

Primljen / Received: 16.7.2012.

Ispravljen / Corrected: 24.12.2012.

Prihvaćen / Accepted: 27.12.2012.

Dostupno online / Available online: 15.1.2013.

Mogućnosti podzemnog inženjerstva u iskorištavanju plitke geotermalne energije

Autori:



Prof. dr. sc. **Meho Saša Kovačević**, dipl.ing. građ.
Sveučilište u Zagrebu
Građevinski fakultet, Zavod za geotehniku
mksk@grad.hr



Mario Bačić, mag.ing.aedif.
Sveučilište u Zagrebu
Građevinski fakultet, Zavod za geotehniku
mbacic@grad.hr



Ivan Arapov, dipl.ing. građ.
Sveučilište u Zagrebu
Građevinski fakultet, Zavod za geotehniku
arapov@grad.hr

Pregledni rad

Meho Saša Kovačević, Mario Bačić, Ivan Arapov

Mogućnosti podzemnog inženjerstva u iskorištavanju plitke geotermalne energije

U radu se daje prikaz mogućih oblika iskorištavanja plitke geotermalne energije, te mogućnosti podzemnog inženjerstva u takvom procesu. Podzemne konstrukcije koje su u izravnom kontaktu s tlom, stijenom ili podzemnom vodom se osim svoje osnovne uloge u osiguranju nosivosti ili stabilnosti tla i stijene, reduciranju slijeganja konstrukcija, itd., mogu primijeniti i kao dio geotermalnih sustava gdje efikasno sudjeluju u procesu transfera energije. Njih tada nazivamo energetske podzemne konstrukcijama. U Hrvatskoj je implementacija elemenata podzemnih konstrukcija kao dijela geotermalnih sustava u svojim počecima.

Ključne riječi:

geotermalna energija, podzemno inženjerstvo, energetske podzemne konstrukcije

Subject review

Meho Saša Kovačević, Mario Bačić, Ivan Arapov

Prospects of underground engineering in the use of shallow geothermal energy

Possible ways of using shallow geothermal energy, and capabilities of underground engineering in this process, are described in the paper. In addition to their basic role in ensuring bearing capacity or stability of soil and rock, reducing settlement of structures, etc., underground structures in direct contact with the soil, rock or ground water can also be used as a part of geothermal systems in which they can assume an efficient role in the energy transfer process. In this case, they are referred to as "underground energy structures". The implementation of elements of underground structures as parts of geothermal systems is currently in its beginnings in Croatia.

Key words:

geothermal energy, underground engineering, underground energy structures

Übersichtsarbeit

Meho Saša Kovačević, Mario Bačić, Ivan Arapov

Möglichkeiten des unterirdischen Ingenieurbaus in der Nutzung von geothermischer Energie

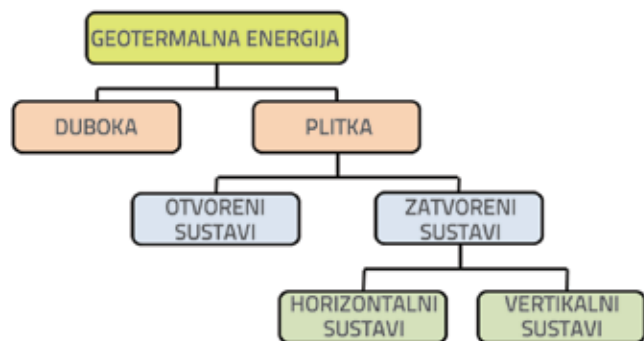
In der vorliegenden Arbeit sind mögliche Formen der Nutzung von geothermischer Energie dargestellt und die Möglichkeiten des unterirdischen Ingenieurbaus in diesem Prozess erläutert. Unterirdische Strukturen, die in unmittelbarem Kontakt mit Boden, Fels oder Grundwasser errichtet sind, können neben ihrer grundlegenden Funktion, die Tragfähigkeit und Stabilität des Grundes zu sichern, die Setzung von Bauten zu reduzieren usw., auch als Bestandteile geothermaler Systeme genutzt werden, falls sie effizient dem Verlauf des Energietransfers beitragen. Diese werden dann als energetische unterirdische Strukturen bezeichnet. In Kroatien ist der Einsatz unterirdischer Bauwerke in geothermalen Systemen im Auftakt.

Schlüsselwörter:

geothermale Energie, unterirdischer Ingenieurbau, energetische unterirdische Strukturen

1. Uvod

Pod geotermalnom energijom podrazumijevamo toplinsku energiju koja se generira i pohranjuje unutar Zemlje. Postoje dva načina generiranja geotermalne energije. Prvi je način rezultat formiranja Zemlje i radioaktivnog raspada minerala u jezgri Zemlje, dok je drugi način povezan s izravnim djelovanjem sunčeve energije koja grije površinski dio zemljine kore. Mogućnost upotrebe geotermalne energije čovječanstvu je poznata još od paleolitika kad su se vrući geotermalni izvori koristili kao kupališta ili za potrebe kuhanja [1]. U današnje vrijeme, iskorištavanje geotermalne energije karakterizira širok raspon potencijalne primjene, od mogućnosti proizvodnje električne energije, do primjene u grijanju i hlađenju objekata u kojima borave ljudi, grijanju staklenika ili životinjskih farmi, odleđivanju zamrznutih prometnica i aerodromskih pista, itd. Iskorištavanje geotermalnih resursa se dijeli na duboko i na plitko, gdje je granica određena dubinom od 400 m [2]. Sustavi za iskorištavanje plitkih geotermalnih resursa se dijele na otvorene i zatvorene, a potonji se dalje dijele na horizontalne i vertikalne sustave, slika 1. Iako je sam naziv "geotermalna energija" prema geolozima još uvijek vezan uglavnom za duboke resurse geotermalne energije, u praksi se naziv uvriježio za sve oblike iskorištavanja toplinske energije tla, stijena ili podzemnih voda.



Slika 1. Podjela geotermalne energije

Važna je uloga geotermalne energije u budućem razvoju čovječanstva, te stoga Maire et al. [3] navode da je geotermalna energija jedan od četiri glavna resursa podzemlja, uz prostor, vodu i geomaterijale, koja vode prema održivom razvoju urbanih sredina. Razlog za navedeno je to što geotermalna energija predstavlja vrlo atraktivan izvor energije koji ima brojne prednosti u odnosu na konvencionalne izvore energije kao što su ugljen, prirodni plin i nafta. Najznačajnija prednost je u činjenici da se radi o obnovljivom i čistom izvoru energije koji nema negativan utjecaj na okoliš, kao što je slučaj s konvencionalnim neobnovljivim izvorima energije [4]. Prednost iskorištavanja geotermalne energije je i s ekonomskog aspekta. Dobar primjer za navedeno je iskorištavanje plitkih geotermalnih resursa za grijanje

i hlađenje objekata. Iako su početni troškovi ugrađivanja geotermalnih sustava za iskorištavanje plitkih geotermalnih resursa u usporedbi s početnim troškovima ugrađivanja konvencionalnih sustava veći za 20 do 50 % [5], period povrata uloženi sredstava u zemljama EU iznosi tek 3 do 8 godina [6]. Period povrata uloženi sredstava ovisi o nizu parametara kao što su karakteristike geomedija koji se iskorištava, karakteristike ugradnje geotermalnog sustava, te cijena energenata na tržištu.

