

Usporedba energetske performansi toplinski crpki

Šplajt, Luka

Undergraduate thesis / Završni rad

2022

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek / Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:200:987149>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-04-01**

Repository / Repozitorij:

[Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek](#)



**SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA I
INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA**

Sveučilišni studij

**USPOREDBA ENERGETSKIH PERFORMANSI
TOPLINSKIH CRPKI**

Završni rad

Luka Šplajt

Osijek, 2021./2022. godina.

**FERIT**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA **OSIJEK****Obrazac ZIP - Obrazac za ocjenu završnog rada na preddiplomskom sveučilišnom studiju**

Osijek, 06.09.2022.

Odboru za završne i diplomske ispite

Prijedlog ocjene završnog rada na preddiplomskom sveučilišnom studiju

Ime i prezime Pristupnika:	Luka Šplajt
Studij, smjer:	Preddiplomski sveučilišni studij Elektrotehnika i informacijska tehnologija
Mat. br. Pristupnika, godina upisa:	4737, 23.07.2019.
OIB Pristupnika:	68767233187
Mentor:	Prof.dr.sc. Damir Šljivac
Sumentor:	,
Sumentor iz tvrtke:	
Naslov završnog rada:	Usporedba energetske performansi toplinski crpki
Znanstvena grana rada:	Elektroenergetika (zn. polje elektrotehnika)
Zadatak završnog rad:	U teorijskom dijelu dati opis trenutnog razvoja tehnologija toplinskih crpki zemlja, zrak, (morska) voda i dr. Na primjeru tipične zgrade dimenzionirati toplinske crpke i dati usporedbu njihovih energetske performansi. Molim prijavite se na teme koje želite, kriterij za odabir teme: zbroj ocjene iz OEiE i prosjeka ocjena prijavljenih na temi.
Prijedlog ocjene završnog rada:	Izvrstan (5)
Kratko obrazloženje ocjene prema Kriterijima za ocjenjivanje završnih i diplomskih radova:	Primjena znanja stečenih na fakultetu: 3 bod/boda Postignuti rezultati u odnosu na složenost zadatka: 2 bod/boda Jasnoća pismenog izražavanja: 3 bod/boda Razina samostalnosti: 3 razina
Datum prijedloga ocjene od strane mentora:	06.09.2022.
Datum potvrde ocjene od strane Odbora:	05.10.2022.
Potvrda mentora o predaji konačne verzije rada:	Mentor elektronički potpisao predaju konačne verzije.
	Datum:

**FERIT**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK**IZJAVA O ORIGINALNOSTI RADA**

Osijek, 05.10.2022.

Ime i prezime studenta:

Luka Šplajt

Studij:

Preddiplomski sveučilišni studij Elektrotehnika i informacijska tehnologija

Mat. br. studenta, godina upisa:

4737, 23.07.2019.

Turnitin podudaranje [%]:

12

Ovom izjavom izjavljujem da je rad pod nazivom: **Usporedba energetske performansi toplinski crpki**

izrađen pod vodstvom mentora Prof.dr.sc. Damir Šljivac

i sumentora ,

moj vlastiti rad i prema mom najboljem znanju ne sadrži prethodno objavljene ili neobjavljene pisane materijale drugih osoba, osim onih koji su izričito priznati navođenjem literature i drugih izvora informacija. Izjavljujem da je intelektualni sadržaj navedenog rada proizvod mog vlastitog rada, osim u onom dijelu za koji mi je bila potrebna pomoć mentora, sumentora i drugih osoba, a što je izričito navedeno u radu.

Potpis studenta:

Luka Šplajt

SADRŽAJ

1. UVOD.....	1
1.1. Zadatak završnog rada	2
2. Općenito o toplinskim crpkama	3
2.1. Načini rada crpke.....	7
2.1.1. Monovalentni način rada	7
2.1.2. Bivalentno-paralelni način rada	8
2.1.3. Bivalentno-alternativni način rada	8
2.2. Toplinski izvori	9
2.2.1. Geotermalna energija (tlo).....	11
2.2.2. Voda	12
2.2.3. Zrak	13
2.3. Toplinske crpke tlo-voda	14
2.3.1. Izvedba s vodoravnim izmjenjivačem	14
2.3.2. Izvedba s okomitim izmjenjivačem.....	16
2.4. Toplinske crpke voda-voda.....	17
2.5. Toplinske crpke zrak-voda	19
3. Pregled područja toplinskih crpki	21
4. Metodologija proračuna energetske performansi toplinskih crpki.....	23
4.1. Temperature izvora	23
4.2. Radna točka i temperaturni režim toplinske crpke	24
4.3. Vanjski faktori	24
5. Energetske performanse toplinskih crpki u GeoT*Sol programu.....	27
5.1. GeoT*Sol toplinske crpke tlo-voda.....	27
5.1.1. GeoT*Sol toplinske crpke tlo-voda s vertikalnom izvedbom	28
5.1.2. GeoT*Sol toplinske crpke tlo-voda s horizontalnom izvedbom.....	34
5.2. GeoT*Sol toplinske crpke voda-voda.....	38
5.3. GeoT*Sol toplinske crpke zrak-voda	41
5.4. Analiza rezultata simulacija	44

6. ZAKLJUČAK.....	47
LITERATURA	48
SAŽETAK	50
ABSTRACT.....	51
ŽIVOTOPIS	52

1. UVOD

Toplinska crpka je sustav koji crpi toplinsku energiju iz jednoga izvora i predaje ju radnom mediju. Toplinske crpke koriste se ljevokretnim Carnoutovim procesom koji koristi dva spremnika toplinske energije: niskotemperaturni spremnik zvan isparivač, koji posjeduje toplinsku energiju, crpljenu iz okoline (tlo, zrak, voda,...) i visokotemperaturni spremnik zvan kondenzator odnosno toplinski ponor, kojemu se predaje toplinska energija iz niskotemperaturnog toplinskog spremnika.

Za ostvarenje prijenosa toplinske energije između spremnika koristi se kompresorski krug (međukrug) pogonjen kompresorom ili pumpom. Ovaj krug može i obrnuti smjer kretanja čime se uloge visokotemperaturnog i niskotemperaturnog spremnika zamjenjuju, te se radni medij hladi umjesto grije.

Toplinske crpke najviše se upotrebljavaju kao osnovni ili dodatni izvor toplinske energije za sustave grijanja i pripreme potrošne tople vode u stambenim zgradama ili kao izvor topline za zagrijavanje vode u plivalištima, staklenicima i industrijskim procesima.

Prvu modernu toplinsku crpku je izumio Peter von Rittinger 1856., a služila je za sušenje slane otopine i dobivanje soli pomoću kompresora pogonjenog vodom i bojlera. Prva toplinska crpka koja je služila za grijanje zgrade napravljena je 1936. u Zürichu za grijanje Gradske vijećnice, a izvor toplinske energije je bila riječna voda.

Tehnologija toplinskih crpki za grijanje stambenih prostora se od tada nadaleko unaprijedila, te danas raspoznajemo različite toplinske crpke ovisno o izvoru toplinske energije: zrak, morska i riječna voda, podzemna voda, tlo, Sunce, i otpadna toplinska energija.

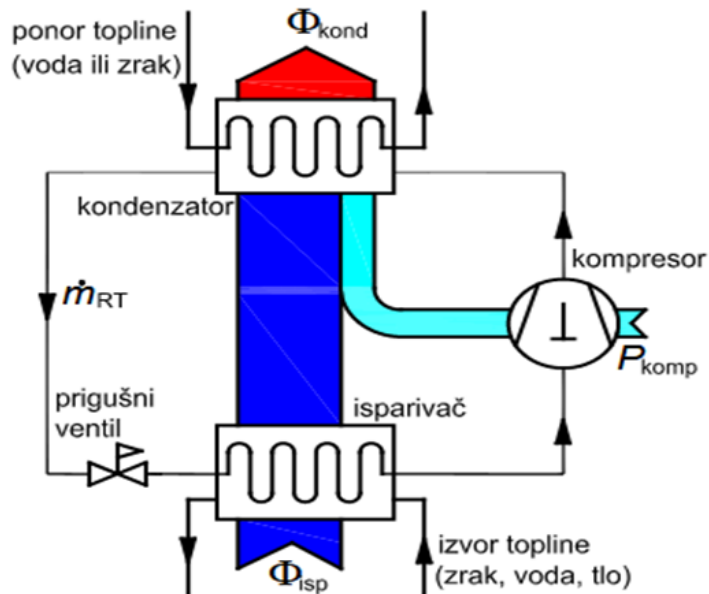
Pogledom na ove izvore može se zaključiti da toplinske crpke koriste obnovljive izvore energije, što znači da se izvor toplinske energije smatra praktički „nepresušivim“ a potreba za dodatnom energijom (grijanje na višu temperaturu ili hlađenje na nižu) minimalna čime su i troškovi grijanja znatno manji u usporedbi sa konvencionalnim grijanjem (npr. plin) ili hlađenja (npr. klima uređaji). Zbog ovih prednosti razvoj i primjena toplinskih crpki raste.

1.1. Zadatak završnog rada

Zadatak ovog završnog rada je opisati toplinske crpke, usporediti njihove načine rada, prednosti i mane, te na primjeru stambene zgrade dimenzionirati toplinske crpke. Pomoću dimenzioniranja odrediti energetske performanse i toplinski množitelj, te ih usporediti. (*Dimenzioniranje se odnosi isključivo za grijanje i to za crpke koje koriste zrak, vodu i geotermalnu energiju (tlo), kao izvor toplinske energije.*)

2. Općenito o toplinskim crpkama

Krug toplinske crpke sastoji se od izvora topline, toplinskog ponora (potrošača), međukruga sa kompresorom ili pumpom i prigušnim ventilom, te dva izmjenjivača topline (isparivač i kondenzator). Ovaj krug koristi se ljevokretnim kružnim procesom koji se može vidjeti na slici:



Sl. 2.1. Prikaz ljevokretnog kružnog procesa toplinske crpke [1]

Toplinska energija crpi se iz izvora topline, u ovom slučaju iz zraka, vode ili tla. Toplina se zatim predaje mediju međukruga preko isparivača. Medij međukruga se onda tlači pomoću kompresora ili pumpe čime mu se povisuje temperatura. Kompresor (pumpa) također omogućuje cirkulaciju samoga medija koja je nužna za izmjenu toplinske energije između izvora i ponora topline.

Nakon prolaska kroz kompresor, medij predaje toplinu kondenzatoru odnosno radnom mediju, najčešće vodi ili zraku. Toplina koja je predana radnom mediju se koristi za niskotemperaturne potrebe poput grijanja prostora i pripreme potrošne tople vode (PTV), dok se medij međukruga koji je predao toplinsku energiju vraća natrag prema isparivaču čime prolazi kroz prigušni ventil i tlak mu se spušta, a time i temperatura.

Spuštanje temperature medija koji se vraća u isparivač važno je jer učinkovitost isparivača i kondenzatora je veća, što je manja razlika između temperatura medija koji prima toplinu i medija koji ju predaje, odnosno što je manja razlika između medija isparivača i medija međukruga, te razlika između medija međukruga i medija kondenzatora (radnog medija).

Za podizanje temperature koriste se kompresori koji tlače medij i omogućuju mu cirkulaciju. Podizanje temperature medija međukruga važno je jer kada se toplina preda radnom mediju, temperatura medija ostaje na višoj vrijednosti što je pogodno za korištenje u kućanstvu.

Obično se za manje toplinske crpke koriste električni kompresori po kojima su dobile naziv „Kompresijske dizalice topline“. Za veće toplinske crpke koriste se plinski kompresori, koji imaju vrlo visok stupanj djelovanja, a kod njih se može koristiti i toplina preuzeta njihovim hlađenjem.

Podizanje i spuštanje temperature medija važno je za učinkovitost sustava. Općenito, učinkovitost cijeloga sustava je veća, što je manja temperaturna razlika između temperaturnog izvora i ponora.

Za učinkovitost je najbitnija varijabla toplinski množitelj. *Toplinski množitelj* ili *faktor grijanja* (eng. *Coefficient of performance*, COP) je bezdimenzionalan broj dobiven kao omjer učinka grijanja kondenzatora i snage utrošene u kompresor (pumpu) dobiven sljedećim izrazom:

$$\varepsilon_{gr} = \frac{\Phi_{kond}}{P_{komp}} \quad (2.1.)$$

Gdje su:

ε_{gr} - toplinski množitelj

Φ_{kond} - toplinski tok kondenzatora (učinak grijanja kondenzatora)

P_{komp} - snaga kompresora

Budući da je toplinski množitelj omjer dobivenog i uloženog, broj koji se dobije može se interpretirati na sljedeći način: za toplinski množitelj $\varepsilon_{gr}=2$, govorimo da se za svaki uloženi kW električne energije dobije ekvivalentna toplinska energija vrijednosti 2 kW.

Osim toplinskog množitelja, druga bitna varijabla kod toplinskih crpki je *godišnji toplinski množitelj* (eng. *Seasonal performance factor*, SPF), koji se koristi za proračunavanje i dimenzioniranje sustava grijanja.

Godišnji toplinski množitelj dan je sljedećim izrazom:

$$SPF = \frac{\sum_{\text{god}}(Q_{GR} + Q_{PTV})}{\sum_{\text{god}} E_{\text{sust}}} \quad (2.2.)$$

Gdje su:

$\sum Q_{GR}$ – godišnja potrebna toplinska energija za grijanje prostora, [kWh]

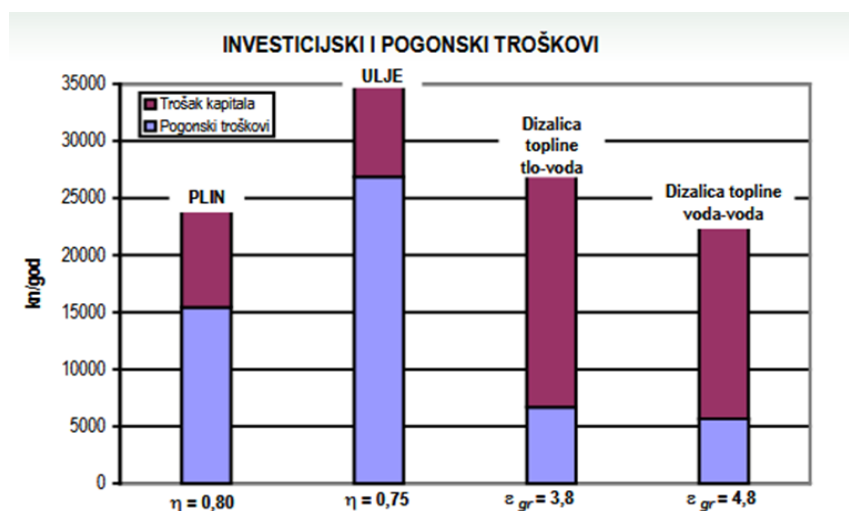
$\sum Q_{PTV}$ - godišnja potrebna toplinska energija za zagrijavanje PTV, [kWh]

$\sum E_{\text{sust}}$ – ukupna godišnja el. energija utrošena na pogon kompresora, pumpi, ... , [kWh]

Za razliku od toplinskog množitelja koji se koristi za jednu točku rada toplinske crpke, koja može biti bilo kojega dana u godini, godišnji toplinski množitelj daje prosjek za rad crpke tokom cijele godine.

Godišnji toplinski množitelj kreće se od 2 do 6 ovisno o izvedbi toplinske crpke, izvoru toplinske energije i lokaciji. Kada pogledamo prijašnju interpretaciju i vrijednosti toplinskog množitelja, možemo zaključiti da su mogućnosti uštede energije vrlo velike.

S obzirom na štedljivost, može se također naglasiti još jedna prednost toplinskih crpki, a to su minimalni troškovi održavanja. Razlog tome je malen broj pogonskih strojeva, koji najviše zahtijevaju održavanje (pumpa, kompresor), dok je ostatak pasivan (PVC ili metalne cijevi, ekspanzijski ventil, ...). Sustav je također većinom zatvoren, odnosno nema ispuštanja niti dodavanja medija u sustav, već on cirkulira, čime se ne mogu pojaviti nečistoće u cijevima koje bi osporile ili prekinule cirkulaciju medija.



