

Geotermalna dizalica topline

Kragulj, Ivana

Master's thesis / Specijalistički diplomski stručni

2015

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **Karlovac University of Applied Sciences / Veleučilište u Karlovcu**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:128:476350>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-10-09**



VELEUČILIŠTE U KARLOVCU
Karlovac University of Applied Sciences

Repository / Repozitorij:

[Repository of Karlovac University of Applied Sciences - Institutional Repository](#)



zir.nsk.hr



DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

VELEUČILIŠTE U KARLOVCU

STROJARSKI ODJEL

Specijalistički diplomski stručni studij Strojarsva

Ivana Kragulj

**GEOTERMALNA DIZALICA
TOPLINE**

Završni rad

Karlovac, 2015.

VELEUČILIŠTE U KARLOVCU

STROJARSKI ODJEL

Specijalistički diplomski stručni studij Strojарstva

Ivana Kragulj

**GEOTERMALNA DIZALICA
TOPLINE**

Završni rad

Dr.sc. Mustapić Nenad

Karlovac, 2015.

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

Zahvaljujem se mentoru dr.sc. Mustapić Nenadu na iskazanom povjerenju, vodstvu i diskusijama tijekom izrade ovog rada.

Zahvalila bih se svojoj obitelji na strpljenju i moralnoj podršci, te povjerenju koje su mi ukazali tokom studija.

Ivana Kragulj

SADRŽAJ

POPIS SLIKA

POPIS TABLICA

POPIS PRILOGA

POPIS OZNAKA

1. UVOD	1
1.1. POVIJESNI RAZVOJ	1
1.2. OSNOVE RADA DIZALICE TOPLINE	2
1.2.1. <i>Kružni procesi</i>	2
1.2.2. <i>Faktori grijanja i hlađenja</i>	4
2. TEORIJSKE OSNOVE	8
2.1. OSNOVNE ZNAČAJKE DIZALICE TOPLINE.....	8
2.2. KOMPRESIJSKE DIZALICE TOPLINE.....	16
2.2.1. <i>Osnovne značajke kompresijskih dizalica topline</i>	16
2.2.2. <i>Isparivač</i>	19
2.2.3. <i>Kompresor</i>	21
2.2.4. <i>Kondenzator</i>	25
2.2.5. <i>Ekspanzijski ventil</i>	27
2.2.6. <i>Ostala oprema kompresijske dizalice topline</i>	28
2.3. DIZALICE TOPLINE S TLOM KAO TOPLINSKIM IZVOROM	29
2.3.1. <i>Tlo kao toplinski izvor</i>	29
2.3.2. <i>Podzemni toplinski kolektori</i>	33
2.3.3. <i>Vodoravna kolektorska polja</i>	34
2.4. DIMENZIONIRANJE DIZALICE TOPLINE	47
2.4.1. <i>Određivanje potrebnog toplinskog učina</i>	47
2.4.2. <i>Sustavi grijanja sa dizalicom topline</i>	52

2.5.	NAČIN RADA DIZALICE TOPLINE	53
2.5.1.	Monovalentan način rada dizalice topline.....	53
2.5.2.	Bivalentni način rada dizalice topline	54
2.5.3.	Monoenergetski i multivalentni način rada dizalice topline	54
3.	POSTAVKA ZADATKA.....	56
4.	RAZRADA ZADATKA	57
5.	ANALIZA DOBIVENIH REZULTATA	66
6.	ZAKLJUČAK.....	67
7.	POPIS LITERATURE.....	68
8.	PRILOZI.....	69

POPIS SLIKA

Slika 1. Prikaz teoretskog lijevokretnog Carnotov procesa u p - V dijagramu.....	3
Slika 2. Prikaz teoretskog lijevokretnog Carnotov procesa u T - s dijagramu.....	3
Slika 3. Usporedba procesa u rashladnom uređaju i dizalici topline.....	4
Slika 4. Pojednostavljeni prikaz rada kompresijske dizalice topline.	8
Slika 5. Dijagram udjela pojedinih izvedbi dizalica toplina u primjeni, ovisno o toplinskom izvoru.....	9
Slika 6. Dijagram ovisnosti toplinskog učina dizalice topline o temperaturama toplinskog izvora.....	13
Slika 7. Emisija štetnih tvari iz najčešćih toplinskih izvora za sustave grijanja	15
Slika 8. Pojednostavljeni prikaz sastavnih dijelova kompresijske dizalice topline s.....	16
Slika 9. Prikaz stvarnog procesa u kompresijskoj dizalici topline u logp-h i T-s dijagramima	17
Slika 10. Pojednostavljena shema dizalice topline s mogućnošću prekretanja procesa.....	19
Slika 11. Dijagram ovisnosti volumetričkog stupnja djelovanja o kompresijskom omjeru za tri radne tvari.....	22
Slika 12. Prikaz krivulja isparivača i kompresora te radne točke u Q – ̸ dijagramu.	23
Slika 13. Shema klipnog kompresora.....	25
Slika 14. Pojednostavljen prikaz rada spiralnog kompresora.	25
Slika 15. Pojednostavljena shema kondenzatora s dvostrukom koaksijalnom cijevi.....	27
Slika 16. Pojednostavljena shema termoekspanzijskog ventila s vanjskim izjednačavanjem .	28
Slika 17. Shema iskorištavanja tla kao toplinskog izvora za dizalice topline.....	30
Slika 18. Dijagram ovisnosti temperature o dubini tla tijekom godine.....	31
Slika 19. Pojednostavljeni prikaz sustava grijanja s dizalicom topline tlo – voda s podzemnim	32
Slika 20. Dijagram ovisnosti ledišta glikolne smjese o koncentraciji glikola.....	32
Slika 21. Dijagram ovisnosti pada tlaka u cijevima o koncentraciji glikola.	33
Slika 22. Vodoravno kolektorsko polje sa serijski povezanim cijevima.....	35
Slika 23. Vodoravno kolektorsko polje sa paralelno povezanim cijevima.	35
Slika 24. Kanalski kolektor (u jarku).	35
Slika 25. Spiralni kolektor (izvedba 'Slinky').....	36

Slika 26. Spiralni kolektor (izvedba 'Svec').	36
Slika 27. Osnovne dimenzije pri polaganju kanalskih podzemnih toplinskih kolektora.	41
Slika 28. Dvostruka U cijev s utegom i poprečni presjek bušotine s izmjenjivačem topline i ispunom.	45
Slika 29. Monovalentni način rada.....	53
Slika 30. Bivalentno - usporedni način rada	54
Slika 31. Ukupna potrošnja energije promatranog odjela fakulteta.	58
Slika 32. Dijagram potrošnje energije na grijanje i hlađenje odjela.	58
Slika 33. Vertikalni izmjenivači topline u geotermalnoj dizalici topline.....	59
Slika 34. Test toplinskog odziva tla.	60
Slika 35. Uzorci tla po visini bušotine.	61
Slika 36. Sinusoidalni temperaturni gradijent.	61
Slika 37. Troškovi cijevi u ovisnosti o promjeru cijevi.	62
Slika 38. Cijevi od HDPE materijala.	63
Slika 39. Točka smrzavanja u ovisnosti o postotku glikola u radnoj tvari.....	64

POPIS TABLICA

Tablica 1. Prosječni toplinski učin i sezonski faktori grijanja dizalica topline, ovisno o toplinskom izvoru.....	6
Tablica 2. Osnovne značajke pojedinih izvedbi dizalica topline.	10
Tablica 3. Najčešće mogućnosti za primjenu dizalice topline.	12
Tablica 4. Temperature kondenzacije u dizalici topline i izlazne temperature ogrijevnog medija za četiri najčešće namjene.	13
Tablica 5. Potrebna površina zemljišta za polaganje vodoravnog kolektorskog polja ovisna o specifičnim toplinskim gubicima i površini stambenog prostora u zgradi te načinu rada dizalice topline.	38
Tablica 6. Specifično odavanje topline tla za primjenu podzemnih toplinskih kolektora ovisno o sastavu tla.	38
Tablica 7. Smjernice za dimenzioniranje vodoravnog kolektorskog polja.	38
Tablica 8. Specifično odavanje topline tla za primjenu podzemnih toplinskih sondi.	45
Tablica 9. Osnove građevinsko – fizikalne značajke pojedinih građevinskih elemenata (prema HRN EN 12831).	48
Tablica 10. Temperaturni korekcijski faktor građevinskog elementa (prema 12831).	49
Tablica 11. Projektne temperature zraka u grijanim prostorijama (prema HRN EN 12831)..	50
Tablica 12. Najmanji potrebni broj izmjena zraka u prostoriji (prema HRN EN 12831).	50
Tablica 13. Najmanji potrebni broj izmjena zraka u prostoriji (prema HRN EN 12831).	51
Tablica 14. Prosječne specifične potrebe za toplinom zgrade, ovisno o njezinoj izvedbi. ...	52
Tablica 15. Prednosti i nedostaci kolektorskih polja.	59
Tablica 16. Ukupni troškovi ovisno o lokaciji postavljanja kolektorskih polja.	62
Tablica 17. Detalji kolektorskih polja.	64

POPIS PRILOGA

Prilog 1. EES kod za izračun gubitaka i dobitaka topline odjela fakulteta.....	69
Prilog 2. EES kod za izračun troškova dizalice topline.....	72
Prilog 3. EES kod za izračun detalja vertikalnih izmjenjivača topline.....	73

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
ε_{DT}	-	faktor grijanja dizalice topline
Q_{dov}	J	toplina koja je dovedena nekom prostoru ili mediju
E_{pog}	J	pogonska energija za ostvarivanje procesa u dizalici topline
Φ_{DT}	W	toplinski učin dizalice topline
P_{el}	W	nazivna električna snaga dizalice topline
T_{izv}	K	srednja temperatura toplinskog izvora
T_{pol}	K	temperatura polaznog voda ogrijevnog medija
ε_{RU}	-	faktor hlađenja rashladnog uređaja
Q_{odv}	J	toplina koja je odvedena od nekog prostora ili medija
Φ_{RU}	W	rashladni učin rashladnog uređaja
$\varepsilon_{DT,sez}$	-	sezonski faktor grijanja
ΣQ_{dov}	J	ukupna dovedena toplinska energija cijelo vrijeme pogona dizalice topline
Σe_{pog}	J	ukupna energija pogona dizalice topline
$\varepsilon_{DT,stv}$	-	stvarni faktor grijanja kompresijske dizalice topline
Q_{hl}	J	toplina odvedena sustavom hlađenja motora kompresora

Q_{DP}	J	toplina odvedena dimnim plinovima iz motora kompresora
η_{mot}	%	stupanj djelovanja motora kompresora
E_{el}	J	dovedena električna energija za pogon kompresora
Φ_{DT}	W	toplinski učin dizalice topline (kondenzatora)
$\Phi_{DT,r}$	W	rashladni učin dizalice topline (isparivača)
P_{komp}	W	snaga kompresora
ε_{DT}	-	faktor grijanja dizalice topline
Φ_{isp}	W	rashladni učin isparivača
$\rho_{m, PM}$	kg/s	maseni protok posrednog medija kroz isparivač
c_{PM}	J/kgK	specifični toplinski kapacitet posrednog medija
$\Delta\vartheta_{PM}$	°C	razlika temperatura posrednog medija na ulazu i izlazu iz isparivača
$\rho_{m,RT}$	kg/s	maseni protok radne tvari u rashladnom sustavu
ρ_i	J/kg	specifični rashladni učin isparivača
h_1	J/kg	specifična entalpija radne tvari na izlazu iz isparivača
h_4	J/kg	specifična entalpija radne tvari na ulazu u isparivač, odnosno na izlazu iz ekspanzijskog ventila
k_{isp}	W/(m ² K)	koeficijent prolaza topline isparivača
A_{isp}	m ²	površina na izmjenu topline isparivača
$\Delta\vartheta_{PM,sr}$	°C	srednja temperatura posrednog medija pri prolasku kroz isparivač

$\Delta\vartheta_i$	$^{\circ}\text{C}$	temperatura isparavanja radne tvari
V_{us}	m^3/h	dobava kompresora
$P_{\text{komp,ef}}$	W	efektivna snaga kompresora
ε_{teo}	-	teorijski faktor grijanja
η_{ind}	-	inducirani stupanj djelovanja
η_{meh}	-	mehanički stupanj djelovanja
L_{uk}	m	ukupna duljina cijevi vodoravnog kolektorskog polja
s	m	međusoban razmak cijevi
$\Delta p_{\text{uk,vkp}}$	Pa	ukupni pad tlaka u vodoravnom kolektorskom polju
Δp_{DT}	Pa	pad tlaka kroz dizalicu topline
ρ_{PM}	kg/m^3	gustoća posrednog medija (ovisna o sastavu glikolne smjese i temperaturi)
U	$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$	koeficijent prolaza topline pojedinog građevinskog elementa u prostoriji
V_{PM}	m^3/s	volumenski protok posrednog medija
C_{PM}	J/kgK	specifični toplinski kapacitet posrednog medija
$\Delta\vartheta_{\text{PM}}$	$^{\circ}\text{C}$	razlika temperatura posrednog medija na ulazu u kolektor (sondu) i izlazu iz njih
L_{sonda}	m	duljina sonde
PTV	m^3/h	potrošna topla voda
GViK	-	grijanje, hlađenje i ventilacija

SAŽETAK

Završni rad sastoji se od dvije cjeline:

- 1) Teoretskog dijela,
- 2) Eksperimentalnog dijela.

Teoretski dio opisuje dizalice topline kroz povijest, kompresijske dizalice topline, toplinske izvore, princip rada, dimenzioniranje i načine rada.

Eksperimentalni dio se sastoji od proračuna dobitaka i gubitaka topline odjela na fakultetu, odabir broja bušotina, vrste materijala za vertikalni izmjenjivač topline, radne tvari u izmjenjivaču i financijska isplativost. Svi proračuni će biti napravljeni u programu Engineering Equation Solver (EES).

1. UVOD

1.1. Povijesni razvoj

Iako je ubrzan porast primjene dizalica topline započeo sedamdesetih godina prošlog stoljeća, načelo njegovog rada poznato je još od početka devetnaestog stoljeća. 1832 godina francuski fizičar Nicolas Léonard Sadi CARNOT opisao je kružni proces koji predstavlja teorijsku osnovu za rad današnjih rashladnih uređaja i dizalica topline. 1835 godine američki fizičar i izumitelj Jacob PERKINS prijavio je patent za rashladni parni stroj koji je kao radnu tvar koristio dietileter, 1851. irski fizičar William THOMPSON otkrio je mogućnost povišenje temperature razine neke tvari dovođenjem energije i opisao mehanički sustav za grijanje i hlađenje zgrada. Godine 1856 austrijski inženjer Peter Ritter VON RITTINGER izradio je rashladni stroj za opskrbu toplinom proces u pogonu za proizvodnju soli, dok je 1877 njemački izumitelj Carl Paul Gottfried VON LINDE konstruirao prvi kompresijski rashladni uređaj koji je kao radnu tvar koristio amonijak. Izraz toplinska crpka (eng. heat pump) za dizalicu topline stvoren je tek u dvadesetim godinama prošlog stoljeća, kad su u SAD-u i Velikoj Britaniji izvedeni prvi sustavi grijanja koji su ih koristili kao izvor topline. Godine 1938 dizalica topline voda – voda ugrađena je u sustav grijanja vijećnice kantona Zürichu. Nakon drugog svjetskog rata ponovo počinje veća primjena dizalica toplina, najprije u SAD-u gdje su korištene za grijanje i hlađenje prostorija, šezdesetih godina njihova primjena vraća se u Europu. Veliko povećanje njihove primjene započelo je u doba prve velike naftne krize sedamdesetih godina kad su mnogi proizvođači opreme za grijanje širom svijeta tražili rješenje za zamjenu fosilnih goriva drugim izvorima, a jedno od njih je bila upotreba otpadne, odnosno topline iz okolice pomoću dizalice topline. Ipak, tadašnja tehnička rješenja i izvedbe dizalica topline nisu dale očekivane rezultate s obzirom na učinkovitost, pa nakon što je kriza završila zaboravljene su. Početkom devedesetih godina, s porastom standarda stanovnika razvijenih zemalja raste i ekološka svijest, no istodobno dolazi i do povišenja cijena energenata pa se ponovno pojavljuje zanimanje za primjenu dizalica topline. Zbog toga ih je već 1995 godine u cijelom svijetu bilo ugrađeno oko 55 milijuna. Zahvaljujući razvoju novih tehnologija i novih tehničkih rješenja koja su omogućila povećanje učinkovitosti, smanjenje dimenzija i mase, primjena dizalica topline u prvom desetljeću 21.

stoljeća sve je veća pa se može očekivati da će se u skorijoj budućnosti koristiti kao osnovni izvor topline u većini niskotemperaturnih sustava grijanja. [1,4,6]

1.2. Osnove rada dizalica topline

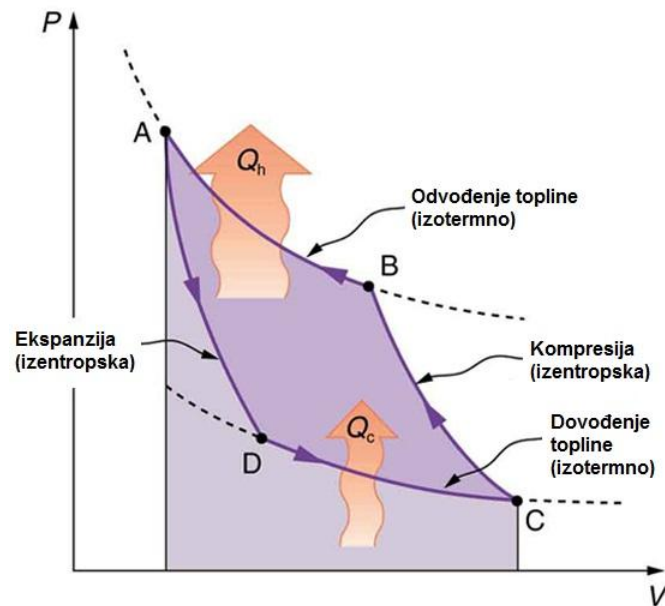
1.2.1. Kružni procesi

Kružni proces je slijed promjena u nekom sustavu nakon čijeg je završetka on ponovo u termodinamički istom početnom stanju, a taj se slijed može ponavljati proizvoljan broj puta. Posljedice kružnog procesa su promjene u okolini promatranog sustava kao npr. obavljanje rada ili prijenos topline. Idealni kružni proces sastoji se od više povratnih potprocesa i u stvarnosti ne postoji, dok se realni kružni proces sastoji od više nepovratnih potprocesa (jer u stvarnim uvjetima uvijek dolazi do određenih gubitaka, npr. zbog trenja. Ovisno o prikazu odvijanja promjena na grafikonima i dijagramima, kružni procesi mogu biti desnokretni ili lijevokretni. U prikazima desnokretnih kružnih procesa promjene se odvijaju u smjeru kretanja kazaljki na satu i njihov cilj je dobivanje rada. U takvim procesima dolazi do pretvora jednog dijela dovedene toplinske u mehaničku energiju, odnosno u rad. Primjeri: plinske turbine, parni strojevi, motori s unutrašnjim izgaranjem i sl. U prikazima lijevokretnih kružnih procesa promjene se odvijaju u suprotnom smjeru kretanja kazaljki na satu i njihov cilj je izmjena topline između dva toplinska spremnika. Za prijenos topline od toplinskog spremnika na nižoj do toplinskog spremnika na višoj temperaturnoj razini kružnom procesu treba dovesti kompenzacijsku energiju (u većini slučajeva to je mehanički rad kompresora). Primjeri: rashladni uređaji, dizalice topline i sl. Kao referentan za ocjenu svih kružnih procesa koristi se Carnotov proces. Radi se o idealnom (teorijskom) kružnom procesu koji u stvarnosti nije moguć. [1,6]

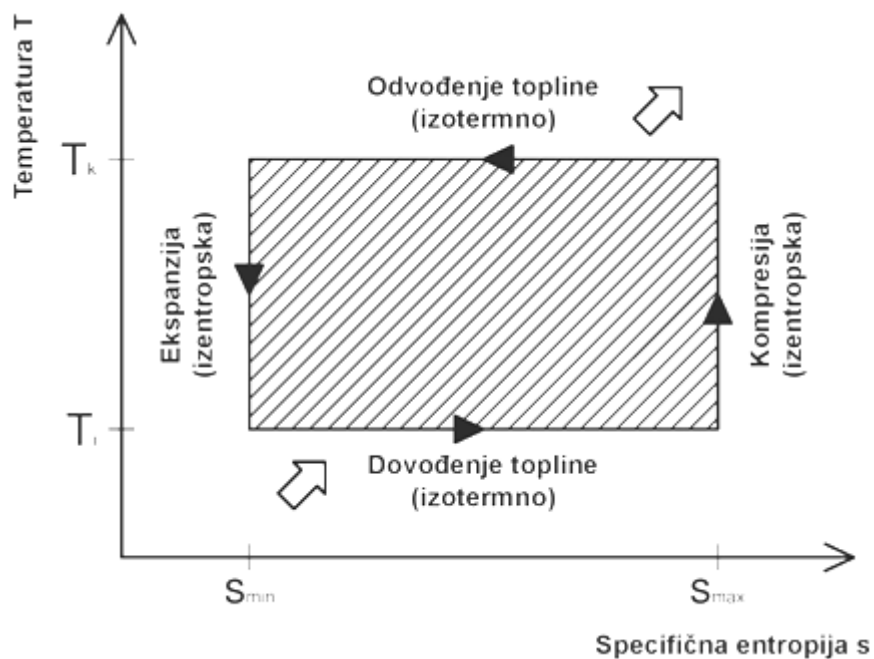
Ljevokretni Carnotov proces sastoji se od 4 povratna potprocesa prikazanog na slici 1 i 2.:

- 1) izentropske kompresije,
- 2) izotermne kompresije (pri temperaturi rashladnog spremnika),
- 3) izentropske ekspanzije,
- 4) izotermne ekspanzije (pri temperaturi ogrijevnog spremnika).

Kod takvog se procesa radnom mediju dovodi mehanički rad izvana kako bi se omogućilo da se pri nižoj temperaturi iz neposredne okolice (toplinskog spremnika na nižoj temperaturnoj razini) dovodi toplina i da potom pri višoj temperaturi predaje toplinu neposrednoj okolici (toplinskom spremniku na višoj temperaturnoj razini).

