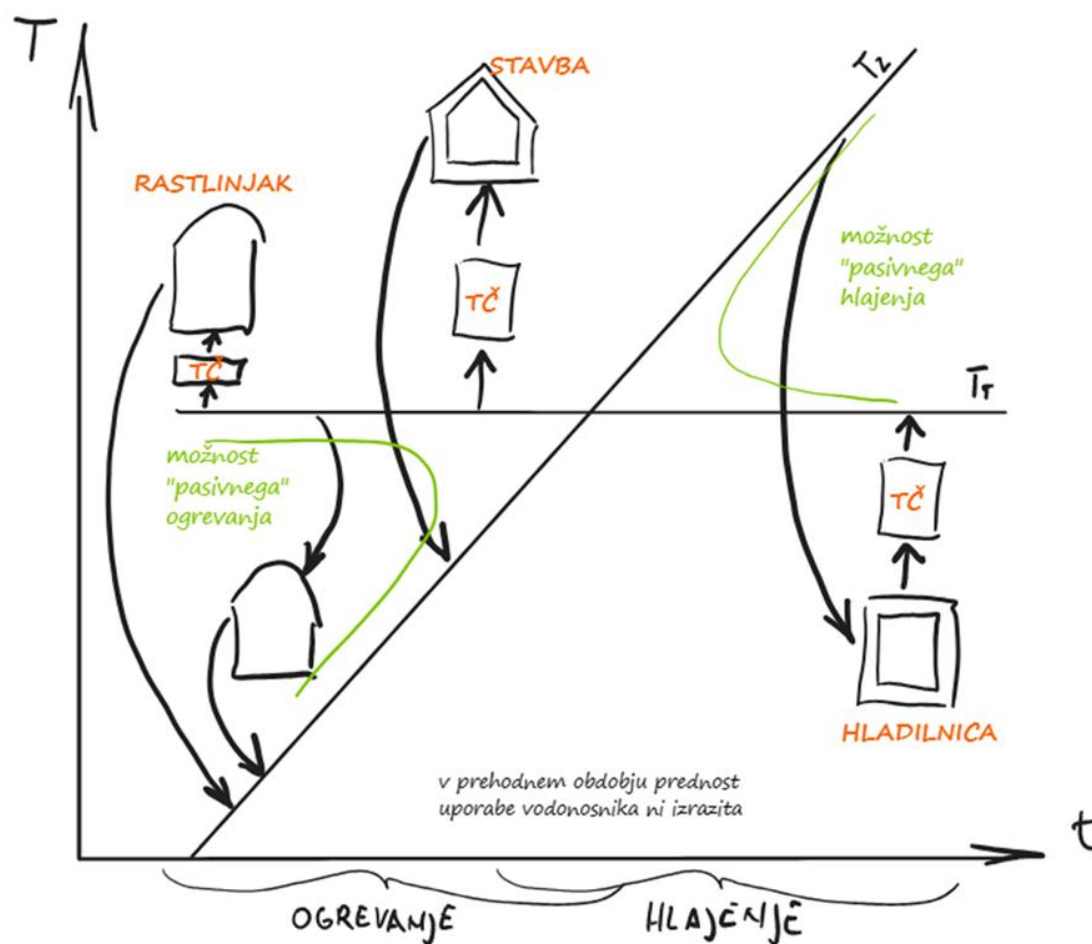




IZRAČUN ENERGIJSKIH POTREB IZBRANE HLADILNICE NA PODLAGI REZULTATOV MONITORINGA

Končno poročilo, Ver. 1.0

Ljubljana, marec 2025



Institut "Jožef Stefan" Ljubljana, Slovenija
Center za energetska učinkovitost

PROJEKT: CRP projekt V1-2213, GeoCOOL FOOD –
Hladno skladiščenje hrane z rabo plitve
geotermalne energije

DELOVNI PAKET: DP 2: Opredelitev tipskih bazičnih in koničnih
energetskih potreb ter presežne toplote, ki jo
je potrebno odvesti v tla na vsaj enem
pilotnem območju

NASLOV POROČILA: M2.2 Izračun energetskih potreb izbrane
hladilnice na podlagi rezultatov monitoringa

DATUM: 07. marec 2025

AVTORJI: dr. Marko Matkovič
dr. Gašper Stegnar
mag. Marko Pečkaj

VERZIJA POROČILA: 1.0

NASLOV POROČILA:

**IZRAČUN ENERGIJSKIH POTREB IZBRANE HLADILNICE NA PODLAGI
REZULTATOV MONITORINGA**

Kazalo

1	Izračun energijskih potreb izbrane hladilnice na podlagi rezultatov monitoringa.....	7
1.1	Uvod	7
1.2	Preliminarna analiza potenciala izrabe geotermalne energije na kmetiji Munda, Juršinci	7
1.2.1	Raba energije za pokrivanje potreb po ogrevanju in hlajenju na kmetiji Munda	7
1.2.2	Izraba geotermalne energije: ogljični odtis in ocena prihrankov	8
1.2.3	Upravičenost investicije v izrabo geotermalne energije na kmetiji Munda.....	10
1.3	Analiza potenciala izrabe geotermalne energije na kmetiji Turk, Podbočje	11
1.3.1	Izračun karakterističnih toplotnih obremenitev objektov na kmetiji Turk	11
1.3.2	Analiza potreb po ogrevanju in hlajenju na kmetiji Turk	13
1.3.3	Integracija sistema strojnih instalacij	14
1.3.4	Poenostavljen model geosonde	15
1.3.5	Modeliranje COP	15
1.3.6	Izraba geotermalne energije – sistematična izvedba simulacij.....	16
1.3.7	Izraba geotermalne energije – finančna in občutljivostna analiza sistema	18
1.3.8	Zaključek.....	20
	Priloga 1: Izračun vrednosti koeficientov karakterističnih izgub stavbe G in karakteristične izgube hladilnice H	21
	Priloga 2: Temperaturni nivoji ter omejitve pasivnega hlajenja in ogrevanja	22
	Priloga 3: Možnosti sklapljanja sistemov ogrevanja in hlajenja z namenom izboljšanja URE	23
	Priloga 4: Možnosti uporabe vodnjaka in geosonde.....	24
	Priloga 5: Povprečne dnevne vrednosti temperature in globalnega sevanja v TRL za Novo mesto	25
	Priloga 6: Povprečne dnevne vrednosti temperature v hladilnicah 1 in 2, zunanjega zraka ter izmerjene rabe električne energije v hladilnicah 1 in 2 ter na celotni kmetiji Turk	26

Kazalo slik

Slika 1 Mesečna raba električne energije za potrebe ogrevanja in hlajenja stanovanjske hiše ter hladilnice.	8
Slika 2 Primerjava mesečnih vrednosti emisij CO ₂ in cene stroškov ogrevanja za različne ogrevalne sisteme.	8
Slika 3 Mesečna raba električne energije za potrebe ogrevanja in hlajenja stanovanjske hiše ter hladilnice z uporabo toplotne črpalke (chillerja) na zrak oziroma geotermalno energijo.	9
Slika 4 Mesečni prihranek električne energije pri vodno hlajenem chillerju z geosondo v primerjavi z uporabo zračno hlajenega chillerja.	9
Slika 5 Graf povprečne dnevne temperature zraka s ponazoritvijo urnika in temperatur ogrevanih ter hlajenih prostorov na kmetiji Turk. Vertikalni črti označujeta čas neprekinjenega izvajanja meritev rabe električne energije v hladilnici 1 in 2.	11
Slika 6 Rezultati meritev rabe električne energije za potrebe obratovanja hladilnic 1 in 2 ter celotne kmetije Turk, meritev temperature v hladilnici ter okolici.	12
Slika 7 Ocenjene toplotne obremenitve hladilnic 1, 2 in 3 v značilnem meteorološkem letu.	13
Slika 8 Ocenjene toplotne obremenitve hiše (levo) in prostora za delavce (desno) v značilnem meteorološkem letu.	13
Slika 9 Shema modela sistema strojnih instalacij in modeliranje toplotnih tokov.	14
Slika 10 Poenostavljen model geosonde.	15
Slika 11 COP v odvisnosti od temperature kondenzacije za štiri temperature uparjanja (10 °C, 0 °C, -10 °C in -20 °C) (levo), modelirani eksponent n in vodilnega člena k v odvisnosti od temperature uparjanja (desno).	16
Slika 12 Letni profil povprečnih dnevni vrednosti temperature tal, zunanje temperature in temperature vmesnega zalogovnika (levo), toplotne in hladilne obremenitev objektov, toplotne moči zračnega konvektorja, toplotne moči geosonde in električne moči (desno) sistema z nazivno toplotno močjo geosonde 0 kW, in zračnega konvektorja 25 kW.	16
Slika 13 Letni profil povprečnih dnevni vrednosti temperature tal, zunanje temperature in temperature vmesnega zalogovnika (levo), toplotne in hladilne obremenitev objektov, toplotne moči zračnega konvektorja, toplotne moči geosonde in električne moči (desno) sistema z nazivno toplotno močjo geosonde 2 kW, in zračnega konvektorja 25 kW.	17
Slika 14 Letni profil povprečnih dnevni vrednosti temperature tal, zunanje temperature in temperature vmesnega zalogovnika (levo), toplotne in hladilne obremenitev objektov, toplotne moči zračnega konvektorja, toplotne moči geosonde in električne moči (desno) sistema z nazivno toplotno močjo geosonde 8 kW, in zračnega konvektorja 25 kW.	17
Slika 15 Letni profil povprečnih dnevni vrednosti temperature tal, zunanje temperature in temperature vmesnega zalogovnika (levo), toplotne in hladilne obremenitev objektov, toplotne moči zračnega konvektorja, toplotne moči geosonde in električne moči (desno) sistema z nazivno toplotno močjo geosonde 512 kW, in zračnega konvektorja 25 kW.	17
Slika 16 Agregirane vrednosti COPs, celotne vrednosti investicije in količnika investicije z letnimi prihranki električne energije v odvisnosti od instalirane toplotne moči geotermalne naprave.	18
Slika 17 Preprosta občutljivostna finančna analiza enostavne vračilne dobe na ceno energije (levo) in interne stopnje donosa (IRR) ter neto sedanje vrednosti (NPV) na ceno energije (desno).	19
Slika 18 Enostavna vračilna doba in neto sedanja vrednost (NPV) v odvisnosti od nazivne moči sistema (levo), interna stopnja donosa (IRR) in neto sedanja vrednost (NPV) v odvisnosti od ekonomske življenjske dobe (desno).	19

Slika 19 Enostavna vračilna doba v odvisnosti od investicijskega stroška 8 kW sistema z geosondo (levo), interna stopnja donosa (IRR) in neto sedanja vrednost (NPV) 8 kW sistema z geosondo v odvisnosti od investicijskega stroška (desno). 19

Kazalo tabel

Tabela 1 Ocena letnih prihrankov na stroških za energijo in zmanjšanje emisij sistema, ki izrablja plitvo geotermalno energijo v primerjavi z navedenimi ogrevalnimi sistemi.	9
Tabela 2 Mesečni urnik obratovanja objektov na kmetiji Turk.....	11
Tabela 3 Rezultati meritev in izračuna karakterističnih izgub objektov na kmetiji Turk.....	12
Tabela 4 Izračunane vrednosti rabe energije, ocene investicije in prihrankov za različne robne pogoje obratovanja.	18

1 Izračun energijskih potreb izbrane hladilnice na podlagi rezultatov monitoringa

1.1 Uvod

Cilj poročila je določiti energetske potrebe objektov – predvsem hladilnic in stanovanjskih stavb na izbrani kmetiji, opredeliti možnosti integracije obnovljivih virov energije ter poiskati optimalno rešitev za hlajenje in ogrevanje tako s finančnega stališča kot tudi s stališča učinkovite rabe energije in zniževanja emisij TGP. V procesu izbire optimalne lokacije za izvedbo pilotne vrtine smo se odločili za kmetijo Turk v Podbočju, za katero smo: izdelali podroben izračun energijskih potreb, zasnovali namenski model sistema strojnih instalacij, ovrednotili ukrep integracije geotermalne energije in z namenom optimizacije sistema izdelali občutljivostno ter finančno analizo sistema. Rezultati analize so predstavljeni v nadaljevanju. V ožjem izboru je bila tudi kmetija Munda v Juršincih, za katero pa je bila izdelana le groba analiza ukrepa integracije sistema za izrabo geotermalne energije v obstoječi sistem ogrevanja in hlajenja.