U nastavku rada dat će se prikaz mogućih oblika iskorištavanja geotermalne energije s posebnim naglaskom na mogućnost primjene elemenata podzemnih konstrukcija kao dijelova geotermalnih sustava. Naime, plitko iskorištavanje geotermalne energije temelji se na iskorištavanju geotermalnog potencijala tla, stijena ili podzemnih voda koji su u izravnom doticaju s elementima podzemnih konstrukcija. Iako se takve konstrukcije u podzemlju primarno izvode da bi ispunile svoje osnovne zadatke (osiguranja nosivosti tla/stijene, sprečavanja urušavanja tla/stijene, osiguranja stabilnosti otvora u tlu/stijeni, itd.), iskorištavanjem elemenata podzemnih konstrukcija kao sastavnih dijelova geotermalnih sustava dobiva se još jedna dodatna dimenzija njihove koristi.

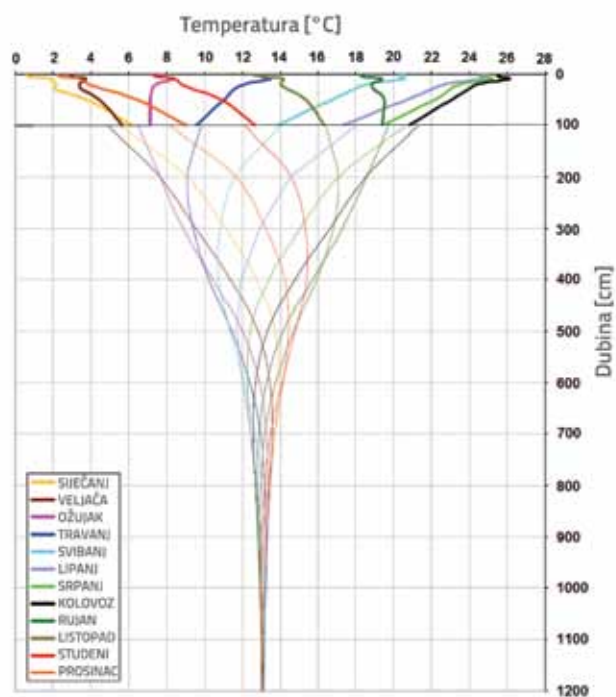
2. Iskorištavanje dubokih geotermalnih resursa

Iskorištavanje geotermalnih resursa na dubinama većim od 400 m temelji se na izvedbi izrazito dubokih bušotina. Ideja iskorištavanja geotermalne energije Zemlje u svojim se počecima temeljila upravo na potencijalu dubokih geotermalnih resursa visokih temperatura. Duboki geotermalni resursi dijele se na hidrogeotermalna ležišta i vruće suhe stijene (HDR) [7]. Upravo se u vrućim suhim stijenama, koje se nalaze na dubinama većim od 1500 m i koje karakterizira niski stupanj propusnosti i niska poroznost, nalazi većina dubokih geotermalnih resursa u obliku topline pohranjene u stijenama. Duboki resursi geotermalne energije mogu biti vrlo efikasni u procesu proizvodnje električne energije, kao i za grijanje objekata. Za proizvodnju električne energije se obično zahtijevaju geotermalni izvori s temperaturom većom od 100 °C. U iskorištavanju dubokih geotermalnih resursa, ključnu ulogu ima geotermalni gradijent lokacije kojim se definira porast temperature prema određenoj dubini, obično dubini od 100 m [8], a prosječni geotermalni gradijent na svjetskoj razini iznosi 3°C/100m. Iskorištavanje dubokih i plitkih geotermalnih resursa se uvelike razlikuje, kako po tehnologiji tako i po različitosti tržišta. Kako je za podzemno inženjerstvo od većeg značaja iskorištavanje plitkih geotermalnih resursa, tako će se ono detaljnije opisati u nastavku rada.

3. Iskorištavanje plitkih geotermalnih resursa

Sustavi za iskorištavanje plitkih geotermalnih resursa podrazumijevaju iskorištavanje geotermalnog potencijala na dubinama manjim od 400 m. Takvi se sustavi najčešće

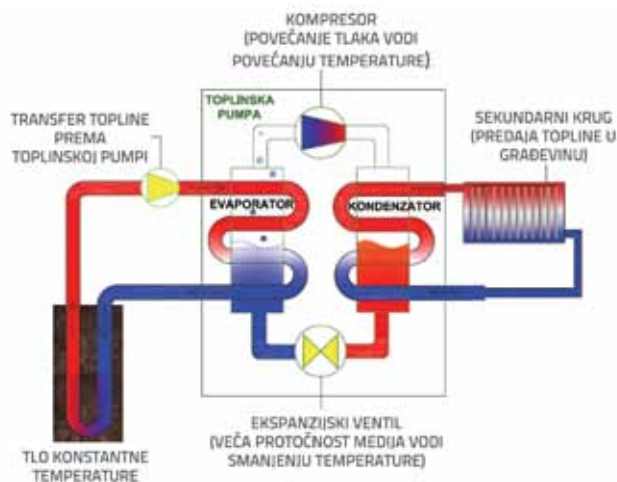
koriste za grijanje i hlađenje objekata, a kako se ne temelje na iskorištavanju potencijala geotermalnih izvora visokih temperatura kao što je slučaj sa sustavima za duboko iskorištavanje, nisu efikasni u procesu proizvodnje električne energije. Sustavi za iskorištavanje plitkih geotermalnih resursa temelje se na principu da je temperatura tla/stijene i podzemne vode na određenoj dubini konstantna tijekom cijele godine. Naime, površinski dio se nalazi pod direktnim utjecajem vanjskih atmosferskih prilika, a takav utjecaj opada s povećanjem dubine, sve do dubine gdje je temperatura konstantna. Na slici 9. je dan prikaz mjerenih srednjih mjesečnih temperatura tla do 100 cm, te izračunatih vrijednosti prigušivanja temperature tla u zavisnosti o promjeni dubine upotrebom sinusne funkcije za lokaciju Zagreb - Maksimir, prema Kureviji [9]. Iz slike je vidljivo da na predmetnoj lokaciji na dubini od cca 11 m, temperatura tla tijekom godine iznosi oko 13°C.



Slika 2. Krivulje promjene temperature po dubini na području grada Zagreba [9]

Da bi se u potpunosti shvatio princip funkcioniranja različitih tipova sustava za iskorištavanje plitkih geotermalnih resursa, potrebno je pojasniti pojam geotermalne dizalice topline koja čini središnji dio svakog geotermalnog sustava. U nastavku će se prikazati proces njezinog rada na primjeru grijanja objekta. Geotermalna dizalica topline, slika 3., predstavlja sustav koji se temelji na lijevom (obrnutom) Carnotovom ciklusu, tj. na termodinamičkom kružnom ciklusu čija je zadaća pretvaranje rada u toplinu. Da bi se kružni tok mogao ostvariti, nužno je da sustav sadrži radni fluid koji služi za transfer topline. Geotermalna dizalica topline, ovisno o načinu iskorištavanja

geotermalne energije, kao radni fluid koristi ili vodu ili antifriz (glikol) pomiješan s vodom. Protokolom iz Montreala (1987.) i njegovim revizijama iz Londona (1990.) i Kopenhagena (1992.), u cilju sprečavanja negativnog utjecaja na okoliš, zabranjena je upotreba freona ili drugih halogeniranih ugljikovodika [10].