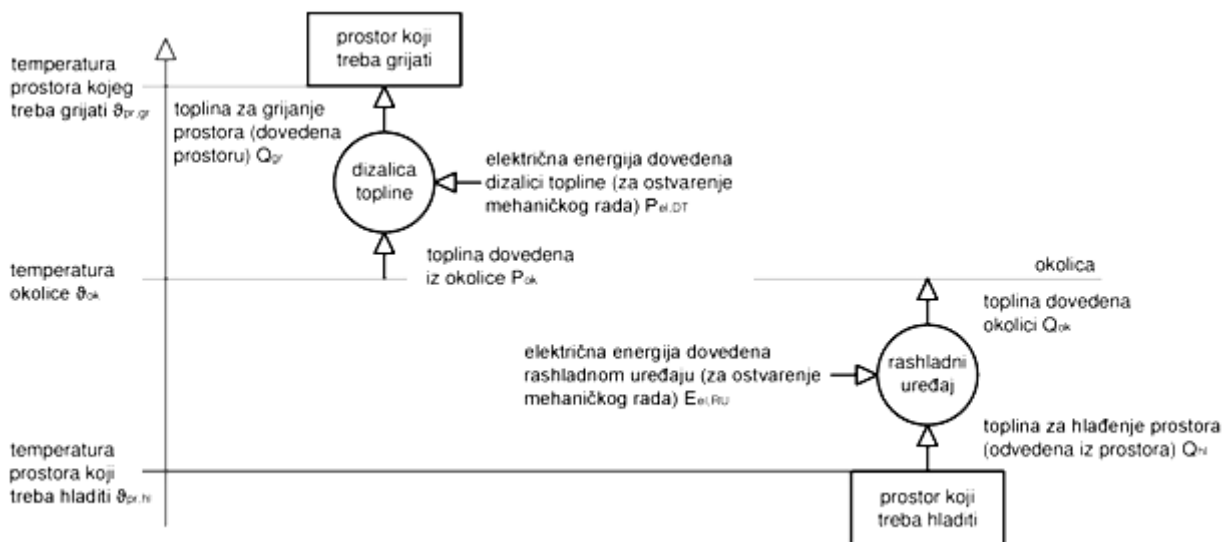


Slika 1. Prikaz teoretskog lijevokretnog Carnotov procesa u p - V dijagramu.



Slika 2. Prikaz teoretskog lijevokretnog Carnotov procesa u T - s dijagramu, [1].

Ovisno tome što se u zadanom slučaju smatra korisnim: grijanje ili hlađenje promatranog okolnog prostora ili medija, razlikuju se procesi u rashladnim uređajima i dizalicama topline prikazan na slici 3. Kod rashladnog uređaja toplinski spremnik na višoj temperaturnoj razini (onaj kojem se toplina dovodi) neposredna okolica uređaja, dok spremnik na nižoj temperaturnoj razini (onaj kojem se toplina odvodi) prostor ili medij koji treba ohladiti (npr. zrak u prostoriji, unutrašnjost hladnjaka i sl.). Kod dizalice topline toplinski spremnik na višoj temperaturnoj razini (onaj kojem se toplina dovodi) prostor ili medij koji se trebaju zagrijati (npr. ogrijevni medij sustava grijanja), dok spremnik na nižoj temperaturnoj razini (onaj kojem se toplina odvodi) neposredna okolica (okolni zrak, voda, tlo). Osnovni zadatak dizalice topline je grijanje nekog prostora, a rashladnog uređaja njegovo hlađenje. Lijevo-kretni kružni proces može se voditi tako da bude rashladno - ogrijevni pa se istodobno može koristiti za grijanje i hlađenje. [1]



Slika 3. Usporedba procesa u rashladnom uređaju i dizalici topline.

1.2.2. Faktori grijanja i hlađenja

Faktor grijanja ili toplinski množitelj (COP, eng. coefficient of performance) je osnovni pokazatelj učinkovitosti rada dizalice topline. Jednak je omjeru toplinske energije koju je dizalica topline dovela nekom prostoru ili mediju i pogonske (mehaničke, električne i sl.) energije kojom se ostvaruje proces u njoj, odnosno omjeru toplinskog učinka koju dizalica

topline preko kondenzatora predaje prostoru ili mediju koju treba grijati i električne snage elektromotora koji pokreće njezin kompresor,[1]:

$$\varepsilon_{DT} = \frac{Q_{dov}}{E_{pog}} = \frac{\Phi_{DT}}{P_{el}} = \frac{1}{1 - \frac{T_{izv}}{T_{pol}}} \quad (1)$$

pri čemu su:

- ε_{DT} –faktor grijanja dizalice topline, > 1 (uvijek),
- Q_{dov} –toplina koja je dovedena nekom prostoru ili mediju, [J],
- E_{pog} –pogonska energija za ostvarivanje procesa u dizalici topline, [J],
- Φ_{DT} –toplinski učin dizalice topline, [W],

- P_{el} –nazivna električna snaga dizalice topline, [W],
- T_{izv} – srednja temperatura toplinskog izvora, [K],
- T_{pol} – temperatura polaznog voda ogrijevnog medija, [K].

Faktor hlađenja je osnovni pokazatelj učinkovitosti rada rashladnog uređaja. Jednak je omjeru toplinske energije koju je rashladni uređaj odveo iz nekog prostora ili medija i pogonske (mehaničke, električne i sl.) energije kojom se ostvaruje proces u njemu, odnosno omjeru rashladnog učina koji rashladni uređaj preko isparivača uzima iz prostora ili medija koje treba hladiti i električne snage elektromotora koji pokreće njegov kompresor:

$$\varepsilon_{RU} = \frac{Q_{dov}}{E_{pog}} = \frac{Q_{ru}}{P_{el}} = \varepsilon_{DT} - 1 \quad (2)$$

pri čemu su:

- ε_{RU} –faktor hlađenja rashladnog uređaja,
- Q_{dov} –toplina koja je odvedena od nekog prostora ili medija, [J],
- Φ_{RU} –rashladni učin rashladnog uređaja, [W].

Sezonski faktor grijanja je pokazatelj učinkovitosti rada dizalice topline tijekom duljeg razdoblja (npr. tijekom sezone grijanja), [1]:

$$\varepsilon_{DT,sez} = \frac{\Sigma Q_{dov}}{\Sigma E_{pog}} \quad (3)$$

pri čemu su:

$\varepsilon_{DT,sez}$ -sezonski faktor grijanja prikazan na tablici 1,

ΣQ_{dov} -ukupna dovedena toplinska energija cijelo vrijeme pogona dizalice topline, [J],

ΣE_{pog} -ukupna energija pogona dizalice topline (npr. u godini dana), [J].

Tablica 1. Prosječni toplinski učin i sezonski faktori grijanja dizalica topline, ovisno o toplinskom izvoru.

Toplinski izvor	Prosječni toplinski učin, [kW]	Sezonski faktor grijanja $\varepsilon_{DT,sez}$
Okolni zrak	4 – 50	2,0 – 2,5
Otpadni, istrošeni ili onečišćeni zrak iz prostorije	3	2,5 – 3,1
Tlo	7 – 400	2,3 – 2,7
Podzemne vode	7 – 400	2,4 – 2,8
Površinske i morska voda	10 – 25 000	2,4 – 3,3
Otpadna toplina industrijskih procesa	> 500	2,5 – 4,0

Stvarni faktor grijanja dizalice topline u obzir uzima gubitke u cijelom procesu, odnosno uređaju (npr. kompresora, crpki, ventilatora). Za kompresijske dizalice topline određuje se jednadžbama:

1) za dizalice topline pogonjene dizelskim ili plinskim motorom:

$$\varepsilon_{DT,stv} = \frac{Q_{dov} + Q_{hl} + Q_{DP}}{Q_{gor}} = 1 + \eta_{mot} \cdot (\varepsilon_{DT} - 1) \quad (4)$$

2) za dizalice topline pogonjene električnim kompresorom:

$$\varepsilon_{DT,stv} = \frac{Q_{dov} + Q_{hl}}{E_{el}} \quad (5)$$

pri čemu su:

-
- $\varepsilon_{DT,stv}$ -stvarni faktor grijanja kompresijske dizalice topline,
- Q_{hl} -toplina odvedena sustavom hlađenja motora kompresora, [J],
- Q_{DP} -toplina odvedena dimnim plinovima iz motora kompresora, [J],
- Q_{gor} -toplina oslobođena izgaranjem goriva u komori izgaranja motora kompresora, [J],
- η_{mot} -stupanj djelovanja motora kompresora, [%],
- E_{el} -dovedena električna energija za pogon kompresora, [J].

2. TEORIJSKE OSNOVE

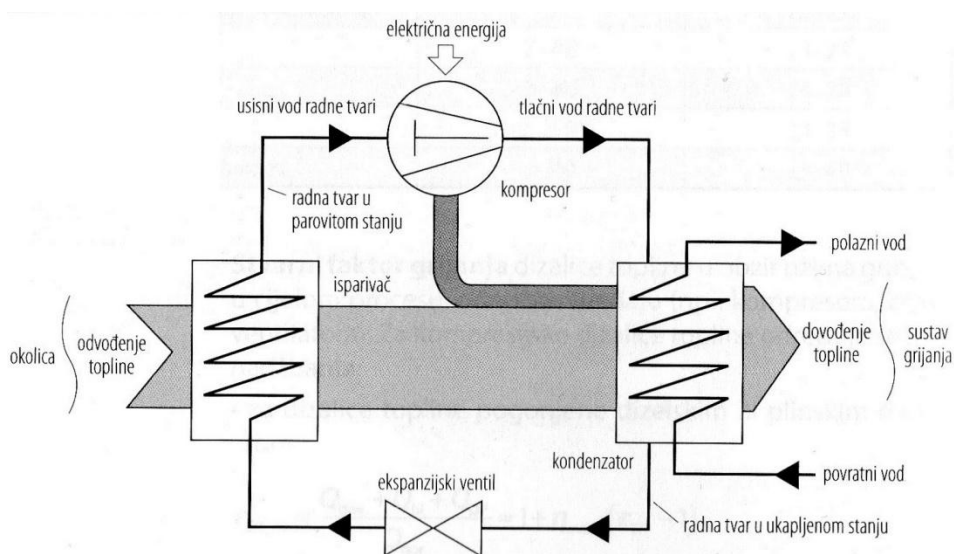
2.1. Osnovne značajke dizalice topline

Dizalica topline (toplinska crpka, toplinska pumpa) je uređaj koji omogućava prijenos (toplinske) energije iz sustava (toplinskog spremnika) niže temperaturne razine u sustav (toplinski spremnik) više temperaturne razine korištenjem dodatne energije (rada) pomoću lijevokretnog kružnog procesa prikladnog radnog medija prikazanog na slici 4. Zahvaljujući tom svojstvu, dizalice topline su vrlo prikladne kao izvor toplinskog (i rashladnog) učina u sustavima grijanja, pripreme potrošne tople vode, ventilacije i klimatizacije. [1, 2]

Toplinski spremnici različitih temperaturnih razina pri tome su:

1) toplinski izvor: prostor ili medij niže temperaturne razine od kojeg se toplina odvodi (najčešće je to: tlo, površinske ili podzemne vode, okolni zrak, otpadni, istrošeni ili onečišćeni zrak iz prostorija ili raznih procesa.)

2) toplinski ponor: prostor ili medij više temperaturne razine kojem se toplina dovodi (najčešće je to: zrak u prostoriji, voda u sustavu grijanja, potrošna topla voda). [1]



Slika 4. Pojednostavljeni prikaz rada kompresijske dizalice topline, [1].

Toplinski izvori za dizalice topline s obzirom na porijeklo i postojanost temperaturne razine mogu se podijeliti u tri osnovne skupine:

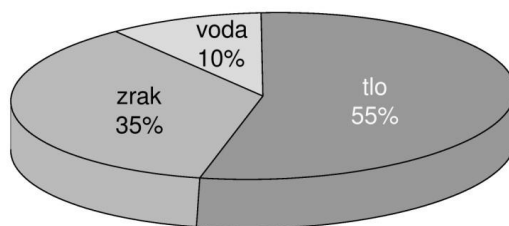
- 1) prirodni s uglavnom promjenjivim temperaturama:
 - a) okolni zrak
- 2) prirodni s razmjerno konstantnim temperaturama:
 - a) površinske vode (vodotoci i jezera), more i oceani
 - b) podzemne vode
 - c) slojevi tla
 - d) sunčeva energija (solarni toplinski sustavi)
- 3) umjetni:
 - a) otpadni, istrošeni ili onečišćeni zrak iz prostorija ili industrijskih procesa (tzv. otpadna toplina)

Kako su ti toplinski izvori više ili manje obnovljivi, dizalice topline se ubrajaju u uređaje, odnosno sustave za iskorištavanje obnovljivih izvora energije.

S obzirom na toplinski izvor, dizalice topline se dijele u tri osnovne skupine:

- 1) dizalice topline tlo – voda (rasolna – voda): kao toplinski izvor koriste slojeve tla
- 2) dizalice topline voda – voda: kao toplinski izvor koriste podzemne, površinske ili otpadne vode
- 3) dizalice topline zrak – voda i zrak – zrak: kao toplinski izvor koriste okolni, istrošeni, otpadni ili onečišćeni zrak.

Dijagram udjela pojedinih izvedbi dizalica toplina u primjeni, ovisno o toplinskom izvoru prikazuju se na slici 5.



Slika 5. Dijagram udjela pojedinih izvedbi dizalica toplina u primjeni, ovisno o toplinskom izvoru.

Tablica 2. Osnovne značajke pojedinih izvedbi dizalica topline.

Tolinski izvor	Izvedba dizalice topline	Temperaturna razina toplinskog izvora	Raspoloživost ovisno o mjestu postavljanja	Raspoloživost ovisno o dobu godine	Podudarnost potreba za toplinom i raspoloživosti toplinskog izvora	Mogućnost primjene kao jedinog izvora topline	Problemi pri uporabi	Potrošnja energije za prijenos posrednog medija	Troškovi izvođenja sustava	Ujiceaj na okoliš
Tlo	Vodoravno kolektorsko polje	tlo - voda	Ponegdje (ovisno o površini zemljišta)	Stalna	Djelomična	Velika	Zaleđivanje tla oko izmjenjivača topline, korozija	Velika (crpka)	Visoki (iskop)	Malen
	Kanalni kolektor	tlo - voda	Od - 5 °C do + 15 °C	Stalna	Djelomična	Velika	Korozija	Velika (crpka)	Visoki (bušotine)	Velik (moguć proboj vodonosnih slojeva)
	Toplinska sonda	tlo - voda	Posvuda	Stalna	Djelomična	Velika	Korozija	Velika (crpka)	Visoki (bušotine)	Značajan
Voda	Podzemne vode	voda - voda	Ponegdje	Stalna	Stalna	Velika	Korozija	Velika (crpka)	Umjereni	Djelomičan
	Površinske vode	voda - voda	Ponegdje (uz more i vodotoke)	Ovisna o vodotoku	Djelomična	Djelomična	Onečišćenje, korozija	Velika (crpka)	Umjereni	Djelomičan
	Otpadne vode	voda - voda	Ponegdje	Stalna	Stalna	Velika	Onečišćenje, korozija, neugodni mirisi	Umjereni do velika (crpka)	Umjereni	Malen
Zrak	Otpadni, istrošeni ili onečišćeni zrak	zrak - voda	Ponegdje	Ovisna o radu sustava ventilacije i klimatizacije	Stalna	Djelomična	-	-	Niski	Zamemariv
	Okolni zrak	zrak - voda	Posvuda	Stalna	Mala	Djelomična	Zaleđivanje isparivača	Velika (ventilator)	Niski	Zamemariv
	Okolni zrak	zrak - zrak	Posvuda	Stalna	Mala	Djelomična	Zaleđivanje isparivača	Velika (ventilator)	Niski	Zamemariv

Osnovne značajke pojedinih izvedbi dizalica topline navedene su u tablici 2.

S obzirom na izvor dodatne energije za ostvarivanje kružnog procesa, dizalice topline mogu biti:

- a) kompresijske, kod njih se proces radne tvari omogućava dovođenjem mehaničkog rada pomoću kompresora (najčešće u primjeni),
- b) sorpcijske (apsorpcijske i adsorpcijske), kod kojih se proces radne tvari omogućava dovođenjem toplinske energije,
- c) Vuilleumierove, kod kojih se proces radne tvari također omogućava dovođenjem toplinske energije.

Osnovna zamisao primjene dizalice topline kao izvor toplinskog (i rashladnog) učina u sustavima grijanja, pripreme PTV-a, ventilacije i klimatizacije temelji se na mogućnosti iskorištavanja dijela "besplatne" i "neograničene" topline iz neposredne okolice, tj. toplinskih izvora kao što su tlo, voda i zrak. [1,4]

Nekoliko je osnovnih mogućnosti njihove primjene u stambenim, poslovnim i sličnim zgradama (hotelima, ugostiteljskim objektima i sl.):

- a) kao izvor toplinskog učina u sustavu grijanja i/ili pripreme PTV-a,
- b) kao izvor toplinskog i rashladnog učina u sustavu grijanja, ventilacije i klimatizacije,
- c) kao izvor toplinskog učina u sustavu grijanja i/ili pripreme PTV-a i kao izvor rashladnog učina u sustavu ventilacije i klimatizacije.

Dizalice topline se mogu koristiti i u raznim proizvodnim pogonima i procesima:

- a) kao izvor toplinskog učina u sustavu grijanja pogona, staklenika, za razne procese i sl.,
- b) kao izvor toplinskog i rashladnog učina u sustavu zagrijavanja, odnosno hlađenja procesne vode,
- c) kao izvor toplinskog učina u sustavu za proizvodnju vodene pare,
- d) kao izvor toplinskog učina u sustavu za sušenje i odvlaživanje (npr. u prehrambenoj, drvnoj i industriji papira i celuloze, skladištima).

Ipak, dizalice topline se najčešće koriste kao izvor topline u sustavima grijanja i/ili pripreme PTV-a obiteljskih kuća, stambenih, javnih i drugih zgrada kao npr. hoteli, ugostiteljski objekti, domovi, kampovi, vojarne i sl.

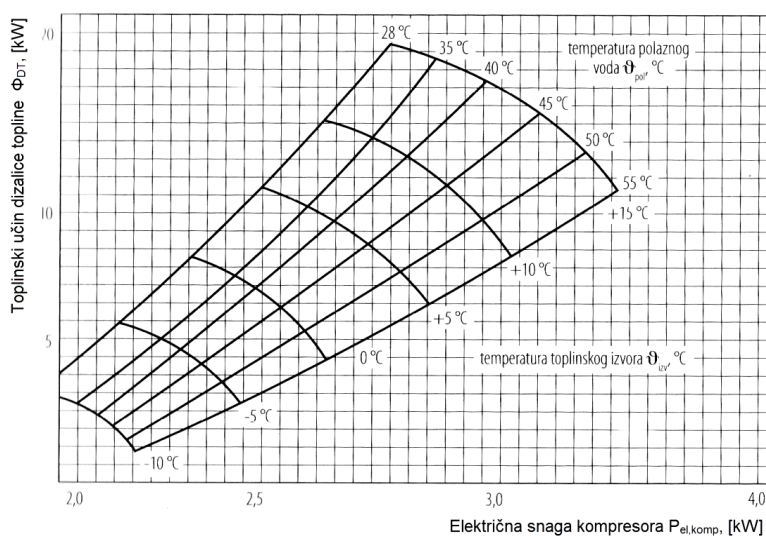
Za njihovu učinkovitu primjenu treba ispuniti nekoliko osnovnih uvjeta:

- 1) raspoloživost toplinskog izvora dovoljno visoke i razmjerno konstante temperature dulje vrijeme (npr. cijele sezone grijanja),
- 2) mala udaljenost toplinskih izvora i ponora,
- 3) umjerena temperaturna razina toplinskih ponora (npr. niskotemperaturni sustav grijanja),
- 4) veliki broj sati uporabe tijekom godine (radi veće isplativosti),
- 5) visoke cijene drugih izvora energije (čime se ostvaruju veće uštede).

Tablica 3. Najčešće mogućnosti za primjenu dizalice topline.

Toplinski učin, [kW]	Primjena	Najčešći toplinski izvori
3	Sustavi primjene PTV-a (osnovni izvor) i grijanje obiteljskih kuća (dodatni izvor)	<ul style="list-style-type: none"> - okolni zrak - otpadni, istrošeni ili onečišćeni zrak iz prostorija ili sustava ventilacije i klimatizacije
16	Sustavi grijanja i pripreme PTV-a obiteljskih kuća (osnovni izvor)	<ul style="list-style-type: none"> - okolni zrak - otpadni, istrošeni ili onečišćeni zrak iz prostorija ili sustava ventilacije i klimatizacije - tlo - podzemne vode - površinske vode (vodotoci i jezera)
100	Sustavi grijanja stambenih zgrada i manjih industrijskih pogona	<ul style="list-style-type: none"> - otpadni, istrošeni ili onečišćeni zrak iz prostorija ili sustava ventilacije i klimatizacije - tlo - podzemne vode - površinske vode (vodotoci i jezera) - morska voda
1000	Toplinarski sustavi manjih naselja i industrijskih pogona	<ul style="list-style-type: none"> - površinske vode (vodotoci i jezera) - morska voda - otpadne vode
10 000	Toplinarski sustavi većih naselja	<ul style="list-style-type: none"> - otpadni ili onečišćeni zrak iz industrije (otpadna toplina) - morska voda - otpadne vode

Najčešće mogućnosti za primjenu dizalice topline navedene su u tablici 3. Kad se dizalice topline koriste u sustavu grijanja, najčešće se radi o niskotemperaturnom toplovodnom grijanju prikazanog u tablici 4. Pri tome su najprikladniji sustavi površinskog grijanja (podno, zidno i stropno), iako se kao ogrijevna tijela mogu koristiti i radijatori, no oni moraju biti prilagođeni niskotemperaturnom pogonu. Postojeći sustav grijanja bez većih zahvata i troškova uglavnom ne mogu prilagoditi za primjenu dizalica topline. Glavni razlog zašto temperatura toplinskog ponora dizalica topline (ogrijevnih medija sustava grijanja) treba biti što niža je ostvarivanje većeg faktora grijanja (omjer toplinskog učina i pogonske električne snage) jer što je temperatura polaznog voda ogrijevnog medija niža, uz istu srednju temperaturu toplinskog izvora, faktor grijanja je veći što se vidi iz slike 6. [1,3]



Slika 6. Dijagram ovisnosti toplinskog učina dizalice topline o temperaturama toplinskog izvora i polaznog voda sustava grijanja, [1].