1.2 Preliminarna analiza potenciala izrabe geotermalne energije na kmetiji Munda, Juršinci

1.2.1 Raba energije za pokrivanje potreb po ogrevanju in hlajenju na kmetiji Munda

Raba energije za ogrevanje in hlajenje na kmetiji Munda je bila izračunana na osnovi posredovanih podatkov s strani lastnika kmetije in razpoložljivih meteoroloških podatkov ARSO za lokacijo Murska Sobota:

- Na lokaciji se s toplotno črpalo na geosondo ogreva in hladi stanovanjska hiša, hladilnica pa se le del leta hladi z zračno hlajenim chillerjem.
- 3 položnice za električno energijo (september, november, december).
- Meteoroloških podatkov za lokacijo Murska Sobota (ARSO).

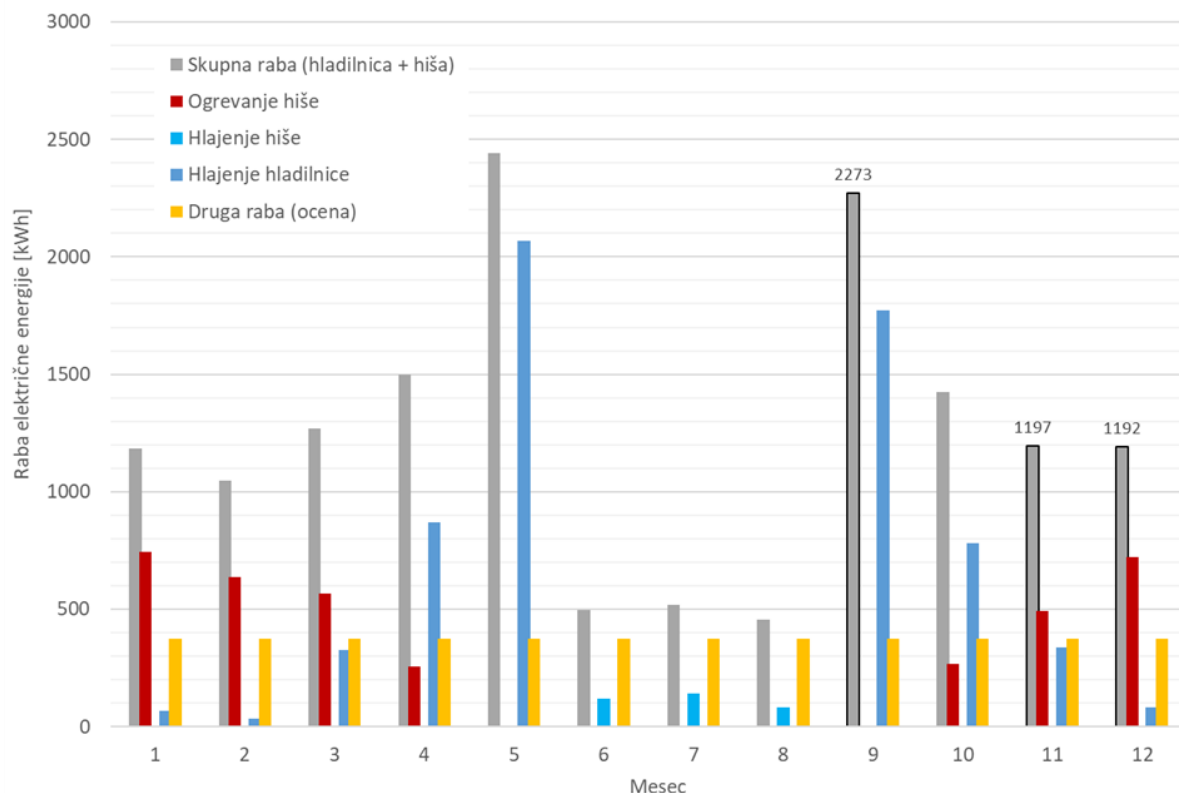
Na osnovi meteoroloških podatkov in predpostavki, da se tekom leta način rabe objektov na kmetiji ne spreminja pomembno, je mogoče na naslednji način zapisati poenostavljen model rabe električne energije za ogrevanje in hlajenje hiše oziroma hladilnice:

$$E = \underbrace{\frac{G \cdot T_{pk}}{COP_G} + r}_{\text{hiša}} + \underbrace{\frac{H \cdot T_{rsh}}{COP_H} + P_{el}}_{\text{hladilnica}} \quad (1)$$

$H \cdot T_{rsh} > 0$

Ob upoštevanju 3 položnic za električno energijo je mogoče izračunati vrednosti koeficientov G - karakteristične izgube stavbe in H - karakteristične izgube hladilnice (Priloga 1):

Karakteristične izgube hiše - G	6.1	[kWh K-1 dan-1]
Karakteristične izgube hladilnice - H	28.4	[kWh K-1 dan-1]

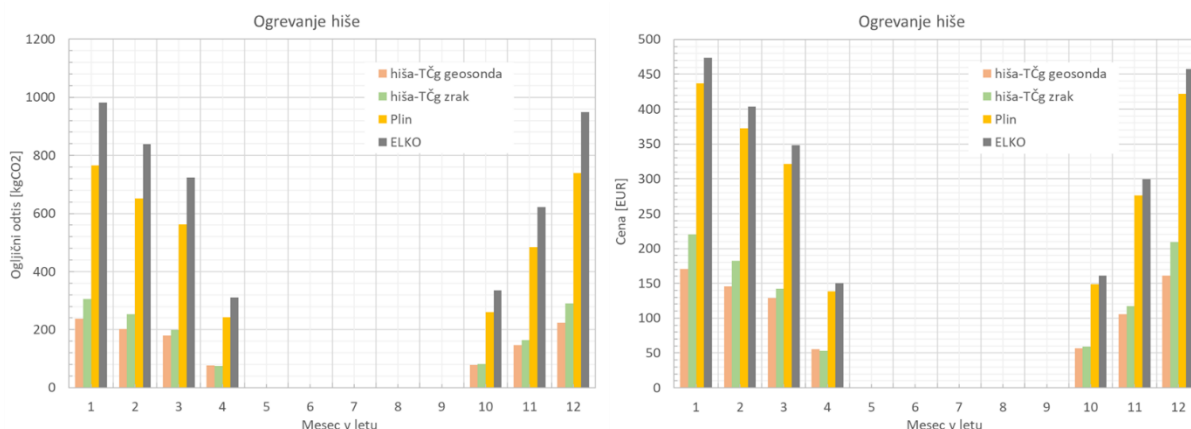


Slika 1 Mesečna raba električne energije za potrebe ogrevanja in hlajenja stanovanjske hiše ter hladilnice.

Na ta način smo lahko s pomočjo znanih vrednosti G in H ter s pomočjo meteoroloških podatkov (temperaturnega primanjkljaja/presežka) za izbrano leto izračunali mesečno dobavo toplote in hlada ter rabo električne energije za potrebe ogrevanja in hlajenja objektov na kmetiji Munda (Slika 1).

1.2.2 Izraba geotermalne energije: ogljični odtis in ocena prihrankov

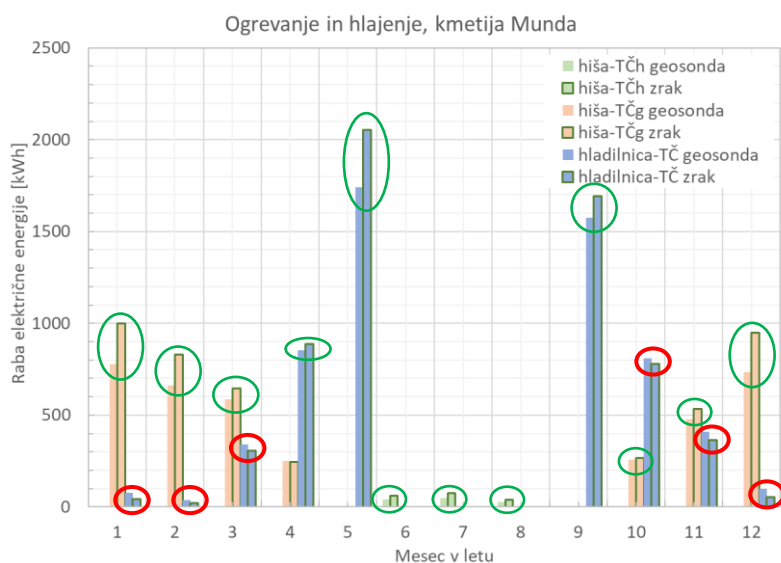
Na osnovi teh vrednosti in znanih emisijskih faktorjev, smo ocenili letni prihranek ter zmanjšanje emisij ogrevalnega sistema, ki izrablja plitvo geotermijo v primerjavi s toplotno črpalko na zrak, ogrevalnim sistemom na plin in ogrevalnim sistemom na ELKO.



Slika 2 Primerjava mesečnih vrednosti emisij CO2 in cene stroškov ogrevanja za različne ogrevalne sisteme..

Tabela 1 Ocena letnih prihrankov na stroških za energijo in zmanjšanje emisij sistema, ki izrablja plitvo geotermalno energijo v primerjavi z navedenimi ogrevalnimi sistemi.

Ocena letnih prihrankov/zmanjšanja emisij:		TČ. ZRAK	ZEM. PLIN	ELKO
Zmanjšanje rabe el. energije	[kWh]	727	/	/
Prihranek na stroških ogrevanja	[€]	160	1293	1469
Znižanje emisij CO ₂	[kgCO ₂]	223	2558	3616



Slika 3 Mesečna raba električne energije za potrebe ogrevanja in hlajenja stanovanjske hiše ter hladilnice z uporabo toplotne črpalke (chillerja) na zrak oziroma geotermalno energijo.



Slika 4 Mesečni prihranek električne energije pri vodno hlajenem chillerju z geosondo v primerjavi z uporabo zračno hlajenega chillerja.

1.2.3 Upravičenost investicije v izrabo geotermalne energije na kmetiji Munda

Upravičenost investicije v izrabo geotermalne energije na kmetiji Munda bi lahko povzeli v naslednjih alinejah:

- Prihranek električne energije v primerjavi z zračno hlajenim hladilnim sistemom je sorazmerno majhen, investicija pa je visoka.
- Prihranki pri uporabi geotermalne energije so največji pri ekstremnih temperaturnih razlikah: poleti za hlajenje, pozimi za ogrevanje. V prehodnem obdobju so majhni. Ker kmetija Munda že uporablja geosondo za ogrevanje, hladilnica pa ne obratuje v najbolj vročih mesecih leta, investicija v vodno hlajen chiller z geosondo finančno ni upravičena.
- V primeru spremenjenih okoliščin (spremenjen urnik delovanja hladilnice, večje potrebe po ogrevanju,...), i bilo potrebno upravičenost izrabe geotermalne na kmetiji Munda ponovno preveriti.
- Dodatno izboljšanje URE bi dosegli z ustreznim uravnoteženjem ogrevanja in hlajenja; celoletnim izkoriščanjem geotermije.