Sl. 2.2. Investicijski i pogonski troškovi različitih izvora toplinske energije za grijanje stambene zgrade od 400 m², uz $Q_{H,nd} = 32000$ kWh/god., $Q_{H,nd} = 80$ kWh/(m²god.), $\Phi_{gr} = 18$ kW (podatci iz 2010.) [1]

Još jedna prednost toplinskih crpki je ekološki faktor, odnosno nulta emisija štetnih plinova (ako se izuzme potencijalno, indirektno, zagađenje nastalo proizvodnjom električne energije). Smanjenje emisija može se očitati iz sljedeće tablice:

Toplinska crpka u usporedbi s:	Smanjenje CO ₂	Smanjenje potrošnje primarne energije
uljnim kotlovima	55 %	43 %
plinskim kotlovima	39 %	44 %
plinskim kondenzacijskim kotlovima	30 %	40 %

Tab. 2.1 Usporedba smanjenja emisija i potrošnje primarne energije kod toplinskih crpki i drugih izvora topline za sustave grijanja [1]

Instalacijom toplinskih crpki koje zamjenjuju električne sustave grijanja, također se smanjuje opterećenje EES-a poput elektrana i dalekovoda, ujedno snižujući potrebu za potrošnjom fosilnih goriva i općenito energentima; zbog potrošnje manje električne energije na grijanje ili hlađenje, te se koriste obnovljivi izvori energije. Iako je činjenica da su toplinski izvori ujedno obnovljivi izvori energije što je prednost, također su i mana jer nisu svi stabilni (promjena temperature zraka i površinske vode tijekom godine).

Zbog ovoga razloga se crpke dimenzioniraju s time u uvidu tako da se zrak dogrijava, ulaz nadzemne vode u sustav se postavlja što bliže dnu rijeke ili jezera, itd.

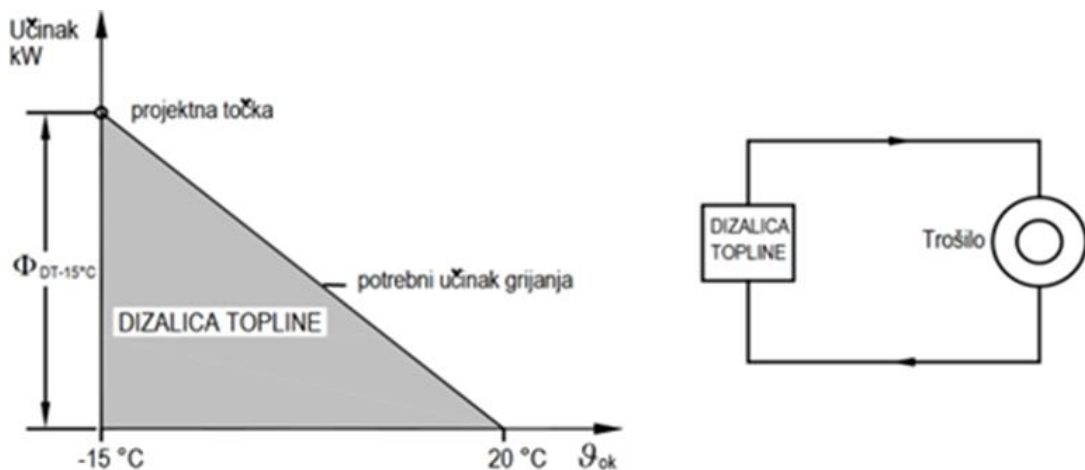
2.1. Načini rada crpke

Osim samostalnog rada toplinske crpke, mogu se dodati dodatni izvori toplinske energije, pri čemu razlikujemo:

- Monovalentni način rada
- Bivalentno-paralelni način rada
- Bivalentno-alternativni način rada

2.1.1. Monovalentni način rada

U ovom načinu rada toplinska crpka je jedini izvor topline, te se ne koriste dodatni izvori za grijanje ili dogrijavaње radnog medija. Sve toplinske gubitke zgrade, odnosno toplinsko opterećenje pokriva isključivo toplinska crpka. Učinak toplinske crpke projektira se prema vanjskoj projektnoj temperaturi zraka. Toplinske crpke koje su povezane s tlom (crpke tlo-voda te voda-voda sa bunarima, odnosno podzemnom vodom kao izvorom topline) rade kao monovalentni sustavi grijanja. Dijagram ovisnosti učinka toplinske crpke o temperaturi okoline, kao i shemu rada crpke u monovalentnom radu može se vidjeti na sljedećoj slici:



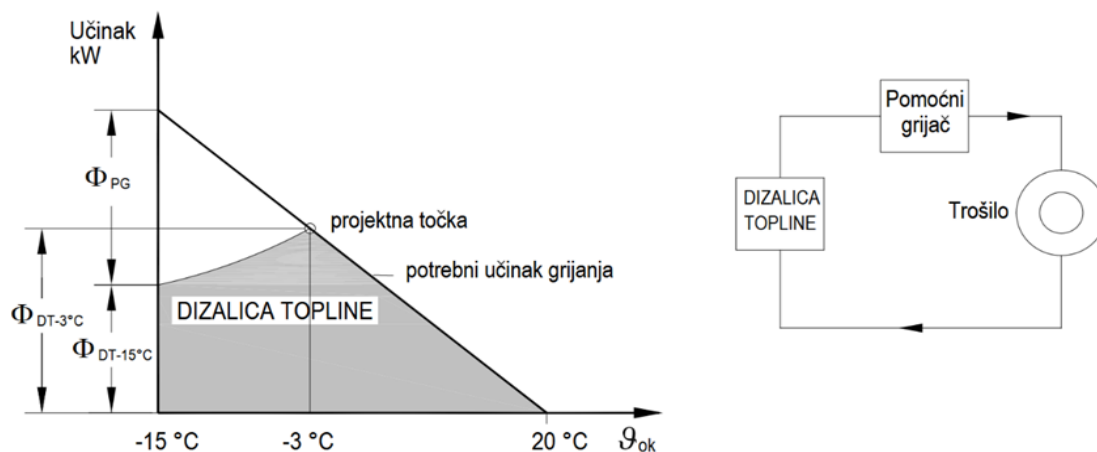
Sl. 2.3. Monovalentni rad dizalice topline [1]

Prema grafu sa slike može se primijetiti da potrebni učinak grijanja pada linearno sa porastom temperature okoline. To je zato što je toplinska crpka jedini izvor topline i zagrijavanje medija je jednolično, a kod grijanja prostora nije potreban rad toplinske crpke nakon što dosegne sobnu temperaturu (20 °C), odnosno potrebni učinak grijanja je 0.

2.1.2. Bivalentno-paralelni način rada

U ovom načinu rada toplinska crpka je jedini izvor topline na višim temperaturama, dok se za niže temperature koristi i pomoćni, paralelno spojeni grijač poput plinskog ili električnog bojlera. Ovaj način grijanja koristi se kod toplinskih crpki koje koriste zrak kao izvor topline.

Dijagram ovisnosti učinka toplinske crpke o temperaturi okoline, kao i shemu rada crpke u bivalentno-paralelnom radu može se vidjeti na sljedećoj slici:



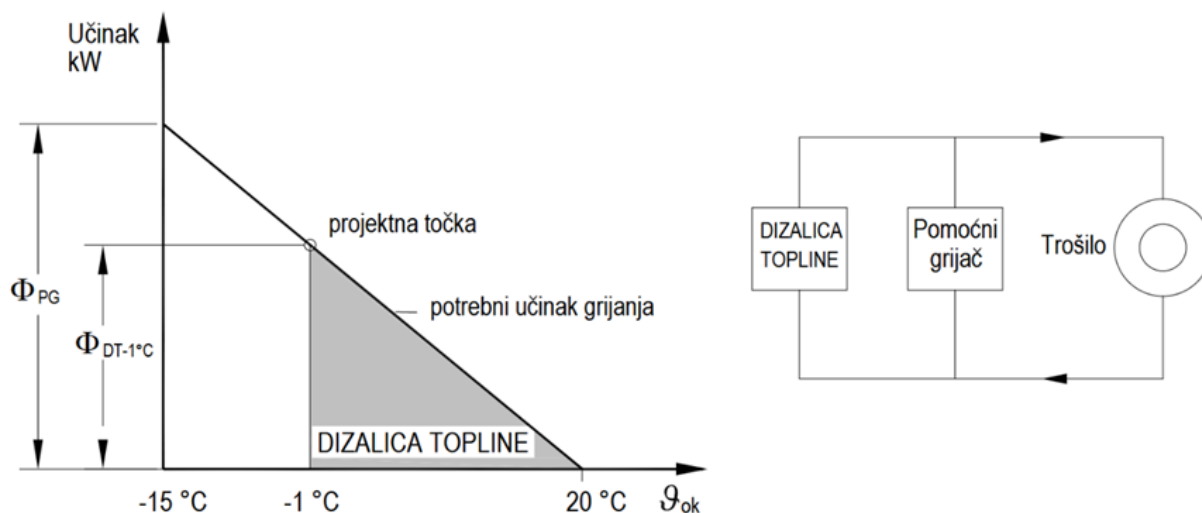
Sl. 2.4. Bivalentno-paralelni rad dizalice topline [1]

Prema grafu na slici možemo primijetiti da je potrebni učinak grijanja koji pokriva toplinska crpka linearan tek od -3 °C. To je zato što se do -3 °C koristi pomoćni grijač koji u velikoj mjeri smanjuje potrebni učinak grijanja toplinske dizalice, odnosno nadopunjuje ukupni potrebni učinak grijanja.

2.1.3. Bivalentno-alternativni način rada

U ovome načinu rada toplinska crpka i pomoćni grijač rade kao odvojeni toplinski izvori koji uvijek rade samostalno. Na nižim temperaturama koristi se pomoćni grijač koji zagrijava radni medij do određene temperature, nakon čega se isključuje, a toplinska crpka počinje sa radom.

Ovaj način rada koristi se u zgradama s radiatorima kao ogrjevnim tijelima. Dijagram ovisnosti učinka toplinske crpke o temperaturi okoline, kao i shemu rada crpke u bivalentno-alternativnom radu može se vidjeti na slici:



Sl. 2.5. Bivalentno-alternativni rad dizalice topline [1]

Prema dijagramu na slici možemo primijetiti da potrebni učinak grijanja toplinske crpke postoji tek nakon -1 °C. To je zato što toplinska crpka ne radi na temperaturama ispod -1 °C, već samo pomoćni grijač. Nakon prekretne točke u -1 °C, kako temperatura raste, pomoćni grijač se isključuje a toplinska crpka uključuje.

2.2. Toplinski izvori

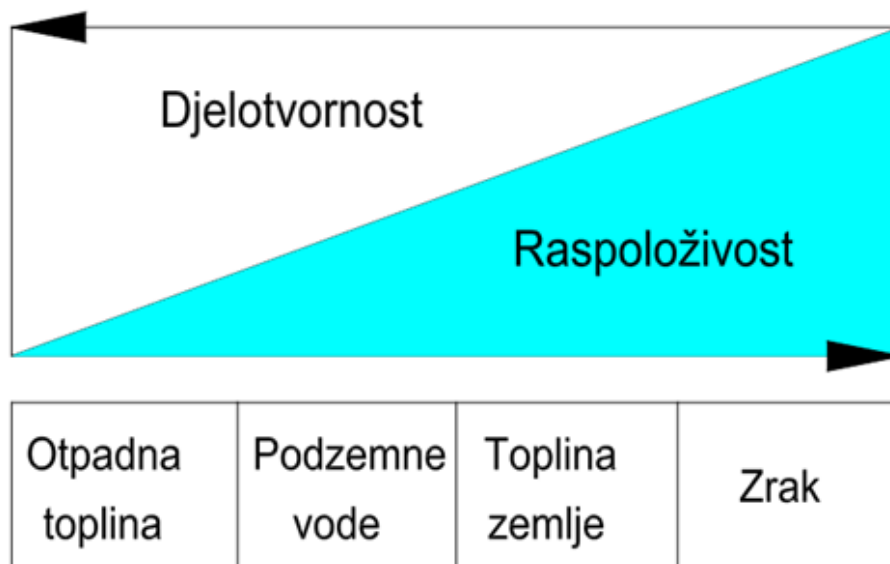
Kod toplinskih crpki toplinski izvori najvažniji su jer o njima ovisi sama učinkovitost i isplativost crpke. Toplinska energija izvora, odnosno isparivača dolazi iz različitih prirodnih izvora, poput zraka, podzemne vode, geotermalne energije, Sunčeve energije, Za optimalnu primjenu toplinskih crpki mora se sljedeće uzeti u obzir:

- toplinski izvor treba osigurati potrebnu količinu topline u svako doba i na što višoj temperaturi
- troškovi za priključenje toplinskog izvora na crpku trebaju biti što manji
- energija za transport topline od izvora do isparivača toplinske crpke treba biti što manja

S obzirom na podrijetlo i postojanost temperatura toplinski izvori mogu se podijeliti u tri osnovne skupine:

- prirodni izvori topline s uglavnom promjenjivim temperaturama, npr. okolni zrak
- prirodni izvori topline s razmjerno konstantnim temperaturama, npr. površinske i podzemne vode, mora, oceani i tlo
- rekuperirani izvori topline, npr. zrak iz prostorija ili industrijskih procesa, otpadne vode itd.

Pri odabiru toplinskog izvora mora se balansirati između djelotvornosti i raspoloživosti kako bi se dobila optimalna i financijski opravdana opskrba toplinskom energijom.



Sl. 2.6. Kvalitativan prikaz djelotvornosti i raspoloživosti izvora topline [1]

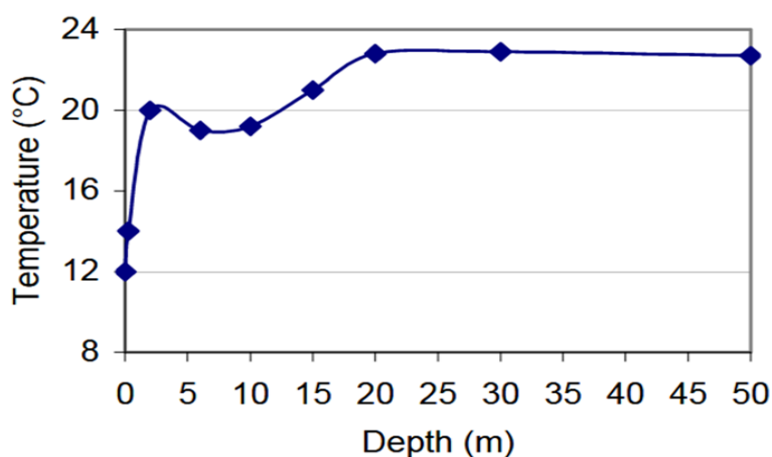
Razlikujemo tri glavna izvora toplinske energije:

- geotermalna energija
- toplina vode
- toplina zraka

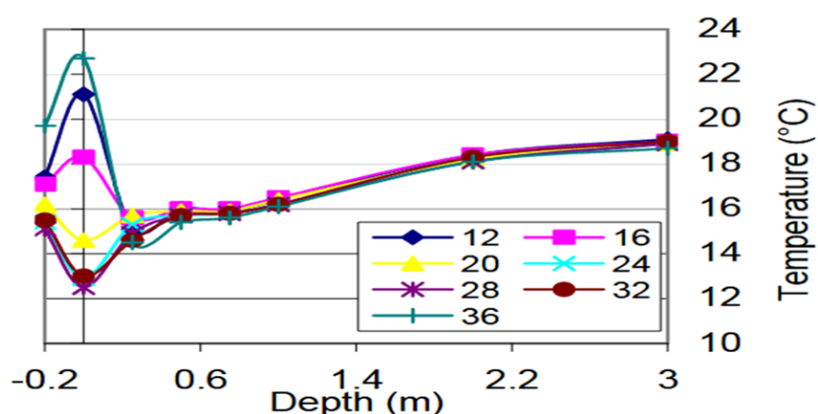
2.2.1. Geotermalna energija (tlo)

Geotermalna energija, odnosno toplinska energija tla, je najstabilniji izvor toplinske energije (ima najmanje promjene temperature tijekom cijele godine).

