

Št. prispevka: A-S1 – 149

Načrtovanje in optimizacija delovanja plitvih geotermalnih sistemov

Mitja Janža^{1*}, Nina Rman¹, Simona Adrinek¹, Nejc Bizjak¹ in Luka Rednak²¹ Geološki zavod Slovenije, Ljubljana, Slovenija² KRONOTERM, d.o.o., Tmava, Slovenija

* Kontaktna oseba:

Ime Priimek: Mitja Janža

Institucija/podjetje: Geološki zavod Slovenije

E-pošta: mitja.janza@geo-zs.si

POVZETEK:

Plitva geotermalna energija je pomemben obnovljiv vir energije za ogrevanje in hlajenje stavb. Njena dolgoročna, učinkovita in trajnostna raba je v veliki meri odvisna od ustreznega načrtovanja geotermalnih sistemov. Ključnega pomena pri tem je poznavanje geoloških, hidrogeoloških in toplotnih lastnosti pod površja ter njihova vključitev v proces načrtovanja. V prispevku je predstavljen primer načrtovanja hibridnega geotermalnega sistema ogrevanja manjšega objekta (250 m²), kjer je bil obstoječi sistem na kurilno olje nadgrajen z zaprtim geotermalnim sistemom. V okviru izvedbe je bil opravljen test toplotnega odziva (TRT), na podlagi katerega so bili določeni ključni toplotni parametri pod površja. Ti podatki so bili uporabljeni v dolgoročni (25-letni) simulaciji delovanja sistema z namenom optimizacije njegove zasnove in obratovanja. Rezultati simulacij kažejo, da sistem omogoča trajnostno rabo lokalnega geotermalnega potenciala in pokrivanje približno 95 % letnih potreb po toploti za ogrevanje. Meritve v prvih mesecih delovanja sistema potrjujejo dobro skladnost s simulacijami, kar potrjuje zanesljivost uporabljene metodologije in njeno uporabnost pri načrtovanju zaprtih geotermalnih sistemov.

KLJUČNE BESEDE:

plitva geotermalna energija, toplotna črpalka, optimizacija, geosonda

1 UVOD

Geotermalna energija je obnovljiv vir, ki lahko pomembno prispeva k učinkovitejšemu energetskega prehodu na področju ogrevanja in hlajenja stavb. Najlažje dostopna je geotermalna energija plitvo pod površjem, ki se najpogosteje uporablja s toplotnimi črpalkami. Ti geotermalni sistemi imajo visoko energetske učinkovitost in zelo majhen vpliv na okolje, če so ustrezno načrtovani (dimenzionirani) in prilagojeni naravnim danostim pod površja. Poleg poznavanja potreb po ogrevanju ali ohlajanju objekta je ključnega pomena poznavanje geotermalnega potenciala oziroma geoloških, hidrogeoloških in toplotnih lastnosti pod površja. Ustrezna določitev teh lastnosti bistveno zmanjša tveganje investicije, povezano predvsem z dolgoročno učinkovitostjo delovanja geotermalnega sistema.

Izhodišče za načrtovanje rabe geotermalne energije je ocena geotermalnega potenciala in prilagoditev rabe tako, da je uravnotežena z naravnim obnavljanjem. V prispevku je predstavljen primer načrtovanja, izvedbe

in delovanja hibridnega sistema ogrevanja v manjšem javnem objektu (250 m²). Obstoječi sistem ogrevanja na kurilno olje je bil nadgrajen z geotermalnim sistemom, ki temelji na dveh navpičnih toplotnih izmenjevalnikih (geosondah) in visokotemperaturni toplotni črpalki (KRONOTERM ETERA L). Med vrtnimi deli je potekalo geološko spremljanje in izvajanje meritev v vrtinah, kar je omogočilo interpretacijo geološke sestave in temperaturnih profilov vzdolž vrtin. S testom toplotnega odziva sta bili določeni toplotna prevodnost tal in toplotna upornost vrtine. Na podlagi teh podatkov je bila izvedena dolgoročna simulacija delovanja geotermalnega sistema in optimizacija delovanja, ki omogoča stroškovno učinkovito ogrevanje in trajnostno rabo lokalnega geotermalnega potenciala. Vzpostavljen monitoring geotermalnega sistema omogoča vrednotenje rezultatov simulacij in naknadno optimizacijo njegovega delovanja. Geotermalni sistem je bil izveden v okviru projektov InnoGeoPot (N1-0347, ARIS) in Danube GeoHeCo (Interreg, Podonavje), prav tako razvoj informacijskega orodja za podporo načrtovanju in optimizaciji delovanja geotermalnih sistemov GeoHeCo IT Tool, ki je prosto dostopno na spletu (<https://geoheco.bolt.host/>).