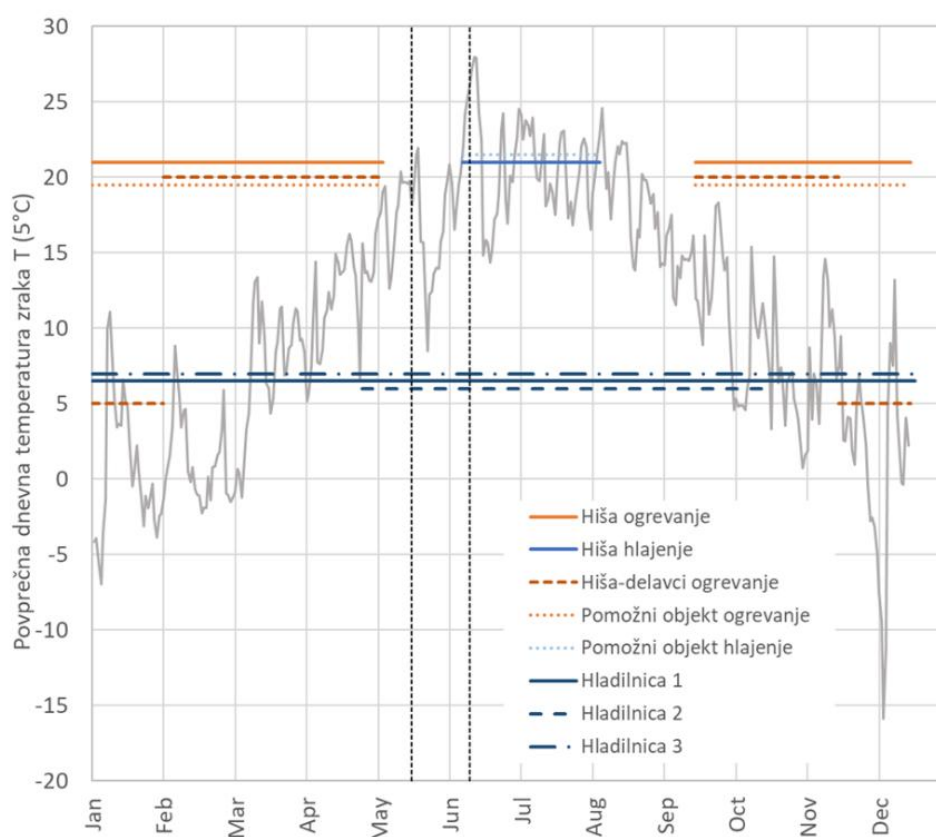
1.3 Analiza potenciala izrabe geotermalne energije na kmetiji Turk, Podbočje

1.3.1 Izračun karakterističnih toplotnih obremenitev objektov na kmetiji Turk

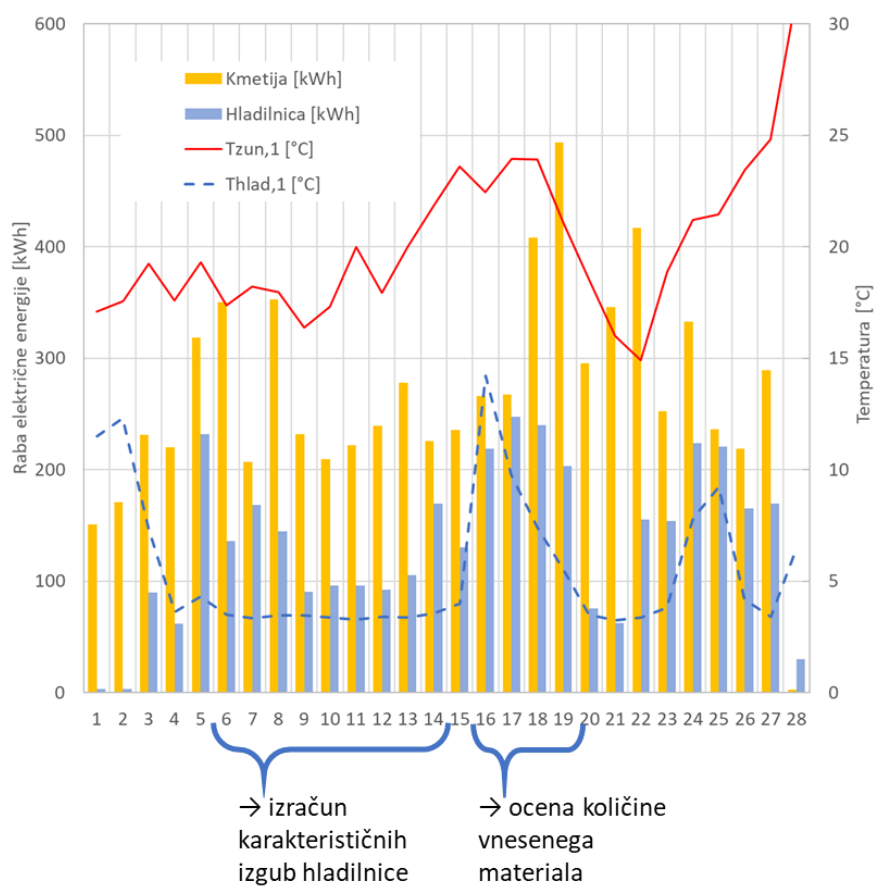
Karakteristična rabe energije za ogrevanje in hlajenje na kmetiji Turk je bila izračunana na osnovi meritev rabe električne energije v hladilnici 1 in hladilnici 2 (Priloga 4), posredovanih podatkov s strani lastnika kmetije in razpoložljivih meritev temperature v obravnavanem obdobju. Vse nadaljnje analize so bile izdelane na osnovi teh izračunov in na osnovi meteoroloških podatkov ARSO za značilno meteorološko leto za lokacijo Novo mesto. V izračunu so bile upoštevane povprečne dnevne vrednosti temperature in globalnega sevanja (Priloga 5). Mesečni urnik obratovanja objektov na kmetiji Turk prikazuje Tabela 2, interval izvajanja meritev pa je ponazorjen z vertikalnimi črtami na Slika 5.

Tabela 2 Mesečni urnik obratovanja objektov na kmetiji Turk

	MESEC:	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
HLADILNICA 1	H1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
HLADILNICA 2	H2					1	1	1	1	1	1	1	
HLADILNICA 3	H3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
HIŠA	S1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
PROSTOR ZA DELAVCE	D1		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
RASTLINJAK 1	R1	1	1									1	1
RASTLINJAK 2	R2	1	1	1	1								1



Slika 5 Graf povprečne dnevne temperature zraka s ponazoritvijo urnika in temperatur ogrevanih ter hlajenih prostorov na kmetiji Turk. Vertikalni črti označujeta čas neprekinjenega izvajanja meritev rabe električne energije v hladilnici 1 in 2.



Slika 6 Rezultati meritev rabe električne energije za potrebe obratovanja hladilnic 1 in 2 ter celotne kmetije Turk, meritev temperature v hladilnici ter okolici.

Na osnovi neprekinjenih meritev rabe električne energije v hladilnicah 1 in 2 (Slika 6) smo identificirali vnos materiala v hladilnico. Ob predpostavki o povprečni specifični toploti $3 \text{ kJ kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ in temperaturi vnesenega materiala (temperatura okolice) smo lahko ocenili maso vnesenih pridelkov v hladilnico. Na ta način smo lahko od skupnih toplotnih obremenitev oddvojili transmisijske in ventilacijske toplotne obremenitve, ki so linearno odvisne od temperaturnega primanjkljaja ter toplotne obremenitve zaradi vnosa materiala v hladilnico, ki so odvisne predvsem od urnika in količine vnesenih pridelkov. Rezultati in predpostavke izračuna so prikazani spodaj (Tabela 3).

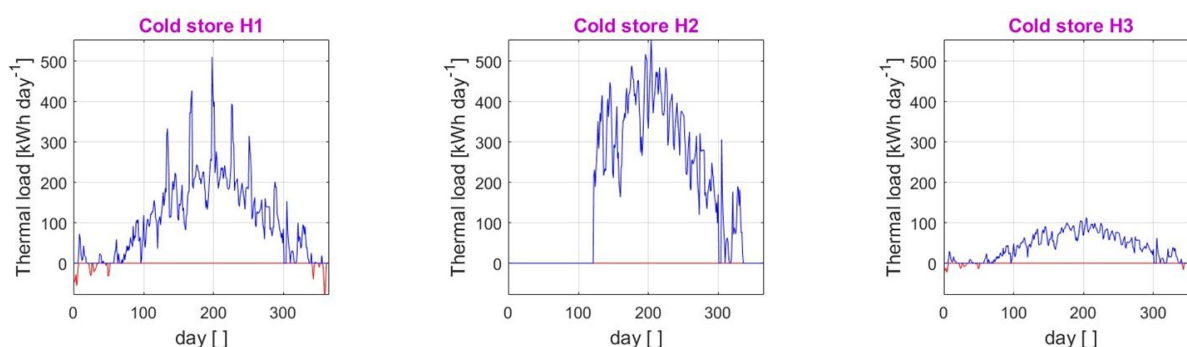
Tabela 3 Rezultati meritev in izračuna karakterističnih izgub objektov na kmetiji Turk

Hladilnice: H1, H2, H3		
Povprečna specifična toplota pridelkov in embalaže	3	$\text{kJ kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$
Povprečna temperatura hladilnic	4	$^{\circ}\text{C}$
Povprečna temperaturna razlika med okolico in hladilnico v izbranem obdobju	15.5	$^{\circ}\text{C}$
Ocenjena raba energije za ohlajitev vnesenih pridelkov in embalaže	500	kWh
Ocenjena masa ohlajenih pridelkov (s povprečno $c_p=3 \text{ kJ kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$)	38.6	t
Dnevne ventilacijske izgube H1, H2 ($V=375 \text{ m}^3$, $dT=15^{\circ}\text{C}$, izmenjava 0,5 h ⁻¹)	19.7	kWh
Povprečna vrednost CPh hlajenja hladilnice	4.5	/
Karakteristične izgube hladilnic H1, H2	483.5	$\text{Wh m}^{-2} \text{ K}^{-1} \text{ dan}^{-1}$

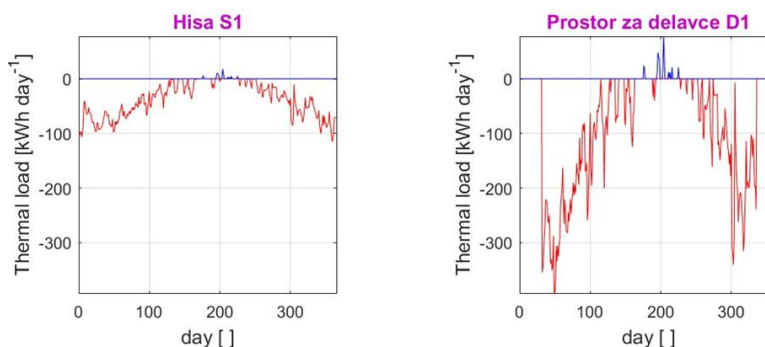
Karakteristične izgube hladilnice H3	550.0	Wh m ⁻² K ⁻¹ dan ⁻¹
Hiša: S1		
Karakteristične izgube hiše	25.0	Wh m ⁻² K ⁻¹ dan ⁻¹
Površina hiše	180	m ²
Povprečna temperatura hiše pozimi	22	°C
Povprečna temperatura hiše poleti	26	°C
Prostor za delavce: D1		
Karakteristične izgube prostora za delavce	80	Wh m ⁻² K ⁻¹ dan ⁻¹
Površina prostora za delavce	250	m ²
Povprečna temperatura prostora za delavce pozimi	20	°C

1.3.2 Analiza potreb po ogrevanju in hlajenju na kmetiji Turk

Po tem, ko smo na osnovi meritev in preliminarne analize določili karakteristične izgube objektov, smo lahko za značilno meteorološko leto za Novo mesto izračunali pričakovane letne potrebe po ogrevanju in hlajenju na Kmetiji Turk. Pri izračunu, ki torej temelji na podatkih značilnega meteorološkega leta, smo upoštevali realno dinamiko vnosa pridelkov v letu 2023. Rezultati povprečni dnevni vrednosti toplotne obremenitve analiziranih objektov so prikazani na Slika 7 in Slika 8.