Geotermalna energija ima stabilnu temperaturu na vrlo malim dubinama, koja se kreće od 7 °C do 13 °C, a u prosjeku temperatura tla raste 2,5 °C do 3 °C svakih 100 m što omogućuje rad toplinske crpke u optimalnoj projektnoj točki, bez dnevnih i sezonskih varijacija. Razlog zome je dobra toplinska izolacija zemlje, čime se energija iz dubljih dijelova zemlje ne miješa sa toplinom sa površine zemlje. Prema sljedećim grafovima možemo uvidjeti toplinsku raspodjelu po dubini tla:



Sl. 2.7. Temperaturna raspodjela u ovisnosti o dubini tla (eng. Temperature = temperatura, eng. Depth = dubina) (podatci iz prosinca 2003.). [5]



Sl. 2.8. Temperaturna raspodjela u ovisnosti o dubini tla s intervalima od 8 sati, započevši od podneva 18. travnja do podneva 19. travnja 2004. [5]

Prema grafu sa slike 2.. možemo zaključiti da je temperatura tla stabilna nakon samo 0,5 m dubine. Ta toplina većim dijelom potječe od Sunčeve energije, a manjim dijelom od toplinske energije unutrašnjosti Zemlje.

Količina iskoristive topline tla ovisi o njegovim termofizikalnim svojstvima. Bitna svojstva su udio vode, udio mineralnih tvari poput pjeska ili glinenca te udio i veličina džepova zraka. Tlo ima bolja termofizikalna svojstva što je više vode i mineralnih tvari u tlu, a udio poroznosti manji.

2.2.2. Voda

Voda kao izvor toplinske energije može biti potočna, riječna, jezerska ili morska. Ovi izvori osim nadzemnih mogu biti i podzemni.

Nadzemne vode općenito se mogu koristiti pri temperaturama višim od 4 °C. Kod vode kao izvora toplinske energije veća akumulacija vode, a time ujedno i topline, je bolja jer je teže poremetiti početnu temperaturu. Poremećaj temperature u obliku njenog smanjenja uzrokuje nižu učinkovitost crpke. U pogledu akumulacije, jezera su povoljnija za korištenje od rijeka zbog veće akumulacije.

Osim akumulacije, važna je i dubina s koje se voda crpi, gdje prednost imaju dublji izvori zbog minimalne temperaturne promjene tijekom godine pri dubljim točkama crpljenja. Kod dovoljno velikih i dubokih jezera (oko 20 do 30 metara), temperatura vode u hladnijim dijelovima godine obično ne pada ispod 5 °C. Nedostatak dubokih jezera je njihov malen broj, što znači da je broj potrošača znatno smanjen i ograničen samo na područja do tih jezera.

S obzirom na dostupnost, pogodniji izvor toplinske energije su podzemne vode čija je temperatura konstantna tokom godine i iznosi 7 – 12 °C. Morska voda je također dobar izvor budući da se temperature mora tokom godine kreću od 11 do 24 °C.

Potoci i rijeke koriste se nadaleko manje zbog puno manje akumulacije i dubine nasprem drugih izvora.

2.2.3. Zrak

Zrak kao izvor toplinske energije je najveći i najpristupačniji od svih toplinskih izvora. Razlika temperature okolišnjeg zraka, kao izvora topline, te radne tvari koja isparuje, kreće se od 6 do 10°C. Najveći nedostatak okolišnjeg zraka kao izvora topline je drastična varijacija njegove temperature, čineći ga najnestabilnijim izvorom toplinske energije.

Temperatura zraka tijekom godine za područje grada Osijeka može se vidjeti u sljedećoj tablici:

Mjesec	Srednja temperatura zraka [°C]	Apsolutni maksimum [°C]	Apsolutni minimum [°C]
Siječanj	-0,6	19,0	-27,1
Veljača	1,4	23,0	-26,4
Ožujak	6,3	26,9	-21,0
Travanj	11,6	30,9	-6,8
Svibanj	16,6	36,0	-3,0
Lipanj	19,9	39,6	1,0
Srpanj	21,7	40,3	4,7
Kolovoz	21,0	40,3	5,1
Rujan	16,7	37,4	-1,2
Listopad	11,3	30,6	-8,6
Studeni	5,8	25,8	-15,7
Prosinac	1,4	21,3	-23,2

Tab. 2.2. Srednja temperatura zraka, apsolutni minimum i maksimum temperature zraka za grad Osijek u razdoblju od 1899. – 2020. [1]

Iz tablice može se uviditi da je razlika između maksimalne i minimalne srednje temperature zraka čak 22,3 °C.

Osim okolišnog zraka može se koristiti i onečišćeni zrak odveden iz prostorija sustavom ventilacije ili klimatizacije velikih poslovnih zgrada ili raznih industrijskih procesa. Također se može koristiti i otpadna toplota iz velikih rashladnih sustava i sl.

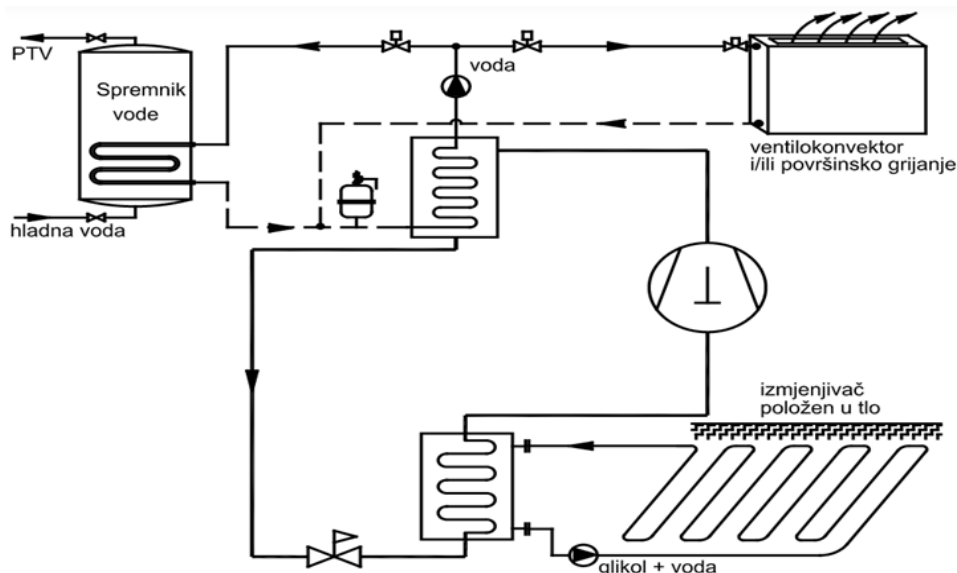
2.3. Toplinske crpke tlo-voda

Ove crpke koriste toplinsku energiju iz tla, te ju predaju vodi. Kao što je prethodno spomenuto, temperatura iz zemlje se najmanje mijenja tijekom godine u usporedbi sa drugim izvorima poput vode i zraka što čini ovu vrstu crpki vrlo stabilnom tijekom cijele godine. Radni medij korišten kod ove vrste crpki je rasolina (smjesa vode i etilen-glikola ili propilen-glikola), čija temperatura u uvjetima punog opterećenja ne smije pasti ispod $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ zbog smrzavanja. Rasolina snižuje točku ledišta vode i ima antikoroziivni učinak.

Osim korištenja u svrhu grijanja, tlo može služiti i kao stabilan toplinski ponor, a svrha tla kao izvora ili ponora topline može se promijeniti ugradnjom prekretnog ventila. Prekretni ventil se koristi kako bi zimi tlo služilo kao toplinski izvor za svrhe grijanja potrošne tople vode i/ili prostora, a ljeti kao toplinski ponor za hlađenje prostora. Kod toplinskih crpki tlo-voda moguće su izvedbe sa vodoravnim i okomitim izmjenjivačem.

2.3.1. Izvedba s vodoravnim izmjenjivačem

Poznata kao i izvedba sa kolektorskim poljem ili horizontalna izvedba, koristi se kada su na raspolaganju veće površine zemlje ispod koje se postavljaju cijevi od polimernih materijala na dubinu od 1,2 do 1,5 m i međusobnim razmakom od 0,5 do 1 m ovisno o vrsti i sastavu tla.



Sl. 2.9. Shema toplinske crpke tlo-voda s kolektorskim poljem [1]

Paralelno postavljene izmjenjivačke podjele moraju biti podjednake duljine zbog lakšeg balansiranja izmjenjivača a mogu biti do 100 metara duljine. Podjele dulje od 100 metara uzrokuju previše visok pad tlaka i uvelike opterećuju optočnu pumpu. Izmjenjivačke podjele mogu se postavljati i u rovove čime se smanjuje potrebna površina.

Zbog potrebe za velikom površinom (za svaki metar kvadratni grijanog prostora potrebno je postaviti 1,5 do 2 metra cijevi) ova izvedba koristi se u ruralnim područjima. Potrebna slobodna površina je otprilike dvostruko veća od grijane površine objekta.

Cijevi postavljene pod zemlju su tipično polietilenske sa promjerom koji obično iznosi 25 ili 32 milimetra. Medij koji prima toplinu tla i teče spomenutim cijevima je rasolina.

Učinak horizontalnog izmjenjivača kreće se od 15 do 35 W/m² ovisno o svojstvima tla koja su prikazana u tablici:

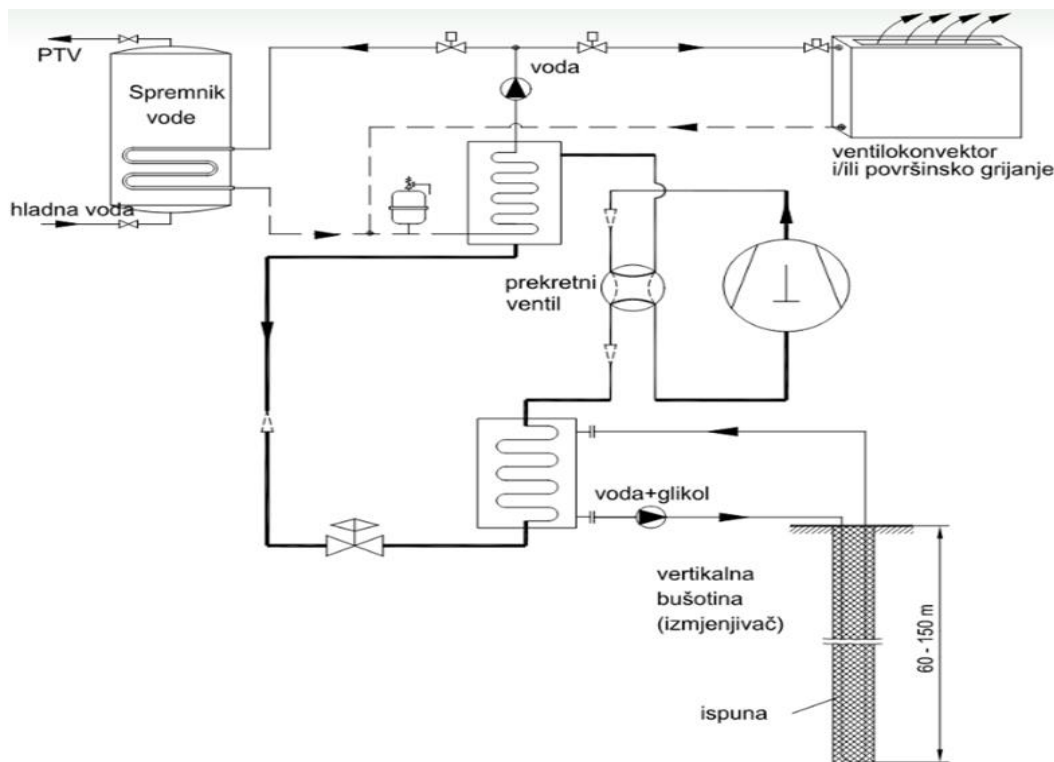
Vrsta tla	Specifični učinak [W/m ²]
Suho pješčano tlo	10 – 15
Mokro pješčano tlo	15 – 20
Suho glinasto tlo	20 – 25
Mokro glinasto tlo	25 – 30
Tlo s podzemnom vodom	30 – 35

Tab. 2.3. Specifični učinak horizontalnog izmjenjivača u tlu ovisno o sastavu tla [1]

Prema tablici se može zaključiti da je tlo sa podzemnom vodom najpovoljnije za postavljanje toplinske crpke.

2.3.2. Izvedba s okomitim izmjenjivačem

Poznata i kao vertikalna izvedba ili izvedba sa toplinskom sondom, najčešće se koristi u urbanim područjima gdje je slobodna površina ograničena. Ova izvedba je skuplja od vodoravne ali zauzima nadaleko manju površinu.



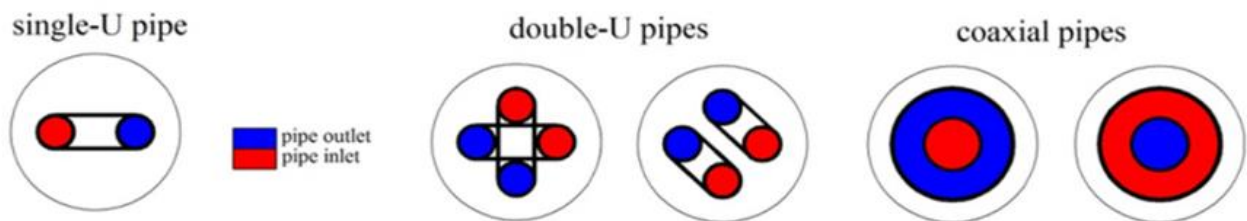
Sl. 2.10. Shema toplinske crpke tlo-voda s izmjenjivačem položenim u okomitu bušotinu [1]

Izmjenjivači se polažu u bušotine dubine 60 do 150 m, najviše do 200 m. U te bušotine se najčešće polažu polietilenske cijevi zbog cjene, dobrih svojstava izmjene topline, te jednostavnog rukovanja i otpornosti na vlagu, tlak i sl. pod zemljom.

Postoji više podizvedbi ove toplinske crpke – kao jednostruka ili dvostruka U-cijev i kao suosna cijev. Kod izmjenjivača sa U-cijevi/ma, kroz jedan krak ulazi ohlađeni radni medij, a kroz drugi se prema isparivaču vraća ugrijan. Za vertikalnu izvedbu uzima se srednji učinak od 50 W/m pri normalnim hidrogeološkim uvjetima, a općenito se kreće od 20 do 85 W/m ovisno o svojstvima tla koja su prikazana u tablici Tab.2.

Vrsta tla	Specifični učinak [W/m]
Šljunak, suhi pjesak	< 20
Šljunak, mokri pjesak	55 – 65
Glina, ilovača	30 – 40
Vapnenac	45 – 60
Pješčanik	55 – 65
Kiseli magmatit (npr. granit)	55 – 70
Bazični magmatit (npr. bazalt)	35 – 55
Kristalasti škriljevac	60 – 70

Tab. 2.4. Specifični učinak vertikalnog izmjenjivača u tlu ovisno o sastavu tla [9]



Sl. 2.11. Shema jednostruke i dvostruke U-cijevi, te suosne(koaksijalne) cijevi [12]

Kod izvedbe sa suosnom cijevi, hladni medij struji kroz unutarnju polietilensku cijev, dok kroz vanjsku, metalnu cijev, struji ugrijani medij koji ide u isparivač.