Slika 3. Princip rada geotermalne dizalice topline

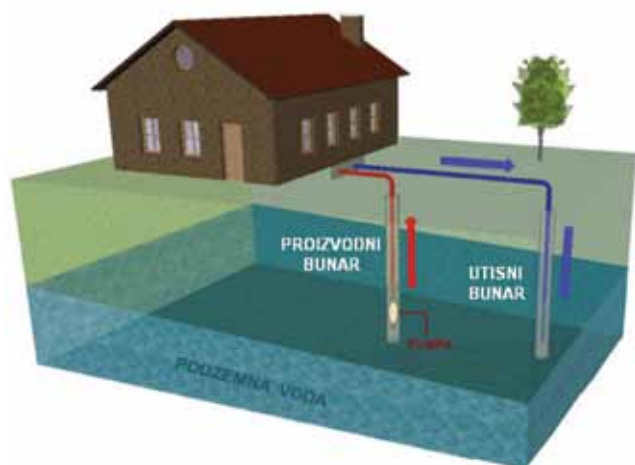
Osnovne komponente dizalice topline su isparivač, kompresor, kondenzator i ekspanzijski ventil. U isparivaču se radnom fluidu predaje toplinska energija tla, te zatim kompresor, povećanjem tlaka, podiže temperaturu radnog fluida na višu energetska razinu. Radni fluid zatim dolazi do kondenzatora, gdje predaje toplinu koja se koristi za zagrijavanje objekta. Nakon predaje topline radni fluid dolazi do ekspanzijskog ventila koji označava prijelaz iz cijevi manjega poprečnog presjeka u cijev većega poprečnog presjeka, gdje radnom fluidu pada tlak, a time i temperatura, sve iz razloga kako bi isparivač mogao iznova primiti toplinsku energiju tla. Učinkovitost dizalice topline najčešće se izražava koeficijentom učinkovitosti COP (engl. *Coefficient of Performance*) koji se određuje kao odnos izlazne snage dizalice i električne energije potrebne za rad dizalice. Veća vrijednost COP podrazumijeva veću učinkovitost dizalice topline. Međutim, bolji indikator za određivanje učinkovitosti cijelog sustava (ne samo dizalice topline, već i drugih elemenata sustava) je faktor sezonskog učinka SPF (engl. *Seasonal Performance Factor*) koji u odnos stavlja ukupno proizvedenu korisnu snagu sustava naspram ukupno utrošene energije za rad cijelog sustava. Ovaj faktor daje točnije rezultate pogonskih troškova kroz cijelu godinu. Pohranjivanjem "viška topline" u ljetnom periodu i njezinim korištenjem u zimskom periodu, kao i pohranjivanjem "viška hladnoće" u zimskom periodu i njezinim korištenjem u ljetnom periodu, postiže se izrazito visoka razina efikasnosti geotermalnih sustava. Geotermalna dizalica topline povezana je s ostalim dijelovima geotermalnog sustava, a ti se dijelovi razlikuju ovisno o načinu iskorištavanja plitkih geotermalnih resursa.

Sustavi za iskorištavanje plitkih geotermalnih resursa dijele se na otvorene i zatvorene. Neki plitki geotermalni sustavi se međutim ne mogu strogo svrstati u otvorene ili u zatvorene,

gdje najbolji primjer predstavljaju sustavi za iskorištavanje podzemnih voda akumuliranih u napuštenim rudnicima [11, 12, 13].

3.1. Otvoreni geotermalni sustavi

U otvorenim sustavima je prijenosnik topline podzemna voda koja predstavlja medij za transfer topline. Treba naglasiti da se u ovom slučaju ne radi o vodi čija je temperatura na razini voda geotermalnih izvora, već se ovakvi sustavi temelje na izravnom crpljenju vode iz podzemnih vodonosnika pomoću proizvodnog bunara. Podzemna voda se crpi iz vodonosnika i dovodi do dizalice topline gdje se toplina pridobiva, te se zatim voda ispušta u vodonosnik pomoću utisnog bunara, čime se izbjegava stalni kružni tok iste količine radnog fluida kao kod zatvorenih sustava. U slučaju hlađenja, voda kojoj je predana toplina ispušta se u vodonosnik. Otvoreni geotermalni sustav s proizvodnim i utisnim bunarom, koji trebaju biti na što je moguće većem razmaku, prikazan je na slici 4.



Slika 4. Otvoreni geotermalni sustav za iskorištavanje plitkih geotermalnih resursa

Osnovni zahtjevi koji se postavljaju za efikasno i funkcionalno iskorištavanje su u dovoljnoj propusnosti naslaga, kao i u zadovoljavajućoj kemijskoj kvaliteti podzemne vode [14]. Naime, problem kod ovakvih sustava nastaje zbog začepjenja nastalog kao rezultat taloženja otopljenih minerala uslijed temperaturnih promjena, te je stoga značajno da voda ima što manji sadržaj željeza. Osim izvedbe upojnog bunara, moguće je upuštanje vode u površinske vode (rijeka, jezera, itd.).

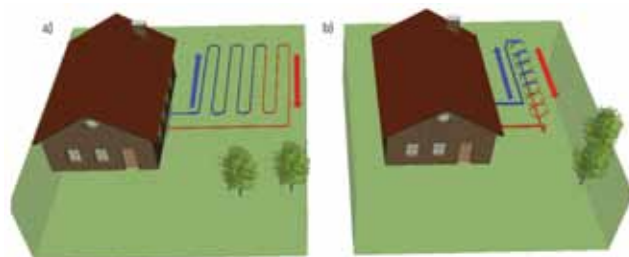
3.2. Zatvoreni geotermalni sustavi

Zatvoreni sustavi za iskorištavanje plitkih geotermalnih resursa temelje se na iskorištavanju toplinskog potencijala naslaga. Važnu ulogu u ovakvom obliku iskorištavanja geotermalne energije imaju cijevne instalacije povezane s geotermalnom dizalicom topline. Cijevne instalacije, ispunjene uvijek istom

količinom radnog fluida, najčešće se sastoje od fleksibilnog i trajnog polietilena ili od polibutena. Uloga im je u provođenju radnog fluida kroz tlo ili stijenu čime se odvija potreban transfer topline. Upravo način ugradnje cijevi uvjetuje podjelu zatvorenih sustava na horizontalne i vertikalne.

Zatvoreni horizontalni geotermalni sustavi

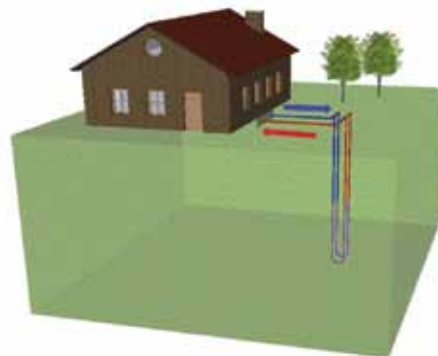
Horizontalni sustavi podrazumijevaju smještanje cijevi u dugačke rovove koji su dublji od granice smržavanja tla. Neke od mogućih varijanta postavljanja cijevi uključuju plošno postavljanje cijevi, slika 5a, ili postavljanje cijevi u spiralnom obliku, slika 5b. Nakon postavljanja cijevi, rovovi se zatrpavaju. Ovakvi se sustavi temelje na činjenici da se radnom fluidu u cijevima predaje toplina tla nastala isključivo kao rezultat sunčane radijacije prema površini tla. S obzirom na to da su cijevne instalacije kod ovakvih sustava relativno plitko postavljene, ovakvi sustavi su neefikasni u područjima s ekstremnim klimatskim uvjetima, gdje prednost imaju zatvoreni vertikalni sustavi.