2 METODE NAČRTOVANJA ZAPRTEGA GEOTERMALNEGA SISTEMA

Zaprti geotermalni sistemi so sestavljeni iz cevnih toplotnih izmenjevalcev, vgrajenih pod površje, v katerih se v zaprtem krožnem sistemu pretaka delovna tekočina za prenos toplote do toplotne črpalke. Cevi so najpogostejše vgrajene v vrtine, kar omogoča večji izkoristek geotermalne energije na enoto površine v primerjavi s horizontalnimi toplotnimi izmenjevalci, vgrajenimi v plitvih zemeljskih izkopih. Ti vertikalni zaprti geotermalni sistemi ali geosonde so najpogostejša oblika geotermalnih sistemov [1] na evropski ravni, predvsem zaradi manj zahtevnih regulativnih postopkov za njihovo umeščanje v prostor v primerjavi z odprtimi geotermalnimi sistemi, hkrati pa so primerni za rabo plitve geotermalne energije v skoraj vseh geoloških pogojih.

Prvi tehnološki korak pri izvedbi geosonde je izvedba vrtnih del. Poznavanje geoloških in hidrogeoloških razmer je ključno za izbiro ustrezne metode vrtnanja. V izvedeno vrtino se vgradi toplotni izmenjevalec, prazni prostor med steno vrtine in cevjo pa se zapolni s cementno-polnilno mešanico, ki zagotavlja mehansko stabilnost toplotnega izmenjevalca ter dober toplotni stik z okoliško kamnino, s čimer se izboljša prenos toplote.

Za načrtovanje oziroma dimenzioniranje geotermalnega sistema so ključni podatki o toplotnih lastnostih podpovršja, ki jih pridobimo s testom toplotnega odziva (angl. Thermal Response Test – TRT). TRT je in situ metoda, s katero določimo povprečno učinkovito toplotno prevodnost kamnin v okolici vrtine, ob upoštevanju naravnih geoloških in hidrogeoloških vplivov, toplotno upornost vrtine ter naravno temperaturo podpovršja. Test se izvede na izbrani geosondi, ki mora pred začetkom testiranja dovolj dolgo mirovati, da se temperatura delovne tekočine izenači s temperaturo okolice. Izvedba testa in interpretacija dobljenih podatkov sta standardizirani [2].