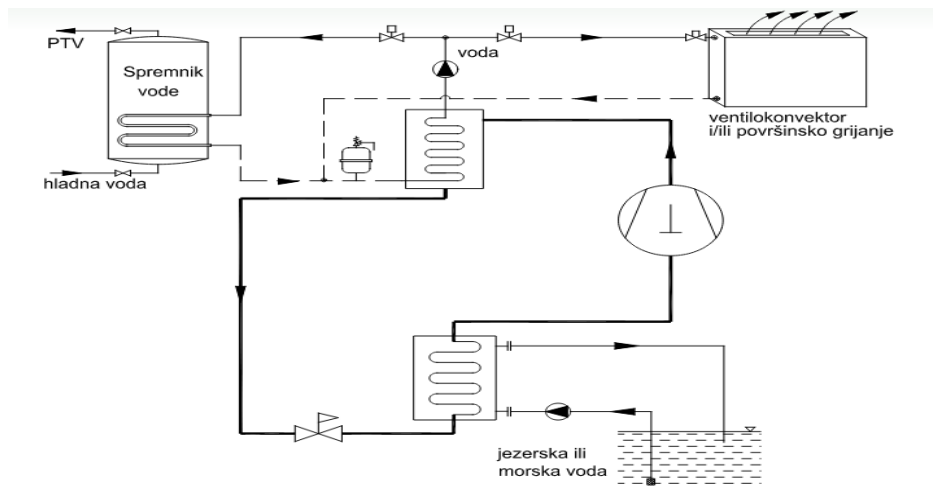
2.4. Toplinske crpke voda-voda

Toplinske crpke voda-voda koriste potočne, riječne, jezerske, morske i podzemne vode kao izvor toplinske energije. Također mogu koristiti i otpadnu toplu vodu iz raznih tehnoloških procesa.

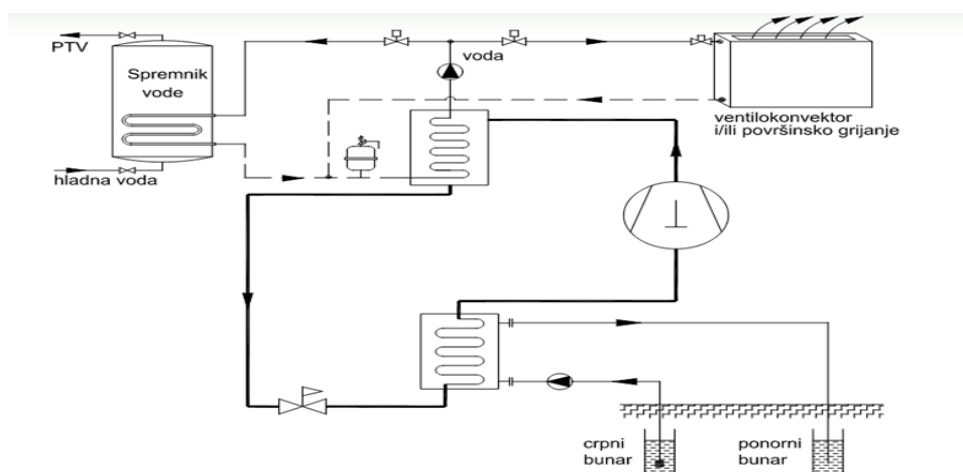
Ove crpke su po izvedbi vrlo slične crpkama tlo-voda, gdje je crpka voda-voda koja koristi podzemne vode slična crpki tlo-voda sa vertikalnom izvedbom, a za nadzemne vode slična vodoravnoj izvedbi sa kolektorskim poljem.

Za kvalitetnu izvedbu toplinske crpke koja koristi vodu kao toplinski izvor bitni su položaj, veličina i dubina izvora, gdje su povoljniji topliji krajevi i veće akumulacije.

Kao što je prethodno rečeno, kod nadzemnih izvora poput jezera, veća i dublja jezera su povoljnija zbog veće akumulacije i stabilnije temperature tokom godine.



Sl. 2.12. Shema toplinske crpke voda-voda sa nadzemnim vodama kao izvorom toplinske energije [1]



Sl. 2.13. Shema toplinske crpke voda-voda sa podzemnim vodama kao izvorom toplinske energije [1]

Kod podzemnih voda kao izvora topline najčešće se koriste dva ili više bunara koji su udaljeni ne manje od 10m.

Crpni bunari moraju u svako doba godine osiguravati dostatnu količinu vode što je presudan parametar pri projektiranju crpki sa ovim izvorom topline. Crpke u bunarima se obično ugrađuju na dubinu do 15 m zbog smanjenja pogonskih troškova pumpe.

Bunari su dublji od dubine na koju je postavljena crpka kako bi se ostavio slobodan prostor za nakupljanje pijeska i nečistoća. Promjer bunara iznosi minimalno 220 mm. Iz jednoga bunara crpi se voda prosječne temperature 10 °C koja prolazi kroz isparivač te se vraća natrag u zemlju pomoću drugog bunara.

Ova crpka može se također izvesti sa samo jednim bunarom, gdje se ohlađena voda koja je prošla kroz isparivač ispušta u površinske vode ili kanalizaciju, što nije uvijek prihvatljivo zbog ekoloških i geoloških razloga. Kod korištenja nadzemnih voda kao izvora toplinske energije, kolektorsko polje polaže se na dno vodotoka, jezera ili mora gdje temperature ne padaju ispod +4 °C.

Sustav se najčešće izvodi kao otvoreni, pri čemu se na određenoj dubini, koja ovisi o prosječnoj temperaturi vode, odnosno o godišnjem dobu, uzima voda koja zatim prolazi kroz isparivač toplinske crpke gdje se hladi, te se zatim ispušta natrag u vodotok, jezero, more ili drugdje, npr. u kanalizacijski sustav.

Kod nadzemnih voda mora se pripaziti da temperaturna razlika između izvorne vode i vode ohlađene u isparivaču ne bi trebala biti manja od 4 °C budući da niske temperature izvora topline smanjuju toplinski množitelj i samu ekonomičnost toplinske crpke. Taj uvjet također vrijedi za podzemne vode, ali kod njih je temperaturna razlika skoro uvijek veća od 4 °C.

2.5. Toplinske crpke zrak-voda

Toplinske crpke zrak-voda koriste okolišni zrak kao glavni izvor toplinske energije, a mogu koristiti i onečišćeni zrak iz raznih industrijskih procesa, otpadnu toplinu iz velikih rashladnih sustava i sl. Po svojoj izvedbi ove crpke su slične malim klimatizacijskim uređajima.

Koristi se orebreni izmjenjivač topline s prisilnom cirkulacijom zraka koji služi za izmjenu topline između zraka i radnog medija. Ova crpka može se izvesti kao kompaktna jedinica ili imati odvojenu izvedbu.

Zbog velikih promjena temperature zraka tijekom godine, potrebno je pripaziti na temperaturu okolišnjeg zraka za danu lokaciju i na stvaranje inja i leda na orebrenim dijelovima isparivača.

Inje i led se pojavljuje pri temperaturama nižim od $+5\text{ }^{\circ}\text{C}$, pogotovo između $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $+2\text{ }^{\circ}\text{C}$ jer je pri ovim temperaturama visok sadržaj vlage u zraku, a led u dovoljnoj količini može i zatvoriti kanale za prolaze zraka u isparivaču. Stvaranjem inja i leda na isparivačkim površinama također smanjuje koeficijent prolaza topline isparivača i učinkovitost crpke. Temperature niže od $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$ nisu kritične budući da je sadržaj vlage u zraku puno manji, ali i dalje dolazi do stvaranja inja i leda u manjim količinama na što treba pripaziti kod dimenzioniranja crpke.

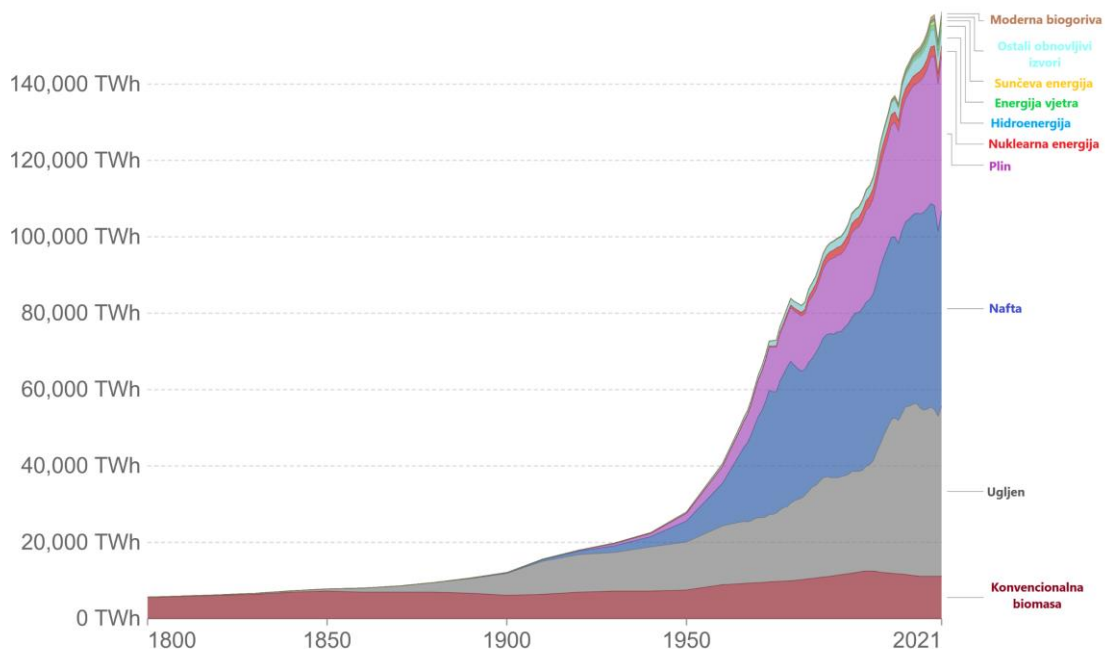
Ove crpke su ekonomski i pogonski opravdane za temperature okolišnjeg zraka do $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$, a u iznimnim slučajevima i do $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$. Ispod $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ potrebno je dodatno grijanje medija što je razlog uporabe samo u posebnim slučajevima. Ovisno o temperaturi vanjskog zraka, toplinski množitelj kreće se od 2,5 do 3,5. Zbog velikih promjena temperatura okolišnjeg zraka tijekom godine, ne dimenzioniraju se za maksimalno toplinsko opterećenje (najnepovoljniju radnu točku) jer bi u najvećem dijelu godine (veći dio sezone grijanja) sustav bio predimenzioniran.

Zrak kao izvor toplinske energije se može koristiti i u crpkama zrak-zrak koje su u najvećoj primjeni jer redovito čine sastavni dio suvremenih malih odvojenih sustava za hlađenje zraka, koji služi za hlađenje prostora ljeti i grijanje zimi. Toplinske crpke koje koriste otpadni zrak imaju povećanu uporabu u kućanstvima sa vrlo malim potrebama za toplinom. U tzv. kompaktnim uređajima toplinske crpke se koriste i u kombinaciji sa sustavom za kontroliranu ventilaciju stanova. U ovim uređajima integrirana toplinska crpka otpadni zrak-voda koristi udio topline otpadnog zraka iz stambenih prostorija koj se ne može koristiti za regeneraciju topline ventilacije, te se koristi za dogrijavanje dovedenog svježeg zraka ili potrošne tople vode.

3. Pregled područja toplinskih crpki

U ovome poglavlju govoriti ćemo o primjeni toplinskih crpki i njihovim prednostima u odnosu na konvencionalne izvore toplinske energije te zašto se primjenjuju.

Toplinske crpke imaju mnogo vrsta, podvrsta, izvedbi i načina radova, svaka za određenu primjenu. Rane toplinske crpke nisu imale veliku raznovrsnost niti primjenu, pogotovo za komercijalne svrhe. Koristile su se u industrijskim procesima, poput spomenute crpke korištene za sušenje soli. Razvitkom tehnologija došlo je do povećane potrebe za energentima i energijom, gdje je svako kućanstvo imalo električnu rasvjetu, hladnjake i druge elektroničke naprave korištene za svakodnevnu potrebu. Potreba za energijom se drastično povećala u modernom dobu, što je dovelo do potražnje alternativnih izvora energije, razvoj novih tehnologija i unaprijeđenja starih.



Sl. 3.1. Potrošnja energije u razdoblju od 1800. do 2021. [13]

Ova unaprijeđenja zahvatila su i toplinske crpke, zbog čega su danas u sve većoj primjeni, pogotovo na mjestima gdje se teže dolazi do toplinske energije, ili se štedi električna energija na grijanje, npr. zamjena ili bivalentan rad električnih bojlera, ili za hlađenje, npr. klima uređaji. Za slučaj gdje se gleda ušteda električne energije za grijanje, ali i općenito energenata, može se pogledati sustav grijanja na Islandu gdje se uveliko koristi geotermalna energija. Island se nalazi vrlo blizu Arktičkog kruga, zbog čega je potreba za grijanjem vrlo velika uslijed niskih

temperatura. Ova potreba zadovoljava se korištenjem obnovljivih izvora energije poput geotermalne energije, zahvaljujući lokaciji na kojoj se nalazi, odnosno magmatskoj aktivnosti, zbog koje postoje mnogobrojni vulkani i gejziri. Godine 2016., Islandska vlada zabilježila je da 85% proizvodnje primarne energije potiče iz obnovljivih izvora energije, od kojih je 65% geotermalna energija [14]. Iako se na Islandu koriste toplane za grijanje, može se pretpostaviti da je korištenje geotermalnog grijanja u ovim slučajevima vrlo korisno.

Što se tiče rashladnih uređaja, poput klima uređaja, toplinske crpke nisu najbolja rješenja za zamjenu jer im je primarna svrha grijanje. Toplinske crpke dimenzionirane su za radne točke i temperaturne režime gdje se preuzima toplina iz izvora niže temperature i predaje potrošaču koji je na višoj temperaturi. Proces se može okrenuti, ali učinkovitost crpke opada u tom načinu rada.

U oba slučaja, grijanje ili hlađenje, toplinske crpke su i dalje puno bolje i energetski manje zahtjevne. Problem zamjene peći, bojlera, klima uređaja, itd. je velika investicijska cijena toplinskih crpki, koja se otplaćuje tijekom dugog niza godina korištenja, te nisu praktične za kratkotrajno korištenje, budući da se investicijski trošak „otplaćuje“ njihovim radom.

Međutim, sa porastom cijene energenata poput plina, zamjena sustava grijanja prostora i PTV-a ili bivalentan rad s njima, je vrlo isplativ, te se investicijski trošak može puno brže „otplatiti“ budući da cijena rada na grijanje pomoću konvencionalnih energenata raste, a investicijska cijena toplinskih crpki ostaje relativno nepromijenjena. Porastom cijene energenata, također raste cijena električne energije potrebne za rad toplinskih crpki, ali ona raste puno sporije od ostalih energenata, poput plina. Krajem 2021. godine, zabilježen je porast cijene električne energije od 30% unutar Europske unije, dok se cijena plina povećala za više od 70% [15].

S ovim rečenim, možemo zaključiti da je primjena toplinskih crpki pogodna za često ili svakodnevno korištenje, pogotovo u slučajevima gdje se koristi za grijanje prostora, ali nisu pogodne za kratkotrajno korištenje ili zamjenu manjih sustava koji koriste grijanje ili hlađenje na električnu energiju.

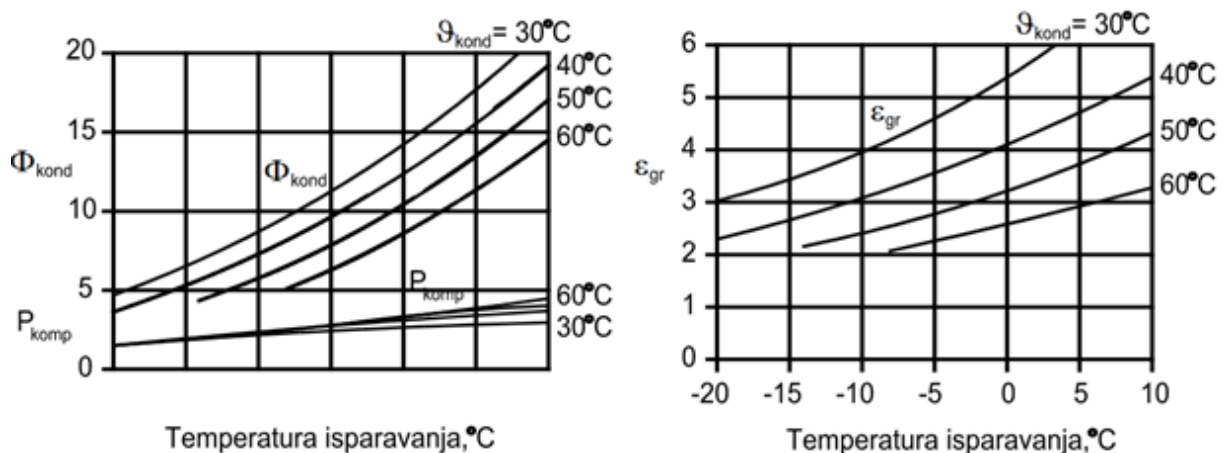
4. Metodologija proračuna energetske performansi toplinskih crpki

Pojam energetske performanse obuhvaća široko područje, od analize početnih temperatura izvora toplinske crpke do gubitaka i dobitaka energije, odnosno njene uštede. Općenito, za proračun energetske performansi koristiti ćemo i analizirati podatke potrebne za izračunavanje godišnjeg toplinskog množitelja crpki (SPF), te financijsku analizu.