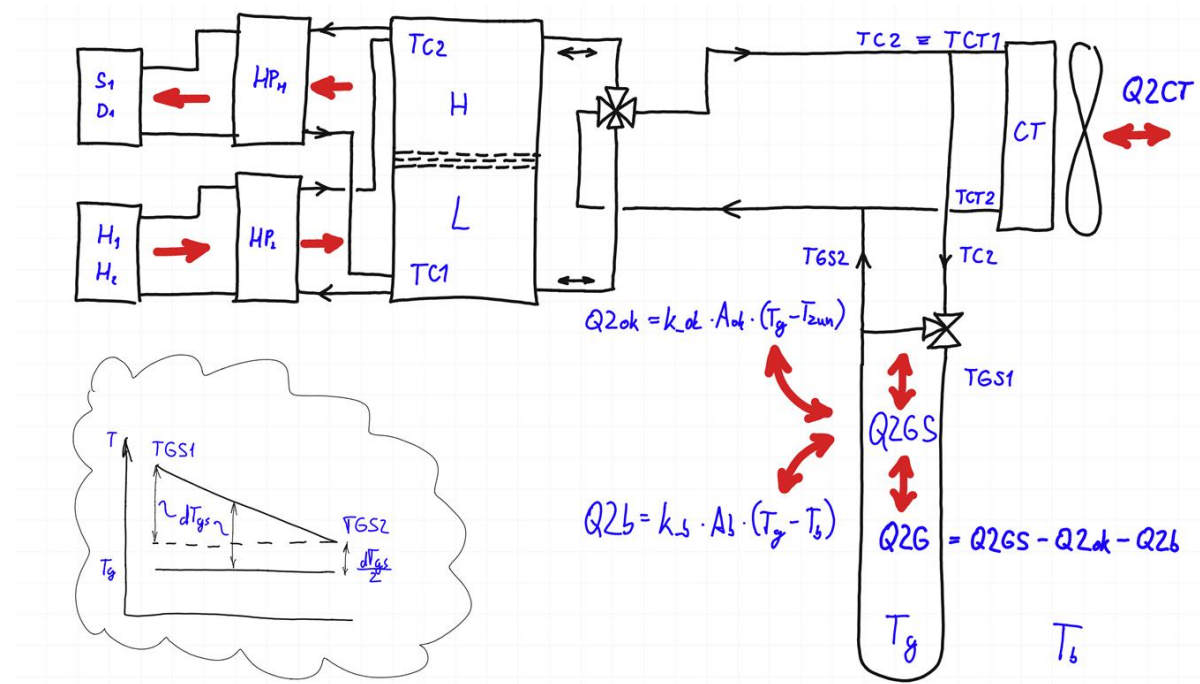
Slika 7 Ocenjene toplotne obremenitve hladilnic 1, 2 in 3 v značilnem meteorološkem letu.



Slika 8 Ocenjene toplotne obremenitve hiše (levo) in prostora za delavce (desno) v značilnem meteorološkem letu.

1.3.3 Integracija sistema strojnih instalacij

Z namenom učinkovitega izkoriščanja odvečne toplote, sezone akumulacije ter izbire med posameznimi izvori in ponori toplote, smo predpostavili model sistema strojnih instalacij, kot je prikazana na spodnji sliki (Slika 9).

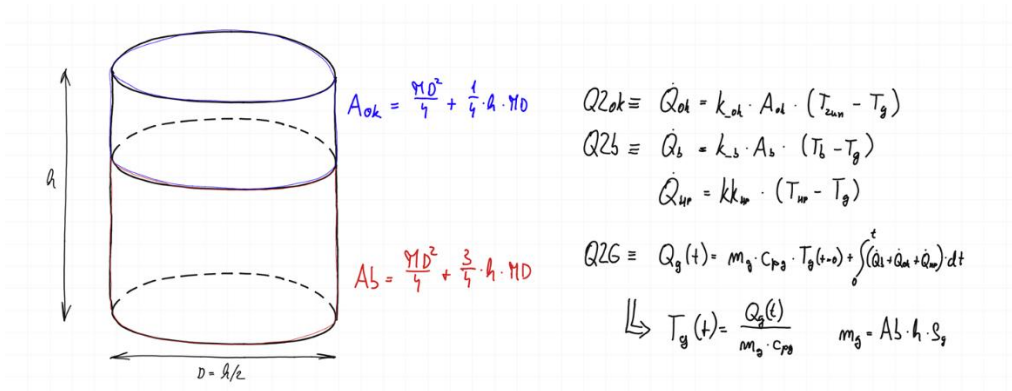


Slika 9 Shema modela sistema strojnih instalacij in modeliranje toplotnih tokov.

Takšna zasnova modela strojnih instalacij omogoča neposredno izkoriščanje odvečne toplote; tako chiller hladilnega sistema, kot tudi toplotna črpalka za ogrevanje sta namreč povezana na skupni zalogovnik, ki razliko potrebne dobave/odvoda toplote zagotovi iz okolice - bodisi iz zraka bodisi iz tal. Prednost tal kot vir ali ponor toplote pride do izraza pri ekstremnih temperaturnih razlikah, npr. pri ohlajanju hladilnic med vročinskim valom poleti, ali pri ogrevanju stavbe pri najnižjih temperaturah pozimi. Poleg tega, da je toplotna moč geosonde sorazmerno majhna, so v prehodnih obdobjih tudi prednosti izrabe geotermalne energije in akumulacije neizrazite, zato je pravilna zasnova sistema instalacij in smiselna integracija z drugim virom (zrak) toliko bolj pomembna.

Predlagan sistem strojnih instalacij (Slika 9) integrira ponora oziroma izvora toplote v tleh in v zraku tako, da v okviru danih omejitev v vsakem trenutku obratuje z največjim dosegljivim COP. Kadar je torej temperatura tal ugodnejša, bo sistem toploto odvajal ali pa jo prejemal iz tal. V kolikor je toplotna moč večja, kot je nazivna toplotna moč geosonde, se razlika toplotnega toka izmenja z zrakom. V tem primeru se prilagodi tudi temperaturna režima toplotne črpalke oziroma chillerja tako, da je prenos toplote z zrakom omogočen.

1.3.4 Poenostavljen model geosonde



Slika 10 Poenostavljen model geosonde..

Glede na lokalne geotermalne karakteristike v Pobočju tla predstavljajo sezonski hranilnik toplote - bolj kot vir ali ponor toplote, zato je izkoriščenost oz. dobrobit takšnega »vira« največja takrat, ko sta tekom sezone dovod in odvod toplote uravnotežena.

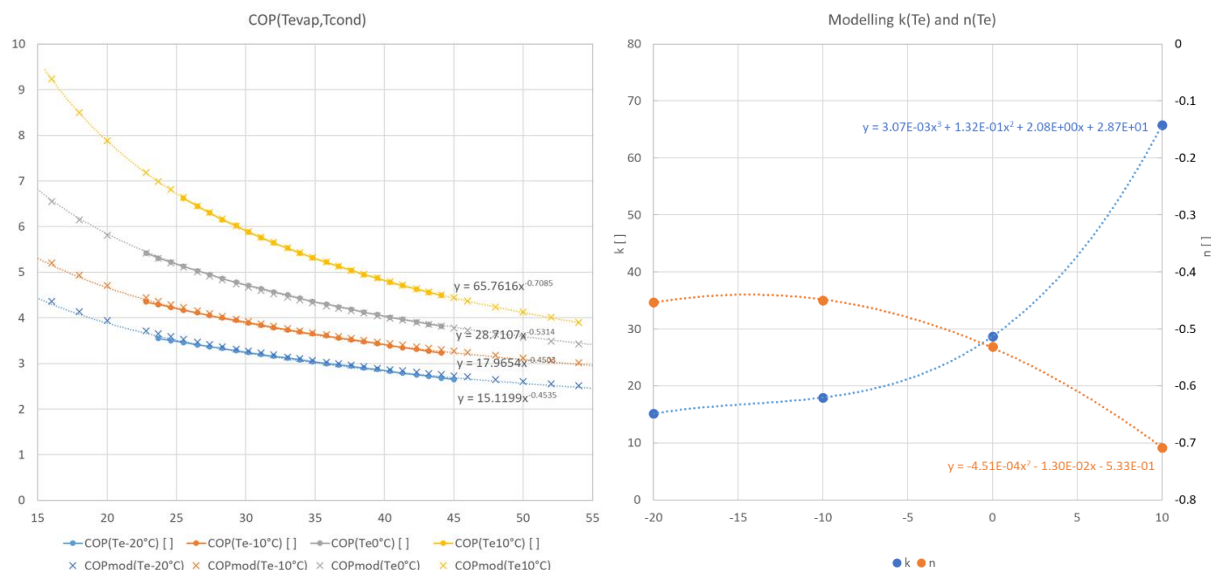
Za potrebe numerične simulacije smo izdelali poenostavljen model geosonde (Slika 10). Fizikalno gledano gre za valj zemljine okoli geosonde, ki prejema ali oddaja toploto preko opisanega sistema strojnih instalacij. Toplota, ki se prenese na omenjeni »valj«, se bodisi akumulira v njem bodisi prenese na okolico: v zgornji $\frac{1}{4}$ na okoliški zrak v spodnjem delu pa v tla. Toplota, ki se akumulira v zemljini, narekuje njeno temperaturo, kar pa ima neposreden vpliv na prenos toplote z okolico in na COP sistema, zato je izračun simulacije izveden iterativno.