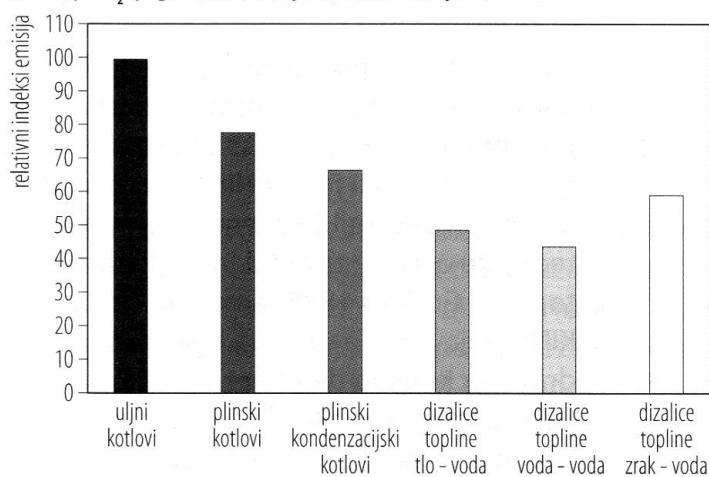
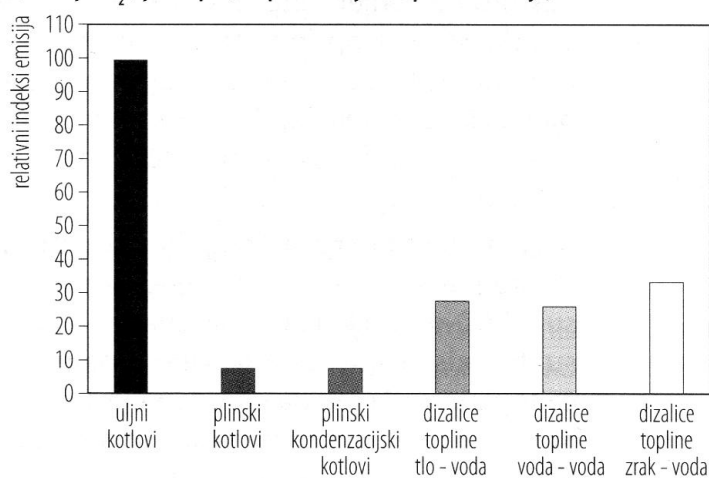
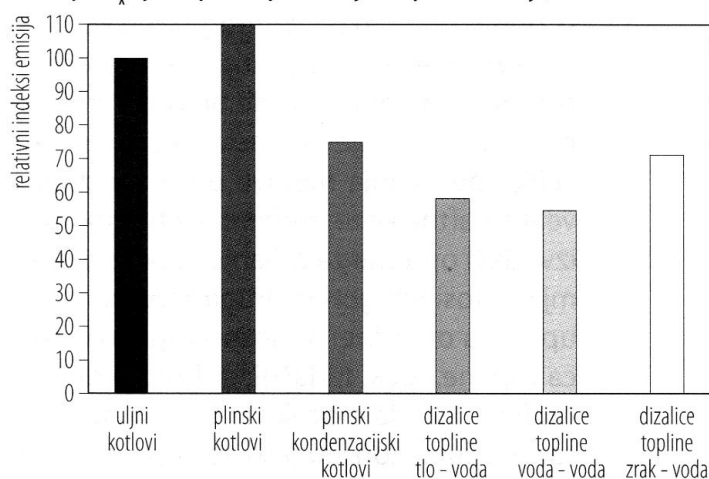
Tablica 4. Temperature kondenzacije u dizalici topline i izlazne temperature ogrijevnog medija za četiri najčešće namjene.

Namjena dizalice topline	Temperatura kondenzacije u dizalici topline, [°C]	Izlazna temperatura ogrijevnog medija iz dizalice topline, [°C]
Površinsko grijanje	45	40
Radijatorsko grijanje	60	55

Priprema PTV-a u stanu	55	50
Priprema PTV-a u stambenoj zgradi	70	65

Ako se dizalice topline osim za grijanje koriste i za pripremu PTV-a, trebalo bi izbjegavati istodoban rad oba sustava, a pogon izvesti tako da se naizmjenice pokrivaju potrebe jednog i drugog sustava.

Primjenom dizalica topline kao izvora topline za sustave grijanja moguće je smanjiti onečišćenje okoliša u usporedbi s uobičajnim izvorima. Emisija štetnih tvari iz najčešćih toplinskih izvora za sustave grijanja prikazuje se na slici 7. [1]

a) emisije CO₂ (pogonske, samo tijekom rada uređaja)b) emisije SO₂ (cjelokupne, od proizvodnje do uporabe uređaja)c) emisije NO_x (cjelokupne, od proizvodnje do uporabe uređaja)

Slika 7. Emisija štetnih tvari iz najčešćih toplinskih izvora za sustave grijanja, [1].

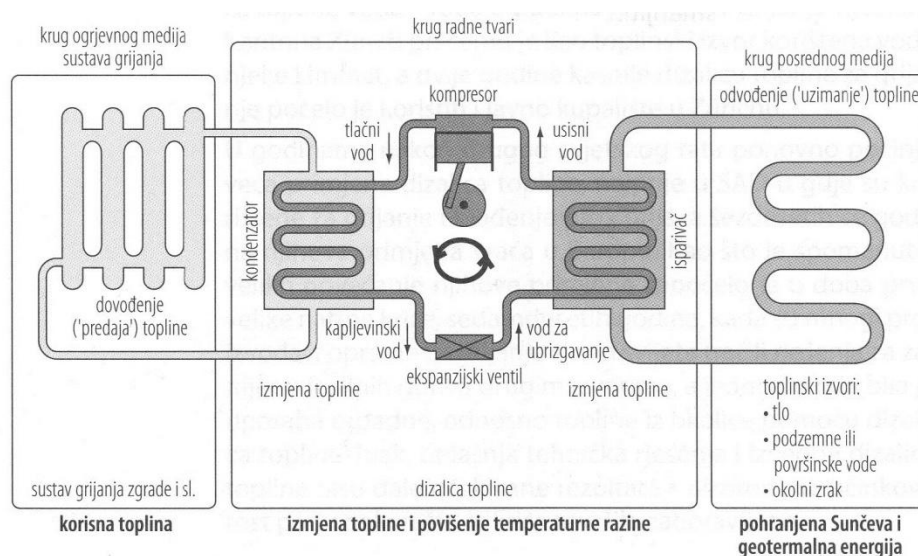
2.2. Kompresijske dizalice topline

2.2.1. Osnovne značajke kompresijskih dizalica topline

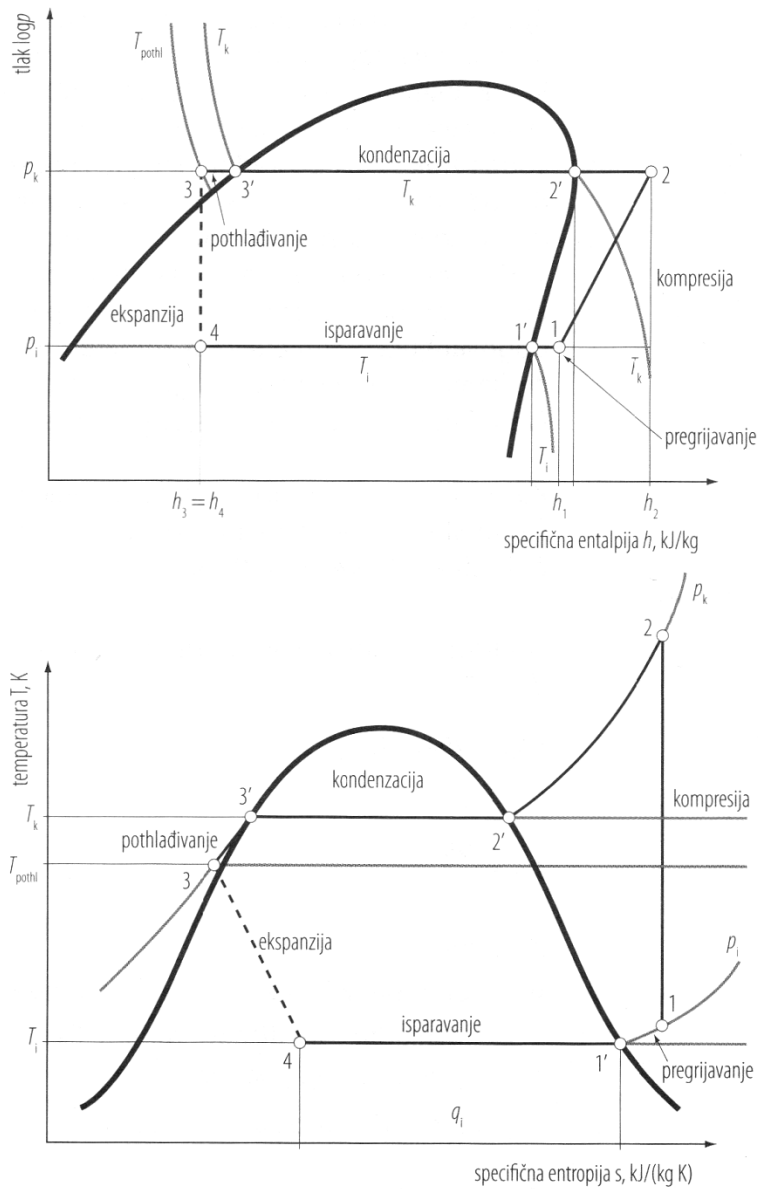
Kompresijske dizalice topline za povišenje energetske razine (temperature i tlaka) radne tvari, odnosno za omogućavanje kružnog procesa koriste mehanički rad kompresora. Od svih izvedbi, s obzirom na izvor dodatne energije za ostvarivanje kružnog procesa, u primjeni su najčešće. Sastoje se od sljedećih osnovnih dijelova:

- a) isparivača
- b) kompresora
- c) kondenzatora
- d) ekspanzijskog ventila.

Uz to, tu su i spojni vodovi koji povezuju ta četiri osnovna dijela, regulacijski i pomoćni elementi te radna tvar. Svi ti dijelovi u većini slučajeva nalaze se u zajedničkom kućištu i čine jedinstvenu cjelinu, odnosno dizalicu topline kao cjelinu. Da bi ona mogla raditi u sustavu grijanja, pripreme PTV-a, ventilacije i klimatizacije, potrebni su spojevi ma dovod posrednog medija, razvod ogrijevnog medija, električnu mrežu, sustav automatske regulacije i sl. [1]



Slika 8. Pojednostavljeni prikaz sastavnih dijelova kompresijske dizalice topline s toplinskim izvorom i sustavom grijanja, [1].



Slika 9. Prikaz stvarnog procesa u kompresijskoj dizalici topline u log-p-h i T-s dijagramima, [1].

Pojednostavljeni prikaz sastavnih dijelova kompresijske dizalice topline s toplinskim izvorom i sustavom grijanja prikazuje se na slici 8. Na slici 9. je prikaz stvarnog procesa u kompresijskoj dizalici topline u log-p-h i T-s dijagramima. Spoj na sustav grijanja izvodi se ovisno o ogrjevom mediju. Ako je to voda (za toplovodne sustave grijanja i sustave za pripremu PTV-a), potreban je priključak za polazni i povratni vod. Ako je topli zrak,

dizalica topline se može spojiti na kanalski razvod zraka ili je njezin kondenzator izveden tako da ga zrak opstrujava i potom izravno ulazi u prostoriju.

Spoj na toplinski izvor izvodi se ovisno i posrednom mediju. Kod dizalica topline tlo – voda i voda – voda posredni medij je u kapljevitom stanju (voda, rasolina, glikolna smjesa) i do isparivača se dovodi cjevovodima. Kod dizalica topline zrak – zrak posredni medij je zrak koji se do isparivača dovodi odgovarajuće izvedenim kanalima ili je isparivač izveden tako da ga zrak opstrujava. Dizalice topline tlo – voda i voda – voda koje kao izvor koriste površinske vode imaju i primarni sustav za izmjenu topline koji se sastoji od odgovarajućeg izmjenjivača topline s cijevnim razvodom i crpkama te regulacijskom, sigurnosnom i mjernom opremom (ventilima, razdjelnicima, osjetnicima i sl.).

Kao radne tvari u kompresijskim dizalicama topline uglavnom se koriste halogenirani ugljikovodici i zeotropne smjese (najčešće R 410A, R 407C i R134a). [1]

Toplinsku bilancu kompresijske dizalice topline opisuju jendadžbe:

$$\Phi_{DT} = \Phi_{DT,r} + P_{komp} \quad (6)$$

i

$$\varepsilon_{DT} = \Phi_{DT} / P_{komp} \quad (7)$$

pri čemu su:

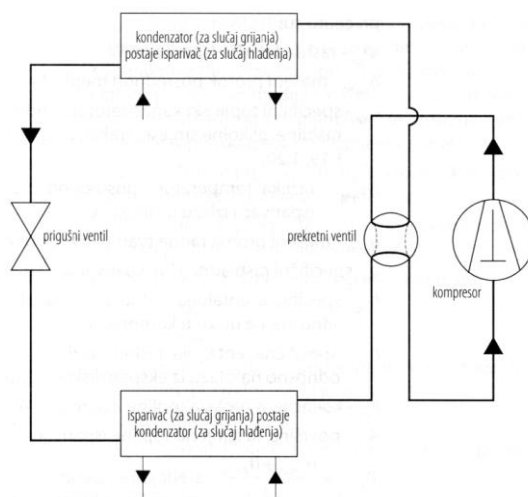
Φ_{DT} – toplinski učin dizalice topline (kondenzatora), [W],

$\Phi_{DT,r}$ – rashladni učin dizalice topline (isparivača), [W],

P_{komp} – snaga kompresora, [W],

ε_{DT} – faktor grijanja dizalice topline.

Kompresijske dizalice topline također se mogu izvesti tako da služe i kao izvor rashladnog učina. Tada se opremaju prekretnim ventilom pa kondenzator postaje isparivač, a isparivač kondenzator što se vidi iz slike 10.



Slika 10. Pojednostavljena shema dizalice topline s mogućnošću prekretanja procesa, [1].

2.2.2. Isparivač

Isparivač je dio rashladnog sustava (dizalice topline ili rashladnog uređaja) u kojem dolazi do potpunog isparivanja radne tvari, zahvaljujući dovođenju topline iz neposredne okolice (prostora ili medija). Isparivač dizalice topline je izmjenjivač topline u kojem radna tvar izmjenjuje toplinu s posrednim medijem (vodom, rasolinom, glikolnom smjesom, zrakom), pri čemu se on hladi.

Izmjenu topline u isparivaču dizalice topline opisuje jednačba:

$$\Phi_{isp} = \Phi_{DT,r} = \rho_{m, PM} \cdot c_{PM} \cdot \Delta\vartheta_{PM} = \rho_{m, RT} \cdot \rho_i = \rho_{m, PM} \cdot (h_1 - h_4) = k_{isp} \cdot A_{isp} \cdot (\Delta\vartheta_{PM, sr} - \Delta\vartheta_i) \quad (8)$$

pri čemu su:

- Φ_{isp} – rashladni učin isparivača, [W],
- $\rho_{m, PM}$ – maseni protok posrednog medija kroz isparivač, [kg/s],
- c_{PM} – specifični toplinski kapacitet posrednog medija (vode, rasoline, glikolne smjese, zraka), [J/kgK],
- $\Delta\vartheta_{PM}$ – razlika temperatura posrednog medija na ulazu i izlazu iz isparivača, [°C],
- $\rho_{m, RT}$ – maseni protok radne tvari u rashladnom sustavu, [kg/s],

ρ_i	–specifični rashladni učin isparivača, [J/kg],
h_1	–specifična entalpija radne tvari na izlazu iz isparivača, odnosno na ulazu u kompresor, [J/kg],
h_4	–specifična entalpija radne tvari na ulazu u isparivač, odnosno na izlazu iz ekspanzijskog ventila, [J/kg],
k_{isp}	–koeficijent prolaza topline isparivača, [W/(m ² K)],
A_{isp}	–površina na izmjenu topline isparivača, [m ²],
$\Delta\vartheta_{PM,sr}$	–srednja temperatura posrednog medija pri prolasku kroz isparivač, [°C],
$\Delta\vartheta_{PM,ul}$	–temperatura posrednog medija na ulazu u isparivač, [°C],
$\Delta\vartheta_{PM,izl}$	–temperatura posrednog medija na izlazu iz isparivača, [°C],
$\Delta\vartheta_i$	–temperatura isparavanja radne tvari, [°C].

Rashladni učin isparivača ovisi o ukupnoj površini za izmjenu topline, koeficijent prolaza topline izmjenjivača i razlici temperatura posrednog medija i radne tvari koja isparava. Ta bi razlika trebala biti što manja (4 – 8 °C) pa tlak isparavanja treba biti što viši. Proces u isparivaču započinje ulaskom radne tvari koja je u stanju mokre pare ($\Delta\vartheta_4 = \Delta\vartheta_{4,pf}$), odnosno ponaša se kao smjesa kapljevine i pare (sl.9.). Potom u isparivaču pri konstantnom tlaku (p_f) dolazi do njezinog isparavanja do granice zasićenja ($\Delta\vartheta_1'$) zbog dovođenja topline iz neposredne okolice. Kako bi se osiguralo potpuno isparavanje radne tvari, ona se pregrijava na temperaturu $\Delta\vartheta_1$ koja je viša od temperature isparavanja. Time se onemogućava ulazak neisparenih dijelova radne tvari u kompresor što može uzrokovati hidraulički udar i njegovo oštećivanje. Na izvedbu isparivača postavlja se nekoliko zahtjeva, a najvažniji su što manje i kompaktnije dimenzije (čime se ostvaruju manje i kompaktnije dimenzije cijelog uređaja), što je manji pad tlaka na strani posrednog medija i radne tvari (tj. što manji otpori njihovom strujanju kroz izmjenjivač) te omogućavanje što veće gustoće toplinskog toka pri izmjeni topline. [1]

Ovisno o izvedbi dizalice topline, odnosno o toplinskom izvoru koji se koristi, postoji više izvedbi isparivača:

- 1) Isparivači za dizalice topline s tлом kao toplinskom izvorom (posredni medij su rasoline ili glikolne smjese):

-
- a) pločasti (kompaktnih dimenzija i najčešće u primjeni)
 - b) s cijevnim snopom
 - c) s dvostrukom koaksijalnom cijevi
- 2) Isparivači za dizalice topline s podzemnom vodom kao toplinskim izvorom (posredni medij je voda):
- a) pločasti od nehrđajućeg čelika
 - b) s dvostrukom koaksijalnom cijevi od bakra ili legure bakra i nikla
- 3) Isparivači za dizalice topline s tlom kao toplinskom izvorom i izravnim isparavanjem (ne koristi se posredni medij, već se toplina izmjenjuje izravno s tlom)
- 4) Isparivači za dizalice topline s površinskom vodom kao toplinskim izvorom (posredni medij je voda)
- a) pločati
 - b) isparivači za dizalice topline s zrakom kao toplinskim izvorom (posredni medij je zrak):
 - a) lamelasti, s bakrenim cijevima i lamelama (rebrima) od bakra ili aluminijski
 - b) s cijevnom zmijom.

2.2.3. Kompresor

Kompresor je dio rashladnog sustava u kojem se radnoj tvari u parovitom stanju dovodenjem energije (rada) povisuje energetska razina (tj. tlak i temperatura) čime se ujedno omogućava njezino kruženje kroz rashladni sustav. Drugim riječima, zadatak kompresora je povisiti temperaturu i tlak radne tvari na vrijednosti kojoj se omogućava njezina kondenzacija na temperaturi koja je viša od temperature ogrijevnog medija. [1]

Rashladni učin kompresora mora biti jednak rashladnom učinku isparivača što se vidi iz slike 9.:

$$\Phi_{\text{kom}} = \Phi_{\text{isp}} = q_{m, RT} \cdot (h_1 - h_4) = q_{m, RT} \cdot q_i = \rho_1 \cdot V_{us} \cdot q_i = V_{us} \cdot q_{i,v} = \rho_1 \cdot A_c \cdot s \cdot f \cdot i \cdot \lambda \cdot q_i \quad (9)$$

pri čemu su:

$q_{i,v} = q_i \cdot \rho_1$ – specifični volumetrijski rashladni učin, [J/m³],

ρ_1 – gustoća radne tvari na ulazu u kompresor, odnosno na izlazu

iz isparivača (pri tlaku i temperaturi isparavanja), $[\text{kg}/\text{m}^3]$,

$V_{\text{us}} = V_{\text{st}} \cdot \lambda$ – dobava kompresora, $[\text{m}^3/\text{h}]$,

$V_{\text{st}} = A_c \cdot s \cdot f \cdot i$ – stapajni volumen kompresora, $[\text{m}^3/\text{s}]$,

Λ – volumetrički stupanj djelovanja (ovisan o temperaturi kondenzacije i isparavanja te svojstvima radne tvari),

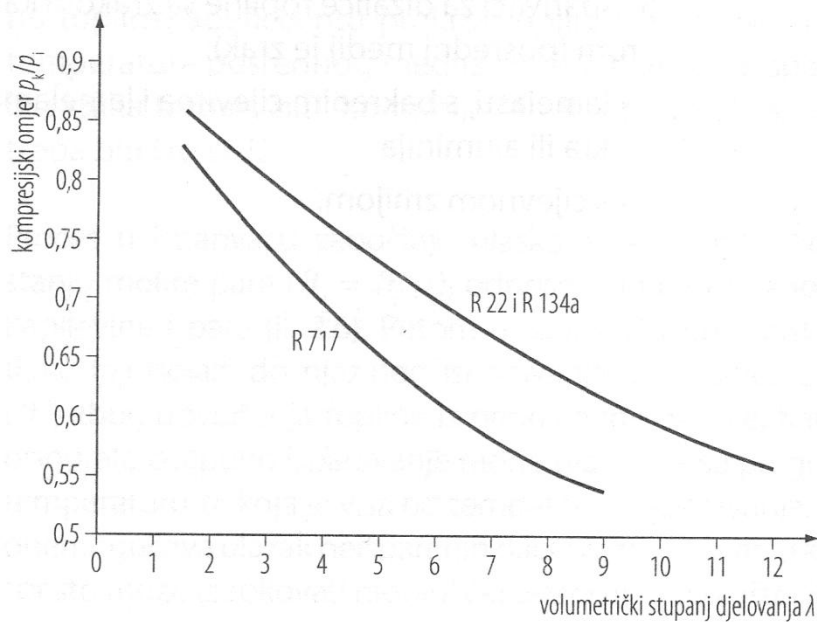
$A_c = (d^2 \cdot \pi) / 4$ – površina cilindra (klipnog) kompresora, $[\text{m}^2]$,

d – promjer cilindra (klipnog) kompresora, $[\text{m}]$,

s – stapaj klipnog kompresora,

f – frekvencija vrtnje vratila (klipnog) kompresora, $[\text{Hz}]$,

i – broj cilindra (klipnog) kompresora.