SPF se računa tako da se svi toplinski dobitci toplinske crpke tokom godine podjele sa uloženom snagom (električnom energijom), potrebnom za ostvarenje tih dobitaka. Općenito, SPF se računa za unaprijed zadane vrijednosti dok se stvarna vrijednost mijenja ovisno o korisniku (smanjenje SPF-a otvaranjem prozora, vrata i sl.). Na SPF toplinske crpke utječu promjene temperature izvora, radna točka i režim rada crpke, te vanjski faktori poput ozračenja područja u kojem se nalazi, vjetera, promjene temperature zraka, itd.

4.1. Temperature izvora

Temperature izvora dane su u tablici 2.2 za zrak, na slici 2.7. za geotermalnu energiju, te spomenute u poglavlju 2.2.2 za vodu. Kao što je prethodno spomenuto, što je manja temperaturna razlika između toplinskog izvora i ponora, to je veći učinak grijanja i manja je snaga potrebna za rad kompresora, odnosno povećava se toplinski množitelj.



Sl. 4.1. Ovisnost toplinskog množitelja o temperaturama isparavanja i kondenzacije [1]

4.2. Radna točka i temperaturni režim toplinske crpke

Radne točke i temperaturni režimi bitni su za optimalno korištenje toplinske crpke a definira ih norma *HRN EN 14511*. Tako se npr. za radnu točku B0/W35, korištenu kod toplinskih crpki tlo-voda, definiraju rasponi prikazani u tablici:

Učinak grijanja [kW]	10,4	10,8
El. snaga dovedena sustavu [kW]	2,4	2,4
Faktor grijanja	4,4	4,4
Temperatura glikolne smjese na isparivaču [°C]	0	-3
Temperatura vode na kondenzatoru [°C]	30	35

Tab. 4.1. Parametri za radnu točku B0/W35, definirani normom HRN EN 14511 [1]

Ovisno o izvoru toplinske energije, odnosno toplinskoj crpki, koriste se različiti temperaturni režimi, odnosno radne točke. Slova koja se koriste opisuju korišteni medij, koji može biti: voda, W (eng. Water), rasolina, B (eng. Brine) i zrak, A (eng. Air). Korištene oznake su engleske, gdje se za tlo koristi rasolina, odnosno eng. „Brine-water heat pump“ bi bila toplinska crpka tlo-voda. Prvi broj koji se koristi odnosi se na najvišu temperaturu izvora, dok se drugi broj odnosi na najvišu temperaturu radnog medija. U najvećoj primjeni su radne točke B0/W35, W10/W35, A2/W35. Temperaturni režim odnosi se na raspon temperatura isparivača i kondenzatora, odnosno temperaturni režim isparivača za ovaj primjer iznosi 0/-3 °C.

4.3. Vanjski faktori

Među vanjske faktore ubrajaju se svi uvjeti koji indirektno ili direktno utječu na ponašanje toplinske crpke, a mogu se samo procjeniti. To može biti npr. pad temperature vanjskoga zraka, što hladi objekt sa toplinskom crpkom, čime se povećava potrebna toplinska energija za grijanja, a time se povećava i opterećenje toplinske crpke.

To je slučaj indirektnog utjecaja na toplinske crpke voda-voda i tlo-voda, a direktan za crpku zrak-voda ili zrak-zrak.

Klimatski podaci su najvažniji vanjski faktori, a ovise o geografskom području gdje se crpka postavlja. Za Republiku Hrvatsku, klimatski podaci dijele se na kontinentalni i primorski dio. Referentni klimatski podaci dani su u *pravilniku o energetske certificiranju zgrada* a predstavljaju skup meteoroloških parametara karakterističnih za neko geografsko ili klimatološko područje. Referentni klimatski podaci uključuju broj stupanj dana (umnožak broja dana grijanja i temperaturne razlike između dogovorene srednje unutarnje temperature zraka i srednje dnevne temperature vanjskog zraka), broj dana u sezoni grijanja i vanjsku projektnu temperaturu.

Varijabla \ Područje	Kontinentalna Hrvatska	Primorska Hrvatska
Broj stupanj dana	2900	1600
Broj dana u sezoni grijanja	180	135
Vanjska projektna temperatura [°C]	-12	-4

Tab. 4.2. Referentne vrijednosti za kontinentalnu i primorsku Hrvatsku [1]

Općenito, za mjesta koja imaju 2200 ili više stupanj dana grijanja godišnje, uzimaju se vrijednosti za kontinentalnu Hrvatsku, dok se za manje od 2200 stupanj dana uzimaju vrijednosti za primorsku Hrvatsku. Početak sezone grijanja se uzima kada vanjska temperatura padne i ostane ispod 12 °C tri uzastopna dana, a završava porastom temperature iznad 12 °C tri uzastopna dana. Još neke od referentnih vrijednosti su ozračenost i temperatura zraka, dane u sljedećim tablicama.

Mjesec	Siječanj	Veljača	Ožujak	Travanj	Svibanj	Lipanj
Temperatura [°C]	7,2	8,1	10,6	13,4	18,0	21,6
Ozračenost [kWh/m ²]	50,28	73,06	121,39	156,39	192,78	206,94
Stupanj-dan	393	330	286	0	0	0
Mjesec	Siječanj	Veljača	Ožujak	Travanj	Svibanj	Lipanj
Temperatura [°C]	24,5	24,0	20,5	16,2	11,8	8,5
Ozračenost [kWh/m ²]	213,89	183,61	140,28	103,33	56,67	43,33
Stupanj-dan	0	0	0	0	239	352

Tab. 4.3. Referentne vrijednosti meteoroloških parametara za kontinentalnu Hrvatsku [1]

Mjesec	Siječanj	Veljača	Ožujak	Travanj	Svibanj	Lipanj
Temperatura [°C]	0,3	3,2	7,5	11,8	15,9	19,2
Ozračenost [kWh/m ²]	31,94	48,61	94,44	128,06	170,0	181,11
Stupanj-dan	607	467	385	234	0	0
Mjesec	Siječanj	Veljača	Ožujak	Travanj	Svibanj	Lipanj
Temperatura [°C]	21,1	20,1	16,4	11,7	6,5	1,8
Ozračenost [kWh/m ²]	187,78	159,44	118,61	74,44	34,72	24,17
Stupanj-dan	0	0	0	245	401	561

Tab. 4.4. Referentne vrijednosti meteoroloških parametara za primorsku Hrvatsku [1]

Za razliku od referentnih klimatskih podataka čije su vrijednosti dane za određena područja, postoje i stvarni klimatski podaci dobiveni obradom podataka iz meteorološke stanice najbliže mjestu, a dani su u *tehničkom propisu o racionalnoj uporabi energije i toplinskoj zaštiti u zgradama*. Kod stvarnih klimatskih podataka gledaju se sljedeće vrijednosti: temperatura vanjskog zraka (srednja mjesečna, godišnja, minimalna i maksimalna temperatura zraka, itd.), broj stupanj dana, vlažnost zraka (srednje mjesečne vrijednosti relativne vlažnosti zraka, srednje vrijednosti relativne vlažnosti zraka mjerene u 7:00 i 14:00 sati, itd.), brzina vjetera i sunčevo zračenje.

5. Energetske performanske toplinskih crpki u GeoT*Sol programu

Za izračun SPF-a raznih toplinskih crpki koristiti ćemo se GeoT*Sol programom tvrtke Valentin Software GmbH. Bitni parametri za unos u program su:

- polazna i povratna temperatura kruga isparivača
- toplinsko opterećenje, odnosno toplinski danak crpke koji može biti mjesečni ili godišnji
- površina grijanog prostora
- temperatura unutrašnjeg prostora
- minimalna i maksimalna temperatura toplinskog izvora
- snaga uložena u toplinsku crpku (kompresor ili pumpu)

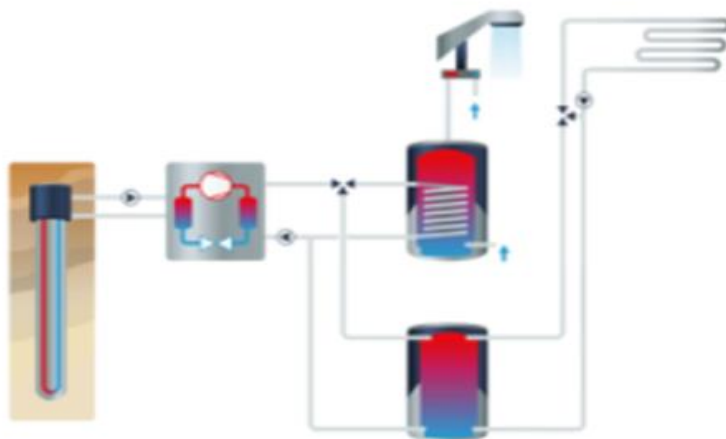
Da bi mogli direktno usporediti performanse toplinskih crpki, svi parametri osim polazne i povratne temperature isparivača, te maksimalne i minimalne temperature izvora, će biti isti. Površina grijanog prostora će iznositi $A = 100 \text{ m}^2$, čime se, uz toplinsko opterećenje od 6,7 kW, dobije specifična godišnja potrebna toplinska energija za grijanje $Q''_{H,nd} = 67 \text{ kWh/m}^2\text{god}$ što odgovara energetske razredu A+ za stambene zgrade prema pravilniku o energetske certificiranju zgrada. Klimatski podaci uzeti su prema mjerenjima meteorološke stanice Gradište. Za proračun performansi će se vršiti dva proračuna za svaku crpku:

- monovalentni način rada sa crpkom namijenjenom za niskotemperaturno grijanje prostora i grijanje PTV
- bivalentno-paralelni način rada sa plinskim grijačem i grijanjem prostora i PTV

5.1. GeoT*Sol toplinske crpke tlo-voda

Za toplinske crpke tlo-voda, osim dva prijašnja proračuna, također će se zasebno razmatrati vertikalna i horizontalna izvedba.

5.1.1. GeoT*Sol toplinske crpke tlo-voda s vertikalnom izvedbom



Sl. 5.1. Shema toplinske crpke tlo-voda sa sondom u GeoT*Sol programu

Space heating loop		Low temp. (LT) heating loop proportion:	
		100,0 %	
Low temperature heating loop		High temperature heating loop	
Supply temperature:	35,0 °C	Supply temperature:	50,0 °C
Return temperature:	28,0 °C	Return temperature:	35,0 °C
Requirements			
<input type="radio"/> Heating load: 6,7 kW <input type="radio"/> Heating output (yearly total): 8.510 kWh <input checked="" type="radio"/> Heating output (monthly): Monthly values			
Heated useable area:	100 m ²	Specific heating load:	67 W/m ²
Indoor temperature:	20,0 °C	Spec. annual heat requirement	85.000 Wh/m ²
Heating limit temperature:	12 °C		
Standard outdoor temperature:	-12,0 °C		
		Heating output (kWh)	
		January	1.800
		February	1.400
		March	1.000
		April	500
		May	200
		June	0
		July	0
		August	0
		September	10
		October	600
		November	1.300
		December	1.700
		Yearly total:	8.510
		OK Cancel	

Sl. 5.2. Parametri za grijanje prostora u GeoT*Sol programu

Prvi postavljani parametar su proporcije nisko-temperaturnog kruga (Low temp. (LT) heating loop proportions), a postavljen je na 100 %. Nisko-temperaturni krug odnosi se na niskotemperaturno grijanje prostora poput zidnog i podnog grijanja, dok bi visoko-temperaturni krug bili radijatori.

Budući da crpka radi u monovalentnom načinu te ne može postići dovoljno visoke temperature, korištenje radijatora nije moguće, zbog čega je proporcija nisko-temperaturnoga kruga 100 %.

Sljedeći parametri su polazne i povratne temperature nisko i visoko-temperaturnih krugova. Za ovu izvedbu polazna temperatura nisko-temperaturnog kruga je 35 °C, a povratna 28 °C. Visoko-temperaturni krug se ne koristi, te postavljene vrijednosti nemaju učinka.

Za potrebne uvjete uzelo se toplinsko opterećenje 6,7 kW, a postoji izbor i ukupne godišnje odane topline kao i mjesečne odane topline čije se vrijednosti mogu očitati iz tablice na slici 5.2. Možemo primijetiti da je najveća toplina odana u siječnju jer su tada temperature okoline najniže, čime je potreba za grijanjem najveća.

Površinu grijanog prostora smo postavili na 100 m² i unutarnju projektiranu temperaturu na 20°C prema normi *HRN EN 12831*. Prema *pravilniku o energetsom certificiranju zgrada* uzeta je vanjska projektna temperatura od -12 °C budući da se radi o kontinentalnoj Hrvatskoj.

Specifična godišnja potrebna toplinska energija za grijanje $Q''_{H,nd}$ je automatski izračunata, a iznosi $Q''_{H,nd} = 85 \text{ kWh/m}^2$, odnosno specifično toplinsko opterećenje iznosi 67 W/m².

Consumption			
<input type="checkbox"/> DHW consumption known			
Average daily usage:	160	l	Annual energy consumption: 2.490 kWh
No. Persons:	4		Spec. annual energy consumpt 24.899,1 Wh/m ²
Consumption per person and day:	40	l	

Temperatures	
DHW target temperature:	50 °C
<input checked="" type="checkbox"/> Calculate cold water temperature based on climate data	
Cold water temperature in February:	9,5 °C
Cold water temperature in August:	16,5 °C

Sl. 5.3. Parametri za grijanje PTV u GeoT*Sol programu

Prelaskom na parametre potrošne tople vode možemo postaviti broj osoba u kućanstvu, kao i dnevnu potrošnju PTV. U ovom slučaju odabrali smo četiri osobe u kućanstvu od kojih svaka troši po 40 litara PTV dnevno. Za potrebe zagrijavanja 160 litara vode dnevno, godišnja potrošnja energije iznosi 2490 kWh, a specifična godišnja potrošnja energije iznosi 24899,1 Wh/m².

PTV se zagrijava na temperaturu od 50 °C, a temperatura vode prije grijanja (temperatura hladne vode) se bazira na klimatskim podacima uzetim iz meteorološke stanice Gradište, prema kojima temperatura vode iznosi 9,5 °C u veljači, a 16,5 °C u kolovozu. Svi prijašnje navedeni parametri ostaju isti za sve simulacije.

Toplinska crpka tlo-voda koju smo odabrali je crpka TCSV 6 tvrtke Gorenje d.d, nazivne snage 6,9 kW i radnom točkom B0/W35 u kojoj COP iznosi 4,4.

Heat pump		Geothermal probe	
Power input on the cold side:	5,4 kW	Borehole diameter:	150 mm
Brine		Construction type:	Double U-Pipe
Nominal output of brine pump:	120 W	Infill:	Simple grouting
Flow rate:	1.549 l/h	Length of the borehole heat exchanger	
Glycol:	30 %	Spec. extraction rate:	20,0 W/r
Ground		Maximum drilling depth:	99 m
Undisturbed ground temperature:	10,0 °C	Required heat probe length:	268 m
Calculate size			
		Number of wells:	3 at 89,3 m

Sl. 5.4. Parametri toplinskog izvora (tlo) u GeoT*Sol programu

Kapacitet hlađenja pumpe (eng. Power input on the cold side; cooling capacity) je nazivna snaga pumpe za hlađenje na sobnu temperaturu. Ova vrijednost ovisi o proizvođaču pumpe, a može se pronaći u tehničkim podacima koje proizvođač izdaje.