Slika 5. Zatvoreni horizontalni geotermalni sustavi: a) plošno postavljanje cijevi; b) postavljanje cijevi u spiralu

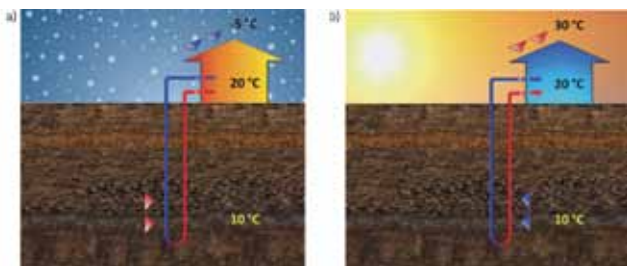
Zatvoreni vertikalni geotermalni sustavi

Osim veće efikasnosti u odnosu na horizontalne sustave iz aspekta instalacije u područjima s ekstremnim temperaturama, zatvoreni sustavi su pogodni i kada je područje za instalaciju geotermalnih cijevi ograničeno ili kada se želi iskoristiti geotermalni potencijal stijena u kojima je teško obavljati iskop za horizontalnu ugradnju cijevi. Kod zatvorenih vertikalnih sustava, slika 6., cijevi se postavljaju u vertikalnu bušotinu standardnog promjera 150 mm i povezane su s geotermalnom dizalicom topline.



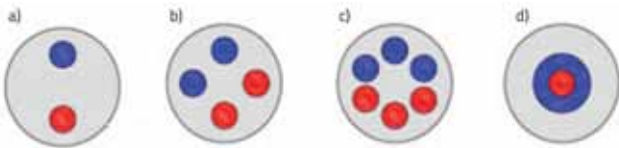
Slika 6. Zatvoreni vertikalni geotermalni sustav

Konstantna temperatura tla omogućava grijanje objekata na površini u zimskom periodu, slika 7.a, te hlađenje objekta na površini u ljetnom periodu, slika 7.b.



Slika 7. Zatvoreni vertikalni sustav: a) grijanje u zimskom periodu; b) hlađenje u ljetnom periodu

Cijevi ispunjene radnim fluidom mogu imati različit raspored unutar bušotine, kako je prikazano na slici 8. Najčešći raspored cijevi podrazumijeva korištenje tzv. "U cijevi", koje su naziv dobile po obilježju da su na dnu bušotine zaokrenute za 180°.



Slika 8. Raspored cijevi unutar bušotine: a) jednostruka U cijev; b) dvostruka U cijev; c) trostruka U cijev; d) koaksijalna cijev

Prostor između cijevi i stijenci bušotine ispunjava se injekcijskom smjesom u cilju osiguranja učinkovitog transfera topline između fluida u cijevima i tla / stijene. Osim toga, ispunjavanje bušotine je važno iz razloga sprečavanja vertikalnog toka voda s površine i potencijalnog onečišćavanja podzemlja. Važnu ulogu u prijenosu topline ima toplinski otpor bušotine koji ovisi o rasporedu cijevi unutar bušotine kao i o termalnim svojstvima injekcijske smjese bušotine. Injekcijske smjese su najčešće ili na bazi cementa ili na bazi bentonita, a provedena su i istraživanja o mogućnosti injektiranja bušotine smjesom na bazi letećeg pepela, nusprodukta industrijskog izgaranja ugljena [15]. Osim toga, moguća je ispunjena geotermalne bušotine kvarcnim pijeskom.

4. Uloga elemenata podzemnih konstrukcija kao dijelova geotermalnih sustava

Brojna znanstvena istraživanja, a posljedično i implementacije u praksi, temelje se na primjeni elemenata podzemnih konstrukcija u procesu iskorištavanja geotermalne energije. Temeljne konstrukcije, potporne konstrukcije, tunnelske betonske podgrade, sidra i geosintetici su korišteni kao dijelovi geotermalnog sustava preko kojih se u zimskom periodu toplina prenosi iz tla i stijena na površinu ili u obrnutom smjeru u ljetnom periodu. Navedeno se postiže instalacijom geotermalnih cijevi, koje u sebi sadrže fluid potreban za

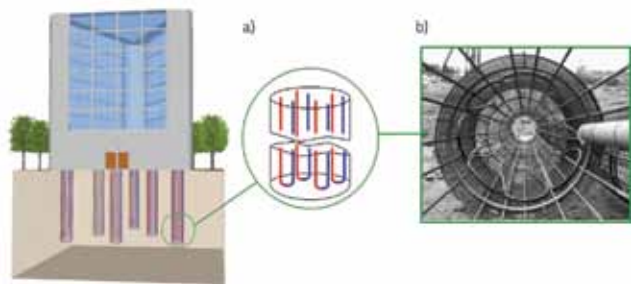
razmjenu topline, u elemente podzemnih konstrukcija. Rezultat je da se takvi elementi, uz svoju osnovnu ulogu, koriste i kao izmjenjivači topline u geotermalnim sustavima. Države koje se mogu smatrati začetnicima u ovom području su Austrija, Njemačka i Švicarska koje su sa svojim aktivnostima počele prije 30-ak godina. U nastavku će se dati prikaz mogućnosti korištenja elemenata podzemnih konstrukcija kao dijela geotermalnih sustava, kao i prikaz karakteristika tla, stijena i podzemnih voda značajnih pri primjeni podzemnih konstrukcija u iskorištavanju geotermalne energije.

4.1. Podjela podzemnih konstrukcija prema iskorištavanju geotermalne energije

Podzemne konstrukcije koje čine dio geotermalnih sustava za iskorištavanje geotermalne energije se nazivaju energetske konstrukcije, pa stoga razlikujemo energetske temeljne konstrukcije, energetske potporne konstrukcije i energetske tunele.

Energetske temeljne konstrukcije

Temeljne su konstrukcije najčešće izvođene među svim energetske podzemnim konstrukcijama. U ovu se skupinu ubrajaju piloti različitih poprečnih presjeka, te temeljne ploče. Primarna zadaća ovih elemenata je u ispunjavanju svih sigurnosnih i funkcionalnih aspekata određenog objekta, kao što su ograničavanje slijeganja i sprečavanje sloma temeljnog tla. Piloti, neovisno o načinu njihove ugradnje (bušeni, zabijeni ili uvrtni), mogu biti dio geotermalnog sustava, te se tada nazivaju energetske pilotima. Iz aspekta iskorištavanja geotermalne energije, razlika između energetske pilota je u vremenu ugradnje cijevi. Kod zabijanih predgotovljenih pilota cijevi su ugrađene u tvornici, dok se kod pilota izvedenih u tlu cijevi vežu za armaturne koševе na gradilištu. Cijevi se ugrađuju do projektom određene duljine, te se na dnu pilota zaokrenu za 180°, formirajući oblik slova U, slika 9. Cijevi bi trebale biti pravilno raspoređene po opsegu pilota da bi se optimizirao transfer topline između cijevi i tla. Vežanje cijevi za armaturne koševе pridonosi povećanoj efikasnosti geotermalnog sustava iz razloga jer cijevi u tom slučaju imaju veći radijus zaokreta na dnu, što rezultira s većim protokom radnog fluida nego što je slučaj s instaliranjem cijevi u standardne geotermalne bušotine. Nakon instalacije cijevi i njihovog pozicioniranja, potrebno je provesti ispitivanje njihova integriteta upuštanjem fluida pod tlakom. Ovo je značajno kod bušenih pilota s obzirom na to da, nakon zapunjavanja bušotine betonom u kojoj je već instaliran armaturni koš s cijevima, može doći do oštećenja cijevi. Problem oštećenja cijevi je još više izražen kod uvrtnih pilota kod kojih se armaturni koš s cijevima uranja u betonom zapunjenu bušotinu. Da bi se prevladalo narušavanje integriteta cijevi, preporučuje se formiranje što krućeg armaturnog koša gdje se spiralna armatura zavaruje za vertikalne šipke, umjesto da se povezuje s njima žicom [10].