Slika 11. Dijagram ovisnosti volumetričkog stupnja djelovanja o kompresijskom omjeru za tri radne tvari, [1].

Dijagram ovisnosti volumetričkog stupnja djelovanja o kompresijskom omjeru za tri radne tvari prikazan je na slici 11.

Efektivna snaga kompresora je određena jednadžbom:

$$P_{\text{komp,ef}} = P_{\text{komp}} / (\epsilon_{\text{teo}} \cdot \eta_{\text{ind}} \cdot \eta_{\text{meh}}) \quad (10)$$

Pri čemu su:

$P_{\text{komp,ef}}$	– efektivna snaga kompresora, [W],
ε_{teo}	– teorijski faktor grijanja,
η_{ind}	– inducirani stupanj djelovanja,
η_{meh}	– mehanički stupanj djelovanja.

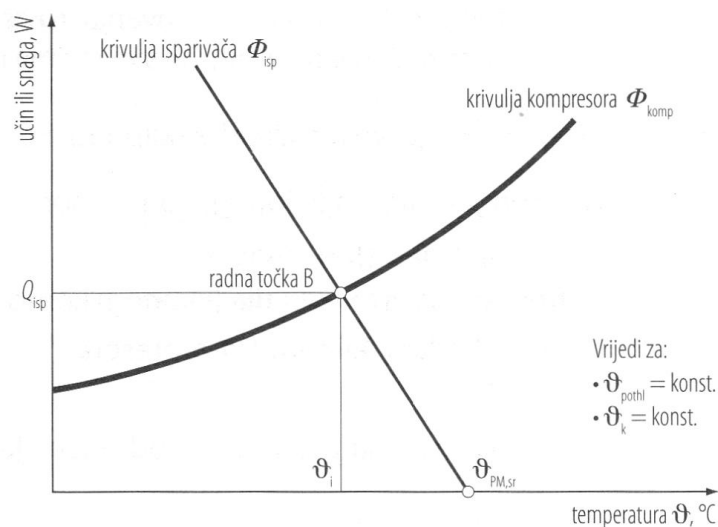
Snaga pogonskog stroja kompresora tada je jednaka:

$$P_{\text{el,komp}} = i_d \cdot P_{\text{komp,ef,max}} \quad (11)$$

Pri čemu su:

$P_{\text{el,komp}}$	– snaga pogonskog stroja kompresora (elektromotora), [W],
i_d	– inženjerski dodatak, = 1,15,
$P_{\text{komp,ef,max}}$	– najveći efekti učin kompresora, [W].

Kompresor mora omogućiti komprimiranje cjelokupne radne tvari iz isparivača ($\Phi_{\text{kom}} = \Phi_{\text{isp}}$). Odnosi rashladnog učina kompresora i isparivača mogu se prikazati u Q- ϑ dijagramu (sl.12). Točka u tom dijagramu u kojem se sjeku krivulje isparivača i kondenzatora, odnosno u kojoj vrijedi $\Phi_{\text{kom}} = \Phi_{\text{isp}}$ naziva se ravnotežnom ili radnom točkom. Pri tome je temperatura određena ravnotežnim učinkom isparivača i kompresora, ako se ne koristi posebna regulacijska armatura. [1]



Slika 12. Prikaz krivulja isparivača i kompresora te radne točke u Q – ϑ dijagramu.

Ovisno o načinu na koji se izvodi stlačivanje, postoji nekoliko osnovnih izvedbi kompresora:

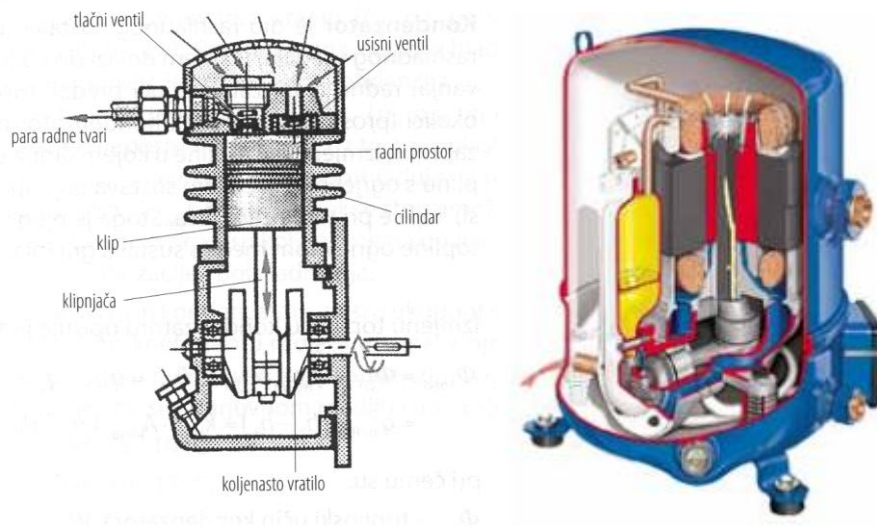
-
- a) klipni kompresori,
 - b) vijčani kompresori,
 - c) spiralni kompresori,
 - d) turbokompresori.

Ovisno o načinu ugradnje pogonskom motora, kompresori mogu biti:

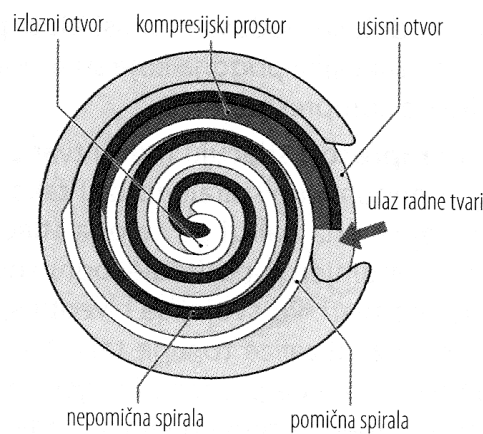
- a) otvoreni,
- b) poluhermetički,
- c) hermetički.

U dizalicama topline uglavnom se koriste klipni i spirani kompresori. Klipni kompresori prikazni na slici 13., stlačuju radnu tvar u cilindru naizmjeničnim pomacima klipa iz donje u gornju mrtvu točku. Određena količina radne tvari u cilindar ulazi dok je klip u donjoj, a iz njega izlazi kad je u gornjoj mrtvoj točki, pri čemu se on pomiče pod djelovanjem koljenastog vratila. U dizalicama topline najčešće se koriste hermetički klipni kompresori. Njihove su osnovne prednosti pouzdana i provjerena izvedba te niska cijena, dok su nedostaci pulsirajući pogon, razmjerno bučan rad te značajke pogona koje su mnogo manje u odnosu na spiralne kompresore.

Spiralni kompresori stlačuju radnu tvar pomicanjem pomične unutar nepomične spirale (puža) tako da se sužava prostor u kojem se ona nalazi pa se ona stlačuje prikazanog na slici 14. Time su stalno i ravnomjerno potiskuje, odnosno stlačuje jednaka količina radne tvari. Po svojoj se izvedbi spiralni kompresori koji se koriste za dizalice topline također ubrajaju u hermetičke. Njihove osnovne prednosti su jednostavna konstrukcija bez mnogo mehaničkih i dijelova podložnih mehaničkom trošenju i kvarovima (ventili), vrlo tih rad, kompaktna izvedba i mala masa te ravnomjerni rad. [1]



Slika 13. Shema klipnog kompresora, [1, 4].



Slika 14. Pojednostavljen prikaz rada spiralnog kompresora, [1].

2.2.4. Kondenzator

Kondenzator je dio rashladnog sustava (dizalice topline ili rashladnog uređaja) u kojem dolazi do kondenzacije radne tvari, zahvaljujući predaji topline neposredoj okolini (prostoru ili mediju). Kondenzator dizalice topline je izmjenjivač topline u kojem radna tvar izmjenjuje toplinu s ogrijevnim medijem sustava grijanja (vodom, zrakom i sl.) koji se pri tome zagrijava. Proces u kondenzatoru započinje ulaskom radne tvari koja je posve u plinovitom stanju, odnosno ponaša se kao plin. Potom se ona najprije hladi na temperaturu

kondenzacije i zatim se kondenzira na konstantnoj temperaturi i tlaku, pri čemu se toplina predaje neposrednoj okolini. Uz to, prije ulaska u ekspanzijski ventil radna tvar se dodatno podhlađuje na temperaturu podhlađivanja. Kondenzator se stoga može podijeliti na tri zone, ovisno o procesu koji se u njemu odvija: zonu pregrijavanja, kondenzacije i podhlađivanja. Toplinski učin kondenzatora ovisi o ukupnoj površini za izmjenu topline, koeficijentu prolaza topline izmjenjivača te razlici temperatura radne tvari koja kondenzira i ogrijevnog medija. Ta razlika ovisi o ogrijevnom mediju i uobičajno iznosi, [1]:

- a) za vodu: 5 – 10 °C,
- b) za zrak: 10 – 15 °C.

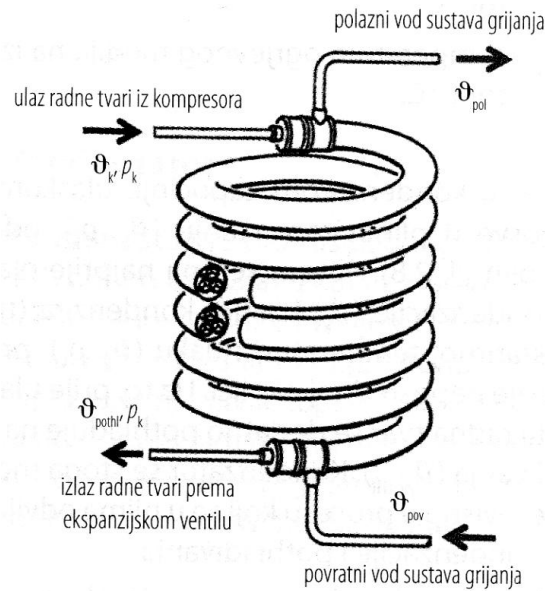
Na izvedbu kondenzatora postavlja se nekoliko osnovnih zahtjeva koji su gotovo isti kao i za isparivač: što manje i kompaktnije dimenzije, što manji pad tlak na ogrijevnoj strani medija i radne tvari te omogućavanje što veće gustoće toplinskog toka pri izmjeni topline.

S obzirom na ogrijevni medij koji se koristi, postoji dvije osnovne izvedbe kondenzatora za dizalice topline, [1]:

- a) vodom hlađeni, kada se kao ogrijevni medij koristi voda (za sustave toplovodnog grijanja i pripreme PTV-a),
- b) zrakom hlađeni, kada se kao ogrijevni medij koristi zrak (za sustave toplozračnog grijanja, ventilacije i klimatizacije).

S obzirom na konstrukciju, u dizalicama topline se najčešće koriste dvije izvedbe kondenzatora:

- a) pločasti od nehrđajućeg čelika,
- b) s dvostrukom koaksijalnom cijevi od bakra ili legure bakra i nikla, prikazanog na slici 15.



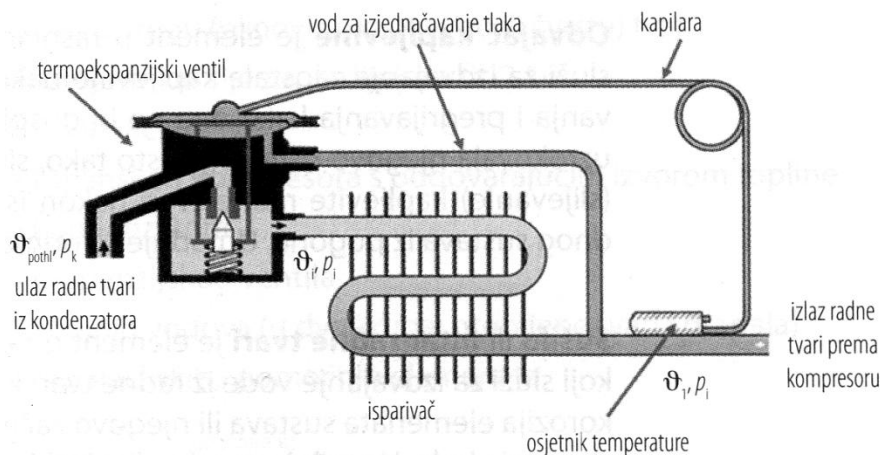
Slika 15. Pojednostavljena shema kondenzatora s dvostrukom koaksijalnom cijevi, [1].

2.2.5. Ekspanzijski ventil

Ekspanzijski ventil je dio rashladnog sustava u kojem se u radnoj tvari u kapljevitom stanju snižava energetska razina (tj. temperatura i tlak). Stoga je njegov zadatak sniziti temperaturu i tlak radne tvari na vrijednost na kojoj se omogućava njezino isparavanje na temperaturi koja je niža od temperature posrednog medija. Procesu u ekspanzijskom ventilu započinje ulaskom radne tvari koja je posve u kapljevitom stanju, a često i podhlađena prikazanog na slici 9. Potom ona ekspandira, uz snižavanje temperature i tlaka do vrijednosti temperature i tlaka isparavanja, s kojim ulazi u isparivač, pri čemu ona djelomično isparava. Istodobno se omogućava prilagodba volumnog protoka radne tvari potrebnom rashladnom učinku isparivača. [1]

Danas se najčešće koriste tri osnovne izvedbe ekspanzijskih ventila:

- a) jednostavna kapilarna cijev;
- b) termostatski ekspanzijski ventili;
- c) ekspanzijski ventili s elektroničkim upravljanjem.



Slika 16. Pojednostavljena shema termoekspanzijskog ventila s vanjskim izjednačavanjem tlaka i njegove uloge u rashladnom sustavu.

2.2.6. Ostala oprema kompresijske dizalice topline

U ostalu opremu kompresijskih dizalica topline ubrajaju se vodovi za radnu tvar kojima se povezuju njezini osnovni dijelovi, te razni regulacijski i pomoćni elementi kojima se ostvaruje njezin siguran i pouzdan rad u svim okolnim uvjetima. Tu su i priključci kojima se uopće omogućava njezin rad kao izvora topline u sustavu grijanja, odnosno spojevi na dovod posrednog i ogrijevnog medija.

Spojni vodovi:

- a) usisni vod: između isparivača i kompresora,
- b) tlačni vod: između kompresora i kondenzatora,
- c) kapljevinski vod: između kondenzatora i ekspanzijskog ventila,
- d) vod za ubrizgavanje: između ekspanzijskog ventila i isparivača.

Kad se kao radna tvar koristi ugljikovodici, spojni vodovi se u pravilu izrađuju od bakra.

Odvajač ulja služi za izdvajanje ulja za podmazivanje kompresora iz njegove smjese s radnom tvari kako bi se ona mogla vratiti u kompresor.

Odvajač kapljevine služi za izdvajanje zaostale kapljevine nakon procesa isparavanja i pregrijavanja kako ona ne bi dospjela u kompresor i uzrokovala njegovo oštećenje. Ugrađuje se odmah iza isparivača.

Sušilo ili filter radne tvari služi za izdvajanje vode iz radne tvari kako bi se spriječila korozija elemenata sustava ili njegovo začepeljivanje u slučaju stvaranja leda. Ugrađuje se u kapljevinski vod, a kao sredstvo za sušenje se koristi silikagel ili molekularna sita.

Pokazno staklo sa pokazivačem kapljevine služi za provjeru ispravnosti rada. Ugrađuje se ispred ekspanzijskog ventila.

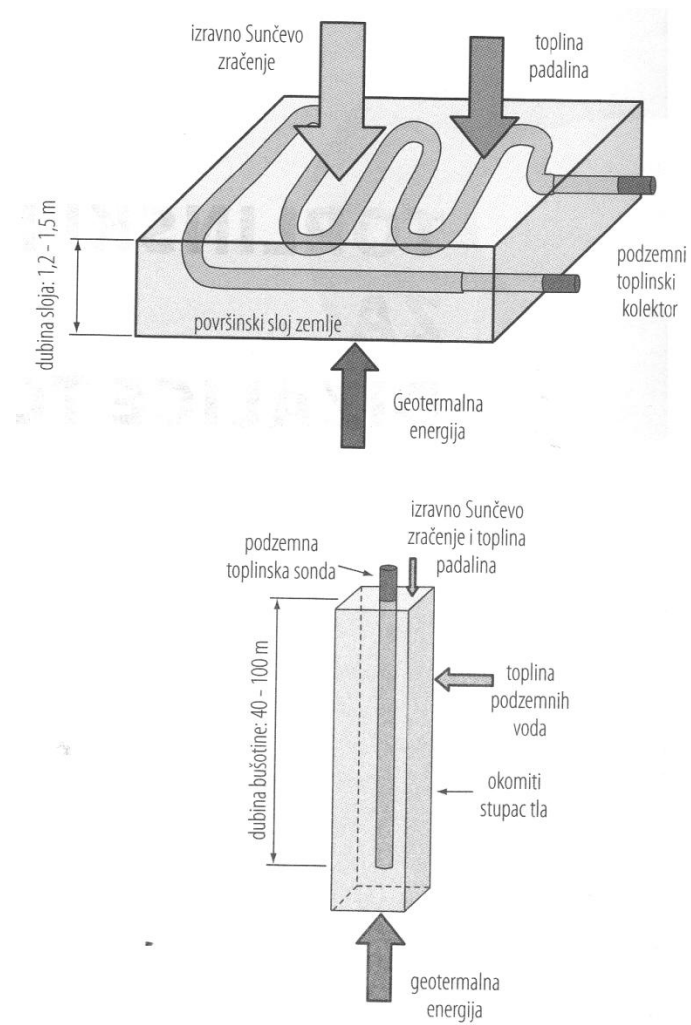
Osjetnik zaleđenosti isparivača služi za otkrivanje prisutnosti leda na vanjskim površinama isparivača, a s ledom smanjuje se izmjena topline. [1]

2.3. Dizalice topline s tlom kao toplinskim izvorom

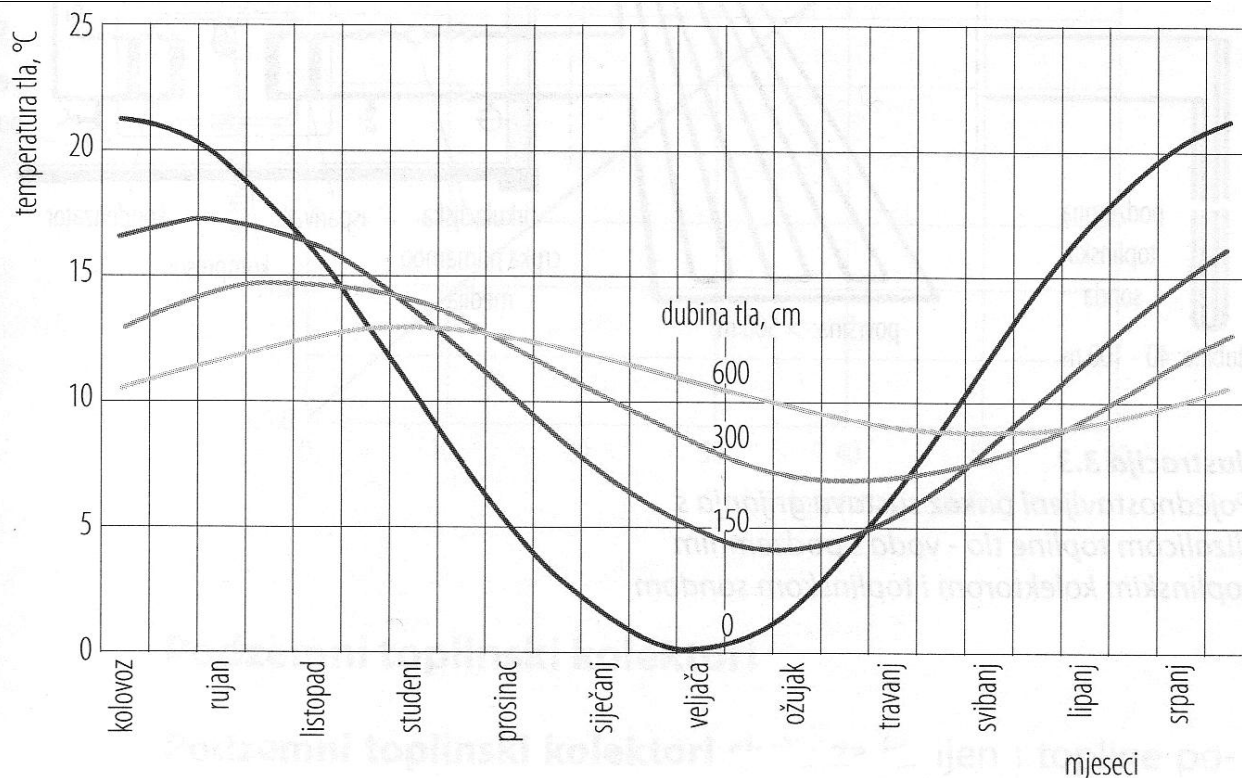
2.3.1. Tlo kao toplinski izvor

Kada se govori o tlu kao toplinskom izvoru za dizalice topline, misli se na toplinsku energiju površinskih ili podzemnih slojeva zemlje. Ona najvećim dijelom potječe od sunčeve energije koja je do tla došla zračenjem ili izmjenom topline s padalinama, a manjim dijelom od geotermalne energije same zemlje. Osnovna značajka tla kao toplinskog izvora je sposobnost pohrane toplinske energije cijele godine, što omogućava njegovo iskorištavanje cijele godine.

