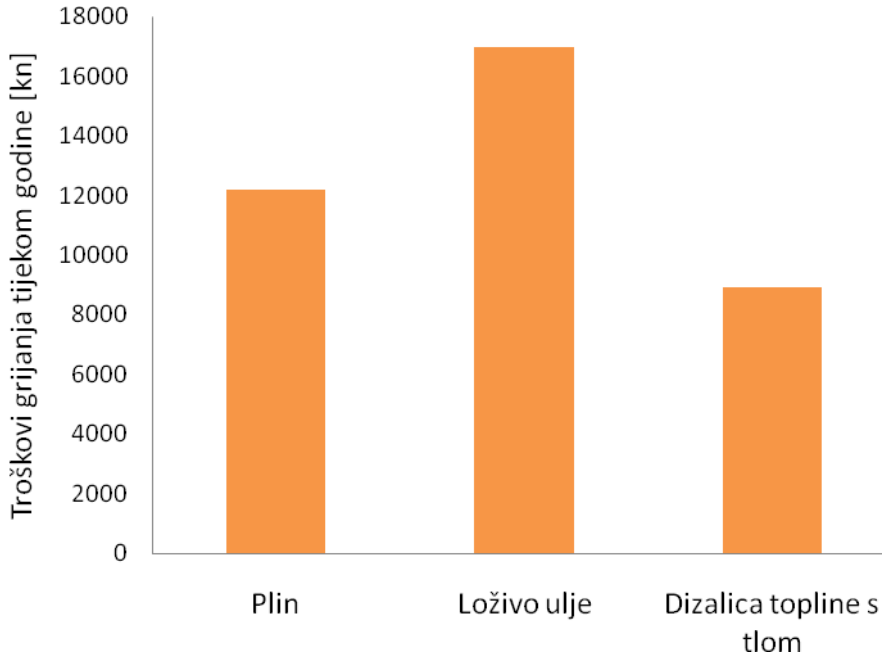
- godišnja potrošnja toplinske energije za potrebe grijanja zgrade je ista tijekom čitavog vremenskog razdoblja promatranja isplativosti,
- cijene plina, loživog ulja i električne energije ostaju iste tijekom promatranog vremena,
- stupanj korisnosti kotla na plin i loživo ulje je isti.

Slijedi prikaz rezultata analize isplativosti:



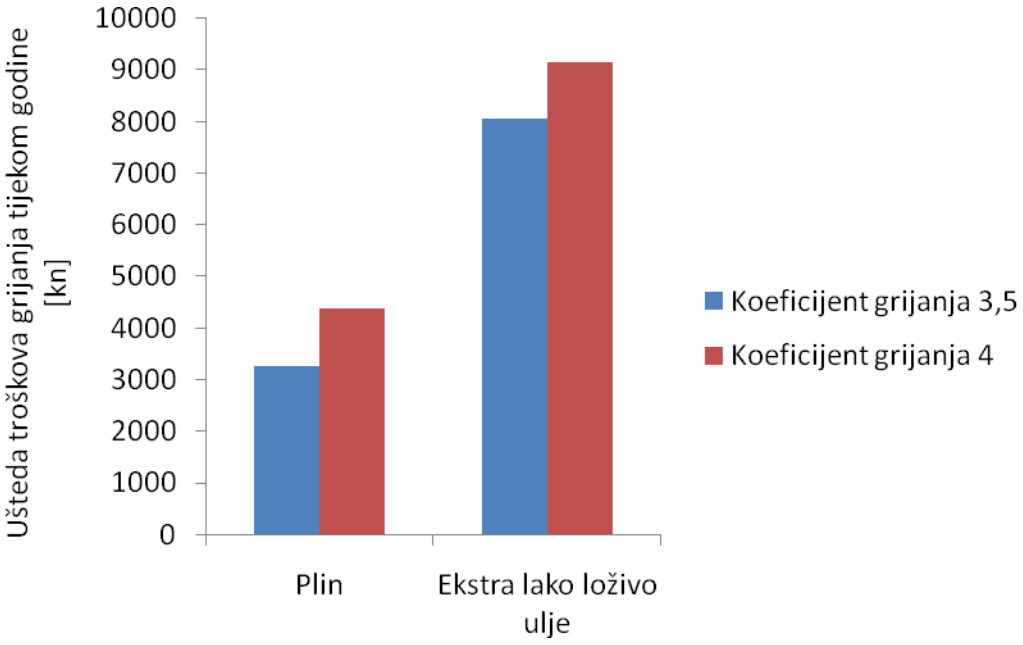
Slika 29. Usporedba godišnje potrošnje energije potrebne za grijanje obiteljske kuće