Kao medij kruga isparivača koristi se rasolina, gdje udio glikola iznosi 30 % rasoline, dok je preostalih 70 % voda. Nazivna snaga pumpe koja služi za cirkulaciju između sonde i isparivača je 120 W, sa protokom od 1548 l/h. Snaga i protok ovise o modelu pumpe.

Temperatura tla bez toplinskih smetnji (rada crpke) iznosi 10 °C.

Za toplinsku sondu koristi se dvostruka U-cijev sa jednostavnom ispunom (ispuna bez značajne toplinske izolacije). Promjer sonde u koju se polaže cijev iznosi 150 mm. Specifični učinak izmjenjivača topline iznosi 20 W/m. Kako bi zadovoljili potrebe za grijanjem prostora i PTV, sa ovim podacima dobili smo zahtjev za tri bunara, od kojih dubina svakog bunara iznosi 89,3 metara.

Spremnik vode odabran za pohranu i zagrijavanje PTV, Bradford White S-DW2-504T6FBN je kapaciteta 170 litara i ima toplinsku izolaciju iznosa 4,18 kWh/d, dok se za pohranu vode korištene za grijanje prostora koristi Viessmann Werke GmbH Co KG-ov spremnik Vitocell 100-E kapaciteta 750 l i toplinske izolacije 2,53 kWh/d. Ovi spremnici se koriste za sve simulacije.

Svrha korištenja dodatnoga spremnika koji skladišti toplu vodu za grijanje prostora je mogućnost pohrane tople vode tokom toplijeg dijela dana kada je grijanje manje potrebno ili nepotrebno, a korištenje te topline za grijanje kada vanjska temperatura padne odnosno ne ovisi se o trenutnoj vanjskoj temperaturi.

SPF (from simulation)	
SPF of heat pump:	4,25
SPF of heat pump system:	3,99
SPF generator system (HP + solar thermal):	---

Sl. 5.5. Rezultati simulacije za SPF crpke tlo-voda sa sondom, u monovalentnom načinu rada u GeoT*Sol programu

Prema rezultatima simulacije možemo očitati SPF toplinske crpke koji iznosi 4,25. i SPF cijeloga sustava koji iznosi 3,99, dok SPF generatorskog sustava ne postoji jer solarne ploče nisu korištene.

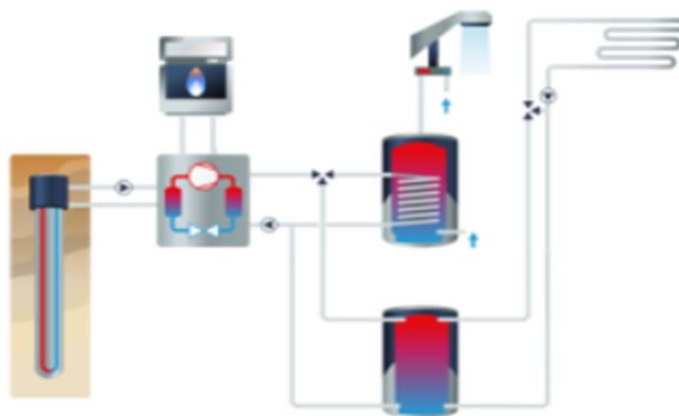
Energy generated / Year		Losses / Year	
Supplied by heat pump:	11.778 kWh (100 %)	Tank losses:	865 kWh
Supplied by boiler:	--- kWh	...fraction of solar tank losses:	--- kWh
Supplied by solar system:	--- kWh	DHW recirculation loop:	--- kWh
Supplied by elec. heating rod:	--- kWh	Solar loop piping indoors:	--- kWh
		Solar loop piping outdoors:	--- kWh
Utilized energy / Year		Solar loop	
Space Heating:	8.502 kWh (77 %)	Solar fraction:	--- %
Domestic hot water:	2.503 kWh (21 %)	Solar fraction DHW:	--- %
		Efficiency of solar system:	--- %
Power consumption / Year		Irradiation onto active solar surface:	--- kWh
Heat pump:	2.774 kWh (93 %)	Energy delivered by collectors:	--- kWh
Heating element:	--- kWh		
Auxiliary energy:	207 kWh (7 %)		
Solar loop pump:	--- kWh		
Boiler (fuel):	--- kWh		

Sl. 5.6. Rezultati simulacije za energiju, crpke tlo-voda sa sondom, u monovalentnom načinu rada u GeoT*Sol programu

Prema rezultatima simulacije za energiju možemo vidjeti da je toplinska crpka potrošila 2774 kWh, uz dodatne gubitke od 207 kWh i gubitke spremnika PTV od 865 kWh, a pridonijela 11778 kWh. Od pridonosene topline, na grijanje prostora se potrošilo 8502 kWh, dok se za grijanje potrošne tople vode iskoristilo 2503 kWh.

Energetski, temperaturni i financijski grafovi mogu se pronaći u *prilogu 1*.

Sljedeće ćemo analizirati toplinsku crpku tlo-voda s vertikalnom izvedbom u bivalentno-paralelnom načinu rada.



Sl. 5.7. Shema toplinske crpke tlo-voda sa sondom i pomoćnim grijačem u GeoT*Sol programu

U ovom načinu rada svi parametri za grijanje prostora i PTV ostaju isti, osim što imamo dodatne parametre za pomoćni grijač. Kao pomoćni grijač odabrali smo plinski bojler Worcester, Bosch Group Greenstar 12, sa nazivnom snagom 12 kW.

Ovaj bojler koristiti će se u bivalentno-paralelnom radu sa toplinskom crpkom, gdje crpka daje dio toplinske energije za temperature ispod točke bivalencije (prekretanja), a ostatak pokriva bojler. Na temperaturama višim od točke bivalencije, bojler se gasi a crpka preuzima puni toplinski teret.

U GeoT*Sol programu točke bivalencije su određene vanjskom projektiranom temperaturom, a gledaju se prema normi *DIN EN 12831*. Točke bivalencije iste su i za Hrvatsku normu *HRN EN 12831*. Za odabranu vanjsku temperaturu od $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$, točka bivalencije kreće se od -3 do $-6\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Standard outdoor temperature °C	Bivalence point °C
-16	-4 ... -7
-14	-3 ... -6
-12	-3 ... -6
-10	-2 ... -5

Sl. 5.8. Točke bivalencije za različite vanjske projektirane temperature prema normi DIN EN 12831

Svi parametri za toplinski izvor su isti, odnosno i dalje su potrebna 3 bunara na 89,3 metara dubine. Spremnici vode također su isti.

SPF (from simulation)	
SPF of heat pump:	4,25
SPF of heat pump system:	4,00
SPF generator system (HP + solar thermal):	---

Sl. 5.9. Rezultati simulacije za SPF crpke tlo-voda sa sondom, u bivalentno-paralelnom načinu rada u GeoT*Sol programu

Prema rezultatima simulacije za SPF, možemo primjetiti da se SPF sustava neznatno promijenio u odnosu na monovalentni način grijanja. Razlog tomu je što se energija uložena za rad pomoćnog grijača ne računa, već samo dobitci i gubitci energije same toplinske crpke. SPF se smanjuje ako je crpka previše ili premalo opterećena, što ovisi o projektiranoj radnoj točki i temperaturnom režimu, a može se vidjeti iz energetske grafova u *prilozima 1 i 2*. Rad bojlera rasterećuje toplinsku crpku što smanjuje njenu potrebu za električnom energijom, što se može vidjeti u rezultatima simulacije za energiju.

Energy generated / Year	
Supplied by heat pump:	11.328 kWh (96 %)
Supplied by boiler:	457 kWh (4 %)
Supplied by solar system:	--- kWh
Supplied by elec. heating rod:	--- kWh

Utilized energy / Year	
Space Heating:	8.504 kWh (77 %)
Domestic hot water:	2.503 kWh (21 %)

Power consumption / Year	
Heat pump:	2.663 kWh (80 %)
Heating element:	--- kWh
Auxiliary energy:	198 kWh (6 %)
Solar loop pump:	--- kWh
Boiler (fuel):	478 kWh (14 %)

Losses / Year	
Tank losses:	867 kWh
...fraction of solar tank losses:	--- kWh
DHW recirculation loop:	--- kWh
Solar loop piping indoors:	--- kWh
Solar loop piping outdoors:	--- kWh

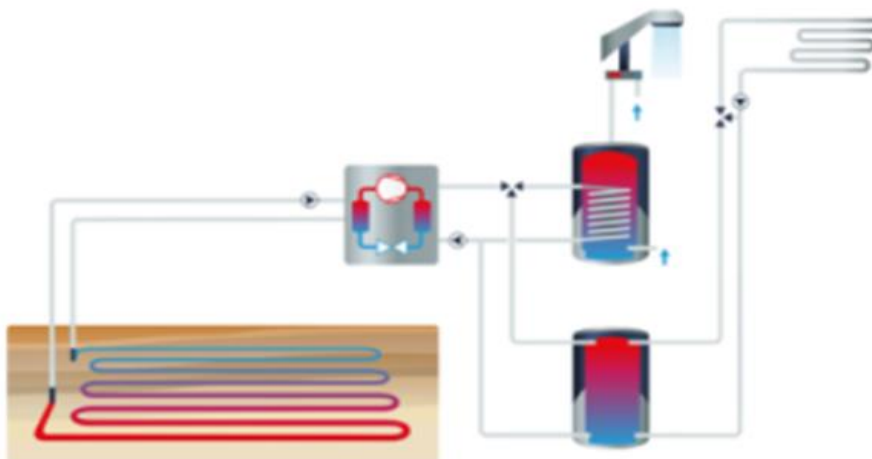
Solar loop	
Solar fraction:	--- %
Solar fraction DHW:	--- %
Efficiency of solar system:	--- %
Irradiation onto active solar surface:	--- kWh
Energy delivered by collectors:	--- kWh

Sl. 5.10. Rezultati simulacije za energiju, crpke tlo-voda sa sondom, u bivalentno-paralelnom načinu rada u GeoT*Sol programu

Iz rezultata simulacije za energiju možemo primjetiti da se u bojler uložilo 478 kWh što je 14 % ukupne energetske potrošnje, dok se zauzvrat dobilo 457 kWh, odnosno samo 4 % ukupnog prinosa toplinske energije.

Energetski, temperaturni i finansijski grafovi mogu se pronaći u *prilogu 2*.

5.1.2. GeoT*Sol toplinske crpke tlo-voda s horizontalnom izvedbom

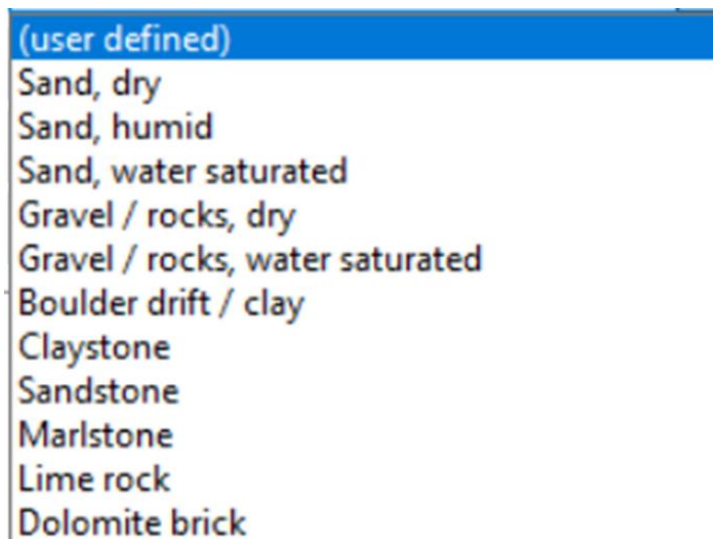


Sl. 5.11. Shema toplinske crpke tlo-voda sa kolektorskim poljem u GeoT*Sol programu

Za ovu izvedbu koristiti ćemo se istim parametrima i uređajima kao za crpku tlo-voda s vertikalnom izvedbom u monovalentnom načinu rada.

Jedini promijenjeni parametri u odnosu na vertikalnu izvedbu su parametri toplinskog izvora. Kapacitet hlađenja pumpe ostaje isti, odnosno na 5,4 kW. Pod grupom parametara geotermalnog kolektora odabiremo površinu koju kolektori zauzimaju, koju smo postavili na 200 m², te dubinu na koju su cijevi položene, a to smo postavili na 1,2 metra. Podzemne vode koje protiču su na dubini od 10 metara i temperaturi 10 °C. Parametri za snagu crpke, njen protok i udio glikola u rasolini su isti kao i za vertikalnu izvedbu.

Za razliku od toplinske crpke tlo-voda sa vertikalnom izvedbom gdje se gledala dubina tla i ispunjena sonde, kod ove izvedbe bitan je sastav zemlje u koji se izmjenjivač polaže.



Sl. 5.12. Izbor sastava tla u GeoT*Sol programu

Imamo izbor raznih sastava tla, od suhoga pjeska do dolomitnih cigli. Odabrali smo šljunak/kamenje, zasićeno vodom, a specifični toplinski kapaciteti za ovaj sastav tla iznosi 2,4 MJ/(m³K) i toplinsku provodnost 1,7 W/(mK). Ovaj sastav tla je jedan od najboljih jer sadržava vodu čiji udio iznosi 60 %. Nedostatak ovog sastava tla je poviša poroznost, ali ona je nužna za protjecanje podzemnih voda.

SPF (from simulation)		
SPF of heat pump:	4,05	?
SPF of heat pump system:	3,81	?
SPF generator system (HP + solar thermal):	---	

Sl. 5.13. Rezultati simulacije za SPF crpke tlo-voda sa kolektorskim poljem, u monovalentnom načinu rada u GeoT*Sol programu

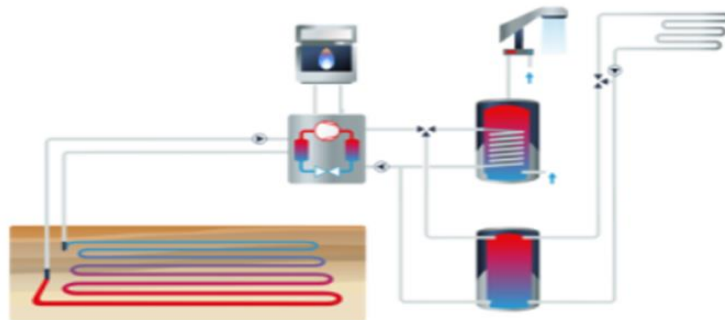
Energy generated / Year		Losses / Year	
Supplied by heat pump:	11.791 kWh (100 %)	Tank losses:	864 kWh
Supplied by boiler:	--- kWh	...fraction of solar tank losses:	--- kWh
Supplied by solar system:	--- kWh	DHW recirculation loop:	--- kWh
Supplied by elec. heating rod:	--- kWh	Solar loop piping indoors:	--- kWh
		Solar loop piping outdoors:	--- kWh
Utilized energy / Year		Solar loop	
Space Heating:	8.521 kWh (77 %)	Solar fraction:	--- %
Domestic hot water:	2.503 kWh (21 %)	Solar fraction DHW:	--- %
		Efficiency of solar system:	--- %
Power consumption / Year		Irradiation onto active solar surface:	--- kWh
Heat pump:	2.908 kWh (93 %)	Energy delivered by collectors:	--- kWh
Heating element:	--- kWh		
Auxiliary energy:	217 kWh (7 %)		
Solar loop pump:	--- kWh		
Boiler (fuel):	--- kWh		

Sl. 5.14. Rezultati simulacije za energiju, crpke tlo-voda sa kolektorskim poljem, u monovalentnom načinu rada u GeoT*Sol programu

Prema rezultatima energetske simulacije i simulacije za SPF možemo zaključiti da je toplinska crpka sa kolektorskim poljem manje učinkovita u odnosu na crpku sa sondom, ali doprinosi jednaku potrebnu toplinsku energiju.

Iz rezultata simulacije možemo primjetiti da je SPF toplinske crpke manji u odnosu na vertikalnu izvedbu u monovalentnom načinu rada za 4,71 %, a SPF sustava za 4,51 %.

Energetski, temperaturni i financijski grafovi mogu se pronaći u *prilogu 3*.