Izmjena topline s tlom ovisi o njegovom koeficijentu toplinske vodljivosti (najčešće $\lambda = 1 - 3 \text{ W/(mK)}$), gustoći i sastavu te specifičnom odvajanju topline. Geološkim i termodinamičkim ispitivanjima pokazano je da se temperatura do oko 10 m dubine tijekom godine mijenja zbog atmosferskih utjecaja (padalina, izmjene godišnjih doba) dok na većim dubinama razmjerno stalna što se vidi iz slike 18. [1]



Slika 17. Shema iskorištavanja tla kao toplinskog izvora za dizalice topline, [1].

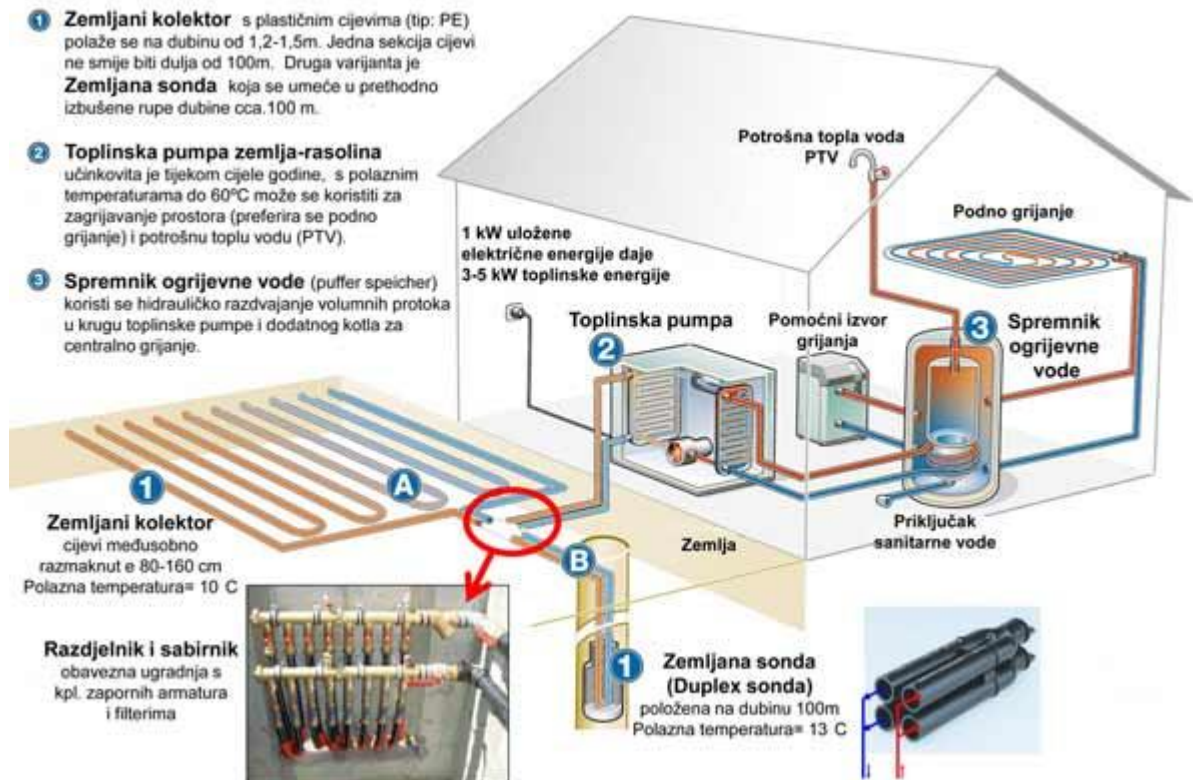


Slika 18. Dijagram ovisnosti temperature o dubini tla tijekom godine, [1].

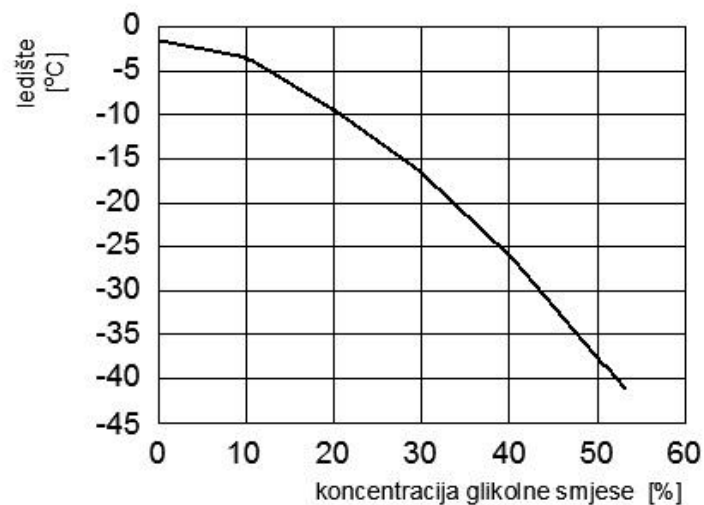
Za iskorištavanje topline tla koristi se dizalica topline tlo – voda. Kako bi se omogućila izmjena topline između tla i posrednog medija dizalice topline koriste izmjenjivač topline koji se ukopava u tlo. Pri tome postoje dvije izvedbe izmjenjivača:

- a) podzemni toplinski kolektori ili kolektorska polja;
- b) podzemne toplinske sonde.

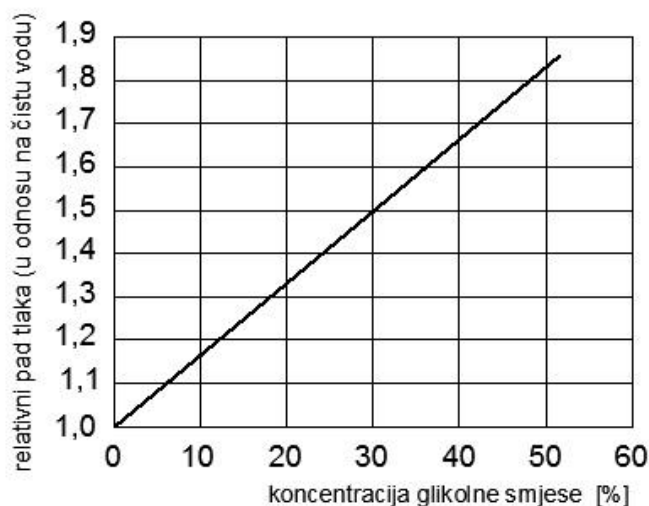
Kao posredni medij u pravilu se koristi rasoline ili glikolne smjese. Osnovni zahtjev koji se podstavlja na posredni medij je onemogućavanje njegovog smrzavanja u cijevima i smanjivanje pada tlaka pri prolasku kroz cijevi. Posredni medij preuzima toplinu od tla koje se pri tome hladi i predaje je radnoj tvari na isparivaču dizalice topline. [1, 3, 4]



Slika 19. Pojednostavljeni prikaz sustava grijanja s dizalicom topline tlo – voda s podzemnim toplinskim kolektorom i toplinskom sondom, [3].



Slika 20. Dijagram ovisnosti ledišta glikolne smjese o koncentraciji glikola, [1].



Slika 21. Dijagram ovisnosti pada tlaka u cijevima o koncentraciji glikola, [1].

Na slici 20. prikazan je dijagram ovisnosti leđišta glikolne smjese o koncentraciji glikola, a na slici 21. se vidi ovisnosti pada tlaka u cijevima o koncentraciji glikola.

2.3.2. Podzemni toplinski kolektori

Podzemni toplinski kolektori služe za izmjenu topline posrednog medija i površinskih slojeva (do dubine 2 m) kod primjene dizalice topline tlo – voda. Radi se o izmjenjivačima topline koji se pojavljuju u nekoliko osnovnih izvedbi:

- vodoravna kolektorska polja (sa serijski i paralelno povezanima cijevima),
- kanalni, kompaktni ili kolektori u jarku,
- spiralni kolektori (izvedbe „Slinky“ i „Svec“).

Osnovna vrijednost koja se koristi pri dimenzioniranju podzemnog toplinskog kolektora je rashladni učin dizalice topline ($\Phi_{DT,r}$), odnosno učin isparivača. Pri dimenzioniranju treba voditi računa o sljedećem:

- sastav tla, što utječe na njegov toplinski kapacitet, izmjenu topline i mogućnost njegove regeneracije,
- namjeni zemljišta (ne smije biti predviđeno za izgradnju, iskapanje ni sadnju većih bilja),

- c) rasponu temperatura tla (npr. 0 – 17 °C),
- d) temperaturnom radnom području dizalice topline, odnosno temperaturi posrednog medija (npr. od -5 do +15 °C);
- e) raspoloživost tla kao toplinskog izvora (cijele godine ili samo dijelu godine),
- f) načinu rada sustava grijanja s dizalicom topline (monovalentan ili bivalentan).

Na osnovi tih podataka dimenzionira se cijevni razvod i cirkulacijska crpka te određuju pogonski parametri sustava kao što su protok posrednog medija, padovi tlaka i sl.

Prosječno specifično odavanje topline tla na dubini 1,5 – 2 m iznosi 15 – 40 W/m².

Kao materijal iz izradu cijevi kolektora najčešće se koristi polietilen koji ima dobra toplinska (koeficijent toplinske vodljivosti) i fizikalna svojstva (otpornost na tlak, vlagu i djelovanje životinja). [1]

2.3.3. Vodoravna kolektorska polja

Vodoravna kolektorska polja najčešće su izvedba podzemnih toplinskih kolektora dizalice topline tlo – voda. Orijentacijski se može uzeti da bi površina zemljišta za polaganje kolektorskog polja trebala biti barem dva puta veća od površine prostora u zgradi koju treba grijati:

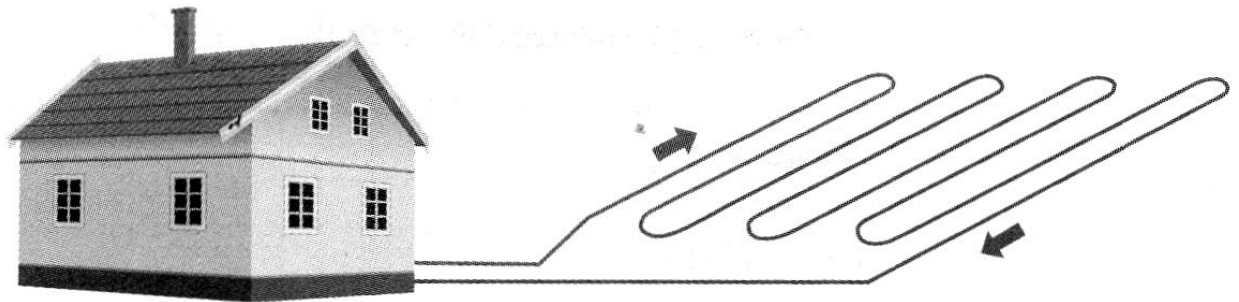
$$A_{zem,kol,uk} \geq 2 \cdot A_{pr,gr,uk} \quad (12)$$

Pri čemu su:

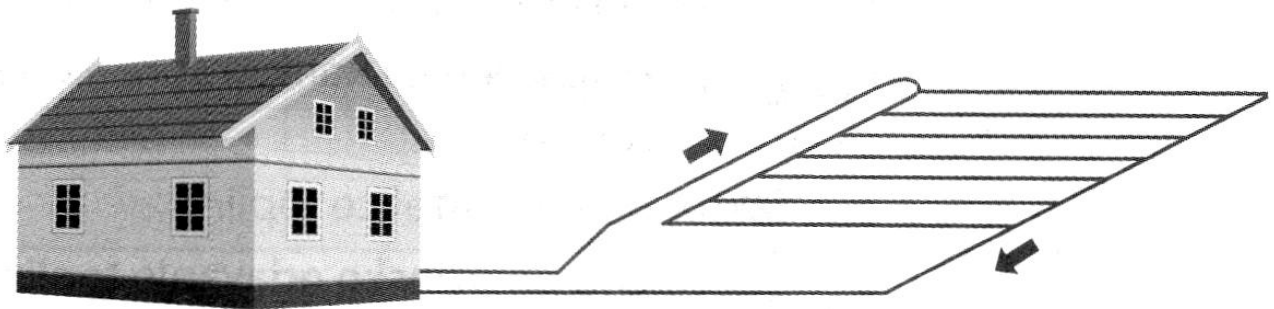
$A_{zem,kol,uk}$ – ukupna površina zemljišta za polaganje vodoravnog kolektorskog polja, m².

$A_{pr,gr,uk}$ – ukupna površina prostorija u zgradi koja se trebaju grijati, m².

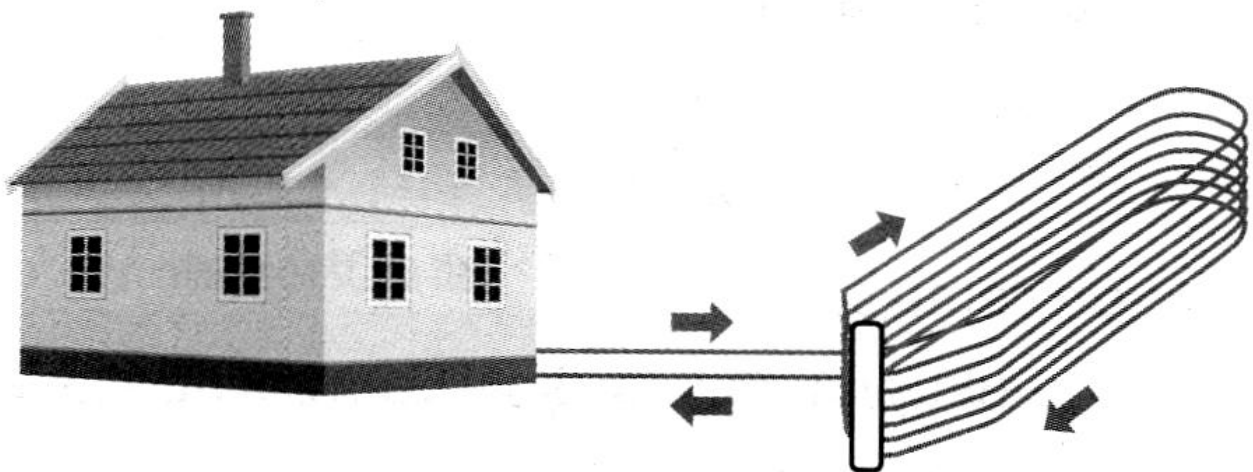
Na osnovi toga bi za sustav grijanja obiteljske kuće stambene površine 200 – 250 m² s dizalicom topline najmanja površina zemljišta za polaganje kolektora trebala iznositi oko 500 m², pa se takva rješenja koriste samo kada su veće površine zemljišta na raspolaganju. Istodobno, duljina pojedine petlje kolektorskog polja ne bi smjela biti veća od 100 m kako bi se izbjegli veliki padovi tlaka. Na slici 22 vidi se vodoravno kolektorsko polje sa serijski povezanim cijevima. Slika 23. prikazuje vodoravno kolektorsko polje sa paralelno povezanim cijevima. Slika 24. prikazuje kanalski kolektor (u jarku). Slika 25. prikazuje spiralni kolektor izvedbe 'Slinky'. Slika 26. prikazuje spiralni kolektor izvedbe 'Svec'. [1,6]



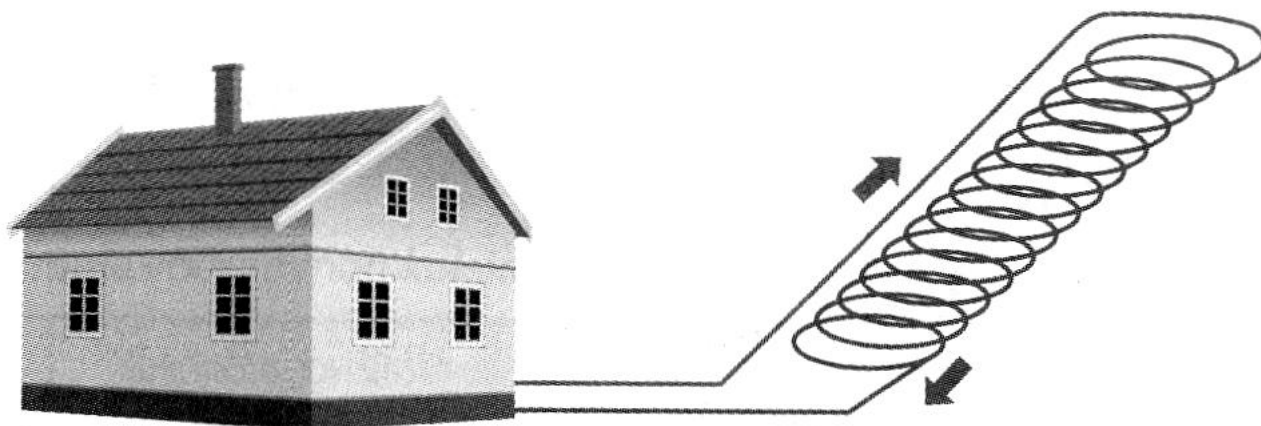
Slika 22. Vodoravno kolektorsko polje sa serijski povezanim cijevima, [1].



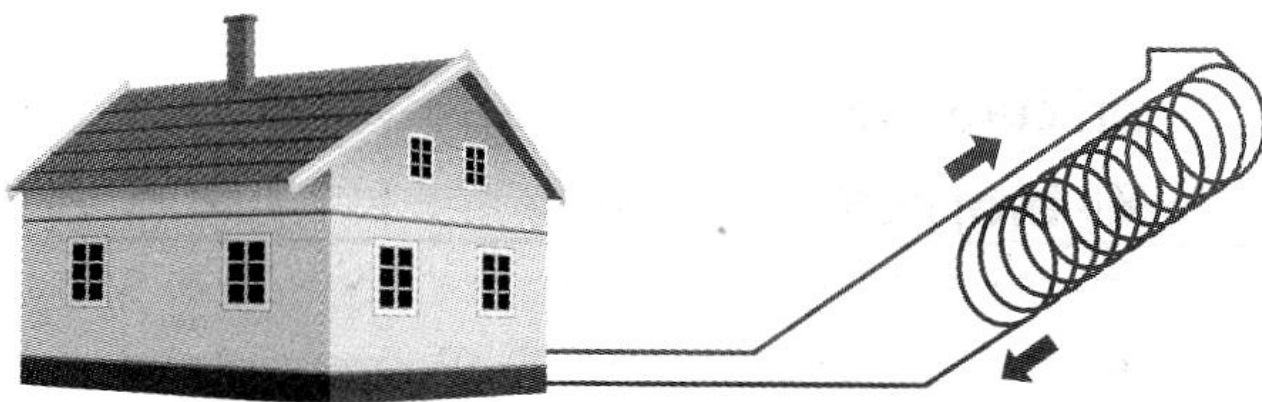
Slika 23. Vodoravno kolektorsko polje sa paralelno povezanim cijevima, [1].



Slika 24. Kanalski kolektor (u jarku), [1].



Slika 25. Spiralni kolektor (izvedba 'Slinky'), [1].



Slika 26. Spiralni kolektor (izvedba 'Svec'), [1].

Točnu vrijednost ukupne površine zemljišta za polaganje vodoravnog kolektorskog polja određuje se jednadžbom:

$$A_{zem,kol,uk} = \Phi_{DT,r} / q_{tlo} \quad (13)$$

pri čemu su:

$$\Phi_{DT,r} = \Phi_{DT} - P_{el,komp} = \Phi_{DT} \cdot (1 - \varepsilon_{DT}^{-1}) \quad \text{– rashladni učin dizalice topline isparivača, [W] (14),}$$

$P_{el,komp}$ – električna snaga kompresora (kompresijke) dizalice topline, [W],

ε_{DT} – faktor grijanja dizalice topline,

q_{tlo} – specifično površinsko odvajanje topline tla, [W/m²].

Ukupna duljina cijevi vodoravnog kolektorskog polja određena je jednadžbom:

$$L_{uk} = \frac{A_{zem, kol, uk}}{s} = \frac{\phi DT, r}{q_{tlo} \cdot s} \quad (15)$$

pri čemu su:

L_{uk} – ukupna duljina cijevi vodoravnog kolektorskog polja, [m],

s – međusoban razmak cijevi, [m].

Potreban broj petlji vodoravnog kolektorskog polja je određena jednadžbama:

g) za polietilenske cijevi dimenzija $\Phi 20 \times 2$ mm i duljinu petlje $L_{pet} = 100$ m:

$$X = A_{zem, kol, uk} \cdot 0.03 \quad (16)$$

h) za polietilenske cijevi dimenzija $\Phi 32 \times 2,9$ mm i duljinu petlje $L_{pet} = 100$ m:

$$X = A_{zem, kol, uk} \cdot 0.015 \quad (17)$$

pri čemu je:

X – broj petlji

Tablica 5. Potrebna površina zemljišta za polaganje vodoravnog kolektorskog polja ovisna o specifičnim toplinskim gubicima i površini stambenog prostora u zgradi te načinu rada dizalice topline.

Način rada dizalice topline	Površina stambenog prostora zgrade	Specifični toplinski gubici zgrade [W/m ²]		
		50	80	100
		Potrebna površina zemljišta A _{uk} [m ²]		
Monovalentni pogon	100	100	160	200
	150	150	240	300
	200	200	320	400
Bivalentni pogon	100	50	80	110
	150	75	120	165
	200	100	160	220

Tablica 6. Specifično odavanje topline tla za primjenu podzemnih toplinskih kolektora ovisno o sastavu tla.

Vrsta tla	Specifično površinsko odavanje topline tla q _{tlo} [W/m ²]
Suha pješčana tla	10
Vlažna pješčana tla	10 – 20
Suha ilovasta tla	20 – 25
Vlažna ilovasta tla	25 – 30
Vrlo vlažna ilovasta tla	30

Tablica 7. Smjernice za dimenzioniranje vodoravnog kolektorskog polja.

Vrsta tla	Specifično površinsko odavanje topline tla q_{tlo} [W/m ²]		Međusoban razmak cijevi s [m]	Dubina polaganja cijevi H [m]	Najmanji razmak priključnih cijevi kolektora s_{kol} [m]
	Za 1800 h rada godišnje	Za 2400 h rada godišnje			
Suhi ne kompaktno tlo	10	8	1	1,2 – 1,5	$\geq 0,7$
Vlažno kompaktno tlo	20 – 30	16 – 24	0,8	1,2 – 1,5	$\geq 0,7$
Rastresito tlo	40	32	0,5	1,2 – 1,5	$\geq 0,7$

Ukupan volumen posrednog medija u cijevima vodoravnog kolektorskog polja i spojnim cijevima za povezivanje s razdjelnikom i sabirnikom (tj. s dizalicom topline) određuje se jednadžbom:

$$V_{PM} = X \cdot L_{uk} \cdot V'_{L,k} + L_{sp} \cdot V'_{L,sp'} \quad (18)$$

pri čemu su:

- a) V_{PM} - ukupna količina (volumen) posrednog medija, [l],
- b) $V'_{L,k} = d_{u,k}^2 \cdot \pi / 4000$ - specifični (duljinski) volumen posrednog medija u cijevima vodovodnog kolektorskog polja, [l/m] (19),
- c) $d_{u,k}$ - unutarnji promjer cijevi kolektorskog polja, [mm],
- d) L_{sp} - duljina spojnih cijevi, [m],
- e) $V'_{L,sp'}$ - specifični (duljinski) volumen posrednog medija u spojnim cijevima, [l/m],
- f) $d_{u,sp}$ - unutarnji projer spojnih cijevi, [mm].