1.3.5 Modeliranje COP

Celoten izračun energijskih tokov sistema predpostavlja znano vrednost COP toplotne črpalke in chillerja. Matematično gledano, se obratovanje chillerja in toplotne črpalke obravnavata enako. Kar je drugače, so robni pogoji pri katerih v danem trenutku obratujeta napravi: temperatura uparjanja (T_{evap}), temperatura kondenzacije (T_{cond}) in faktor delne obremenitve (PLF).

$$COP = PLF \cdot k(T_{evap}) \cdot T_{cond}^{n(T_{evap})} \quad 1$$

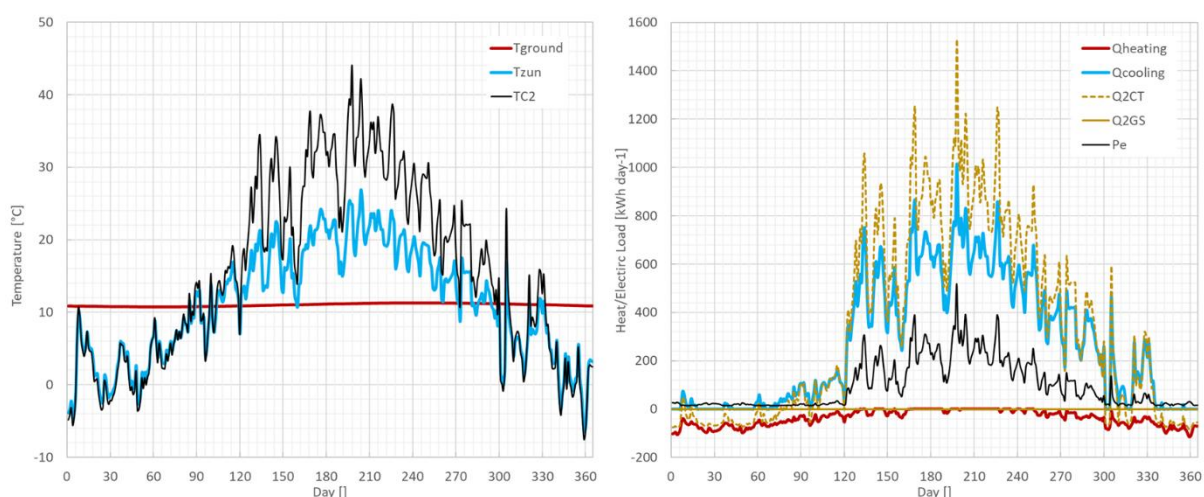
Temperatura uparjanja se izračuna glede na predmetno temperaturo izvora toplote in se korigira za temperaturno razliko, ki omogoča ustrezen prenos toplote. Podobno vendar v kontekstu temperature ponora toplote velja za temperaturo kondenzacije. Kadar imamo izvore in ponore toplote različnih kapacitet in pri različnih temperaturah, mora sistem vzpostaviti takšne pogoje, da bo zagotovljeno vzdržno obratovanje sistema. Ponazorjeno na primeru: četudi bi lahko toploto, ki jo s pomočjo chillerja prenašamo iz hladilnice, odvajali v tla pri občutno nižji temperaturi, temperature kondenzacije ne moremo znižati pod temperaturo zraka, če je toplotna moč geosonde premajhna. Edina prednost, ki jo v takem primeru sistem z geosondo omogoča, je v sezonski akumulaciji toplote in minimalni temperaturni razliki med temperaturo kondenzacije in temperaturo zraka.



Slika 11 COP v odvisnosti od temperature kondenzacije za štiri temperature uparjanja (10 °C, 0 °C, -10 °C in -20 °C)¹ (levo), modelirani eksponent n in vodilnega člena k v odvisnosti od temperature uparjanja (desno).

Tako zasnovan sistem omogoča sistematično izvajanje simulacij v širokem razponu obratovalnih pogojev, kar omogoča optimizacijo obratovalnih pogojev ter agregirano analizo učinkovitosti ogrevanja in hlajenja na kmetiji Turk.

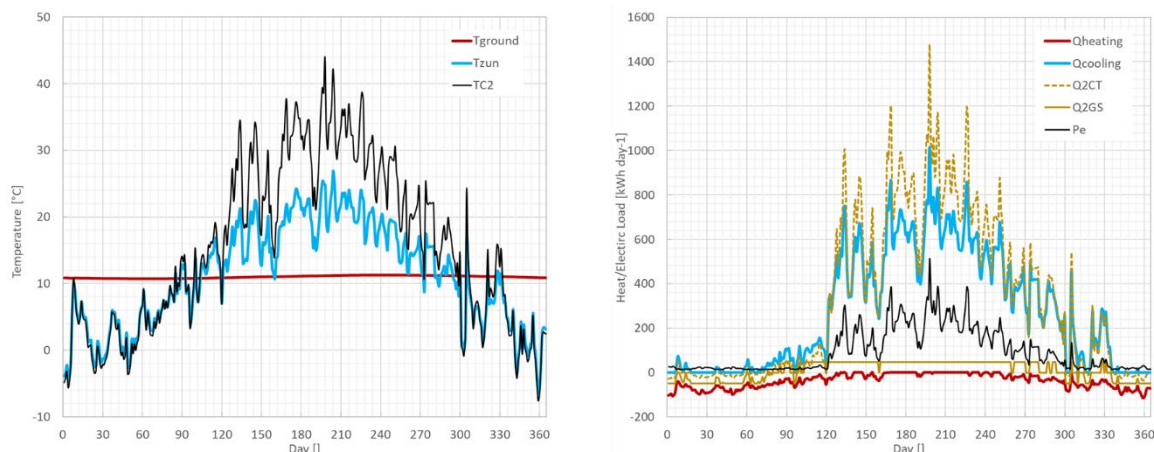
1.3.6 Izraba geotermalne energije – sistematična izvedba simulacij



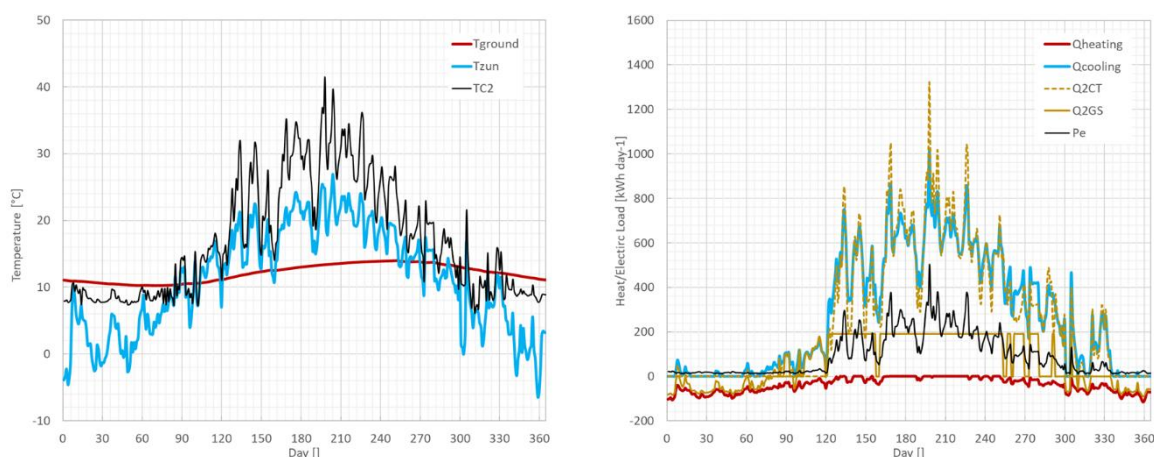
Slika 12 Letni profil povprečnih dnevni vrednosti temperature tal, zunanje temperature in temperature vmesnega zalogovnika (levo), toplotne in hladilne obremenitev objektov, toplotne moči zračnega konvektorja, toplotne moči geosonde in električne moči (desno) sistema z nazivno toplotno močjo geosonde 0 kW, in zračnega konvektorja 25 kW.

¹ Povzeto po:

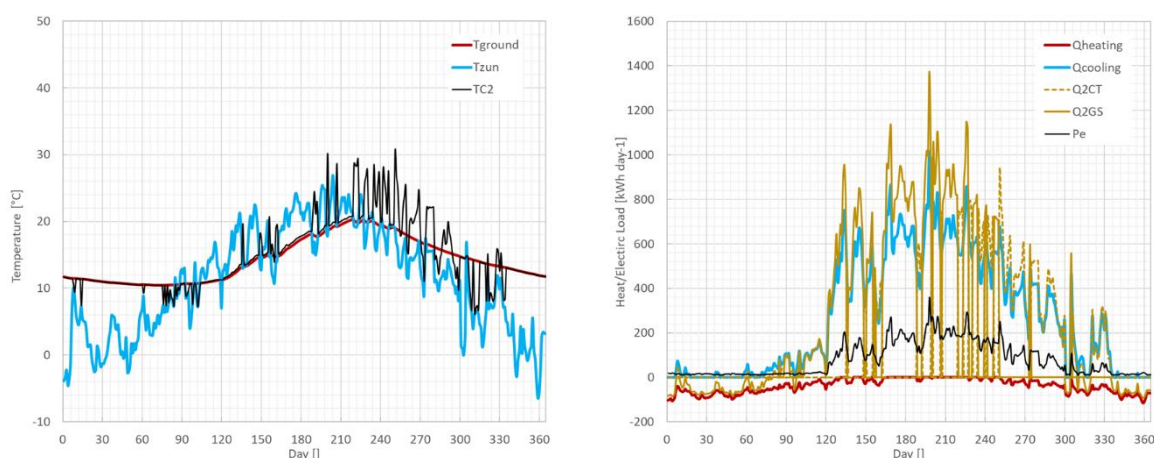
<https://www.researchgate.net/publication/362475480/figure/fig6/AS:11431281153694008@1682521105984/Effects-of-condensing-temperature-on-COP.tif>



Slika 13 Letni profil povprečnih dnevni vrednosti temperature tal, zunanje temperature in temperature vmesnega zalogovnika (levo), toplotne in hladilne obremenitev objektov, toplotne moči zračnega konvektorja, toplotne moči geosonde in električne moči (desno) sistema z nazivno toplotno močjo geosonde 2 kW, in zračnega konvektorja 25 kW.



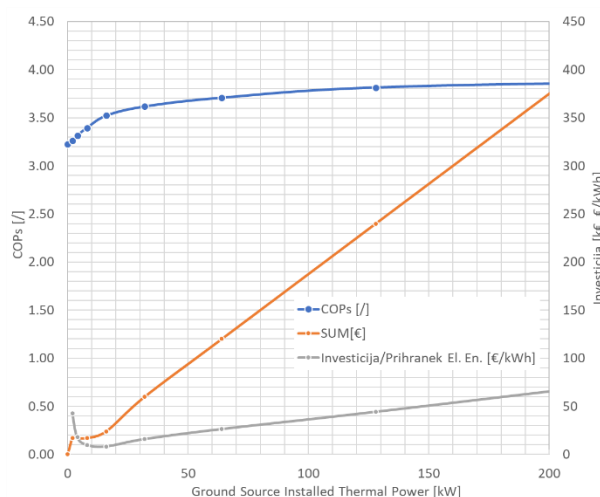
Slika 14 Letni profil povprečnih dnevni vrednosti temperature tal, zunanje temperature in temperature vmesnega zalogovnika (levo), toplotne in hladilne obremenitev objektov, toplotne moči zračnega konvektorja, toplotne moči geosonde in električne moči (desno) sistema z nazivno toplotno močjo geosonde 8 kW, in zračnega konvektorja 25 kW.



Slika 15 Letni profil povprečnih dnevni vrednosti temperature tal, zunanje temperature in temperature vmesnega zalogovnika (levo), toplotne in hladilne obremenitev objektov, toplotne moči zračnega konvektorja, toplotne moči geosonde in električne moči (desno) sistema z nazivno toplotno močjo geosonde 512 kW, in zračnega konvektorja 25 kW.

Tabela 4 Izračunane vrednosti rabe energije, ocene investicije in prihrankov za različne robne pogoje obratovanja.