Sl. 5.15. Shema toplinske crpke tlo-voda sa kolektorskim poljem i pomoćnim grijačem u GeoT*Sol programu

Kao i prethodno, ponavljamo postupak sa istim parametrima, osim što dodajemo plinski bojler kao pomoćni grijač za bivalentno-paralelni način rada.

SPF (from simulation)	
SPF of heat pump:	4,03
SPF of heat pump system:	3,79
SPF generator system (HP + solar thermal):	---

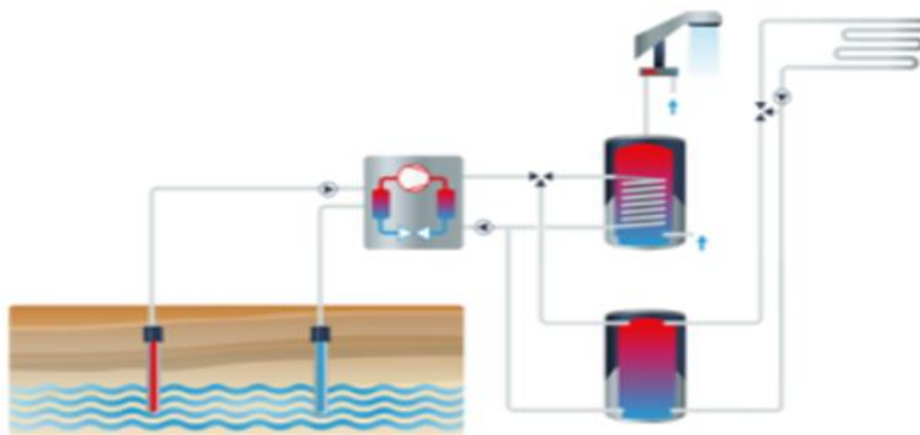
Sl. 5.16. Rezultati simulacije za SPF crpke tlo-voda sa kolektorskim poljem, u bivalentno-paralelnom načinu rada u GeoT*Sol programu

Energy generated / Year		Losses / Year	
Supplied by heat pump:	11.327 kWh (96 %)	Tank losses:	865 kWh
Supplied by boiler:	468 kWh (4 %)	...fraction of solar tank losses:	--- kWh
Supplied by solar system:	--- kWh	DHW recirculation loop:	--- kWh
Supplied by elec. heating rod:	--- kWh	Solar loop piping indoors:	--- kWh
		Solar loop piping outdoors:	--- kWh
Utilized energy / Year		Solar loop	
Space Heating:	8.521 kWh (77 %)	Solar fraction:	--- %
Domestic hot water:	2.503 kWh (21 %)	Solar fraction DHW:	--- %
		Efficiency of solar system:	--- %
Power consumption / Year		Irradiation onto active solar surface:	--- kWh
Heat pump:	2.808 kWh (80 %)	Energy delivered by collectors:	--- kWh
Heating element:	--- kWh		
Auxiliary energy:	210 kWh (6 %)		
Solar loop pump:	--- kWh		
Boiler (fuel):	488 kWh (14 %)		

Sl. 5.17. Rezultati simulacije za energiju, crpke tlo-voda sa kolektorskim poljem, u bivalentno-paralelnom načinu rada u GeoT*Sol programu

Energetski, temperaturni i financijski grafovi mogu se pronaći u *prilogu 4*.

5.2. GeoT*Sol toplinske crpke voda-voda



Sl. 5.18. Shema toplinske crpke voda-voda u GeoT*Sol programu

Za analizu crpke voda-voda koristiti ćemo se podzemnim vodama kao izvorom topline. Kao i prije, uzimamo iste parametre, osim novih parametara za toplinski izvor.

Za razliku od crpki tlo-voda, za crpke voda-voda nije važan sastav tla, već samo temperatura izvora. Gdje se za crpke tlo-voda samo odabrao sastav tla, kod crpki voda-voda potrebno je definirati minimalnu i maksimalnu temperaturu u dva mjeseca, svaki razmaknut po pola godine. Minimalnu temperaturu podzemne vode koju koristimo kao izvor toplinske energije, postavili smo na 7 °C, a maksimalnu temperaturu na 12 °C. Snaga uložena u pumpu iznosi 150 W, a protok pumpe iznosi 4148 l/h.

Groundwater			
Minimum temperature:	<input type="text" value="7,0"/>	°C	on: <input type="text" value="01.03."/> (dd.mm.)
Maximum temperature:	<input type="text" value="12,0"/>	°C	on: <input type="text" value="01.09."/>

Groundwater pump	
Power input:	<input type="text" value="150"/> W For continuous operation after start-up.
Flow rate:	<input type="text" value="4,148"/> l/h

Sl. 5.19. Parametri toplinskog izvora (voda) u GeoT*Sol programu

Toplinska crpka voda-voda koju smo uzeli je crpka TCVV 18 tvrtke Gorenje d.d, nazivne snage 17,7 kW i radnom točkom W10/W35 u kojoj COP iznosi 5,28.

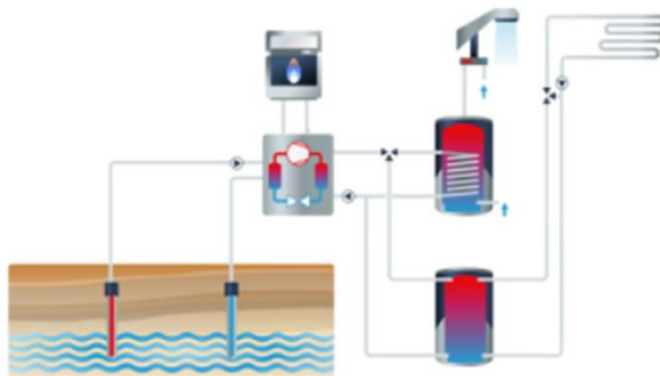
SPF (from simulation)	
SPF of heat pump:	3,89
SPF of heat pump system:	3,76
SPF generator system (HP + solar thermal):	---

Sl. 5.20. Rezultati simulacije za SPF crpke voda-voda, u monovalentnom načinu rada u GeoT*Sol programu

Energy generated / Year		Losses / Year	
Supplied by heat pump:	11.796 kWh (100 %)	Tank losses:	878 kWh
Supplied by boiler:	--- kWh	...fraction of solar tank losses:	--- kWh
Supplied by solar system:	--- kWh	DHW recirculation loop:	--- kWh
Supplied by elec. heating rod:	--- kWh	Solar loop piping indoors:	--- kWh
		Solar loop piping outdoors:	--- kWh
Utilized energy / Year		Solar loop	
Space Heating:	8.506 kWh (77 %)	Solar fraction:	--- %
Domestic hot water:	2.503 kWh (21 %)	Solar fraction DHW:	--- %
		Efficiency of solar system:	--- %
Power consumption / Year		Irradiation onto active solar surface:	--- kWh
Heat pump:	3.031 kWh (96 %)	Energy delivered by collectors:	--- kWh
Heating element:	--- kWh		
Auxiliary energy:	135 kWh (4 %)		
Solar loop pump:	--- kWh		
Boiler (fuel):	--- kWh		

Sl. 5.21. Rezultati simulacije za energiju, crpke voda-voda, u monovalentnom načinu rada u GeoT*Sol programu

Energetski, temperaturni i financijski grafovi mogu se pronaći u *prilogu 5*.



Sl. 5.22. Shema toplinske crpke voda-voda sa pomoćnim grijačem u GeoT*Sol programu

SPF (from simulation)	
SPF of heat pump:	3,89
SPF of heat pump system:	3,76
SPF generator system (HP + solar thermal):	---

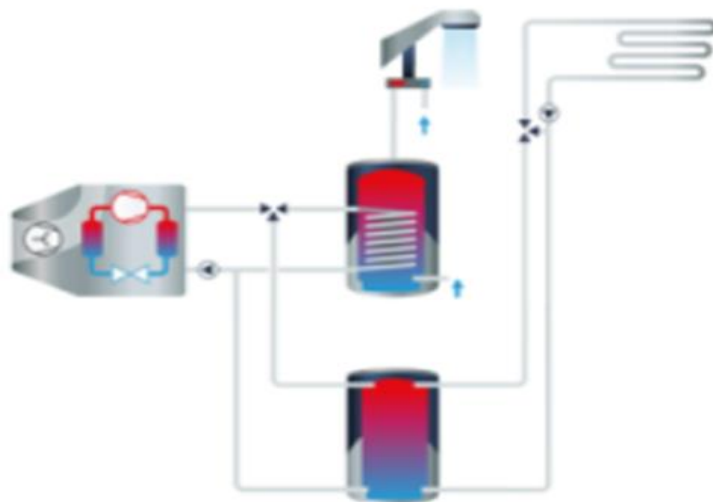
Sl. 5.23. Rezultati simulacije za SPF crpke voda-voda, u bivalentno-paralelnom načinu rada u GeoT*Sol programu

Energy generated / Year		Losses / Year	
Supplied by heat pump:	11.564 kWh (98 %)	Tank losses:	876 kWh
Supplied by boiler:	233 kWh (2 %)	...fraction of solar tank losses:	---
Supplied by solar system:	---	DHW recirculation loop:	---
Supplied by elec. heating rod:	---	Solar loop piping indoors:	---
		Solar loop piping outdoors:	---
Utilized energy / Year		Solar loop	
Space Heating:	8.506 kWh (77 %)	Solar fraction:	---
Domestic hot water:	2.503 kWh (21 %)	Solar fraction DHW:	---
		Efficiency of solar system:	---
Power consumption / Year		Irradiation onto active solar surface:	---
Heat pump:	2.972 kWh (89 %)	Energy delivered by collectors:	---
Heating element:	---		
Auxiliary energy:	133 kWh (4 %)		
Solar loop pump:	---		
Boiler (fuel):	243 kWh (7 %)		

Sl. 5.24. Rezultati simulacije za energiju, crpke voda-voda, u bivalentno-paralelnom načinu rada u GeoT*Sol programu

Energetski, temperaturni i financijski grafovi mogu se pronaći u *prilogu 6*

5.3. GeoT*Sol toplinske crpke zrak-voda



Sl. 5.25. Shema toplinske crpke zrak-voda u GeoT*Sol programu

Za toplinski crpku zrak-voda nemamo izbor parametara toplinskog izvora, odnosno zraka, nego su unaprijed zadani. Ovi parametri baziraju se na mjerenjima meteorološke stanice koju smo izabrali, odnosno meteorološke stanice Gradište.

Toplinska crpka zrak-voda koju smo uzeli je crpka TCZV 9 tvrtke Gorenje d.d, nazivne snage 7,4 kW i radnom točkom A2/W35 u kojoj COP iznosi 3,33.

Nazivna snaga ventilatora korištenog za unos zraka korištenog za grijanje, u sustav, iznosi 100 W.

Volumni protok zraka koji omogućuje crpka iznosi 2509 m³/h.

Ventilator	
Ventilator's nominal output:	0,100 kW
Flow rate:	2.509 m ³ /h

Sl. 5.26. Parametri toplinske crpke zrak-voda u GeoT*Sol programu

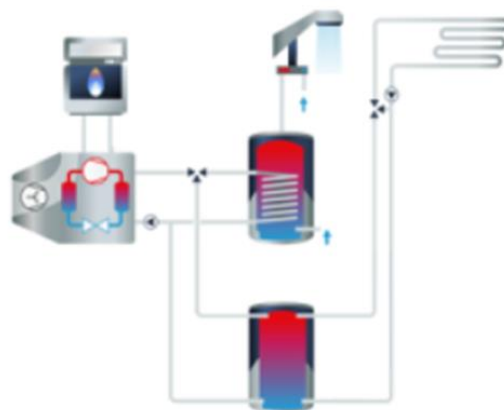
SPF (from simulation)	
SPF of heat pump:	3,10
SPF of heat pump system:	3,10
SPF generator system (HP + solar thermal):	---

Sl. 5.27. Rezultati simulacije za SPF crpke zrak-voda, u monovalentnom načinu rada u GeoT*Sol programu

Energy generated / Year		Losses / Year	
Supplied by heat pump:	11.757 kWh (100 %)	Tank losses:	863 kWh
Supplied by boiler:	--- kWh	...fraction of solar tank losses:	--- kWh
Supplied by solar system:	--- kWh	DHW recirculation loop:	--- kWh
Supplied by elec. heating rod:	--- kWh	Solar loop piping indoors:	--- kWh
		Solar loop piping outdoors:	--- kWh
Utilized energy / Year		Solar loop	
Space Heating:	8.481 kWh (77 %)	Solar fraction:	--- %
Domestic hot water:	2.503 kWh (21 %)	Solar fraction DHW:	--- %
		Efficiency of solar system:	--- %
Power consumption / Year		Irradiation onto active solar surface:	--- kWh
Heat pump:	3.788 kWh (100 %)	Energy delivered by collectors:	--- kWh
Heating element:	--- kWh		
Auxiliary energy:	--- kWh		
Solar loop pump:	--- kWh		
Boiler (fuel):	--- kWh		

Sl. 5.28. Rezultati simulacije za energiju, crpke zrak-voda, u monovalentnom načinu rada u GeoT*Sol programu

Energetski, temperaturni i financijski grafovi mogu se pronaći u *prilogu 7*.



Sl. 5.29. Shema toplinske crpke zrak-voda sa pomoćnim grijačem u GeoT*Sol programu

SPF (from simulation)		
SPF of heat pump:	3,12	?
SPF of heat pump system:	3,12	?
SPF generator system (HP + solar thermal):	---	

Sl. 5.30. Rezultati simulacije za SPF crpke zrak-voda, u bivalentno-paralelnom načinu rada u GeoT*Sol programu

Energy generated / Year		Losses / Year	
Supplied by heat pump:	11.248 kWh (95 %)	Tank losses:	863 kWh
Supplied by boiler:	533 kWh (5 %)	...fraction of solar tank losses:	--- kWh
Supplied by solar system:	--- kWh	DHW recirculation loop:	--- kWh
Supplied by elec. heating rod:	--- kWh	Solar loop piping indoors:	--- kWh
		Solar loop piping outdoors:	--- kWh
Utilized energy / Year		Solar loop	
Space Heating:	8.507 kWh (77 %)	Solar fraction:	--- %
Domestic hot water:	2.503 kWh (21 %)	Solar fraction DHW:	--- %
		Efficiency of solar system:	--- %
Power consumption / Year		Irradiation onto active solar surface:	--- kWh
Heat pump:	3.602 kWh (87 %)	Energy delivered by collectors:	--- kWh
Heating element:	--- kWh		
Auxiliary energy:	--- kWh		
Solar loop pump:	--- kWh		
Boiler (fuel):	555 kWh (13 %)		

Sl. 5.31. Rezultati simulacije za energiju, crpke zrak-voda, u bivalentno-paralelnom načinu rada u GeoT*Sol programu

Energetski, temperaturni i finansijski grafovi mogu se pronaći u *prilogu 8*.

5.4. Analiza rezultata simulacija

Crpka\SPF	SPF crpke	SPF sustava	Radna točka
T-V, sonda, monovalentno	4,25	3,99	B0/W35
T-V, sonda, bivalentno	4,25	4,00	B0/W35
T-V, polje, monovalentno	4,05	3,81	B0/W35
T-V, polje, bivalentno	4,03	3,79	B0/W35
V-V, monovalentno	3,89	3,76	W10/W35
V-V, bivalentno	3,89	3,76	W10/W35
Z-V, monovalentno	3,1	3,10	A2/W35
Z-V, bivalentno	3,12	3,12	A2/W35

Tab. 5.1. Rezultati simulacije SPF-a toplinskih crpki sa odgovarajućim radnim točkama

Analizirati ćemo rezultate počevši od energetske, zatim temperaturne i konačno, financijske rezultate.

Prema energetskim rezultatima možemo primjetiti da je ukupna proizvedena toplinska energija za sve analizirane crpke i načine rada približno jednaka i iznosi $\approx 11,5$ kWh. Od tih 11,5 kWh, 77 % se koristilo na grijanje prostora, dok se 21 % koristio za grijanje potrošne tople vode. Ostalih 2 % su toplinski gubici. Gledajući energetske rezultate simulacija za bivalentno-paralelni rad, možemo primjetiti kako rad pomoćnog grijača, odnosno plinskoga bojlera, zahtjeva čak 14 % ukupne energije potrebne za zagrijavanje prostora i PTV, dok zauzvrat daje samo 2-5 % ukupne dovedene toplinske energije s povremenim radom u samo tri mjeseca u godini.