Energija potrebna za grijanje obiteljske kuće prikazana je na slici 29. Potrošnja toplinske energije koju generiraju kotlovi na plin i kotlovi na loživo ulje za namirivanje toplinskih potreba zgrade tijekom sezone grijanja je jednaka zbog činjenice da je stupanj korisnosti kotlova na plin odnosno loživo ulje isti. Dizalice topline za pokrivanje istih toplinskih potreba zgrade zimi troše samo kompenzacijsku energiju u obliku električne energije dok se preostala energija dobavlja iz tla.



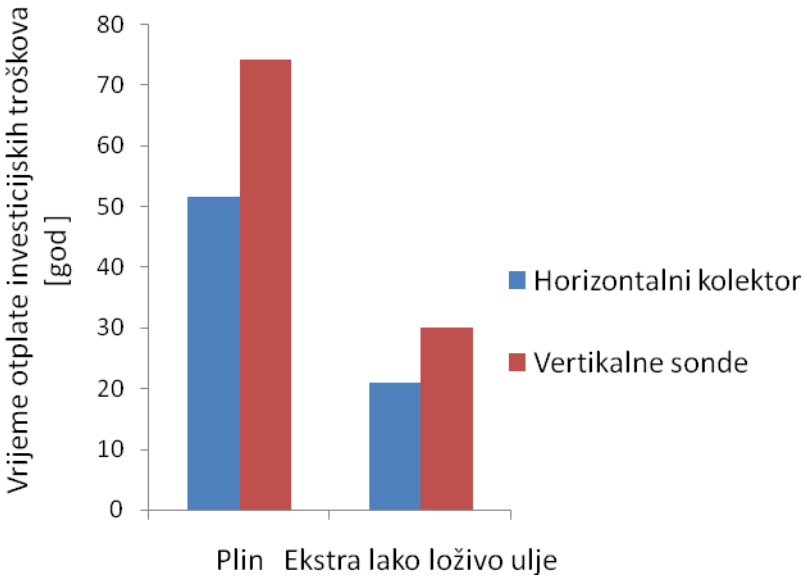
Slika 30. Usporedba godišnjih troškova grijanja obiteljske kuće

Slika 30. potvrđuje činjenicu da sustav grijanja zgrade koji se bazira na dizalicama topline s tlom kao toplinskim spremnikom ima niže troškove grijanja tijekom godine nego li sustavi grijanja jednakog kapciteta na plin ili loživo ulje. Na primjeru obiteljske kuće iz diplomskog zadatka troškovi grijanja na plin i loživo ulje veći su od troškova grijanja sa dizalicom topline s tlom za 56 odnosno 118%.



Slika 31. Ušteda pogonskih troškova sustava grijanja u ovisnosti o sezonskom koeficijentu grijanja dizalice topline s tlom

Utjecaj sezonskog koeficijenta grijanja dizalice topline s tlom na pogonske troškove je prikazan na slici 31. Veći sezonski koeficijent grijanja znači ujedno i niže pogonske troškove.



Slika 32. Vrijeme otplate investicijskih troškova termotehničkih sustava sa dizalicama topline s tlom

Najveći nedostatak tehnologije dizalica topline s tlom vrlo su visoki investicijski troškovi, iz čega proizlazi i dulje vrijeme otplate istih. Posebno se to odnosi na dizalice topline sa vertikalnim sondama, ali i na dizalice topline sa horizntalnim kolektorom koje, iako imaju kraći vijek otplate troškova ulaganja, također nisu pošteđene ovog nedostatka.

Zaključak

Toplinski uređaji koji besplatnu energiju iz našeg okoliša iskorištavaju na energetski učinkovit te za okoliš mnogo manje štetan način, a u svrhu dobave toplinske energije koja se potom može korisno upotrijebiti za različite namjene, zasigurno zaslužuju pažnju svakog inžinjera. Takvi su toplinski uređaji i dizalice topline koje koriste sunčevu energiju pohranjenu u tlu Zemlje za grijanje i hlađenje neke zgrade ili pak u industrijske svrhe(npr. za grijanje pogona i staklenika).