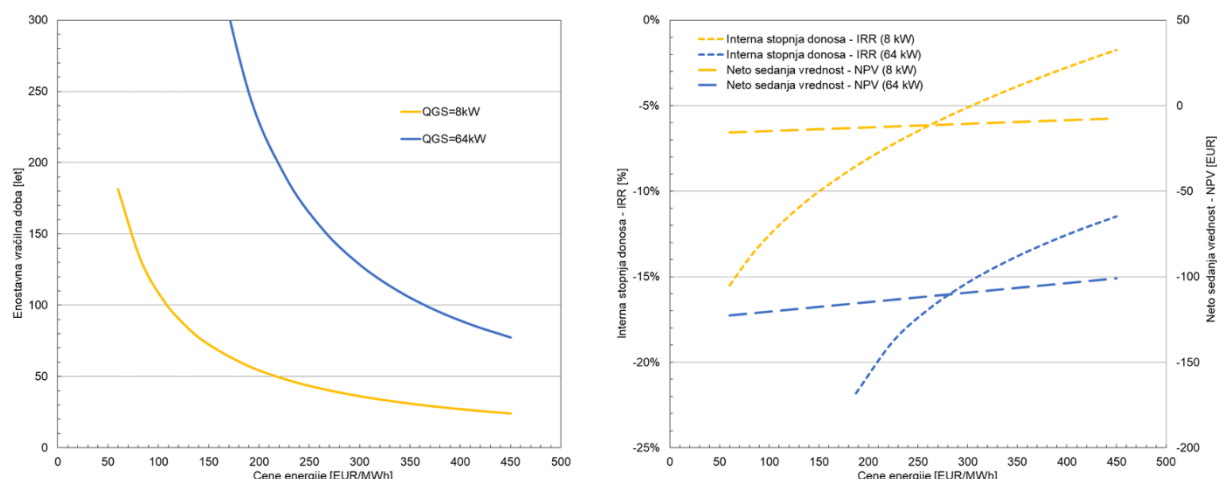
Raba energije:													
sum(Pe)	[kWh]	31088	2585	35274	34875	34324	33538	32326	31476	30701	29845	29418	29204
sum(Qheating)	[kWh]	0	-13732	-13732	-13732	-13732	-13732	-13732	-13732	-13732	-13732	-13732	-13732
sum(Qcooling)	[kWh]	100118	0	100118	100118	100118	100118	100118	100118	100118	100118	100118	100118
sum(Qh+c)	[kWh]	100118	13732	113850	113850	113850	113850	113850	113850	113850	113850	113850	113850
sum(Qground)	[kWh]	31745	-9150	0	4034	11012	24911	47003	69080	72891	72644	72360	72146
sum(Qair)	[kWh]	99461	-1997	121660	117226	109697	95013	71709	48781	44194	43586	43444	43444
COPs [/]	[/]	3.22	5.31	3.23	3.26	3.32	3.39	3.52	3.62	3.71	3.81	3.87	3.90
Ocena investicije:													
SUM[€]		17	17	0	17	17	17	24	60	120	240	480	960
Predelava obstoječega sistema		10	10	0	10	10	10	10	0	0	0	0	0
Geosonda (vrtina + hidravlika)		7	7	0	7	7	7	14	28	56	112	224	448
Nov chiller in instalacije		0	0	0	0	0	0	0	32	64	128	256	512
Prihranek energije [kWh]		/	/	/	400	951	1736	2948	3798	4574	5430	5856	6070
Investicija/Prihranek El. En. [€/kW]		/	/	/	43	18	10	8	16	26	44	82	158



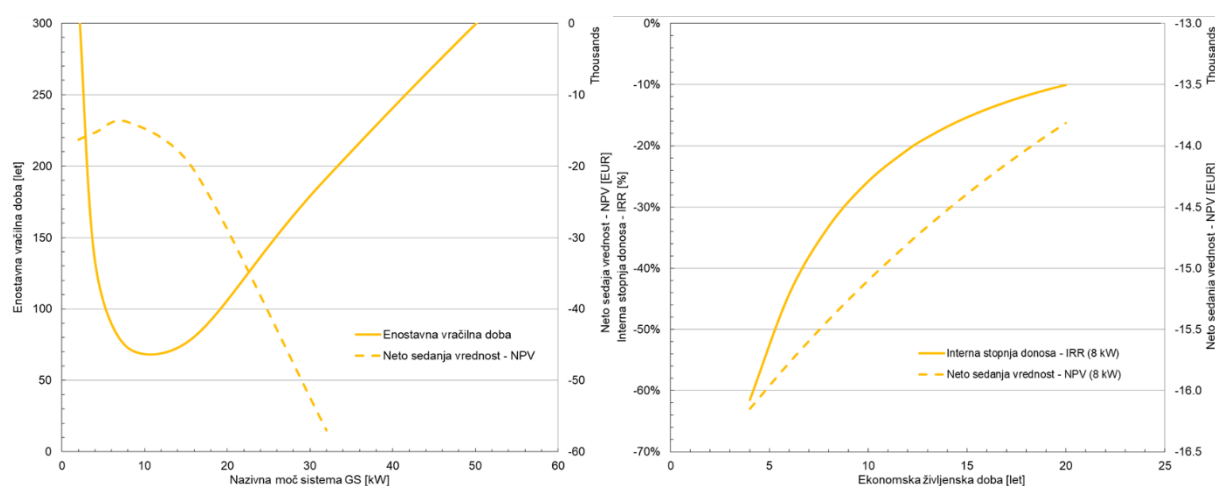
Slika 16 Agregirane vrednosti COPs, celotne vrednosti investicije in količnika investicije v letnih prihrankih električne energije v odvisnosti od instalirane toplotne moči geotermalne naprave.

1.3.7 Izraba geotermalne energije – finančna in občutljivostna analiza sistema

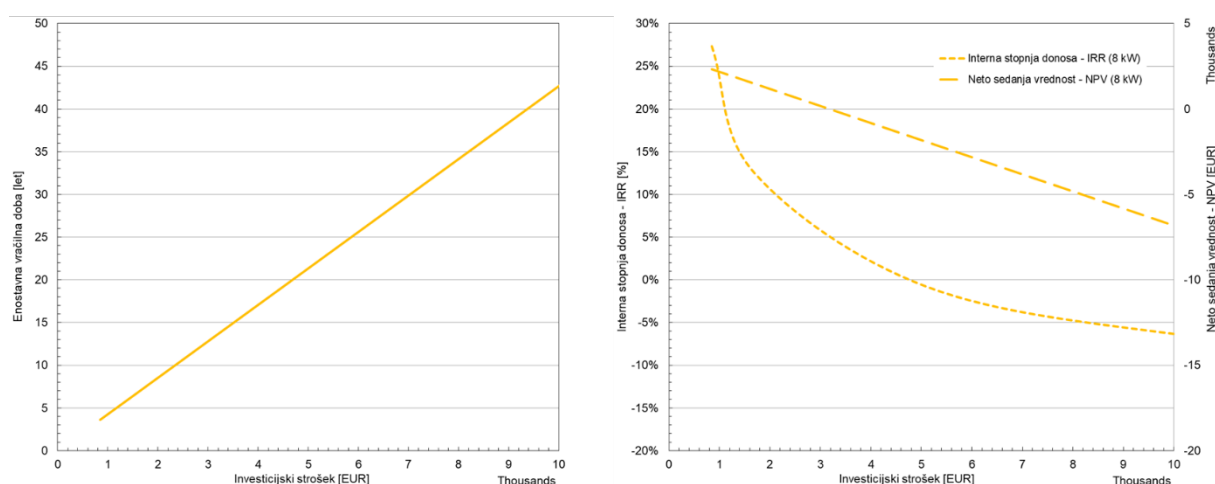
Z namenom optimizacije sistema lahko na osnovi agregiranih rezultatov simulacij letnih energijskih tokov izvedemo občutljivostno analizo ogrevanja in hlajenja z geosondo. Na ta način lahko v smislu odvisnosti odziva rezultatov na različne vhodne parametre določimo občutljivost zasnovanega sistema na te parametre, kar posledično omogoči iskanje optimuma (min, max) oziroma optimizacijo bodisi zasnove bodisi obratovalnih pogojev sistema. Kadar je torej naša odvisna spremenljivka npr. vračilna doba, lokalni minimum označuje izbiro takšne vrednosti neodvisne spremenljivke - vplivnega parametra, pri katerem se bo obratovanje sistema najhitreje poplačalo (Slika 18). Kadar sistem nima lokalnega ekstrema, čeprav je vpliv neodvisne spremenljivke lahko zelo pomemben (Slika 17), ne moremo govoriti o eni izbiri optimalne vrednosti vplivnega parametra pač pa le o občutljivosti sistema na dano spremenljivko. Razumevanje slednje je torej s stališča URE in racionalne rabe resursov ključnega pomena tako v fazi snovanja sistema, kot tudi med obratovanjem.



Slika 17 Preprosta občutljivostna finančna analiza enostavne vračilne dobe na ceno energije (levo) in interne stopnje donosa (IRR) ter neto sedanje vrednosti (NPV) na ceno energije (desno).



Slika 18 Enostavna vračilna doba in neto sedanja vrednost (NPV) v odvisnosti od nazivne moči sistema (levo), interna stopnja donosa (IRR) in neto sedanja vrednost (NPV) v odvisnosti od ekonomske življenjske dobe (desno).



Slika 19 Enostavna vračilna doba v odvisnosti od investicijskega stroška 8 kW sistema z geosondo (levo), interna stopnja donosa (IRR) in neto sedanja vrednost (NPV) 8 kW sistema z geosondo v odvisnosti od investicijskega stroška (desno).

Slika 17 prikazuje enoznačno občutljivost izbranega sistema na ceno energije; dražja kot je modelirana cena električne energije, krajša je vračilna doba sistema. Ob ostalih nespremenjenih

pogojih je rezultat intuitiven, saj je denarni tok neposredno vezan na prihranek električne energije, ki ga more omogočiti integracija geotermalne energije. Povsem drugačen pa je vpliv velikosti sistema na vračilno dobo. Večji kot je sistem, večji so prihranki, večja pa je tudi investicija in manjša izkoriščenost sistema. Pomenljiv pri tem je že kazalnik Investicija/Prihranek [€/kWh] (Tabela 4). Izkaže se, da je za dano dinamiko energijskih potreb pri izbranih robnih pogojih na kmetiji Turk finančno optimalna velikost hladilnega sistema z geosondo okoli 10 kW (Slika 18). Kljub optimizaciji velikosti sistema z geosondo, pa glede na NPV investicija stroškovno ni upravičena, zato se je porodilo vprašanje maksimalne vrednosti investicije, ki bi bila finančno še rentabilna. Tako smo izvedli finančno analizo za sistem z geosondo nazivne moči 8 kW. Glede na odvisnost interne stopnje donosa (IRR) od investicijskega stroška, investicija pri zahtevanem donosu 4% in ostalih danih robnih pogojih nebi smela presegati 3200 € (Slika 19). S tako majhno razpoložljivo investicijo v danem primeru stroška nadgradnje tako kompleksnega sistema ne moremo pokriti. Prav tako »a priori« prednosti izrabe plitve geotermije na primeru hladilnic ne moremo potrditi. Preden se sprejme odločitev za investicijo v tovrstni sistem, se torej predlaga izvedba poglobljene energijske in finančne analize za vsak individualni sistem posebej.

1.3.8 Zaključek

Integracija plitve geotermije pri uporabi v hladilnicah prinaša določene prednosti, vendar so te značilno omejene. Pomembne omejitve izrabe geotermalne energije so naslednje:

- gre za sorazmerno kratko obdobje ekstremnih temperaturnih razlik (poleti za hlajenje in pozimi za ogrevanje), ko je izraba geotermije učinkovitejša od izrabe zračno hlajenega sistema.
- Kadar je toplotna moč ponora ali izvora toplote v tleh premajhna, je razliko toplotnega toka potrebno prenesti na zrak, kar pomeni obratovanje pri skoraj enakem temperaturnem režimu, kot če geosonde nebi imeli, zato so takrat prihranki minimalni.
- Prednosti sezonske akumulacije toplote v tleh so močno odvisne od lokalnih geoloških lastnosti terena.
- Zračno hlajeni sistem je v primerjavi s sistemom z geosondo v prehodnem obdobju učinkovitejši, hkrati pa je z njim lažje in ceneje doseči zahtevano nazivno toplotno moč sistema, zato je integracija obeh sistemov pogosto najracionalnejša izbira.
- Nazivna moč sistema z geosondo je sorazmerno majhna, investicija pa sorazmerno velika.
- Poleg stroškov povezanih z izvrtino je tudi sistem strojnih instalacij (ali nadgradnja obstoječega sistema) sorazmerno kompleksen, zato je investicija primerno visoka.