Budući da je potreba za energijom jednaka u svim slučajevima, SPF je određen energetskom potrošnjom toplinske crpke. Prema tablici 5.1. možemo direktno usporediti toplinske crpke prema njihovoj potrošnji. Možemo primjetiti da su crpke tlo-voda sa vertikalnom izvedbom nadaleko najbolje što se tiče uštede energije; sa uložnim 1 kWh energije dobijemo čak 4,25 kWh. Sljedeće najbolje crpke po SPF-u su crpke tlo-voda sa horizontalnom izvedbom, koje su blizu crpkama voda-voda koje koriste podzemne vode, te na kraju, imamo crpke zrak-voda koje su nadaleko

najgore što se tiče uštede energije i učinkovitosti. Ovi rezultati podudaraju se sa prikazom djelatnosti/raspoloživosti na slici 2.6.

Prema energetske grafovima u priložima, može se primjetiti da je SPF toplinskih crpki koje idu u dubinu, odnosno crpke tlo-voda sa vertikalnom izvedbom, te crpke voda-voda sa bunarima, najviši u hladnijim mjesecima, a pada u toplijim. SPF crpki tlo-voda sa horizontalnom izvedbom ostaje relativno nepromijenjen tokom godine, a SPF crpki zrak-voda najviši je tokom toplijih dijelova godine. Razlog ovim rezultatima nalazi se u projektiranim radnim točkama. Radne točke nužne su za optimalno korištenje i postavljaju se u uvidu da daju najbolje rezultate tokom godine. Tako za crpke koje idu u dubinu, radna točka je postavljena za više opterećenje, te u hladnijim mjesecima, kada je opterećenje najveće, SPF je također najviši, dok se u toplijim mjesecima, kada opterećenje pada, pada i SPF. Iako crpke tlo-voda sa horizontalnom izvedbom koriste radnom točkom, zbog konstrukcije SPF ostaje relativno stabilan tokom godine. Toplinske crpke zrak-voda ne dimenzioniraju se za puno toplinsko opterećenje, te zbog tog razloga imaju najniži SPF tokom hladnijih mjeseci, a najviši tokom toplijih mjeseci.

Toplinski grafovi u priložima prikazuju temperaturu u ulazu i izlazu iz isparivača, te temperaturu tla oko kolektora za crpke koje koriste geotermalnu energiju. Možemo primjetiti kako je svaki izvor toplinske energije nadaleko drugaciji jedan od drugoga. Temperatura tla, po dubini ima blage prijelaze a kreće se od 1 °C u najhladnijim, do 8 °C u najtoplinim mjesecima. Temperatura medija u kolektoru dobro prati temperaturu tla koje je oko nje. Za razliku od stabilne temperature tla po dubini, temperatura tla kod crpke tlo-voda sa gorizontalom izvedbom naglo poraste nakon Ožujka. Temperatura tla kreće se od 1 do 18 °C, a temperatura kolektora, od -2 do 14 °C. Također možemo primjetiti da kolektor slabije prati temperaturu okolnog tla, te razlika između njihovih temperatura iznosi minimalno 1°C. Temperatura vode kod crpke voda-voda, najmanje se mijenja u odnosu minimalne i maksimalne temperatura, te ima sinusoidni oblik. Najniža temperatura iznosi 7 °C u Ožujku, a 12 °C u Rujnu. Zadnji izvor je zrak, koji je najnestabilniji i po temperaturnim prijelazima, i po temperaturnom minimumu i maksimumu, koji se kreće od -4 do 27 °C.

Financijski grafovi u priložima su napravljeni prema računici na sljedećoj slici, gdje su se samo cijene investicije mijenjale.

Financial Analysis					
Life span:	12	Years	Auxiliary electricity price (budget price):	0,300	kn/kWh
Interest on capital:	4,00	%	Inflation rate:	2,00	%/year
Reinvestment return:	2,00	%	Generated energy:	11.778	kWh/Jahr
Heat pump system		Comparison system			
Energy price:	Tariffs		0,075	kn/kWh	
Cost escalation rate of energy:	3,00	%/year	3,00	%/year	
System expenditure figure:	0,253		1,300		
Investments and Subsidies:	Change...		Remaining investment:	5.000,00	kn
Maintenance costs:	200,00	kn/Year	200,00	kn/Year	
Annuities					
Investment annuity:	1.065,52	kn	532,76	kn	Net present value: 853,85 kn
Operating costs annuity:	715,77	kn	1.339,51	kn	
Allowances annuity:	---	kn	---	kn	
Maintenance costs annuity:	221,48	kn	221,48	kn	
Heat production costs	0,170	kn/kWh	0,178	kn/kWh	
Reinvestment premise					
Return (MIRR):	4,44	%			
Surplus:	3.425,03	kn			

Sl. 5.32. Financijski parametri u GeoT*Sol programu

Važni parametri uključuju životni vijek crpke od 12 godina, 4 % kamatnu stopu, troškove održavanja 221,48 kn, te cijenu po kilovatsatu proizvedene topline od 0,17 kn/kWh.

Prema financijskim grafovima iz priloga možemo primjetiti da su najskuplje crpke, crpke tlo-voda sa vertikalnom izvedbom, te crpke voda-voda koje koriste podzemne vode. Razlog tome je visoka cijena bušenja u zemlju te postavljanja toplinskog kolektora. Crpke tlo-voda sa horizontalnom izvedbom nešto su niže cijene, ali zahtijevaju veliku površinu koja se mora prokopati kako bi se postavili toplinski kolektori. Crpke zrak-voda zauzimaju najmanje mjesta i mogu se postaviti na najviše lokacija, bez potrebe za bušenjem ili kopanjem te, zbog najmanjeg SPF-a, najmanje koštaju.

6. ZAKLJUČAK

Toplinske crpke od početka su bile osmišljene kako bi se jeftino i učinkovito koristila temperatura izvora oko nas. Od prve moderne toplinske crpke koja je služila za sušenje soli, do današnjih toplinskih crpki koje služe za regulaciju temperature prostora i zagrijavanje potrošne vode, ljudi se koriste toplinskim crpkama kako bi smanjili troškove grijanja i hlađenja. Ujedno, uz smanjenje troškova, ugradnja toplinskih crpki ne utječe pozitivno na samo na vlasnike, već i u puno većem području. Toplinske crpke same po sebi smanjuju emisije CO₂, u velikoj mjeri, ali također smanjuju potrebu za energijom korištenom za grijanje ili hlađenje, što smanjuje potrebu za fosilnim gorivima. Svrha toplinskih crpki je učinkovitost, a to je prikazano u samim izvorima toplinske energije kojima se koriste, a svi su obnovljivi. Obnovljivost izvora znači iskorištavanje nepresušivih prirodnih izvora oko nas, bez potrebe za kupovanjem fosilnih ili drugih goriva. Svi ti faktori mogu se očitati u godišnjem toplinskom množitelju, koji opisuje omjer dobivene energije nasprem uložene, gdje je omjer dobivene energije minimalno dvostruko, a često i više, veći od uložene. Toplinski množitelj može se i povisiti odabirući povoljnu radnu točku i temperaturni režim toplinske crpke, koji se određuju ovisno o opterećenju crpke i njejoj građi. Ponekad same toplinske crpke nisu dovoljne da se zadovolji energetska potražnja, stoga se često kombiniraju sa pomoćnim grijačima, poput bojlera, kako bi se omogućila stabilna opskrba toplinskom energijom. Postoje različite kombinacije uporabe i same toplinske crpke, kao i toplinske crpke zajedno sa pomoćnim grijačem, a ovisno o izvedbi toplinske crpke i potrebama. Te potrebe, na kraju, ovisno o korisniku, koji odlučuje kako će koristiti tu toplinsku energiju i kolika je energija potrebna, a na toplinskim crpkama je to da zadovolje te potrebe. Zahvaljujući svim prethodnim dobrim karakteristikama, razvoj toplinskih crpki još je aktivan, što se primjećuje u raznim područjima primjene, raznim izvedbama i raznim izvorima kojima se koriste.

LITERATURA

- [1] M. Andrassy, I. Balen, I. Boras, D. Dović, Ž.H. Borković, K. Lenić, D. Lončar, B. Pavković, V. Soldo, B. Sučić, S. Švaić, Priručnik za energetska certificiranje zgrada, Program Ujedinjenih naroda za razvoj - UNDP, Zagreb, 2010., dostupno na: <https://www.enu.hr/wp-content/uploads/2016/03/Priru%C4%8Dnik-za-energetsko-certificirane-zgrada.pdf> [21.8.2022.]
- [2] Peter von Rittinger's Steam Pump, elkement, 2015., dostupno na: <https://elkement.wordpress.com/2015/11/24/peter-von-rittingers-steam-pump-aka-the-first-heat-pump> [21.8.2022.]
- [3] A history of technical milestones in refrigeration, FrioTherm, dostupno na: <https://www.friotherm.com/about-us/history> [21.8.2022.]
- [4] M. Zogg, Energy and Communications DETEC, History of heat pumps: Swiss Contributions and International Milestones, Swiss Federal Office of Energy SFOE, 2008., dostupno na: <https://www.osti.gov/etdeweb/servlets/purl/21381633> [21.8.2022.]
- [5] G. Florides, S. Kalogirou, Measurements of Ground Temperature at Various Depths, Higher Technical Institute, dostupno na: <https://ktisis.cut.ac.cy/bitstream/10488/870/3/C55-PRT020-SET3.pdf> [21.8.2022.]
- [6] S. Vladimir, Dizalice topline, Međimurska energetska agencija d.o.o, Čakovec, 2013., dostupno na: https://www.menea.hr/wp-content/uploads/2013/12/Dizalice-topline-CK_Soldo.pdf [21.8.2022.]
- [7] Toplinske crpke, ecol, dostupno na: <http://www.ecol.hr/toplinskecrpke.html> [21.8.2022.]
- [8] Toplinske pumpe, eko-puls d.o.o., dostupno na: http://www.eko-puls.hr/Toplinske_pumpe.aspx [21.8.2022.]
- [9] LJ. Majdandžić, Obnovljivi izvori energije, Graphis d.o.o, Zagreb, 2008.
- [10] C. Maatouk, A. Zoughaib, D. Clodic, New Methodology of Characterization of Seasonal Performance Factor of An Air-To-Water Heat Pump, Purdue University, Purdue, 2010., dostupno na: <https://docs.lib.purdue.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=2079&context=iracc> [21.8.2022.]
- [11] V. Soldo, Algoritam za proračun potrebne energije za grijanje i hlađenje prostora zgrade prema HRN EN ISO 13790, Fakultet strojarstva i brodogradnje Zagreb, Zagreb, 2014., dostupno na: <https://mpgi.gov.hr/UserDocsImages/dokumenti/EnergetskaUcinkovitost/Propisi/2017/Algoritam-HRN-EN-ISO-13790.pdf> [21.8.2022.]
- [12] G. Radioti, Shallow geothermal energy: effect of in-situ conditions on borehole heat exchanger design and performance, University of Liege, Liege, 2016., dostupno na: <https://orbi.uliege.be/bitstream/2268/204011/1/Ph.D.%20thesis.pdf> [21.8.2022.]
- [13] Hannah Ritchie, Max Roser, Energy production and consumption, dostupno na: <https://ourworldindata.org/energy-production-consumption> [5.10.2022.]
- [14] Government of Iceland, Energy, dostupno na: <https://www.government.is/topics/business-and-industry/energy> [5.10.2022.]

- [15] Vlada Republike Hrvatske, Paket mjera za ublažavanje rasta cijena zbog poskupljenja energenata, dostupno na: <https://vlada.gov.hr/UserDocsImages/Vijesti/2022/02%20velja%C4%8Da/16%20velja%C4%8De/Paket%20mjera%20za%20ubla%C5%BEavanje%20rasta%20cijena%2016-02-2022.pdf> [5.10.2022.]
- [16] Fakultet strojarstva i brodogradnje Zagreb, Sustavi grijanja u zgradarstvu - metoda proračuna toplinskog opterećenja prema EN 12831, dostupno na: https://www.fsb.unizg.hr/atlantis/upload/newsboard/22_02_2010__12505_EN_12831_Vjezbe.pdf [21.8.2022.]
- [17] Ministarstvo zaštite okoliša, prostornog uređenja i graditeljstva, Pravilnik o energetsom certificiranju zgrada, Narodne novine, Zagreb, 2010., dostupno na: https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2010_03_36_930.html [21.8.2022.]
- [18] Ministarstvo graditeljstva i prostornog uređenja, Pravilnik o pregledu zgrade i energetsom certificiranju, Narodne novine, Zagreb, 2017., dostupno na: https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2017_09_88_2093.html [21.8.2022.]
- [19] Hrvatski normativni dokument HRN EN ISO 13790, 2008. dostupno na: <https://repozitorij.hzn.hr/norm/HRN+EN+ISO+13790%3A2008> [21.8.2022.]
- [20] Hrvatski normativni dokument HRN EN 12831, 2017., dostupno na: <https://repozitorij.hzn.hr/norm/HRN+EN+12831-1%3A2017> [21.8.2022.]
- [21] Hrvatski normativni dokument HRN EN 14511, 2018., dostupno na: <https://repozitorij.hzn.hr/norm/HRN+EN+14511-1%3A2018> [21.8.2022.]
- [22] Hrvatski normativni dokument HRN EN 15316-4-2, 2017., dostupno na: <https://repozitorij.hzn.hr/norm/HRN+EN+15316-4-2%3A2017> [21.8.2022.]
- [23] Hrvatski normativni dokument HRN EN 15603, 2017., dostupno na: <https://repozitorij.hzn.hr/norm/HRN+EN+ISO+52000-1%3A2017> [21.8.2022.]

SAŽETAK

Naslov: Usporedba energetske performansi toplinskih crpki

U ovom radu razmatraju se različite izvedbe toplinskih crpki, po čemu se razlikuju, te koje su im prednosti i mane. U prvome dijelu smo započeli sa definicijom toplinskih crpki, te njihovoj povijesti. Zatim smo odredili toplinski množitelj, te godišnji toplinski množitelj. Nakon toga smo odredili prednosti i mane, tipove, izvore i načine rada toplinskih crpki. Detaljno smo analizirali izvore toplinske energije i tipove toplinskih crpki koje se koriste njima. Definirali smo radne točke, temperaturne režime i vanjske faktore bitne kod rada toplinskih crpki. Za kraj smo krenuli sa analizom energetske performansi, počevši od definiranja energetske performansi za ovaj rad, te simuliranjem grijanja objekta različitim toplinskim crpkama u dva načina rada, u GeoT*Sol programu.

Ključne riječi: Energetske performanse, Obnovljivi izvori energije, Toplinske crpke, Toplinski množitelj, Učinkovitost

ABSTRACT

Title: Comparison of heat pump energy performances

In this thesis we look at different heat pump solutions, what makes them different from one another and what are their pros and cons. In the first part we started with the definition of heat pumps, as well as their history. After that, we defined the Coefficient of performance and Seasonal performance factor. Next, we took a look at the pros and cons, types, sources and work modes of heat pumps. We have analysed the energy sources and types of heat pumps that use them, in detail. We have defined the work points, temperature regimes and outer factors that are important for heat pump operation. For the end we have started by energy performance analysis, starting with defining energy performance for this thesis, as well as simulating the heating of an object via various heat pump types, in two operation modes, in GeoT*Sol application.

Key words: Coefficient of performance, Efficiency, Energy performance, Heat pumps, Renewable energy sources

ŽIVOTOPIS

Luka Šplajt, sin Snježane i Zorana, rođen je 23.8.2000. u Vinkovcima. U selu Rokovci, gdje trenutno živi, završava osnovnu školu Ivana Brlić-Mažuranić. Nakon završetka osnovne škole, godine 2015. upisuje se u srednju Tehničku školu Ruđera Boškovića u Vinkovcima, smjer mehatronika. Godine 2019., nakon završenog srednjoškolskog obrazovanja, upisuje se na Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek, smjer elektrotehnika i informacijske tehnologije, preddiplomskog sveučilišnog studija, gdje je trenutno student treće godine.