Slika 9. Energetski piloti: a) shema ugradnje cijevi u pilote; b) prikaz geotermalnih cijevi pričvršćenih za armaturu pilota [10]

Na površini se sve cijevi iz pilota spajaju u priključne blokove koji su međusobno povezani sustavom horizontalnih cijevi. Takve horizontalne cijevi se najčešće nalaze unutar buduće temeljne ploče. Brojna su istraživanja i praktične primjene koja se zasnivaju na mogućnosti primjene temeljnih sustava u procesu iskorištavanja geotermalne energije [10, 16-20].

Energetske potporne konstrukcije

Potporne konstrukcije kao što su AB dijafragme, pilotske zagatne stijene, pa čak i podrumski zidovi objekata, imaju primarnu ulogu u bočnom pridržavanju tla. Mogu se izvoditi od prefabriciranih elemenata ili izvedbom u tlu. Efikasno se, mogu iskoristiti i kao dio geotermalnih sustava, gdje se cijevi vežu za armaturu potpornih elemenata [21]. Tada ih možemo nazivati energetskim potpornim konstrukcijama, a primjer takve konstrukcije je prikazan na slici 10. za AB dijafragmu koja služi kao zaštita pri dubokom iskopu. Katzenbach et al. [22] su prikazali mogućnost primjene pilotske potporne stijene u procesu iskorištavanja geotermalne energije za potrebe grijanja objekta u Frankfurtu, gdje je ujedno iskorišten i temeljni sustav za istu svrhu.

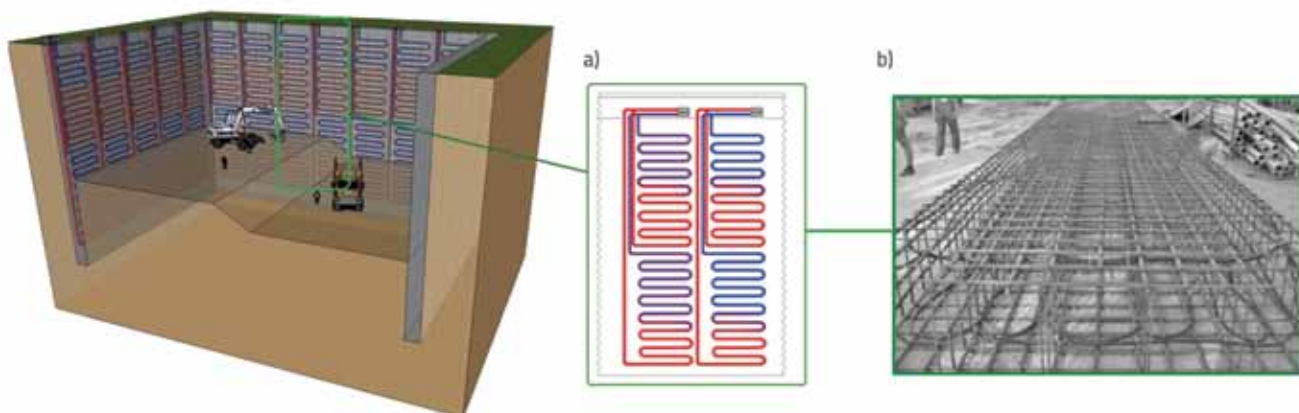
Energetski tuneli

Iskorištavanje tunela kao dijela geotermalnih sustava temelji se na instaliranju geotermalnih cijevi unutar elemenata

podgradnog sustava. Toplina koja se koristi za zagrijavanje objekata na površini nije rezultat samo geotermalne energije tla, već se dodatno generira od prometa unutar tunelske cijevi. Osim iskorištavanja topline za zagrijavanje objekata na površini, ovo ima značajan pozitivan utjecaj na hlađenje samog tunela. Zbog činjenice da se radi o linijskim građevinama koje mogu imati duljinu i do nekoliko desetaka kilometara, veliki volumen tla ili stijene može sudjelovati u procesu iskorištavanja geotermalne energije. Značajna stavka kod iskorištavanja tunelskih elemenata je i veličina nadsloja, tj. dubina na kojoj se tunel nalazi. Tuneli s većim nadslojem nalaze se u okruženjima s višim temperaturama, što je posljedica geotermalnog gradijenta. Postoji više tehnologija izvođenja tunela, te stoga i više vrsta primjena podgradnih elemenata u procesu iskorištavanja geotermalne energije.

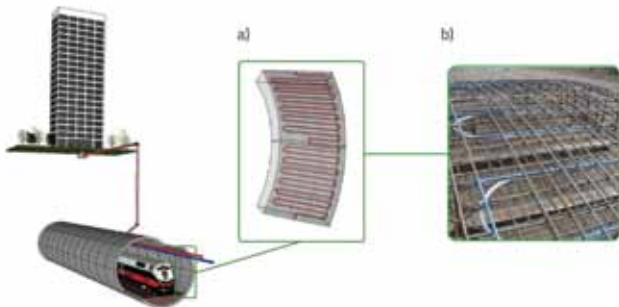
Prva tehnologija izvedbe tunela obuhvaća tzv. "cut and cover" metodu. Ova se metoda bazira na iskopu tla na dionici tunela, izgradnji tunelskih elemenata, te naknadnom zatrpavanju iskopenim tлом. Formirana tunelska konstrukcija se sastoji od vertikalnih i horizontalnih elemenata. Vertikalne elemente čine AB zidovi ili pilotske stijene, dok su horizontalni elementi AB ploče. Stoga, ugradnja cijevi za iskorištavanje geotermalnih resursa podrazumijeva već uhodani postupak ugradnje cijevi u temeljne sustave ili potporne konstrukcije [23].

Druga tehnologija izvedbe tunela je korištenjem strojeva za iskop u punom profilu, tzv. krtice, poznatije pod nazivom TBM (engl. *Tunnel Boring Machine*). Iskop se obavlja pomoću rotirajuće rezne glave koja se nalazi na čelu krtice, a nakon iskopa određenog segmenta, ugrađuje se podgradni segment u obliku prefabriciranih AB prstena. Upravo se prefabricirani prstenovi mogu iskoristiti kao dio geotermalnog sustava. Postavljanjem cijevi unutar prstenastih segmenata i njihovim povezivanjem s armaturom prstena, ispunjavanjem radnim fluidom te stavljanjem u funkciju, može se iskoristiti toplina tla ili generirana toplina od prometa unutar tunela za zagrijavanje objekata na površini. Pričvršćavanje cijevi za armaturu prstena obavlja se u tvornici gdje se oplata prstena



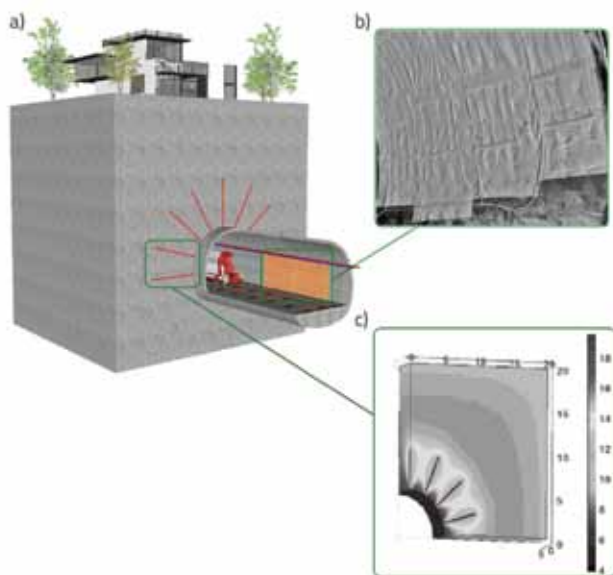
Slika 10. Energetska AB dijafragma: a) shema ugradnje cijevi u dijafragmu; b) prikaz geotermalnih cijevi pričvršćenih za armaturu dijafragme [10]

zatim ispuni betonskom mješavinom. Način na koji su cijevi instalirane u prefabriciranim prstenima može se vidjeti na slici 11. Ovakav su način iskorištavanja geotermalne energije prikazali Frodl et al. [24] na primjeru tunela Jenbach u Austriji.