Upravičenost investicije v izrabo geotermalne energije na kmetiji Turk bi lahko povzeli v naslednjih alinejah:

- optimalna nazivna moč sistema z geosondo je 8 kW.
- Stroška nadgradnje tako kompleksnega sistema ne moremo opravičiti brez subvencije.
- Investicija pri zahtevanem donosu 4% in ostalih danih robnih pogojih nebi smela presegati 3200 €.
- Prednosti izrabe plitve geotermije na primeru hladilnic ne moremo potrditi »a priori«.
- Za vsak individualni sistem morata odločitev za investicijo v tovrstni sistem in sama optimizacija sistema temeljiti na poglobljeni energijski in finančni analizi.

Priloga 1: Izračun vrednosti koeficientov karakterističnih izgub stavbe G in karakteristične izgube hladilnice H

GeoCOOL FOOD

Date:

Sheet :

05.02.2024

$$E = \underbrace{\frac{G \cdot T_{PK}}{COP_G}}_{\text{hiša}} + \underbrace{r + \frac{H \cdot T_{PSH}}{COP_H}}_{\text{hladilnica}} + P_{el} \leftarrow \begin{matrix} \text{ogrevanje} & \text{ostala voda} & \text{hlajenje} & \text{ogrevanje} \\ & & & H \cdot T_{PSg} > 0 \end{matrix}$$

$$G = \frac{COP_G}{T_{PKi}} \cdot \left(E_i - r_i - \frac{H \cdot T_{PSHi}}{COP_H} - H \cdot T_{PSgi} \right)$$

$$\frac{COP_G}{T_{PK1}} \cdot \left(E_1 - r_1 - \frac{H \cdot T_{PSH1}}{COP_H} - H \cdot T_{PSg1} \right) = \frac{COP_G}{T_{PK2}} \cdot \left(E_2 - r_2 - \frac{H \cdot T_{PSH2}}{COP_H} - H \cdot T_{PSg2} \right)$$

$$\frac{E_1}{T_{PK1}} - \frac{r_1}{T_{PK1}} - H \left(\frac{T_{PSH1}}{T_{PK1} \cdot COP_H} + \frac{T_{PSg1}}{T_{PK1}} \right) = \frac{E_2}{T_{PK2}} - \frac{r_2}{T_{PK2}} - H \left(\frac{T_{PSH2}}{T_{PK2} \cdot COP_H} + \frac{T_{PSg2}}{T_{PK2}} \right)$$

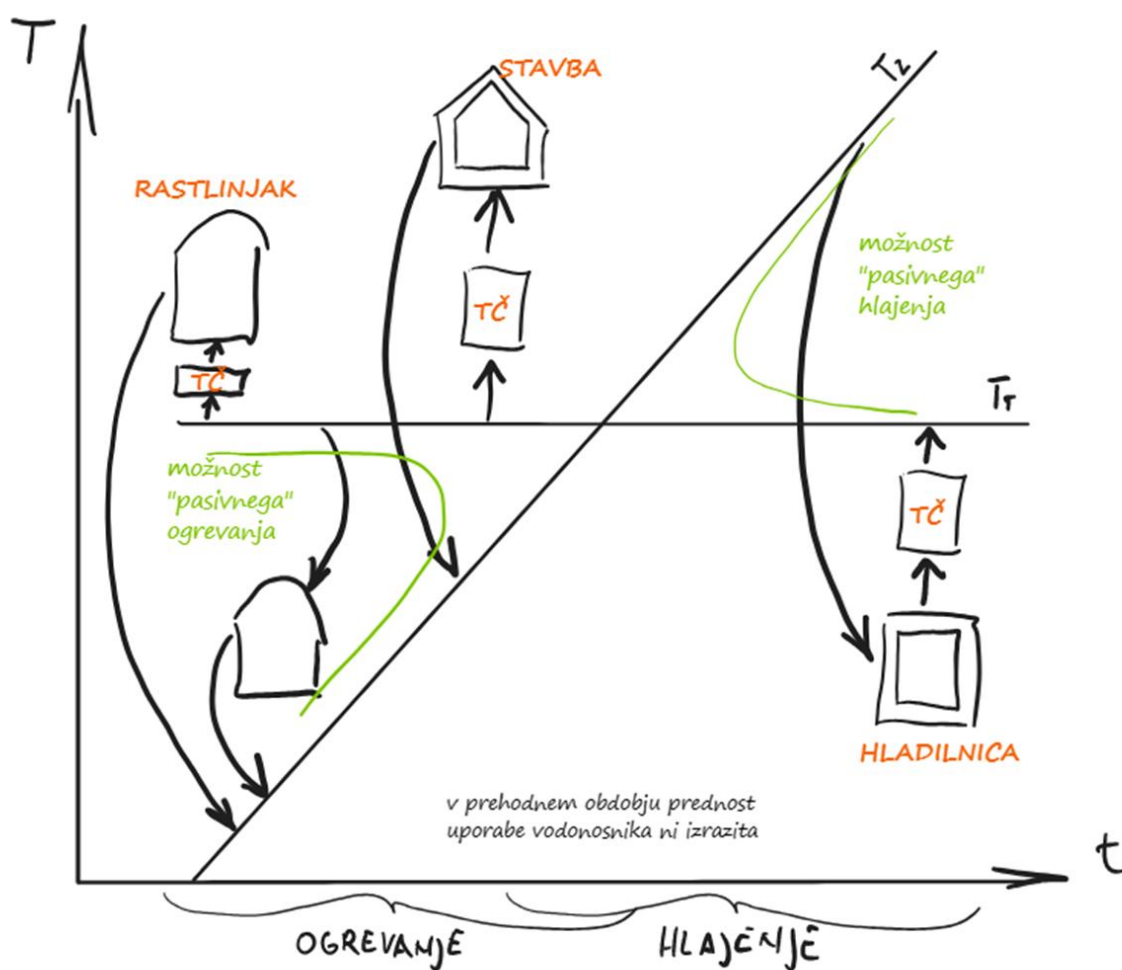
$$H \left(\frac{T_{PSH2}}{T_{PK2} \cdot COP_H} + \frac{T_{PSg2}}{T_{PK2}} - \frac{T_{PSH1}}{T_{PK1} \cdot COP_H} - \frac{T_{PSg1}}{T_{PK1}} \right) = \frac{E_2 - r_2}{T_{PK2}} - \frac{E_1 - r_1}{T_{PK1}}$$

$$H = \frac{\frac{E_2 - r_2}{T_{PK2}} - \frac{E_1 - r_1}{T_{PK1}}}{\left(\frac{T_{PSH2}}{T_{PK2} \cdot COP_H} + \frac{T_{PSg2}}{T_{PK2}} - \frac{T_{PSH1}}{T_{PK1} \cdot COP_H} - \frac{T_{PSg1}}{T_{PK1}} \right)}$$

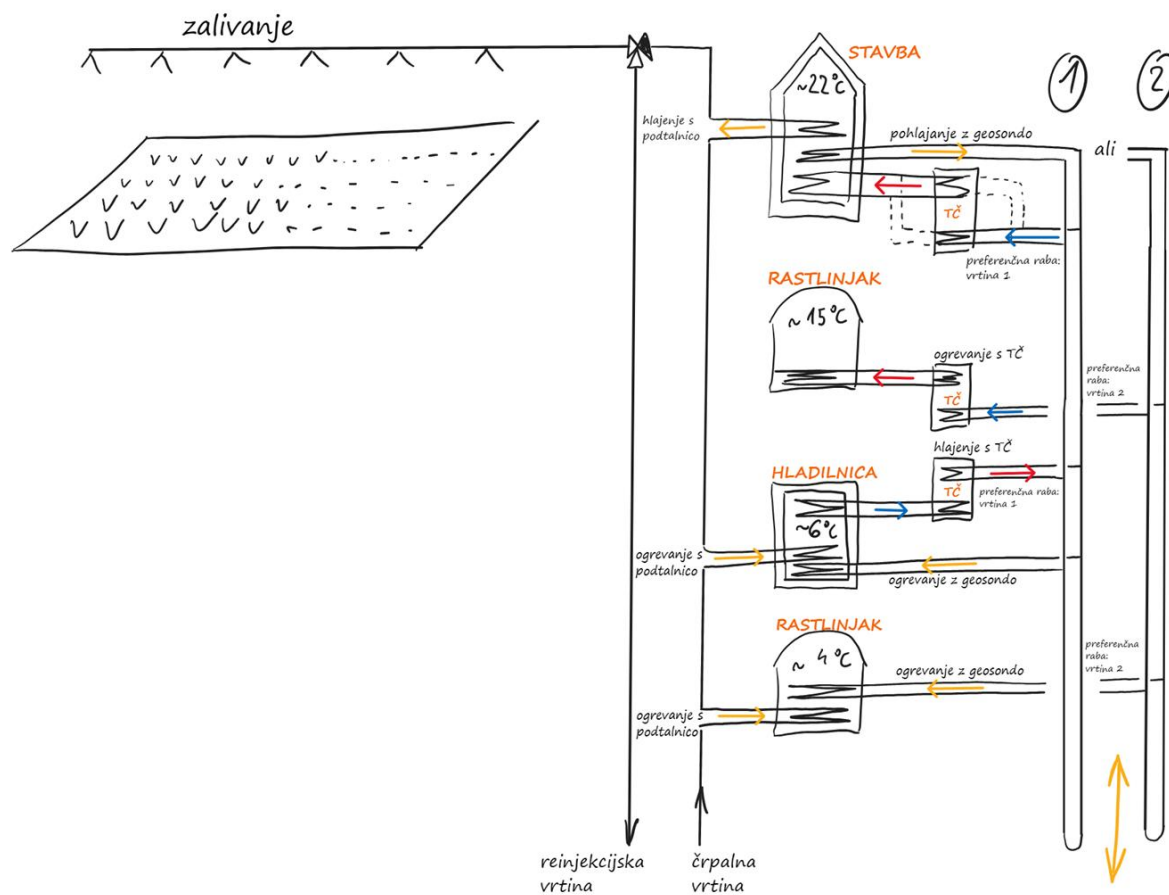
T_{PK} ... temperaturni primanjflj (ogrevanje hiše)
 T_{PSg} ... temperaturni primanjflj/presežek (ogrevanje hladilnice)
 T_{PSH} ... — Hm (hlajenje hladilnice)

G ... karakteristične izgube stavke
 H ... karakteristične izgube hladilnice
 ESTECO AREA Science Park | Padriciano, 99 | 34012 Trieste | Italy
 www.esteco.com