Ukupan pad tlaka u vodoravnom kolektorskopolju određuje se jednadžbom:

$$\Delta p_{uk,vkp} = \Delta p_{pet} + \Delta p_{sp} + \Delta p_{DT} \quad (20)$$

pri čemu su:

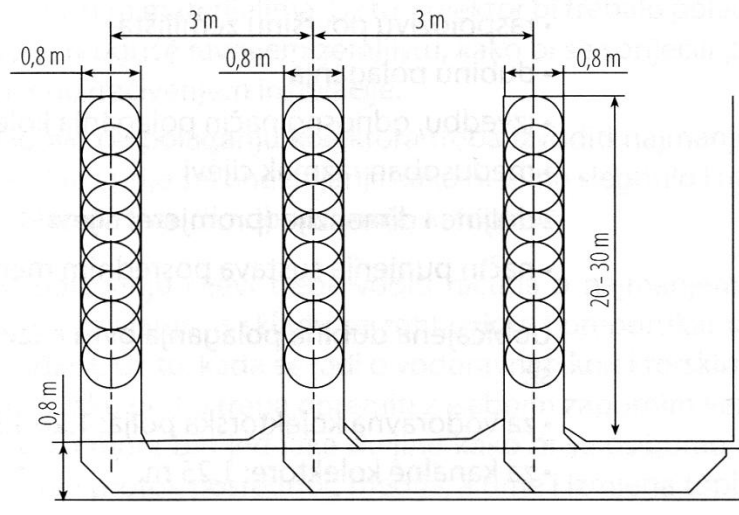
$\Delta p_{uk,vkp}$	– ukupni pad tlaka u vodoravnom kolektorskom polju, [Pa],
$\Delta p_{pet} = \Delta p'_{pet} \cdot L_{pet}$	- pad tlaka u jednoj petlji, [Pa] (21),
$\Delta p'_{pet}$	- pad tlaka po duljini petlje (ovisan o materijalu i dimenzijama cijevi te protoku kroz petlju), [Pa/m],
L_{pet}	- duljina jedne petlje vodoravnog kolektorskog polja, [m],
$\Delta p_{sp} = \Delta p'_{sp} \cdot L_{sp}$	- pad tlaka u spjnim cijevima, [Pa] (22),
$\Delta p'_{sp}$	- pad tlaka po duljini spojen cijevi (ovisan o materijalu i dimenzijama cijevi te protoku kroz petlju), [Pa/m],
Δp_{DT}	- pad tlaka kroz dizalicu topline, [Pa].

2.3.3.1. Kanalni, kompaktni ili kolektori u jarku

Kanalni, kompaktni ili kolektori u jarku također su vrlo česta izvedba podzemnih toplinskih kolektora dizalica toplina tlo – voda, a iznimno su popularni u središnjoj Europi (sl. 23.). Radi se o izvedbi kod koje se omogućava najveće specifično odavanje topline tla: 100-130 W/m², uz prosječnu temperaturu tla tijekom zime +2 °C. Pri tome se u iskopani kanal polaže petlja kolektorskih cijevi u spiralnom obliku, čime se zauzima mnogo manja površina zemljišta, [1]. Za ugradnju vrijedi nekoliko osnovnih smjernica, [1]:

- a) dubina polaganja: 1,6 – 2,0 m,
- b) najmanja širina kanala: 0,8 m,
- c) duljina kanala: 20 – 30 m,
- d) materijal i dimenzije cijevi kolektora: polietilen, Φ 32x3 mm,
- e) duljina cijevi u petlji: 125 m,

f) razmak cijevi: 3 m.



Slika 27. Osnovne dimenzije pri polaganju kanalskih podzemnih toplinskih kolektora, [1].

Osnovne dimenzije pri polaganju kanalskih podzemnih toplinskih kolektora prikazani su na slici 27.

2.3.3.2. Cirkulacijska crpka posrednog medija

Cirkulacijska crpka posrednog medija dio je svakog sustava koji čine dizalica topline tlo – voda i podzemni toplinski kolektor, odnosno toplinska sonda. Za njezino dimenzioniranje i odabir treba poznavati protok posrednog medija i pad tlaka pri strujanju medija kroz kolektor, odnosno kroz sondu. Protok posrednog medija pri tome se određuje jednadžbom, [1]:

$$V_{PM} = \frac{\phi DT}{\rho_{PM} \cdot C_{PM} \cdot \Delta \theta_{PM}} \quad (23)$$

Pri čemu su:

V_{PM} – volumenski protok posrednog medija, [m^3/s],

ρ_{PM} – gustoća posrednog medija (ovisna o sastavu glikolne smjese i temperaturi, [kg/m^3],

C_{PM} – specifični toplinski kapacitet posrednog medija (ovisan o sastavu

glikolne smjese), [J/kgK],

$\Delta\vartheta_{PM}$ – razlika temperatura posrednog medija na ulazu u kolektor (sondu) i izlazu iz njih, [°C].

Orijentacijski se može uzeti da protok posrednog medija treba biti oko 0,5 m³/hkW toplinskog toka koji predaje tlo. [1]

2.3.3.3. Osnovne smjernice za izvođenje podzemnih toplinskih kolektora

Pri izvođenju podzemnih toplinskih kolektora u obzir treba uzeti:

- a) raspoloživu površinu zemljišta
- b) dubinu polaganja
- c) izvedbu, odnosno način polaganja kolektora
- d) međusoban razmak cijevi
- e) duljine i dimenzije (promjere) cijevi
- f) način punjenja sustava posrednim medijem

Uobičajna dubina polaganja ovisi o izvedbi kolektora i iznosi:

- a) za vodoravna kolektorska polja: 1,2 – 1,5 m
- b) za kanalske kolektore: 1,25 m

Kao smjernica vrijedi da se cijevi kolektra polažu na dubinu najmanje 20 – 30 cm ispod razine smrzavanja tla (u središnjoj Europi), odnosno najmanje 80 cm u području gdje se ne očekuje smrzavanje tla (iznad te dubine postoji opasnost od prevelikog utjecaja na biljni svijet). Međusoban razmak cijevi kolektora pri polaganju ovise o sastavu tla i iznosi:

- a) za vlažna i kompaktna tla: 0,7 – 1,2 m
- b) za pjeskovita tla: najmanje 0,5 m.

Pri polaganju cijevi kolektora treba voditi računa o mogućem utjecaju cijevi i izmjene topline na raslinje, okolne instalacije (vodovodne, kanalizacijske, telekomunikacijske, plinske) i objekte (temelje zgrada i sl.), pri čemu najmanja udaljenost iznosi 1,5 m. Ako tu udaljenost nije moguće održati, raslinje, instalacije i objekti se moraju toplinski izolirati na odgovarajući način (slojem prikladnog materijala, cijevima ili pločastim toplinskim izolacijama i sl.). U obzir treba uzeti mogućnost smrzavanja slojeva tla oko cijevi, to ne utječe

na izmjenu topline (ponekad je čak i povoljnije), no može uzrokovat izdizanje tla iznad kolektora. Zbog toga izmjena topline s tlom ne bi trebala biti veća od 35 W/m cijevi kolektora. Oko zemljišta u koje se polaže kolektor ne bi trebalo biti objekata koji stvaraju sjenu veći dio dana. Na zemljištu također ne smije se saditi biljke dubokog i razgranatog korijenja niti ništa graditi, ni posuti asfaltom, betonom ili vodonepropusnim materijalima. Kolektor bi trebalo polagati na što ravnijem zemljištu, kako bi se spriječili problemi s odzračivanjem instalacije. Radove na polaganju kolektora treba izvoditi najmanje mjesec dana prije sezone grijanja kako bi se tlo slegnulo i omogućilo dobru izmjenu topline. Pri polaganju cijevi treba voditi računa o najmanjem polumjeru savijanja, u skladu s zahtjevima i preporukama proizvođača. Kad se radi o vodoravnim kolektorskim poljima, svaku petlju treba opremiti zasebnim zapornim ventilom i svaka mora biti jednake duljine kako bi se osiguralo ravnomjeren protok posrednog medija, a time i izmjena topline. Kako se cijevi kolektora ne bi oštetile, nakon što je iskop izveden, polažu se u posteljicu od finog pijeska ili na dno jame koja je očišćena od krupnog kamenja i stijena. Oko 30 cm iznad cijevi postavlja se traka za označavanje. U najvišoj točki kolektorskog sustava ugrađuje se razdjelnik, sabirnik i odzračni ventil. Razdjelnik se ugrađuje na usisnoj strani cirkulacijske crpke posrednog medija, a glavni odzračni ventil na najvišem mjestu ispred razdjelnika i sabirnika pojedinih petlji. Kompenzaciju toplinskih rastezanja posrednog medija u pravilu se u sustav ugrađuje i membranska ekspanzijska posuda. Cirkulacijska crpka, razdjelnik, sabirnik i ekspanzijska posuda u pravilu se postavljaju izvan zgrade u posebno izvedeno okno (predgotovljeno ili betonsko), a ako se postavljaju u kotlovnicu, treba ih toplinski izolirati (sl.24.). Osnovni razlog za postavljanje razdjelnika i sabirnika izvan zgrade je da su potrebna samo dva otvora u zidu umjesto više njih (za svaku petlju). [1, 3]

Veliku pozornost treba posvetiti prolasku cijevi kroz zid do prostorije kotlovnice u kojem se dizalica topline nalazi. Pri tome bi ona trebala biti što bliže priključnim cijevima na kolektor. Za prolazak kroz zid uobičajno se izvode dva otvora promjera 55 cm koja nakon provlačenja cijevi treba zabrtviti te toplinski, ako je potrebno i hidroizolirati. Dio cijevi kolektorskog sustava koji od dizalice topline vodi izvan zgrade (do duljine 1m od zida) također treba toplinski izolirati.

Kolektorski sustav puni se smjesom vode i glikola u omjeru 70:30. Prije punjenja valjalo bi provjeriti otpornost pripremljene glikolne smjese na smrzavanje. Sustav se puni pomoću crpke najmanjeg kapaciteta 6 m³/h pri čemu tlak punjenja iznosi 2 – 2,5 bar, a smatra

se nadopunjenim ako iz povratnog voda (tj. ulaznog voda u dizalicu topline) više ne izlazi zrak, pri čemu je poželjno da u cijevima bude pretlak. Za uklanjanje onečišćenja, pri punjenju se u pravilu ispušta prvih nekoliko litara glikolne smjese u posebnu posudu. Kako bi se uvijek mogla provjeriti količina i kvaliteta glikolne smjese, u sustav se ugrađuje osjetnik promjene tlaka u sustavu, a spaja se na regulacijsku jedinicu dizalice topline. [1]

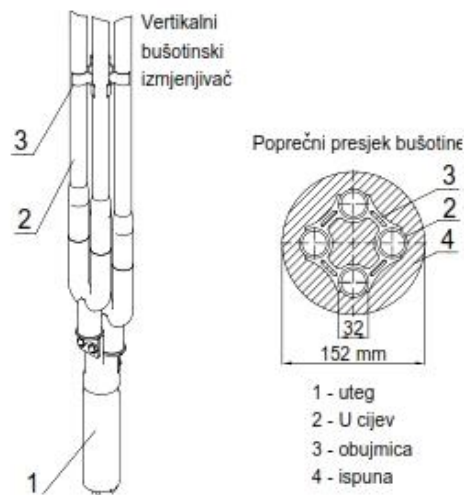
2.3.3.4. Podzemne toplinske sonde

Podzemne toplinske sonde služe za izmjenu topline posrednog medija i dubokih slojeva tla kod primjene dizalica topline tlo – voda. Radi se o okomitim izmjenjivačima topline koji se uobičajno koriste kada na raspolaganju nisu veće slobodne površine zemljišta. Dubina, promjer i broj bušotina u koji se ugrađuju cijevi izmjenjivača ovise o potrebama zgrade za toplinskom i rashladnom učinku dizalice topline.

Dvije su uobičajne izvedbe podzemnih toplinskih sondi:

- a) dvostruka U cijev od polietilena, pri čemu kroz jedan krak ulazi ohlađeni posredni medij iz dizalice topline, a kroz drugi se vraća zagrijan,
- b) koaksijala cijev, pri čemu je unutarnja cijev od polietilena i u nju ulazi ohlađeni posredni medij iz dizalice topline, dok je vanjska cijev od nehrđajućeg čelika i kroz nju se vraća zagrijani medij.

Kao posredni medij za podzemne sonde koristi se glikolna smjesa u omjeru 30% glikola i 70% vode. Specifično odavanje topline tla kod primjene podzemnih toplinskih sondi prosječno iznosi 25 – 100 W/m duljine sonde, odnosno dubine bušotine, a značajno ovisi o sastavu i kvaliteti tla, jer količina vlage i poroznosti imaju veliki utjecaj na toplinsku vodljivost što se vidi iz tablice 8. Na slici 28. prikazuje se dvostruka U cijev s utegom i poprečni presjek bušotine s izmjenjivačem topline i ispunom. [1]



Slika 28. Dvostruka U cijev s utegom i poprečni presjek bušotine s izmjenjivačem topline i ispunom, [1].

Potrebna duljina sonde određuje se na osnovi rashladnog učina dizalice topline i specifičnog odavanja topline tla pomoću jednadžbe:

$$L_{sonda} = \frac{\phi DT, r}{q'_{tlo}} \quad (24)$$

pri čemu su:

L_{sonda} - duljina sonde, [m],

q'_{tlo} - specifično dubinsko odavanje topline tla, [W/m].

Tablica 8. Specifično odavanje topline tla za primjenu podzemnih toplinskih sondi.

Vrsta tla	Specifično dubinsko odavanje topline tla q'_{tlo} [W/m]
Suhi sedimenti	30
Škriljac	55
Glina i vlažna ilovača	35
Vapnenac	55

Pješčenjak	60
Gnajs	65
Šljunak i pijesak	20
Stijene s velikom toplinskom vodljivosti	80
Slojevi s podzemnim vodama	100

Točna vrijednost specifičnog dubinskog odavanja topline tla, odnosno njegovih pojedinih slojeva po dubini bušotine može se utvrditi samo pri izvođenju bušotine. Tada se, ovisno o sastavu pojedinog sloja, ocjenjuje njegovospecifično odavanje topline. [1]

Pri ugradnji toplinskih sonde u obzir treba uzeti:

- a) promjer cijevi sonde: 25, 32 ili 40 mm
- b) prosječnu duljinu sonde: 40 – 100 m
- c) najmanju udaljenost između bušotina: 5 m (za sonde duljine 40 – 50 m), odnosno 6 m (za sonde veće od 50 m)
- d) najmanju udaljenost od temelja okolnih zgrada: 2 m
- e) izvedbu spojnih cijevi (moraju biti s usponom zbog odzračivanja)
- f) kvalitetu, odnosno vrstu tla te raspored podzemnih slojeva (bilo za izvođenje bušotine treba paziti da se ne prekinu vodonosni slojevi)

Nakon izvođenja bušotine i umetanja sonde, međuprostor se zapunjava prikladnom suspenzijom (npr. bentonitom, kvarcnim pijeskom). Kako bi se olakšalo umetanje, sonda se puni vodom, a često se njezin najdonji dio postavlja prikladan teret. Prije i nakon umetanja sonde u bušotinu treba provesti tlačne probe. Spajanje sustava sonde s dizalicom topline, odnosno prolazak cijevi kroz zid zgrade te punjenje sustava glikolnom smjesom izvodi se kao i za podzemne toplinske kolektore. [1]

2.4. Dimenzioniranje dizalice topline

2.4.1. Određivanje potrebnog toplinskog učina

Osnovna veličina na osnovi koje se dimenzioniraju, projektiraju i izvode sustavi grijanja, PTV-a, ventilacije i klimatizacije koji koriste dizalice topline je njegov toplinski učin koji se određuje na osnovi potreba za toplinom za grijanja, odnosno toplinskih gubitaka ili toplinskog opterećenja zgrade. [1]

$$\Phi_{DT} \geq \Phi_{TOZ} \quad (25)$$

Pri čemu su:

Φ_{DT} - toplinski učin dizalice topline, [W];

Φ_{TOZ} - toplinsko opterećenje zgrade, [W].

Toplinsko opterećenje zgrade određuje se postupkom prema HRN EN 12831. Osnovni cilj proračuna je određivanje projektnih toplinskih gubitaka i razmatra se:

- a) projektni transmisijski toplinski gubici
- b) ventilacijski toplinski gubici

Projektno toplinsko opterećenje zgrade je jednako zbroju projektnih transmisijskih i ventilacijskih toplinskih gubitaka i dodatnog učina za ponovno zagrijavanje svih prostorija koje se griju, [1]:

$$\Phi_{TOZ} = \Phi_{TG} + \Phi_{VG} + \Phi_{PZ} \quad (26)$$

pri čemu su:

Φ_{TOZ} - ukupno projektno toplinsko opterećenje zgrade, [W],

Φ_{TG} - projektni transmisijski toplinski gubici pojedine prostorije koja se grije, [W],

Φ_{VG} - projektni ventilacijski toplinski gubici pojedine prostorije koja se grije, [W],

Φ_{PZ} - dodatni učin za ponovno zagrijavanje pojedine prostorije (za slučaj periodičnog, povremenog ili rada sustava grijanja s prekidima), [W].

Prema normi 12 831 pojednostavljeni postupak računanja, [1]:

$$\Phi_{TG} = \sum A_j \cdot U_j \cdot f_j \cdot (\vartheta_{pro} - \vartheta_{ok}) \quad (27)$$

$$\Phi_{VG} = \rho_{zr} \cdot c_{zr} \cdot V_{min} \cdot (\vartheta_{pro} - \vartheta_{ok}) \quad (28)$$

$$\Phi_{PZ} = A_{pr} \cdot F_{zag} \quad (29)$$

Pri čemu su:

- U - koeficijent prolaza topline pojedinog građevinskog elementa u prostoriji, [W/m²K],
- A - površina pojedinog građevinskog elementa u prostoriji (pod, strop, zid, prozora), [m²],
- f - temperaturni korekcijski faktor pojedinog građevinskog elementa
- ϑ_{pro} - projektana temperatura prostorije koja se grija, [°C],
- ϑ_{ok} - vanjska projektana temperatura zraka, [°C],
- ρ_{zr} - gustoća zraka pri projektnoj temperaturi u prostoriji, [°C],
- $c_{zr} = 1005$ - specifični toplinski kapacitet zraka pri konstantnom tlaku, [J/kgK],
- $V_{zr,min} = V_{pr} \cdot n_{min} / 3600$ - najmanji potrebni protok zraka u prostoriji, [m³/s] (27),
- V_{pr} - volumen prostorije, [m³],
- n_{min} - najmanji potrebni broj izmjena zraka u prostoriji, [-],
- A_{pr} - površina poda prostorije, [m²],
- f_{zag} - korekcijski faktor za ponovo zagrijavanje, ovisan o vremenu za ponovo zagrijavanje nakon prekida grijanja.

Tablica 9. Osnove građevinsko – fizikalne značajke pojedinih građevinskih elemenata (prema HRN EN 12831).

Građevinski element	Debljina d [m]	Toplinski otpor R [m ² K/W]	Koeficijent prolaza topline U [W/m ² K]
Izolirani vanjski zid	0,29	2,31	0,433
Izolirani vanjski zid (prema susjednoj zgradi)	0,6	5,03	0,199
Neizolirani vanjski zid	0,21	0,45	2,229
Unutarnji pregradni zid (od gipskartonskih elemenata)	0,02	0,5	2,011
Unutarnji pregradni zid (od lagane opeke i gipskartonskih elemenata)	0,14	1,35	0,742
Unutarnja vrata	0,04	0,53	1,899
Strop prizemlje	0,09	2,13	0,469
Pod prizemlja	0,27	2,08	0,48

Prozori	-	-	2,1
Vanjska vrata	0,060	0,57	1,754
Izolirani vanjski zid podruma (prema tlu)	0,472	1,65	0,606
Izolirani vanjski zid podruma (prema zraku)	0,25	1,38	0,725
Izolirani pod podruma	0,442	2,19	0,457

Tablica 10. Temperaturni korekcijski faktor građevinskog elementa (prema 12831).

Toplinski gubici		Temperaturni korekcijski faktor građevinskog elementa f
Izravno prema okolici	Za izolirane toplinske mostove	1,00
	Za neizolirane toplinske mostove	1,40
	Za pozore i vrata	1,00
Prema negrijanim prostorijama	Za izolirane toplinske mostove	0,80
	Za neizolirane toplinske mostove	1,12
Prema tlu	Za izolirane toplinske mostove	0,30
	Za neizolirane toplinske mostove	0,42
Prema potkrovlju	Za izolirane toplinske mostove	0,90
	Za neizolirane toplinske mostove	1,26
Za ovješeni pod	Za izolirane toplinske mostove	0,90
	Za neizolirane toplinske mostove	1,26
Prema susjednoj zgradi	Za izolirane toplinske mostove	0,50
	Za neizolirane toplinske mostove	0,70
Prema dijelu susjedne zgrade	Za izolirane toplinske mostove	0,30
	Za neizolirane toplinske mostove	0,42

Tablica 11. Projektne temperature zraka u grijanim prostorijama (prema HRN EN 12831).

Vrsta ili namjena prostorije	Projektna temperatura u prostoriji ϑ_{zr} [°C]
Kupaonice	24
Stambene prostorije	20
Uredske prostorije	20
Prostorije za satanke, predavaonice, učionice	20
Restorani, kafići	20
Dječiji vrtić, jaslice	20
Trgovački centri	16
Muzeji, galerije	16
Crkve	15

Tablica 12. Najmanji potrebni broj izmjena zraka u prostoriji (prema HRN EN 12831).