Slika 11. Energetski tunel izveden TBM metodom: a) shema ugradnje cijevi u tunelske prstenove; b) prikaz geotermalnih cijevi pričvršćenih za armaturu tunelskih prstenova [24]

Treća tehnologija izvedbe tunela podrazumijeva iskop i instalaciju tunelskoga podgradnog sustava Novom austrijskom tunelskom metodom (NATM) ili Norveškom metodom tunelogradnje (NTM). Nakon iskopa određenog segmenta, obavlja se ugradnja elemenata podgradnog sustava koji uključuje sidra, betonsku podgradu, čelične lukove, itd. Primarna uloga ovih elemenata je u osiguranju tunelskog otvora od urušavanja stijenske mase. Navedeni se elementi efikasno mogu iskoristiti i kao dio geotermalnog sustava, gdje je instalacija cijevi moguća unutar sekundarne AB obloge tunela. Nadalje, zanimljivo istraživanje o iskorištavanju tunelskih sidara, nazvanih energetskim sidrima, proveo je Oberhauser [25].



Slika 12. Energetski tunel izveden NATM metodom: a) shema tunela s podgradnim elementima; b) prikaz geotermalnih cijevi pričvršćenih za geotekstil [26]; c) prikaz numeričkog modela energetskih sidara [26]

Primjer korištenja geotekstila, materijala koji nije standardan pri izvođenju tunela, prikazali su Adam et al. [26], gdje su se cijevi pričvrstile za geotekstil položen između primarne podgrade i sekundarne obloge. Na slici 12. je prikazan tunel izveden NATM metodom s naznačenim položajem cijevi pričvršćenih za geotekstil, kao i numeričkim modelom ispitivanja termalnih karakteristika energetskih sidara. Zanimljiv primjer su dali Wilhelm et al. [27] gdje je prikazan sustav temeljen na ekspanziji geotermalne energije kroz iskorištenje dreniranih tunelskih voda. Naime, podzemne vode koje se dreniraju u tunelski otvor nakon njegova iskopa mogu se iskoristiti za grijanje zgrada, postrojenja i poljoprivrednih objekata na površini. Također je aktualna i ideja mogućeg korištenja pariškog metroa i njegove konstantne godišnje temperature od 14 do 20 °C koja je rezultat prometa, u grijanju zgrada siromašne četvrti [28]. Zbog svoje duljine, metro ima veliku količinu otpadne topline koja bi se dovođila pomoću izmjenjivača topline do sustava za grijanje u zgradama.

4.2. Bitni parametri za projektiranje energetskih podzemnih konstrukcija

Kada govorimo o iskorištavanju elemenata podzemnih konstrukcija u procesu geotermalne energije, određeni geomediji imaju povoljnije karakteristike od drugih. Prema Brandlu [6], za generiranje 1 kW topline potrebno je na raspolaganju imati oko 20 m² površine betonskih podzemnih konstrukcija ako se nalaze u saturiranom tlu ili čak 50 m² površine betonskih podzemnih konstrukcija ako se želi iskoristiti geotermalni potencijal suhih pijesaka. Kao što je vidljivo, saturacija ima značajnu ulogu u transferu energije. Međutim, ovisno o vrsti iskorištavanja geotermalne energije, mijenjaju se optimalni uvjeti tla i podzemnih voda. Ako se geotermalni sustav koristi samo za grijanje objekata, ili samo za hlađenje objekata, od većeg je značaja imati na raspolaganju tlo s većom vodopropusnosti i podzemnu vodu s većim hidrauličkim gradijentom. Veća vodopropusnost i veći hidraulički gradijent podrazumijevaju veću brzinu kretanja vode u podzemlju. U slučaju da se geotermalni sustav koristi i za grijanje i za hlađenje, tada je od značaja imati na raspolaganju tlo s manjom vodopropusnošću i manjim hidrauličkim gradijentom. U tom slučaju tlo služi kao skladište topline. Sam prijenos topline u tlu je vrlo kompleksan i sastoji se od niza mehanizama koji uključuju dominantno kondukciju, a zatim i radijaciju, konvekciju, kao i procese vaporizacije i kondenzacije, proces izmjene iona, i procese smrzavanja i odmrzavanja tla. Brandl [10] je dao cijeli niz karakteristika geomedija koji imaju utjecaj na projektiranje energetskih podzemnih konstrukcija. Od **geotehničkih karakteristika**, uz već spomenutu saturiranost i vodopropusnost, značajan utjecaj na transfer topline ima gustoća geomedija i koeficijent poroznosti.

U slučaju potrebe da zagrijavanje nekog objekta zahtijeva pridobivanje većih količina topline, vrlo je važno u obzir uzeti potencijal smrzavanja i odmrzavanja tla. Primjerice, ako temeljne konstrukcije sudjeluju u procesu iskorištavanja geotermalne energije, varijacije temperature tla koje nastaju kao posljedica toplinskog transfera neće imati negativnog utjecaja, u smislu nosivosti temeljnih konstrukcija, sve dok je temperatura tla iznad 2°C. Međutim, spuštanje temperature na 0°C može rezultirati smrzavanjem temeljnog tla, te može doći do gubitka nosivosti. Također je bitno u obzir uzeti potencijalne bujajuće i skupljajuće ponašanje tala koja se namjeravaju iskoristiti kao medij za prijenos topline. Naravno, za dimenzioniranje energetskih temeljnih sustava, bitno je uzeti u obzir i posmične parametre tla kao i parametre stišljivosti, sve u cilju ispunjenja njihovih osnovnih zadataka u ograničavanju slijeganja i osiguranju nosivosti. Nadalje, bitan utjecaj na transfer topline imaju i **termalne karakteristike** geomedija. Toplinska vodljivost (λ) i specifični toplinski kapacitet (c) predstavljaju najvažnije termalne karakteristike geomedija, a one se određuju istražnim radovima čiju osnovu čini TRT (engl. *Thermal Response Test*) ispitivanje, koji predstavlja terensko određivanje navedenih parametara, ili mjerenjem navedenih parametara na uzorcima. Toplinska vodljivost ($W/m^{\circ}K$) je pokazatelj prijelaza topline od viših ka nižim izvorima topline, te teži prema uravnotežavanju temperature, a specifični toplinski kapacitet ($J/kg^{\circ}K$) definira se kao količina energije koja je potrebna da se masi od 1 kg poveća temperatura za 1°C, pri konstantnom tlaku. Ovi parametri, zajedno s parametrom toplinske difuznosti "a" (m^2/s) i specifičnom gustoćom tla ili stijene ρ (kg/m^3), čine osnovnu jednadžbu koja opisuje termička svojstva geomedija i fluida:

$$\lambda = a \cdot c \cdot \rho \quad (1)$$

Hidrogeološke karakteristike geomedija su također od bitnog značaja za transfer topline, posebno dubina i sezonske varijacije razine podzemnih voda, kao njihov smjer tečenja i brzina protjecanja kroz podzemlje. Osim navedenih, bitnu ulogu imaju i **mineraloške i geokemijske karakteristike** geomedija. Sve je navedeno vezano isključivo za karakteristike tla, stijene i podzemne vode, kao i uz pojave koje se u njima odvijaju. Međutim, postavlja se pitanje značajnih **karakteristika podzemnih elemenata** koji sudjeluju kao dio geotermalnih sustava za prijenos energije. Značajne karakteristike uključuju dimenzije elemenata, razmak između elemenata, način njihove ugradnje, kao i karakteristike materijala od kojih su elementi građeni. Elementi podzemnih konstrukcija su u pravilu građeni od betona ili armiranog betona. Toplinska vodljivost betona ($\lambda=1.6 W/m^{\circ}K$ za $v/c=0.65$ i udio cementa od $300 kg/m^3$) osigurava efikasniji transfer topline nego što je to slučaj sa standardnom bentonitnom ispunom geotermalnih bušotina ($\lambda=0.7 W/m^{\circ}K$ pri $10^{\circ}C$).