Priloga 2: Temperaturni nivoji ter omejitve pasivnega hlajenja in ogrevanja



Priloga 4: Možnosti uporabe vodnjaka in geosonde



Priloga 5: Povprečne dnevne vrednosti temperature in globalnega sevanja v TRL za Novo mesto

day	Tzun	GlobSev	73	4.6	1.9	146	22.1	5.9	219	21.4	7.3	292	13.4	3.8
1	-3.9	1.5	74	5.8	2.6	147	19.7	5.3	220	19.4	4.1	293	12.8	3.7
2	-3.3	0.2	75	6.4	1.9	148	16.9	5.3	221	19.2	6.8	294	11.7	3.2
3	-2.3	0.6	76	7.5	3.7	149	13.3	4.6	222	19.1	7.4	295	10.7	1.5
4	-4.6	0.5	77	6.3	3.3	150	12.7	3.3	223	19.7	7.3	296	10.3	1.4
5	-3.7	0.8	78	7.3	4.8	151	16.1	7.8	224	22.0	7.0	297	9.2	0.8
6	-1.1	1.0	79	6.5	4.3	152	15.8	7.0	225	24.0	6.6	298	10.2	2.3
7	6.3	0.6	80	7.7	5.0	153	16.2	7.9	226	23.1	6.8	299	8.1	0.8
8	10.0	0.7	81	9.3	3.7	154	18.0	7.9	227	22.3	3.9	300	11.1	0.9
9	9.0	1.2	82	8.4	4.1	155	20.1	7.4	228	16.0	3.0	301	1.5	1.0
10	6.3	0.4	83	8.1	3.7	156	14.8	1.8	229	16.8	5.2	302	0.9	0.8
11	5.1	0.4	84	7.3	0.9	157	15.4	4.8	230	18.8	6.5	303	0.0	1.6
12	4.5	0.6	85	11.6	3.0	158	12.3	3.8	231	20.3	6.9	304	2.7	1.7
13	5.3	1.4	86	8.5	0.6	159	11.5	5.2	232	20.7	6.3	305	16.7	1.5
14	7.3	1.7	87	9.6	4.6	160	10.8	4.0	233	20.8	5.4	306	11.2	0.7
15	5.5	1.5	88	9.2	5.2	161	13.8	4.3	234	21.4	6.3	307	9.0	2.6
16	5.0	1.9	89	12.3	3.7	162	14.0	4.2	235	19.3	4.3	308	7.4	2.5
17	4.9	2.1	90	12.9	5.4	163	17.5	5.8	236	16.2	4.3	309	6.3	2.2
18	3.6	2.1	91	12.2	4.1	164	18.6	6.4	237	15.6	5.4	310	3.9	1.4
19	1.2	0.5	92	13.0	3.4	165	18.6	5.5	238	17.6	6.4	311	5.8	0.6
20	1.4	0.7	93	8.5	2.8	166	19.4	7.1	239	18.5	5.3	312	6.4	0.4
21	1.5	0.6	94	8.7	5.3	167	18.8	5.7	240	19.5	5.8	313	6.6	0.5
22	-0.4	1.0	95	9.3	2.2	168	21.1	7.5	241	20.4	5.6	314	6.2	0.5
23	-1.7	2.3	96	4.1	0.8	169	21.9	4.4	242	18.9	3.3	315	4.7	0.7
24	-2.6	1.1	97	4.9	5.4	170	20.0	8.5	243	17.9	3.9	316	4.1	1.2
25	-2.3	0.8	98	7.5	6.4	171	19.3	8.4	244	16.8	4.2	317	1.2	2.4
26	1.3	2.0	99	9.9	6.1	172	21.3	8.2	245	15.0	2.7	318	2.1	1.1
27	0.8	0.6	100	13.9	2.7	173	21.4	6.7	246	18.7	6.1	319	4.4	1.9
28	-1.1	0.5	101	8.9	0.8	174	21.8	7.1	247	19.6	5.5	320	7.0	0.8
29	-1.8	0.6	102	7.2	3.7	175	23.0	7.8	248	19.5	5.1	321	11.3	0.2
30	-1.3	0.7	103	8.8	4.9	176	24.2	7.3	249	19.3	5.7	322	7.0	1.6
31	-1.3	0.4	104	11.6	6.3	177	23.9	6.2	250	19.3	5.6	323	7.6	2.2
32	-0.7	0.7	105	12.8	5.2	178	22.9	7.5	251	19.0	4.5	324	7.3	2.1
33	-0.2	0.3	106	13.0	1.2	179	22.8	6.0	252	16.9	1.8	325	7.0	1.7
34	0.8	0.7	107	12.0	4.5	180	21.1	5.9	253	16.1	1.9	326	7.5	1.9
35	2.6	1.8	108	11.4	3.3	181	21.4	6.9	254	13.3	1.4	327	9.9	1.2
36	3.7	1.7	109	12.1	1.9	182	20.2	4.1	255	13.0	2.4	328	11.9	0.6
37	6.0	1.7	110	14.2	6.3	183	21.3	6.9	256	13.4	4.6	329	11.6	0.6
38	5.8	1.1	111	13.9	6.7	184	21.7	7.6	257	15.6	5.7	330	9.9	0.2
39	5.6	0.5	112	14.6	6.6	185	22.7	6.8	258	16.5	3.9	331	11.5	1.3
40	4.0	2.9	113	14.4	5.4	186	22.7	6.6	259	17.5	4.8	332	9.1	0.5
41	3.8	0.9	114	15.5	6.7	187	20.0	4.4	260	11.8	1.9	333	7.1	0.4
42	4.5	1.2	115	16.9	6.5	188	18.6	2.4	261	11.5	2.6	334	7.2	0.7
43	1.8	3.2	116	15.8	3.9	189	15.3	2.1	262	14.3	4.0	335	5.1	0.4
44	0.1	3.1	117	13.3	0.7	190	17.0	5.8	263	14.6	5.0	336	4.8	0.5
45	0.5	2.5	118	12.9	1.0	191	15.0	1.4	264	14.2	3.2	337	3.0	0.4
46	-0.5	3.2	119	11.5	2.1	192	16.1	6.6	265	14.3	5.0	338	2.9	0.3
47	-0.1	2.1	120	7.0	1.0	193	18.2	7.8	266	14.7	5.1	339	3.1	0.3
48	2.6	1.5	121	12.4	6.9	194	21.0	7.5	267	15.1	4.9	340	6.2	1.8
49	-2.7	2.8	122	12.9	6.3	195	23.7	7.7	268	15.6	2.9	341	1.8	1.8
50	-2.5	3.8	123	13.6	3.7	196	25.4	7.4	269	17.1	3.6	342	-1.8	2.0
51	-1.3	3.4	124	11.8	1.2	197	25.0	7.9	270	13.5	0.8	343	-3.3	1.9
52	1.7	3.3	125	13.4	2.4	198	24.8	7.9	271	11.6	1.1	344	-0.9	0.7
53	0.3	1.0	126	14.8	5.8	199	19.0	3.4	272	11.1	0.5	345	0.7	0.6
54	1.7	2.2	127	16.4	7.0	200	17.8	7.7	273	9.0	0.5	346	4.3	1.5
55	0.8	1.3	128	18.5	6.7	201	20.1	7.8	274	17.3	4.3	347	0.2	1.3
56	1.9	2.3	129	15.7	3.6	202	22.5	7.8	275	15.6	1.2	348	3.9	1.4
57	2.4	3.0	130	17.1	6.0	203	23.9	7.5	276	15.4	3.6	349	1.3	0.9
58	5.3	3.4	131	19.4	7.5	204	26.9	7.4	277	15.6	3.7	350	0.4	1.5
59	6.3	3.3	132	18.5	5.9	205	25.1	7.6	278	15.5	4.0	351	-0.8	0.8
60	6.8	2.9	133	20.4	6.5	206	20.8	4.7	279	15.6	4.0	352	-0.4	1.8
61	8.9	1.1	134	21.2	7.6	207	19.4	7.8	280	15.6	2.6	353	0.8	1.4
62	6.0	3.5	135	17.9	1.8	208	20.5	7.8	281	10.9	4.3	354	1.3	1.6
63	3.7	1.1	136	13.0	3.8	209	21.3	5.7	282	11.3	2.7	355	5.6	0.7
64	6.0	1.7	137	13.4	5.0	210	22.1	7.2	283	10.4	1.0	356	0.9	0.5
65	4.8	2.2	138	13.7	7.7	211	23.6	7.4	284	9.6	0.8	357	-0.8	1.9
66	3.0	3.2	139	13.5	7.4	212	23.1	6.1	285	11.0	0.7	358	-3.9	1.7
67	3.0	4.5	140	16.4	5.5	213	23.6	7.1	286	11.6	0.7	359	-6.5	1.6
68	2.9	3.5	141	19.6	7.4	214	21.3	4.7	287	12.0	2.0	360	-5.7	1.5
69	4.8	4.4	142	20.8	6.6	215	22.1	6.5	288	12.6	1.8	361	-2.0	1.7
70	4.0	1.4	143	19.0	5.7	216	24.1	6.4	289	11.4	2.3	362	2.9	0.5
71	4.9	2.9	144	20.4	7.2	217	22.6	5.9	290	11.5	2.6	363	3.4	0.5
72	6.0	3.6	145	22.5	7.4	218	21.4	6.6	291	14.3	3.5	364	3.2	0.2

365	3.2	0.3
-----	-----	-----

Priloga 6: Povprečne dnevne vrednosti temperature v hladilnicah 1 in 2, zunanega zraka ter izmerjene rabe električne energije v hladilnicah 1 in 2 ter na celotni kmetiji Turk

dan_i	Pkmetija	Phladilnica	Tzun,1	Thlad,1	Tzun,2	Thlad,2	Tps_hlad1	dan
	[kWh]	[kWh]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[K dan]	[d]
1	151.0	3.5	17.1	11.5	17.9	11.2	5.6	143
2	171.0	3.2	17.6	12.3	18.3	12.1	5.2	144
3	231.4	90.0	19.2	7.4	19.0	6.7	11.9	145
4	220.1	62.0	17.6	3.6	18.5	2.9	14.0	146
5	318.6	232.1	19.3	4.3	20.1	3.8	15.0	147
6	350.6	135.9	17.4	3.5	17.7	3.1	13.9	148
7	207.2	168.1	18.2	3.3	18.7	3.0	14.9	149
8	353.0	144.5	18.0	3.5	18.1	3.1	14.5	150
9	231.7	90.4	16.4	3.5	16.7	3.2	12.9	151
10	209.7	95.9	17.3	3.4	18.5	3.1	13.9	152
11	222.2	95.9	20.0	3.3	20.1	2.9	16.7	153
12	239.2	92.3	17.9	3.4	18.5	3.1	14.5	154
13	277.7	105.5	20.0	3.4	20.4	3.0	16.6	155
14	225.9	169.9	21.9	3.6	22.2	3.3	18.3	156
15	236.0	130.4	23.6	4.0	23.5	3.7	19.6	157
16	266.0	218.9	22.5	14.2	22.2	13.9	8.2	158
17	267.2	247.7	23.9	9.8	24.1	9.5	14.2	159
18	408.0	240.0	23.9	7.4	23.8	6.9	16.5	160
19	493.5	203.5	21.1	5.5	20.9	5.1	15.6	161
20	295.7	75.6	18.5	3.5	18.4	3.2	15.0	162
21	345.9	62.4	16.0	3.2	16.2	2.8	12.8	163
22	416.9	155.0	14.9	3.4	15.4	2.9	11.5	164
23	252.6	154.0	18.9	3.8	19.4	3.1	15.1	165
24	332.6	224.0	21.2	7.8	21.7	7.6	13.4	166
25	236.0	220.4	21.5	9.2	21.5	9.0	12.2	167
26	218.6	165.3	23.5	4.2	24.0	3.7	19.3	168
27	289.3	169.9	24.8	3.4	25.0	3.4	21.4	169
28	2.6	29.9	31.4	6.5	31.6	6.4	24.9	170