Budući da potrebe nekog objekta za grijanjem i hlađenjem tijekom godine zahtijevaju značajne količine toplinske energije koja se najvećim dijelom dobavlja iz fosilnog goriva čije su količine ograničene i neobnovljive te koje je pored toga štetno za okoliš, upotreba dizalica topline s tlom u termotehničkim sustavima zgrada sve je češća. Tehnologija dizalica topline s tlom kao toplinskim izvorom u usporedbi sa konvencionalnim temotehničkim sustavima postiže značajne uštede u godišnjoj potrošnji energije i doprinosi smanjenju emisije CO_2 te ostalih stakleničkih plinova.

Unatoč ovako značajnim i važnim prednostima, na osnovu provedene analize isplativosti primjene dizalica topline s tlom za grijanje obiteljske kuće, može se zaključiti da je i pored sadašnje(često nestabilne) cijene goriva za pogon konvencionalnih sustava grijanja, dizalica topline s tlom još uvijek skuplja te stoga financijski neisplativija tehnologija. Naime, godišnje uštede u troškovima grijanja obiteljske kuće kada se primjenjuje ova tehnologija nisu dovoljne kako bi se u nekom razumnom roku povratila velika investicijska sredstva koja ona zahtjeva.

Tu ipak treba napomenuti da se potonje konstatacije odnose prije svega na primjenu dizalica topline za potrebe grijanja jedne obiteljske kuće. Ukoliko bi se promatrala isplativost primjene dizalica topline za grijanje većeg broja zgrada(npr. naselja od nekoliko desetaka kuća) odnosno ukoliko bi godišnja potrošnja toplinske energije bila nekoliko desetaka puta veća od godišnje potrošnje toplinske energije jedne obiteljske kuće, tada bi se ova tehnologija mogla smatrati ne samo ekološki korisnom, već i financijski isplativom.

LITERATURA

[1] Galović, A.: Termodinamika I, II prerađeno izdanje, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2002.

[2] http://en.wikipedia.org/wiki/Heat_pump

[3] Bupić, M.i Čustović, S.: „Stanje i trendovi uprabe dizalice topline“ časopis“ Naše more“ br.53/2006.(str. 213-219)

[4] Ćurko, T.: Projektiranje rashladnih sustava, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2006.

[5] http://www.grasso.nl/en-us/News-and-Media/technical-articles-Grasso/Pages /HeatpumpCOP.aspx

[6] Ground-Source Heat Pump Project Analysis, RETScreen International, poglavlje 2.6 (str 49-51), www.retscreen.net/download.php/ang/479/0/Textbook_GSHP.pdf

[7] Grobovšek, B.“Izvedbe in dimenzioniranje zemeljskih kolektorjev za ogrevanje in hlajenje s toplotno črpalko“ Eges br.1/2006. (str. 86-91)

[8] Tehničke informacije, Heat pumps, VIESSMANN Werke, 2007.

[9] Tehničke informacije, Sustav geoTHERM, VAILLANT GmbH, 2008.

[10] Tehničke informacije, DHP-R, Danfoss, 2008.

[11] Pahud, D.: Borehole heat exchanger calculation, Geothermal-energy.doc, 2002., (str. 34-63)

[12] ASHRAE Handbook – HVAC Applications 2007 (SI), poglavlje 32 (str. 12-22.)

[13] Lund J.W. „Designd of closed-loop geothermal heat exchangers in the U.S.“, International Course on Geothermal heat pumps, poglavlje 2.4 (str. 134-146.)

[14] Tehničke informacije, Geothermal Heat Pump Design Manual, McQuay, 2002.

[15] Krishna C. Adivi, Simulation of a vertical ground-coupled heat pump system with optimal ground loop design, diplomski rad, 2003.

[16] User's manual, Control System DHP – R, Danfoss, 2008.

[17] www.mcsolar.hr/

[18] Heating and Cooling with a Heat Pump, Natural Resources Canada, 2004., (str. 24-42.)

Prilozi

1. Crtež 001 - Shema spajanja i automatike
2. Crtež 002 - Tlocrt podruma - grijanje i hlađenje
3. Crtež 003 - Tlocrt prizemlja - grijanje i hlađenje
4. Crtež 004 - Tlocrt kata - grijanje i hlađenje