Vrsta ili namjena prostorije	Najmanji potrebni broj izmjena zraka n_{\min} [h ⁻¹]
Kuhinje ili kupaonice s prozorom	1,5
Stambene prostorije	0,5
Uredske prostorije	1,0
Prostorije za sastanke, učionice, predavaonice	2,0

Tablica 13. Najmanji potrebni broj izmjena zraka u prostoriji (prema HRN EN 12831).

Najdulje vrijeme prekida rada sustava grijanja [h]	12									8		
Predpostavljeni pad temperature [°C]	2			3			4			1	2	3
Masa zgrade	Mala	Srednja	Velika	Mala	Srednja	Velika	Mala	Srednja	Velika	Mala	Srednja	Velika
Vrijeme potrebno za ponovno zagrijavanje	Korekcijski faktor za ponovno zagrijavanje f_{zag}											
1	18	23	25	27	30	27	36	27	31	11	22	45
2	9	16	22	18	20	23	22	24	25	6	11	22
3	6	13	18	11	16	18	18	18	18	4	9	16
4	4	11	16	6	13	16	11	16	16	2	7	13

Tablica 14. Prosječne specifične potrebe za toplotom zgrade, ovisno o njezinoj izvedbi.

Izvedba zgrade	Prosječne specifične potrebe ua toplotom [W/m ²]
Pasivne kuće	10
Niskoenergetske kuće	40
Novogradnja s dobrom izolacijom	50
Starije zgrade s naknadno postavljenom izolacijom	60
Starije zgrade bez izolacije	120

U tablici 9. prikazane su osnove građevinsko – fizikalne značajke pojedinih građevinskih elemenata prema normi HRN EN 12831. U tablici 10. vidi se temperaturni korekcijski faktor građevinskog elementa (prema 12831). U tablica 11. prikazane su projektne temperature zraka u grijanim prostorijama (prema HRN EN 12831). U tablica 12. vidi se najmanji potrebni broj izmjena zraka u prostoriji (prema HRN EN 12831). U tablici 13. isčitava se najmanji potrebni broj izmjena zraka u prostoriji (prema HRN EN 12831), dok u tablici 14. navedene su prosječne specifične potrebe za toplotom zgrade, ovisno o njezinoj izvedbi. [1]

2.4.2. Sustavi grijanja sa dizalicom topline

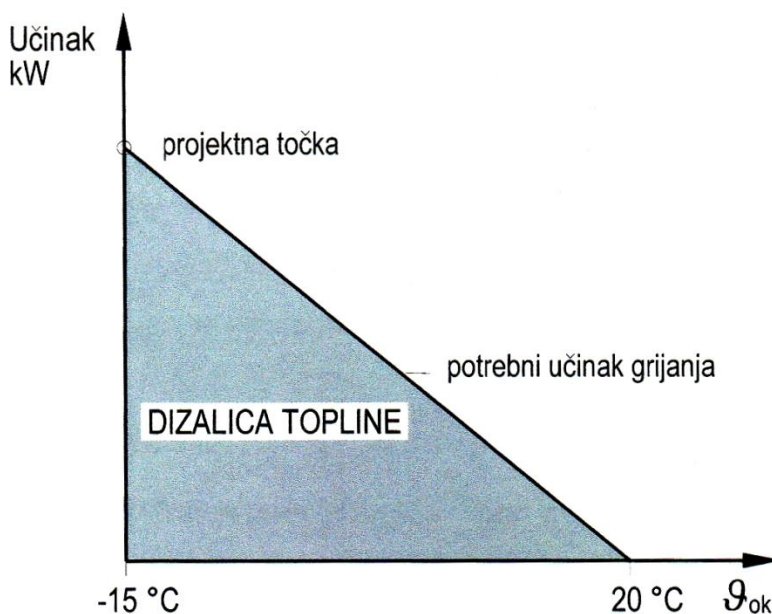
Toplovodni sustavi grijanja koji kao izvor koriste dizalicu topline mogu biti izvedeni kao radijatorski ili kao površinski (podno, stropno i zidno grijanje), a za njihov odabir je mjerodavna temperatura polaznog voda sustava. Temperatura polaznog voda sustava u pravilu treba iznositi 50 – 55 °C, a najviše do 65 – 70 °C, što znači da se radi o niskotemperaturnom sustavu grijanja. Zbog toga se u novim zgradama najčešće koriste za površinske sustave grijanja. Radijatorski sustavi se uobičajno koriste kod postojećih zgrada kod kojih se dizalica topline ugrađuje naknadno. Kod postojećih zgrada nerijetko je potrebno

poboljšavanje građevinsko – fizikalnih svojstava zgrade (poboljšavanje toplinske izolacije, sprječavanje toplinskih mostova i sl.). [1]

2.5. Način rada dizalice topline

2.5.1. Monovalentan način rada dizalice topline

Monovalentan način rada dizalice topline prikazan na slici 29. znači da se njome tijekom cijele sezone grijanja pokrivaju cjelokupne potrebe zgrade za toplinom, odnosno da je ona jedini izvor topline u sustavu grijanja i pripreme PTV-a. Osnovna pretpostavka za monovalentni način rada je cjelogodišnja raspoloživost toplinskog izvora, a za što su najprikladnije podzemne i površinske vode te površinski i duboki slojevi tla, a u nekim slučajevima i okolni zrak. Osnovna prednost monovalentnog načina rada je manje zauzimanje prostora u kućanstvu jer dizalica topline zauzima prostor koji bi inače zauzima kotao. Nema potrebe za dimnjakom, niti za izvođenjem plinskih instalacija, spremnika loživog ulja i sl. [1]



Slika 29. Monovalentni način rada, [4].

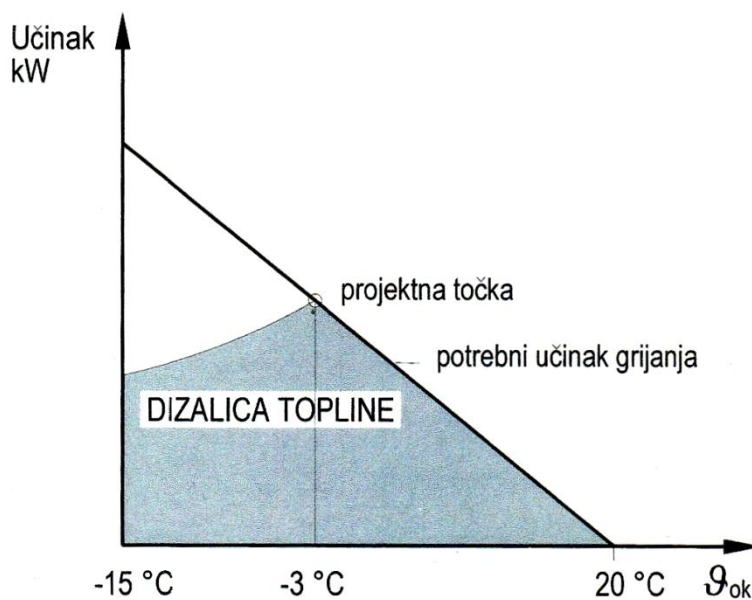
2.5.2. Bivalentni način rada dizalice topline

Bivalentni način rada dizalice topline prikazan na slici 30. znači da se njom tijekom sezone grijanja pokriva samo jedan dio potreba zgrade za topline, odnosno da u sustavu grijanja i pripreme PTV-a mora postojati još jedan izvor topline kao npr. plinski, električni, uljni ili kotao na kruta goriva. Takav je način uobičajan kod dizalice zrak – voda.

Tri su osnovne vrste bivalentnog načina rada:

- bivalentno – alternativni način rada
- djelomični bivalentno – usporedni način rada
- bivalentno – usporedni način rada

Osnovna prednost bivalentnog načina rada dizalice topline je mogućnost zadržavanja postojećeg kotla i sustava grijanja u uporabi te povećanje pogonske i sigurnosti opskrbe zgrade topline jer tada postoje dva izvora topline i dva energenta. [1]



Slika 30. Bivalentno - usporedni način rada, [4].

2.5.3. Monoenergetski i multivalentni način rada dizalice topline

Monoenergetski način rada dizalice topline znači da dodatni izvor topline za sustav grijanja i pripreme PTV-a kao energent koristi samo električnu energiju. Kod takvog načina rada jedini energent u zgradi je električna energija. Kao dodatni izvor topline najčešće služi akumulacijski spremnik – zagrijač tople vode s ugrađenim električnim grijačem.

Multivalentni način rada dizalice topline znači da dodatni izvor topline za sustav grijanja i pripreme PTV-a kao energent koristi npr. plin, lož ulje, sunčevu energiju. Znači, uz električnu energiju mora postojati najmanje još jedan energent u zgradi. Kao dodatni izvor topline tada mogu poslužiti plinski ili uljni kotlovi (niskotemperaturni ili kondenzacijski) ili solarni sustavi. [1]

3. POSTAVKA ZADATKA

Zadatak je razrada geotermalnog konstrukcijskog projekta zapadnog odjela na fakultetu. Promatrani odjel fakulteta iznosi 5217 m². Uspoređuju se geotermalni sustav grijanja, ventilacije i klimatizacije (GViK) i konvencionalni GViK sustav. Cilj rada je istražiti koji je sustav isplativiji s konstrukcijskog i financijskog aspekta. U proračun će se uzeti cijena instalacija i cijena energenata. Proračun će se izvršiti pomoću programa Engineering Equation Solver, koji će dati tražene rezultate i na osnovu njih će se odabrati isplativiji GViK sustav.

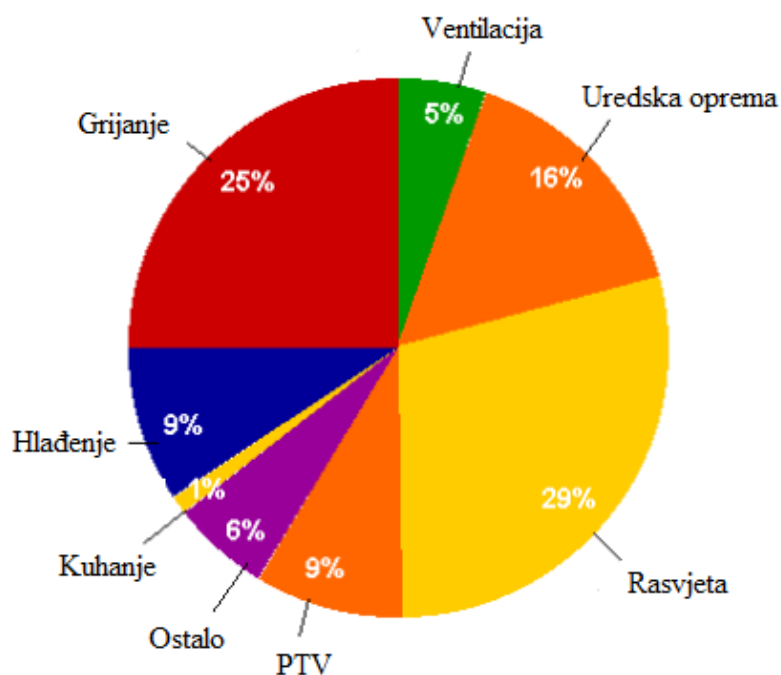
Prvi korak u razradi zadatka je proračun gubitaka i dobitaka odjela na fakultetu, zatim slijedi odabir vrste izmjenjivača topline te konačan proračun troškova ugradnje geotermalne dizalice topline.

4. RAZRADA ZADATKA

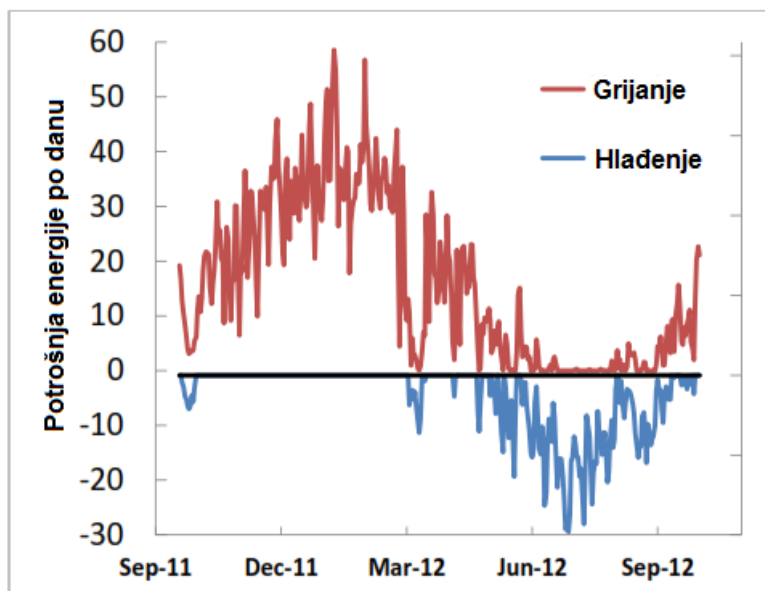
Za optimalan odabir dizalice topline za zgradu, važno je proračunati gubitke i dobitke topline cijele zgrade. U zimi, zgrada gubi toplinu transmisivskim toplinskim gubicima (provođenje topline kroz okolne plohe prema okolici i tlu, te prema okolnim prostorima s različitim opterećenjem) i ventilacijskim toplinskim gubicima (posljedica strujanja zraka kroz ovojnicu zgrade i između pojedinih njezinih dijelova, odnosno prostorija), dok ljeti dobiti topline su unutrašnji izvori topline (dobitak topline od ljudi, rasvjete, strojeva, susjednih prostorija,...) i vanjski izvori topline (dobitak topline kroz zidove i staklene plohe transmisijom i zračenjem).

Na promatranom odjelu fakulteta troši se 34% od ukupne potrošnje energije na grijanje i hlađenje zgrade što je vidljivo na slici 31. Uzevši u obzir tu činjenicu, pomoću geotermalne dizalice topline, 75% energije potrebne za grijanje i hlađenje zgrade dobije se iz obnovljivog izvora, iz zemlje, a preostalih 25% iz elektrane. To znači da bi sa geotermalnim HVAC sustavom imao 26% ukupne energije iz obnovljivih izvora.

Prvi korak u razradi zadatka je proračun gubitaka i dobitaka topline odjela na fakultetu. Gubici i dobiti topline su izračunati pomoću programa EES (Engineering Equation Solver). Za proračun je uzeto 6 najhladnijih i 6 najtoplijih dana u godini. Pomoću izračuna u prilogu 1 vidljivo je da je potreban GVİK sustav koji treba 611,923 kW za grijanje i 295,415 kW za hlađenje. Na slici 31. prikazana je potrošnja energije u godini dana na grijanje i hlađenje promatranog odjela. Također na slici 32. vidljiva je potrošnja energije na grijanje i hlađenje po mjesecima u godini dana.



Slika 31. Ukupna potrošnja energije promatranog odjela fakulteta.





Slika 32. Dijagram potrošnje energije na grijanje i hlađenje odjela.

Sljedeći korak u razradi zadatka je odabir vrste izvedbe izmjenjivača topline u geotermalnom sustavu. U razmatranje je uzeta vertikalna i horizontalna izvedba izmjenjivača

topline. U tablici 15. prikazana je usporedba prednosti i nedostataka vertikalne i horizontalne izvedbe.

Tablica 15. Prednosti i nedostaci kolektorskih polja.

	Horizontalni	Vertikalni
		
Prednosti	Plitki iskop, manji troškovi.	Mala dimenzija iskopa, velika učinkovitost.
Nedostaci	Velika dimenzija iskopa.	Veliki konstrukcijski troškovi.

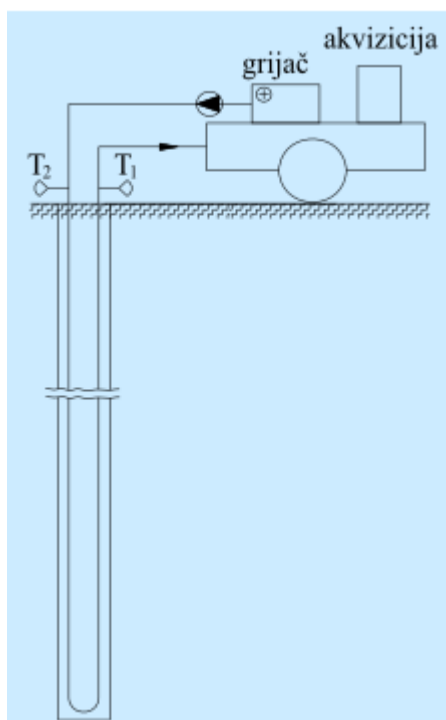
Kao najbolji izbor za odjel odabrana je vertikalna izvedba koja je prikazana na slici 33. Razlog zašto je odabrana vertikalna izvedba je potreba za manjim iskopom površine dvorišta nego horizontalna. Vertikalna izvedba će se nalaziti do dubine 100 m.



Slika 33. Vertikalni izmjenivači topline u geotermalnoj dizalici topline.

Nakon što je odabrana vertikalna izvedba kao jedini prihvatljivi izbor, potrebno je ustanoviti ukupne troškove njezine izvedbe. U proračun se uzima u obzir udaljenost izmjenjivača topline od fakulteta, promjer izmjenjivača, broj izmjenjivača, materijal izmjenjivača i razmak između izmjenjivača.

Za izračun promjera izmjenjivača i razmaka između njih potrebno je provesti test termičkog odziva tla s kojim se dobivaju vrijednosti toplinske vodljivosti tla λ [W/m·K] i unutarnji otpor bušotine R_b [m·K/W]. Ispitivanje toplinskog odziva tla, koji se prikazuje na slici 34., provodi se u pravilu višednevnim grijanjem bušotinskih izmjenjivača topline (72 sata), uz održavanje konstantne snage grijača.



Slika 34. Test toplinskog odziva tla.

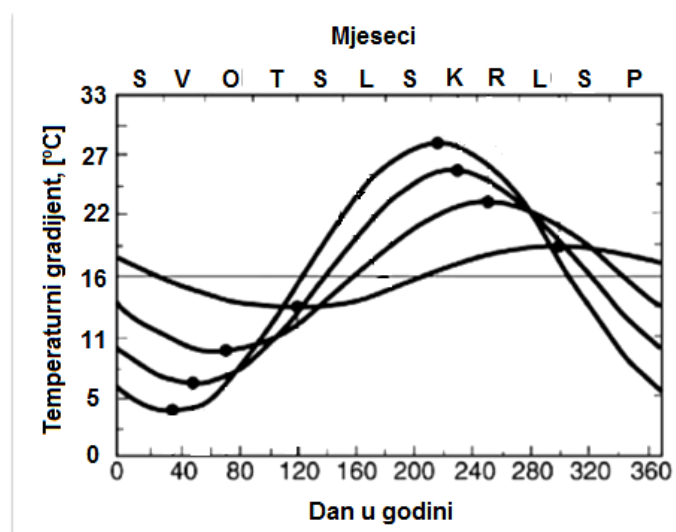
Slika 35. prikazuje dio uzoraka tla koji su uzimani na raznim dubinama bušotine. U početnih desetak metara tlo je sitno šljunčano, zatim postaje pjeskovito, da bi nakon petnaestak metara tlo bivalo zaglinjeno, i tako sve do 100 metara dubine.



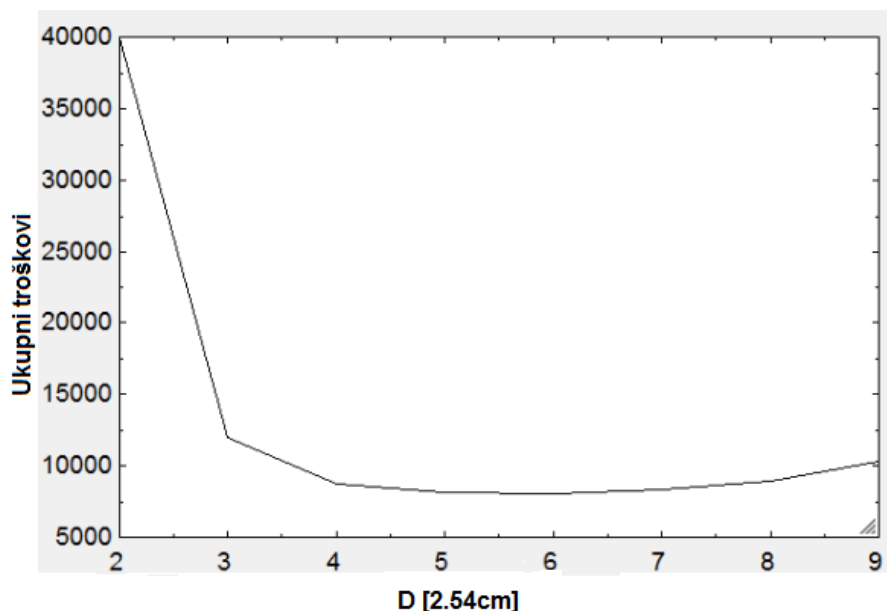
Slika 35. Uzorci tla po visini bušotine.

Razmak između izmjenjivača topline određujemo na temelju toplinske vrijednosti prijenosa topline od zemlje. Razmak između kolektora je veći ako se toplinska vodljivost povećava. Suprotnog od tog, s smanjenjem toplinske vodljivosti kolektori trebaju biti bliži da bi postigli istu količinu prijenosa topline. Na slici 37. prikazan je dijagram troškova u ovisnosti o promjeni promjera cijevi.

Na slici 36. je prikazan sinusoidalni temperaturni gradijent kako se mijenja u ovisnosti o dubini tla i danima u godini. Gornji sinusoidalni temperaturni gradijent je na dubini tla od 0,6 m, srednji na dubini 1,5 m, a donji na dubini 3,5 m.



Slika 36. Sinusoidalni temperaturni gradijent.



Slika 37. Troškovi cijevi u ovisnosti o promjeru cijevi.

Za moguću lokaciju ukopa izmjenjivača topline postoji pet potencijalnih lokacija u okrugu fakulteta. U tablici 16. je vidljiva detaljna razrada troškova po svakoj lokaciji. S porastom udaljenosti od odjela do lokacije izmjenjivača topline raste i količina materijala potrebna za konačnu konstrukciju kao i potrebna veća snaga dobavne pumpe. S tim porastom rastu i troškovi izvedbe.

Za izračun smo uzeli sljedeće cijene koje se nalaze u prilogu 2:

za cijevi: $C_1=3$ [€], $C_2=0,75$ [€/2.54cm], $C_3=1,5[30.54\text{cm}^{-2/3}]$, $C_4=30$ [€/30.48cm]

za dobavnu pumpu: $C_5=1,2$ [€], $C_6=8,4$ [€/30.54cm], and $C_7=2\ 324$ [€].