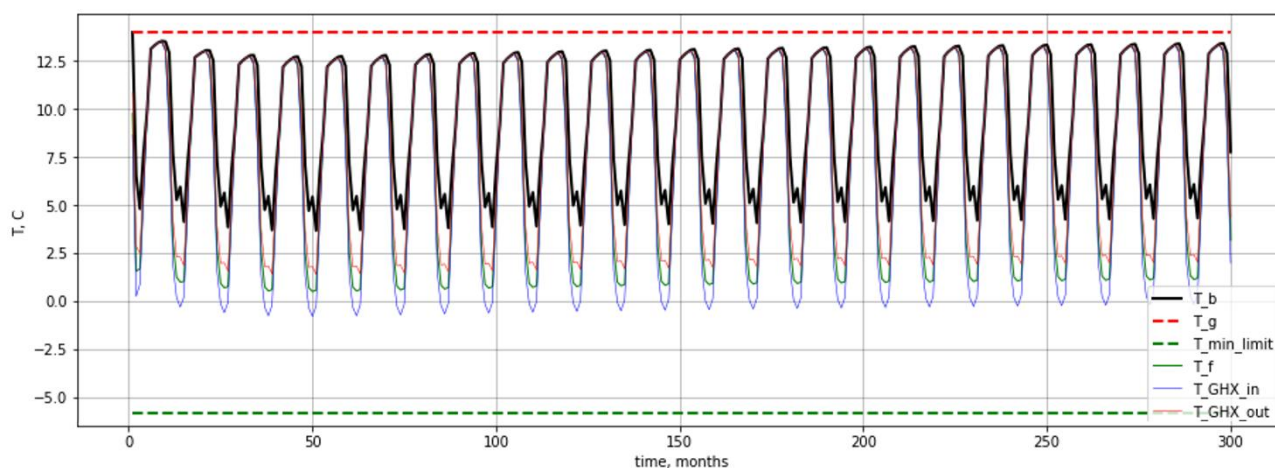
Uporabnik lahko v orodju GeoHeCo IT Tool opredeli ključne vhodne podatke: toplotne potrebe objekta, konfiguracijo geosond, lastnosti podpovršja, parametre toplotne črpalke, način delovanja sistema (npr. hibridni način z dodatnim virom toplote) ter ekonomske parametre. Rezultat uporabe orodja je izračun in grafični prikaz tehničnih in ekonomskih kazalnikov, med katerimi so: časovni niz spreminjanja temperature delovne tekočine v vrtini, toplotni tokovi med geosondo, toplotno črpalko in objektom, delež pokritosti toplotnih potreb s toplotno črpalko in sekundarnim virom, obremenitveni kazalniki toplotne črpalke, poraba električne energije in goriva ter nivelirani strošek toplote za celotni sistem. Rezultati so predstavljeni v obliki grafov in tabel ter so primerni za neposredno primerjavo različnih projektnih scenarijev, na primer pri analizi vpliva spremembe bivalentne temperature ali skupne dolžine geosond.

Orodje omogoča modeliranje ključnih fizikalnih in obratovalnih procesov geotermalnega sistema v večletnem časovnem obdobju, kar omogoča izbor dolgoročno učinkovitih in trajnostnih rešitev. Rezultati so prikazani v obliki preglednih časovnih vrst, ki omogočajo spremljanje trendov, sezonskih vplivov in vršnih obremenitev sistema. Orodje nudi usmeritve pri izbiri ustrezne dolžine geosond ter določanju bivalentne temperature, kar je ključno za optimalno delovanje hibridnih ogrevalnih sistemov. Omogoča tudi izračun niveliranega stroška toplote, ki predstavlja primerljivo ekonomsko osnovo za vrednotenje različnih tehničnih in projektnih variant.

3 REZULTATI

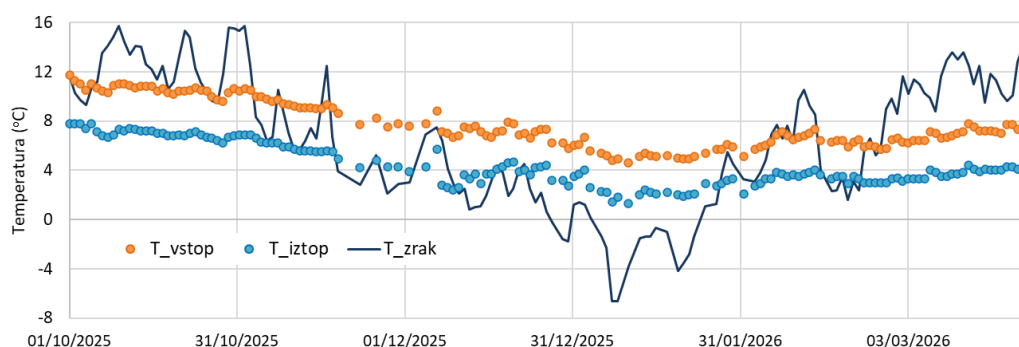
Na podlagi interpretacije podatkov testa toplotnega odziva (TRT) smo ocenili, da je povprečna toplotna prevodnost podpovršja $4,17 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, toplotna upornost raziskovalne geosonde $0,09 \text{ m} \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$ in povprečna temperatura podpovršja vzdolž geosonde $14,09 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Visoka vrednost ocenjene učinkovite toplotne prevodnosti odraža vpliv toka podzemne vode in zelo ugodne razmere za uporabo zaprtih geotermalnih sistemov.