5. Geotermalna energija u Hrvatskoj

Hrvatska iskustva u iskorištavanju geotermalne energije većinom su temeljena na iskorištavanju dubokih geotermalnih resursa. Posebice je takav oblik iskorištavanja atraktivan u panonskom bazenu gdje je geotermalni gradijent iznad svjetskog prosjeka, dok dinarski dio Hrvatske, na koji otpada više od 50% kopnenog dijela [29, 30], ima geotermalni gradijent niži od svjetskog prosjeka [31], slika 13.

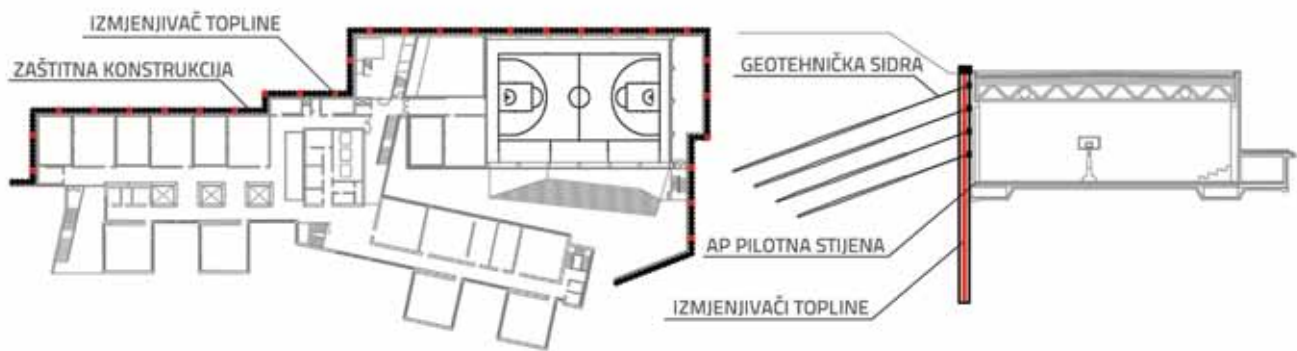


Slika 13. Geotermalni gradijent Hrvatske

Ukupno u Hrvatskoj postoji 28 geotermalnih rezervoara, od kojih se njih 18 iskorištava, pri čemu je ukupni postotak iskorištavanja dostupne energije vrlo nizak [31]. Nisko temperature termalne vode se većim dijelom koriste u medicinske i turističke svrhe, te u manjem dijelu za grijanje objekata. U Hrvatskoj postoji 5 geotermalnih polja s temperaturom većom od 100°C koja se nalaze u panonskom bazenu. Proizvodnja električne energije iz dubokih geotermalnih izvora još uvijek nije zastupljena u Hrvatskoj, ali plan je da se do 2020. godine u Hrvatskoj izgrade čak 3 geotermalne elektrane.

Kada je riječ o iskorištavanju plitkih geotermalnih resursa, najčešće se koriste zatvoreni vertikalni geotermalni sustavi, te se dobivena energija iskorištava za potrebe grijanja i/ili hlađenja stambeno-poslovnih objekata. U Hrvatskoj, međutim, još uvijek nije izvedena niti jedna podzemna konstrukcija čiji bi elementi služili kao izmjenjivači topline u geotermalnim sustavima. Svjetska znanja i iskustva o mogućnostima primjene podzemnih konstrukcija u iskorištavanju geotermalnog potencijala još uvijek nisu implementirani u Hrvatskoj. Osnivanje Centra za istraživanje plitkih geotermalnih resursa (engl. *Center for Shallow Geothermal Research*) 2010. godine, u sklopu Zavoda za geotehniku Građevinskog fakulteta u Zagrebu, dalo je dodatni impuls povezivanju geotermalne energije s podzemnim inženjerstvom.

Prvi pilot projekt iskorištavanja geotermalne energije uz pomoć podzemnih konstrukcija je u fazi idejnog rješenja. U sklopu rekonstrukcije i dogradnje OŠ Ksaver Šandor Gjalski u Zagrebu planirana je izvedba zaštitne potporne konstrukcije, duljine oko 150 m. Potporna je konstrukcija projektirana



Slika 14. Tlocrtna dispozicija izmjenjivača topline, te karakteristični presjek zaštitne konstrukcije na lokaciji OŠ Ksaver Šandor Gjalski u Zagrebu [32]

kao AB pilotna stijena, visine 20 m, dodatno osigurana geotehničkim sidrima. Grad Zagreb je od Građevinskog fakulteta u Zagrebu zatražio izradu idejnog rješenja [32] iskorištavanja geotermalne energije koristeći potpurnu konstrukciju. Dobivena energija bi se iskoristila za grijanje športske dvorane i pripadnih svlačionica korištenjem klasičnog podnog sustava. U tom smislu, uvažavajući međunarodno prihvaćene norme (u prvom redu HRN EN 15450:2008), te na osnovi dosadašnjih iskustava na iskorištavanju geotermalne energije u Republici Hrvatskoj, projektiran je geotermalni sustav na idejnoj razini. Sustav je konceptualno identičan zatvorenom vertikalnom sustavu (bušotinski izmjenjivači topline), dok konstrukcijski spada u energetske potporne sustave. Projektno rješenje je vrlo jednostavno, u AB pilote se na rasteru od 5 m, odnosno u svaki šesti AB pilot, ugrađuju izmjenjivači topline (slika 14.). Prema dosadašnjim iskustvima izvođača bušotinskih izmjenjivača topline (usmena razmjena podataka) na području Zagrebačke županije, moguće je dobiti cca. 50-60 W specifičnog iskorištenja energije po m² bušotine, što bi u konačnici trebalo rezultirati izlazom od ukupno 45-55 kW snage. S obzirom da energetske potrebe za grijanjem športske dvorane i pripadnih svlačionica iznose cca. 150 kW, bit će potrebno izvesti dvojni sustav grijanja (podno grijanje + ventilokonvektori). Vrijedi napomenuti da hlađenje objekta bušotinskim izmjenjivačima topline nije razmatrano (što bi dugoročno sigurno smanjilo toplinski kapacitet temeljnog tla zbog pothlađivanja), jer nije traženo projektним zadatkom. Osim ovog rješenja predložena je i druga varijanta geotermalnog sustava, gdje bi se ugradili izmjenjivači topline pojedinačne duljine 100 m, čime bi se izbjeglo korištenje dvojnog sustava grijanja. Prvih 20 m izmjenjivači topline bi bili ugrađeni u AB pilotima, a nakon toga bi se izveli kao klasični bušotinski izmjenjivači topline. Ovakav mješovit geotermalni sustav bi predstavljao jedinstven način iskorištavanja

geotermalne energije. Ovim rješenjem moguće je dobiti 185-225 kW izlazne snage, čime bi se više nego zadovoljile energetske potrebe športske dvorane i svlačionica OŠ Ksaver Šandor Gjalski.