Tablica 16. Ukupni troškovi ovisno o lokaciji postavljanja kolektorskih polja.

Lokacija	Udaljenost od fakulteta [m]	Promjer cijevi [cm]	Troškovi cijevi [€]	Dobavna pumpa [€]	Ukupni troškovi [€]
Lokacija 1	50	30	5 192	2 925	8 116
Lokacija 2	170	30	17 002	3 248	20 251

Lokacija 3	370	35	36 989	3 253	40 242
Lokacija 4	580	35	57 658	3 516	61 175
Lokacija 5	690	35	68 485	3 654	72 139

Razlika troškova između najbliže i najudaljenije lokacije je 64 023 € , što znači da je najbliža lokacija 88,8 % jeftinija za izvedbu.

Prilikom razgovora s lokalnim dobavljačima dogovoreno je da je materijal cijevi polietilen visoke gustoće (HDPE). Polietilen je najčešće korišten polimer u industriji zbog dobrih mehaničkih svojstava koji omogućuje proizvodima. HDPE ima veću gustoću koja mora biti veća ili jednaka 0.941 g/cm³. Zbog toga taj materijal ima još bolja svojstva koja su zahtjevana prilikom protoka fluida kroz cijevi. Prednosti su dobra toplinska i fizikalna svojstva, kao što su koeficijent toplinske vodljivosti, otpornost na tlak i vlagu. Radi opasnosti od prevelikog pada tlaka ni jedan cjevovod ne smije biti dulji od 100 m, a svi izmjenjivači topline trebaju biti približno jednake duljine i time postizemo identične padove tlaka, a time i podjednake protočne uvjete. Slika 38. prikazuje cijevi izrađene od polietilena visoke gustoće.

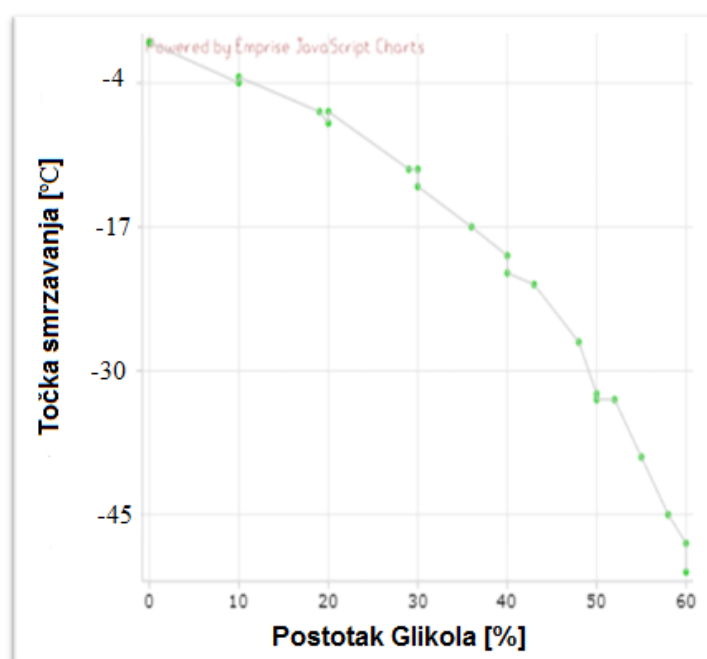


Slika 38. Cijevi od HDPE materijala.

Sljedeći korak u proračunu je izračun broja izmjenjivača topline potrebnih za energiju grijanja i hlađenja odjela. Na temelju dobivenih podataka izvršena je završna analiza u EES-u.

Pomoću izračuna gubitaka i dobitaka topline i analize tla dobili smo rezultate da za potrebe odjela fakulteta treba 88 vertikalnih izmjenjivača topline. Temperaturni interval radne tvari je od 0 – 32 °C. Zbog opasnosti od smrzavanja, radna tvar će biti voda s 10% glikolom. Promjer izmjenjivača topline će biti manji nego što bi bio sa radnom tvari od 100% vode. U tablici 17. prikazani su konačni detalji izmjenjivača topline.

Na slici 39. je prikazano kako se točka smrzavanja spušta s obzirom na postotak glikola s vodom u radnoj tvari.



Slika 39. Točka smrzavanja u ovisnosti o postotku glikola u radnoj tvari.

Tablica 17. Detalji kolektorskih polja.

Broj izmjenjivača topline	88
Dubina bušotine L_B [m]	100
Promjer bušotine D_B [mm]	127
Materijal	HDPE
Ukupni troškovi [€]	478 720
Vijek upotrebe [€]	50
Životni vijek [€]	50+

Tlo predstavlja ogroman toplinski spremnik koji se može koristiti kako za grijanje tako i za hlađenje prostora. Iako se hlađenje može ostvariti neposrednim korištenjem izmjenjivača topline u tlu, u svrhu grijanja je u pravilu potrebno upotrijebiti dizalicu topline. Ugradnjom prekretnog ventila, dizalica topline se načelno zimi može koristiti za grijanje, a ljeti za hlađenje. Koliko se topline može oduzeti tlu ovisi o njegovom sastavu i vlažnosti, te mjestu polaganja izmjenjivača topline. Do sada provedena istraživanja, kao i u praksi instalirani sustavi pokazuju da je temperatura tla na dubini od 2 m otprilike 7 do 10°C, a na dubini do 100 m temperatura tla se kreće između 12 i 15°C. Kod instalacija s izmjenjivačem u vertikalnoj bušotini, kod normalnih hidrogeoloških uvjeta, uzima se da je srednji učinak izmjenjivača s dvostrukom U cijevi 50 W/m (prema VDI 4640). Pouzdaniji rezultati dobiju se in-site mjerenjima svojstava tla. Protok pumpe za glikolnu smjesu proračunava se na temperaturnu razliku glikola na isparivaču od približno 3°C. Troškovi izvedbe bušotine i polaganja izmjenjivača zajedno s ispunom iznose od 35 do 55 €/m. Troškovi izvedbe bušotine s izmjenjivačem iznosi od 45 do 60 €/m.

Dizalice topline smatraju se visokoučinkovitim sustavima za dobivanje toplinske energije. Primjenjuju se u svim veličinama, od onih najmanjih za grijanje stanova, pa sve do toplinskih sustava čitavih naselja. Prepreku u njihovoj primjeni predstavljaju veći investicijski troškovi (primjer korištenja tla u vertikalnoj izvedbi izmjenjivača), u odnosu na konvencionalne sustave grijanja. Troškovi pogona koji su npr. znatno manji u odnosu na uljne kotlove, najviše ovise o cijeni električne energije, dok troškovi ulaganja ovise o primijenjenom toplinskom izvoru i učinku dizalice topline. Toplinski učinak dizalice topline koje se koriste u kućanstvima kreće se od 3 do 18 kW, pri čemu pogonska snaga kompresora iznosi od 1 do 6 kW. Isplativost njihovog korištenja ponajviše ovisi o investicijskim troškovima i odnosu cijena električne energije i ostalih energenata poput plina i ulja.

5. ANALIZA DOBIVENIH REZULTATA

Usporedbom geotermalnog i konvencionalnog GViK sustava, ustanovljeno je da instalacija geotermalne dizalice topline na odjelu fakulteta nije financijski isplativa. Cijena ugradnje konvecncionalnog GViK sustava je 203 806 €. Za geotermalni cijena ugradnje iznosi 1 784 870 €, o čega su troškovi bušotine 478 720 €, za cijevi 10 000 € i za dobavnu pumpu 1 240 000 €. Godišnja potrošnja energije za konvencionali GViK sustav je 2 288 350 kWh/god, dok za geotermalni iznosi 562 040 kWh/god. S niskom cijenom prirodnog plina umanjuju se troškovi konvencionalnog GViK sustava. Da bi geotermalna dizalica topline bila financijski isplativa, cijena prirodnog plina bi trebala biti visoka i geotermalna dizalica bi trebala grijati i hladiti sve prostorije na fakultetu, a ne samo odabrani odjel promatranja.

6. ZAKLJUČAK

Cijena izvedbe sustava s geotermalnim dizalicama topline je relativno visoka, ako se uspoređuje s klasičnim sustavima grijanja čija su trošila vezana na distribucijsku plinsku mrežu kao i toplinske mreže elektrana. Početna investicija u nisko temperaturne toplinske sustave s geotermalnom dizalicom topline je 2-3 puta veća u odnosu na klasični sustav grijanja s plinskim uređajem. Kod najsloženijih toplinskih sustava, koji su izvedeni po standardima koji pružaju najviši komfor s elementima inteligentne regulacije cjelokupnog sustava u objektu (grijanje, rasvijeta, hlađenje, odvlaživanje, ventilacija, rekuperacija itd.) nije moguće govoriti o povratu investicije u vijeku trajanja pojedinih elemenata sustava jer je početna investicija realno gledajući neprihvatljiva što znači da postoji ekonomska granica primjenjivosti ovih sustava. Ekonomska opravdanost uvođenja složenih instalacija postoji samo ako se uzmu u obzir moguće subvencije fondova, države za poticanje korištenja obnovljivih izvora energije.

7. POPIS LITERATURE

- [1] Energetika marketing.: Osnove primjene dizalice topline, Zagreb, 2009.
- [2] www.klimatizacija.hr
- [3] www.zelenaenergija.org
- [4] Program Ujedinjenih naroda za razvoj – UNDP: Priručnik za energetske certificiranje zgrada, Tisak Zelina, 2010.
- [5] www.fchart.com/assets/downloads/ees_manual.pdf
- [6] Stiebel Eltron: Planung und Installation Wärmepumpen, Holzminden 2013.

8. PRILOZI

Prilog 1. EES kod za izračun gubitaka i dobitaka topline odjela na fakultetu. [5]

```

"!ENGR333 West Wing Project - building heat transfer resistance caclulation"
"!__R_total__" "this value will be used in Excel for HDD/CDD"
Q_dot_net=A_effective*(T_o-T_i)*convert(BTU/hr,tons)/R_total
"!__NOTATION__"
// Heat into building is positive
Q$[1..16]=[ "1"cond_wall', 'cond_window', 'cond_roof', "4"conv_wall', 'conv_window', 'conv_roof',
"7"rad_wall', 'rad_window', 'rad_roof', "10"total_wall', 'total_window', 'total_roof', "13"outsideair',
"14"people', 'computers', 'lights']
"!__ENVIRONMENT__"
T_i = converttemp(F,R,72[F]) "inside room temperature"
T_o = converttemp(F,R,21) "outside ambient temperature for 6th coldest day in Grand Rapids *6"
T_surr = T_o-20[R] "temperature at 'infinity' for radiation heat transfer"
P_o = 1 [atm]
"!__HEAT LOSS THROUGH EXTERIOR WALL__"
// Ignore heat loss through basement (recommended by *5)
// Model walls (for example) as: Series(conduction_wall + Parallel(convection_wall + radiation_wall))
"!Areas"
h_wall=20[ft]; h_basement=10[ft]
L_west=230[ft]; L_north=100[ft]; L_south=62[ft]
A_floor=L_west*L_north
A_wallframe = ((L_west+L_north+L_south)*h_wall) "doesn't include basement *5"
A_wall = A_wallframe - A_window
A_window = (0.5{length fraction of window} * 0.7{height fraction of window} * A_wallframe)
A_roof=L_north*L_west
A_effective=53000[ft^2] "**6"
"!Thermal resistances of walls, roof" "**2"
R_facebrick = 0.43[ft^2-hr-F/BTU] "exterier face brick"
R_foam = 10[ft^2-hr-F/BTU] "2 inch rigid foam insulation"
R_CMUbrick = 1.11[ft^2-hr-F/BTU] "8 inch C.M.U. brick"
R_window = 0.9[ft^2-hr-F/BTU] "double pained with .75in air gap"
R_roof = 0.5[ft^2-hr-F/BTU] "estimation for OSB, tar, and pebbles"

```

$R_{o_air} = 0.17[\text{ft}^2\text{-hr-F/BTU}]$ "outside air"

$R_{i_air} = 0.35[\text{ft}^2\text{-hr-F/BTU}]$ "inside air"

$R_{wall_conduction} = R_{i_air} + R_{CMUbrick} + R_{foam} + R_{facebrick}$

$R_{window_conduction} = R_{i_air} + R_{window}$

$R_{roof_conduction} = R_{foam} + R_{roof} + R_{o_air}$

"!Conductive heat transfer"

"total heat transfer in through wall"

$q_{dot_spec}[1] = (T_{wall} - T_i) / R_{wall_conduction}$

$Q_{dot}[1] = A_{wall} * q_{dot_spec}[1] * \text{convert}(\text{BTU/hr, tons})$

"total heat transfer in through window"

$q_{dot_spec}[2] = (T_{window} - T_i) / R_{window_conduction}$

$Q_{dot}[2] = A_{window} * q_{dot_spec}[2] * \text{convert}(\text{BTU/hr, tons})$

"total heat transfer in through roof"

$q_{dot_spec}[3] = (T_{roof} - T_i) / R_{roof_conduction}$

$Q_{dot}[3] = A_{roof} * q_{dot_spec}[3] * \text{convert}(\text{BTU/hr, tons})$

"!Convective heat transfer"

"convective part of heat transfer to outside of wall"

$q_{dot_spec}[4] = (T_o - T_{wall}) / R_{o_air}$

$Q_{dot}[4] = A_{wall} * q_{dot_spec}[4] * \text{convert}(\text{BTU/hr, tons})$

"convective part of heat transfer to outside of window"

$q_{dot_spec}[5] = (T_o - T_{window}) / R_{o_air}$

$Q_{dot}[5] = A_{window} * q_{dot_spec}[5] * \text{convert}(\text{BTU/hr, tons})$

"convective part of heat transfer to outside of roof"

$q_{dot_spec}[6] = (T_o - T_{roof}) / R_{o_air}$

$Q_{dot}[6] = A_{roof} * q_{dot_spec}[6] * \text{convert}(\text{BTU/hr, tons})$

"!Radiation heat transfer"

$F = 1$ "view factor to sky"

$\sigma = (5.67 * 10^{-8}) [\text{W/m}^2\text{-K}^4] * \text{convert}(\text{W/m}^2\text{-K}^4, \text{BTU/hr-ft}^2\text{-R}^4)$ "Stephon-Boltzman constant"

$\epsilon_{facebrick} = 0.75$ "emissivity of exterior face brick"

$\epsilon_{window} = 0.94$ "emissivity of window"

$\epsilon_{roof} = 0.80$

"guess for emissivity of roof" "radiative part of heat transfer to outside of wall"

$q_{dot_spec}[7] = \epsilon_{facebrick} * F * \sigma * (T_{surr}^4 - T_{wall}^4)$
 $Q_{dot}[7] = q_{dot_spec}[7] * A_{wall} * \text{convert}(\text{BTU/hr, tons})$

"radiative part of heat transfer to outside of window"

$q_{dot_spec}[8] = \epsilon_{window} * F * \sigma * (T_{surr}^4 - T_{window}^4)$
 $Q_{dot}[8] = q_{dot_spec}[8] * A_{window} * \text{convert}(\text{BTU/hr, tons})$

"radiative part of heat transfer to outside of roof"

$$q_dot_spec[9] = \epsilon_{roof} * F * \sigma * (T_{surr}^4 - T_{roof}^4)$$

$$Q_dot[9] = q_dot_spec[9] * A_{roof} * \text{convert}(\text{BTU/hr, tons})$$

"!Total heat transfer" "*4"

duplicate i=1,3; Q_dot[i]=Q_dot[i+3]+Q_dot[i+6]; end "conduction=convection + radiation"

duplicate i=1,3; Q_dot[i+9]=Q_dot[i+3]+Q_dot[i+6]; end "same heat flux as conduction"

Q_dot_heatloss = SUM(Q_dot[i],i=10,12) "total heat transfer from exterior walls & windows"

Q_dot_heatloss = (A_floor+A_wallframe)*(T_o-T_i)/R_bldg*convert(BTU/hr,tons) "finds R_bldg"

"! __VENTILATION/INFILTRATION LOADS__ "

V_bldg = A_floor*(h_wall+h_basement) "volume of building"

"ACH values online are anywhere between 0.05 and 10--lets assume 3.3"

$$\text{ACH} = 3.3[1/\text{hr}]$$

V_dot = ACH*V_bldg*convert(min,hr) "to assure enough

flow" c_p_air = specheat(air,T=T_o)

rho_air = density(air,T=T_o,P=P_o)

Q_dot[13] = V_dot*rho_air*c_p_air*(T_o-T_i)*convert(hr,min)*convert(BTU/hr,tons) "total heat transfer from outside air loads"

"! __OCCUPANT LOADS__ "

Q_dot_person = 150[W]*convert(W,tons)

occupancy = 100{people}*((6[hr])/(24[hr])) "average occupancy"

Q_dot[14] = Q_dot_person*occupancy "total heat generation from suite occupants"

"! __COMPUTER LOADS__ "

Q_dot_computer = 500[W]

computer_use = 20{computers}*((11[hr])/(24[hr])) "average computer heating power"

Q_dot[15] = Q_dot_computer*computer_use*convert(W,tons) "total heat generation from computers"

"! __LIGHTING LOADS__ "

Q_dot_bulb = 0.25{estimate of heat given off}*40[W]*convert(W,tons)

lighting = 3{bulbs/fixture}*15{fixtures/room}*40{rooms}*((14[hr])/(24[hr])) "average computer heating power"

Q_dot[16] = Q_dot_bulb*lighting "total heat generation from lights"

"! __TOTAL HEATING LOAD__ "

Q_dot_losses=(SUM(Q_dot[i],i=10,13))

Q_dot_gains=(SUM(Q_dot[i],i=14,16))

Q_dot_net = Q_dot_gains+Q_dot_losses

Prilog 2. EES kod za izračun troškova dizalice topline. [5]

"Pipe and Booster Pump Cost Estimations"

```

T=283[K]
P=101[kPa]

rho=density(H2O, T=T, P=P)
V_dot=0.03407[m^3/s]
velo_dot=V_dot/A
mu=viscosity(H2O, T=T)
Re=(rho*D^velo_dot)/(mu)

L=690[m]

D=D_inches*convert(in,m)
A=((D/2)^2)*pi#

weldedsteel=0.045
f=MoodyChart(Re, weldedsteel)

g=9.81[m/s^2]
h_L=f*(L/D)*(velo_dot^2/(2*g))
h_L_feet=h_L*convert(m,ft)

"D_inches=3[in]"
L_feet=L*convert(m,ft)

Cost_pipe=((3*exp(.75*D_inches))*(1+(3/(2*(sqrt(L_feet)*L_feet)))))+(30*L_feet)
Cost_pump=1.2*((8.4*h_L_feet)+2325)
Cost_total=Cost_pipe+Cost_pump

```

"average temp of working fluid in pipes"

"water glycol mix estimated as pure water"
"flow rate from Below Ground Team"

"Reynold' number based on diameter"

"the distance from the West Wing to the bore field"

"Paul Pennock specified material, this roughness is from the ENGR 319 textbook"

Prilog 3. EES kod za izračun vertikalnih izmjenjivača topline. [5]

```

*Known Parameters*
T_ground=10[C]
Q_dot_max=48[ton]*convert(ton,W)
D_pipe=1.25[in]*convert(in,m)
epsilon=0.00001[m]
eta_pump=0.8
x_water=0
rho_water=density(water,t=T_ground,x=x_water)
mu=Viscosity(Water,T=T_ground,x=x_water)
g=9.81[m/s^2]
k_L= 4+1.2
P_1=101325[Pa]
P_2=P_2
Z_1=0[m]
Z_2=h

*Design Variables*
V_dot=12[gpm]*convert(gpm,m^3/s)
T_water=16[C]
//DELTA=6[C]
h=400[ft]*convert(ft,m)
h=(L-10[m])/2
{//L=500[ft]*convert(ft,m)}

*Calculated Parameters*
A_x_pipe=PI*(D_pipe^2)/4
m_dot=V_dot*rho_water
V=V_dot/A_x_pipe
V_1=V
V_2=V
Re=(rho_water*V*D_pipe)/mu
B=(epsilon/D_pipe)/(3.7+2.51/(Re*.5))
1/(f*.5)=-2.0*log10(B)

*Head Loss and Pump Power*
h_L=((L/D_pipe)*(V^2/(2*g)))+(k_L*(V^2/(2*g)))
h_L=(E_dot_mech_loss)/(m_dot*g)
m_dot*(P_1/rho_water+V_1^2/2+g*Z_1)+W_dot_pump=m_dot*(P_2/rho_water+V_2^2/2+g*Z_2)+E_dot_mech_loss
W_act=W_dot_pump*eta_pump
W_dot_pump_actual=W_act*convert(W,hp)

(*Effective Thermal Resistance of the ground*
Q_dot_max=((2*h*(T_water-T_ground))/R)*convert(w,kW)
Q_dot_max=((2*h*(DELTA))/R)*convert(w,kW)
R_english=R*convert(m-K/W,hr-ft-F/Btu)
//R=.01[m-K/W]
//R_english=.008[hr-ft-F/Btu]
//Conductivity=1/R_english
//Conductivity=2.0[Btu/hr-ft-F]}

Unit Settings: SI C kPa kJ mass deg

A_x_pipe = 0.0007917 [m^2]
eta_pump = 0.8
h = 121.9 [m]
mu = 0.001307 [kg/m*s]
Q_dot_max = 168809 [W]
T_water = 16 [C]
V_dot = 0.0007571 [m^3/s]
x_water = 0

B = 0.0007593
E_dot_mech_loss = 71.62 [W]
h_L = 9.646 [m]
m_dot = 0.7569 [kg/s]
Re = 23229
V = 0.9562 [m/s]
W_act = 781.5 [W]
Z_1 = 0 [m]

D_pipe = 0.03175 [m]
f = 0.02569
k_L = 1.6
P_1 = 101325 [Pa]
rho_water = 999.7 [kg/m^3]
V_1 = 0.9562 [m/s]
W_dot_pump = 976.8 [W]
Z_2 = 121.9 [m]

epsilon = 0.00001 [m]
g = 9.81 [m/s^2]
L = 253.8 [m]
P_2 = 101325 [Pa]
T_ground = 10 [C]
V_2 = 0.9562 [m/s]
W_dot_pump_actual = 1.048 [hp]

No unit problems were detected.

Calculation time = .0 sec.

```