Z uporabo teh podatkov ter parametrov, ki opisujejo značilnosti geotermalnega sistema, toplotne potrebe objekta in meteorološke razmere, smo izvedli 25-letno simulacijo delovanja geotermalnega sistema in njegovega vpliva na temperaturne razmere v podpovršju. Rezultati simulacije kažejo, da se bo v najhladnejših mesecih vhodna temperatura v geosondo znižala na približno $0 \text{ }^{\circ}\text{C}$, izhodna pa na približno $2,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (Slika 1). Poleti se bo temperatura podpovršja v celoti obnovila, kar kaže, da načrtovani način delovanja sistema omogoča dolgoročno učinkovito in trajnostno rabo geotermalne energije ter zagotavlja približno 40 MWh toplote letno, kar predstavlja okoli 95% toplotnih potreb za ogrevanje objekta.



Slika 1: Simulirane temperature geotermalnega sistema: naravna temperatura tal (T_g), najnižja dovoljena temperatura delovne tekočine ($T_{min,limit}$), povprečna temperatura delovne tekočine v geosondi (T_f), vstopna ($T_{GHX,in}$) in izstopna ($T_{GHX,out}$) temperatura delovne tekočine v geosondi, ter temperatura neposredne okolice geosonde (T_b).

Podatki monitoringa delovanja sistema omogočajo validacijo rezultatov simulacij. Meritve temperature delovne tekočine ob vstopu in izstopu iz toplotne črpalke v prvih šestih mesecih ogrevalne sezone (od začetka oktobra 2025 do konca marca 2026) so skupaj z meritvami temperature zraka prikazane na Sliki 2. Temperature tekočine na izstopu iz toplotne črpalke so se v najhladnejšem delu leta približale $0 \text{ }^{\circ}\text{C}$ in so primerljive s simuliranimi najnižjimi temperaturami na Sliki 1, ki se v najhladnejših obdobjih spustijo tudi nekoliko pod $0 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Najnižja izmerjena temperatura delovne tekočine iz geosond oziroma ob vstopu v toplotno črpalko je znašala okoli $4 \text{ }^{\circ}\text{C}$, kar je približno $2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ višje od simulirane vrednosti. Toplotna črpalka je v obravnavanem obdobju zagotavljala 100% potreb po ogrevanju stavbe brez uporabe dodatnega vira toplote.



Slika 2: Izmerjena temperatura delovne tekočine ob vstopu v toplotno črpalko (modri krogec) in izstopu iz toplotne črpalke (oranžni krogec) ter temperatura zunanjega zraka (modra črta).

4 ZAKLJUČKI

Ustrezno načrtovanje geotermalnih sistemov je ključno za optimizacijo stroškov njihove izvedbe, ki predstavljajo pomemben omejitveni dejavnik za njihovo širšo uporabo. Določitev toplotnih lastnosti podpovršja je osnovni korak, ki ob poznavanju toplotnih potreb objekta in lastnosti toplotne črpalke z uporabo analitičnih orodij omogoča simulacijo vpliva delovanja geotermalnega sistema na temperaturne razmere v podpovršju. Tako se je mogoče izogniti nepotrebnim stroškom vrtalnih del ali tveganjem, povezanim s poddimenzioniranjem geosond. Uporaba predstavljene metodologije na konkretnem primeru in njena validacija z meritvami potrjujeta zanesljivost in smiselnost uporabe postopka pri načrtovanju geotermalnih sistemov.

5 REFERENCE

- [1] ADRINEK S., JANŽA M., SINGH R. M.: Influence of Geology, Hydrogeology, and Climate on Ground Source Heat Pump Distribution in Slovenia and Selected European Countries, Resources, št. 13, 2024, DOI: 10.3390/resources13030039.
- [2] VDI 4640, Blatt 5: Thermal use of the underground – Thermal Response Test (TRT), VDI-Gesellschaft Energie und Umwelt (GEU), Berlin, Nemčija, 2020.