6. Zaključak

Geotermalna energija predstavlja obnovljiv izvor energije čijim se iskorištavanjem dobivaju brojne prednosti u odnosu na iskorištavanje konvencionalnih izvora energije. Za praksu podzemnog inženjerstva je od najvećeg interesa iskorištavanje plitkih geotermalnih resursa, iz razloga jer se upravo u tom dijelu mogu efikasno implementirati podzemne konstrukcije kao dio geotermalnog sustava. Niz znanstvenih istraživanja na svjetskoj razini, ali i uspješno izvedenih projekata, uključuje primjenu temeljnih konstrukcija, potpornih konstrukcija i tunela kao izmjenjivača topline s tлом, stijenom ili podzemnom vodom. Pri projektiranju takvih konstrukcija nužno je uzeti u obzir sve parametre koji imaju utjecaj na njihovu osnovnu ulogu u osiguranju nosivosti i stabilnosti, ali i na njihovu moguću ulogu u transferu energije. Navedeno uključuje uzimanje u obzir geotehničkih, termalnih, hidrogeoloških, mineraloških i geokemijskih karakteristika geomedija, kao i dimenzije elemenata podzemnih konstrukcija, razmak između elemenata podzemnih konstrukcija, način njihove ugradnje, te karakteristike materijala od kojih su elementi podzemnih konstrukcija građeni. U Hrvatskoj još uvijek nije u znanosti i praksi implementirana upotreba takvih energetskih podzemnih konstrukcija. Prvi pilot projekt primjene podzemnih konstrukcija u Hrvatskoj, kao sastavnog dijela geotermalnih sustava, je u fazi idejnog rješenja. Projekt uključuje izvedbu pilotne potporne stijene koja bi ujedno služila i kao izmjenjivač topline, a sve u cilju osiguranja potreba za grijanjem športske dvorane i svlačionica OŠ Ksaver Šandor Gjalski u Zagrebu.

LITERATURA

- [1] Cataldi, R.: Review of historiographic aspects of geothermal energy in the Mediterranean and Mesoamerican areas prior to the Modern Age, *Geo-Heat Centre Quarterly Bulletin* 15 (1993) 1, 13-16
- [2] Haehnlein, S.; Bayer, P.; Blum P.: International legal status of the use of shallow geothermal energy, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14 (2010), 2611-2625
- [3] Maire, P.; Bluiner, P.; Parriaux, A.; Tacher, L.: Underground planning and optimisation of the underground resources combination looking for sustainable development in urban areas, *Workshop - Going Underground: Excavating the Subterranean City*, Manchester (2006), 15 p.
- [4] Fridleifsson, I.B.: Geothermal energy for the benefit of the people, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 5 (2001) 3, 299-312
- [5] Watzlaf, G.R.; Ackman, T.E.: Underground Mine Water for Heating and Cooling using Geothermal Heat Pump Systems, *Mine Water and the Environment* 25 (2006) 1, 1-14
- [6] Brandl, H.: Geothermal heating and cooling of buildings, *Zbornik 4. Šukljetovi dnevi, Portorož* (2003), 3-27
- [7] Rybach, L.; Bodmer, P.; Pavoni, N.; Mueller, St.: Siting criteria for heat extraction from hot dry rocks: application to Switzerland, *Pure Appl. Geophys.* 116 (1978), 1211-1224
- [8] Šestanović, S.: *Osnove geologije i petrografije* (2001) Građevinski fakultet Sveučilišta u Splitu
- [9] Kurevija, T.: Energetsko vrednovanje plitkih geotermalnih potencijala Republike Hrvatske, *Doktorski rad, Rudarsko – Geološko – Naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu* (2010), 183 p.
- [10] Brandl, H.: Energy foundations and other thermo-active ground structures, *Geotechnique* 56 (2006) 2, 81-122
- [11] Hall, A.; Scott, J.A.; Shang, H.: Geothermal energy recovery from underground mines, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15 (2011) 916-924
- [12] Raymond, J.; Therrien, R.; Hassani, F.: Overview of Geothermal Energy Resources in Québec (Canada) *Mining Environments, Proceedings of 10th International Mine Water Association Congress, Karlsbad* (2008), 99-110
- [13] Wieber, G.; Pohl, S.: Mine Water: A Source of Geothermal Energy – Examples from the Rhenish Massif, *Proceedings of 10th International Mine Water Association Congress, Karlsbad* (2008), 113-116
- [14] Sanner, B.: Shallow Geothermal Energy, *Geo-Heat Centre Quarterly Bulletin* 22 (2001) 2, 19-25
- [15] Allan, M.; Philippopoulos, A.: Performance Characteristics and Modelling of Cementitious Grouts for Geothermal Heat Pumps, *Proceedings World Geothermal Congress, Kyushu – Tohoku* (2000), 3355-3360
- [16] Brandl, H.: Energy piles for heating and cooling of buildings, *Proceedings of 7th Int. Conf. Exhib. Piling and Deep Foundations, Vienna* (1998), 341-346
- [17] Suckling, T. P.; Smith, P.: Environmentally friendly geothermal piles at Keble College, Oxford, UK, *Proceedings of 9th Int. Conf. Exhib. on Piling and Deep Foundation, Nice* (2002), 445-452
- [18] Laloui, L.; Moreni, M.; Vulliet, L.: Behavior of a dual-purpose pile as foundation and heat exchangers, *Can Geotech J* 40 (2003), 388-402
- [19] Hamada, Y.; Saitoh, H.; Nakamura, M.; Kubota, H.; Ochifuji, K.: Field performance of an energy pile system for space heating, *Energy and Buildings* 39 (2007) 5, 517-524
- [20] Gao, J.; Zhang, X.; Liu, J.; Li, K.; Yang, J.: Numerical and experimental assessment of thermal performance of vertical energy piles: An application, *Applied Energy* 85 (2008) 10, 901-910
- [21] Xia, C.; Sun, M.; Zhang, G.; Xiao, S.; Zou, Y.: Experimental study on geothermal heat exchangers buried in diaphragm walls, *Energy and Buildings* 52 (2012), 50-65
- [22] Katzenbach, R.; Clauss, F.; Waberseck, T.; Wagner, I.: Coupled Numerical Simulation of Geothermal Energy Systems, *Proceedings of 12th International Conference of IACMAG, Goa* (2008), 1170-1179
- [23] Unterberger, W.; Hofinger, H.; Grünstäudl, T.; Adam, A.; Markiewicz, R.: Utilization of Tunnels as Source of Ground Heat and Cooling – Practical Applications in Austria, *Proceedings of the ISRM International Symposium 3rd ARMS, Kyoto* (2004), 421-426
- [24] Frodl, S.; Franzius, J. N.; Bartl, T.: Design and construction of the tunnel geothermal system in Jenbach, *Geomechanics and Tunneling* 3 (2010) 5, 658-668
- [25] Oberhauser, A.: *Verfahrens und Komponentenentwicklung zur Planung von Tunnelthermie – Anglen*, *Doktorski rad, Vienna University of Technology* (2006)
- [26] Adam, D.; Markiewicz, R.: Energy from earth-coupled structures, foundations, tunnels and sewers, *Geotechnique* 59 (2009) 3, 229-236
- [27] Wilhelm, J.; Rybach, L.: The geothermal potential of Swiss Alpine tunnels, *Geothermics* 32 (2003) 4-6, 557-568
- [28] Vrančić, T.: Građevine u svijetu – Zgrada grijana tjelesnom toplinom, *Građevinar* 63 (2011) 12, 1133-1140
- [29] Kovačević, M.S.; Jurić-Kačunić, D.; Simović, R.: Određivanje modula deformacije karbonatnih stijena u hrvatskom kršu, *Građevinar* 63 (2011) 1, 35-41
- [30] Garašić M; Kovačević M.S.; Jurić-Kačunić D.: Investigation and remediation of the cavern in the vrata tunnel on the Zagreb – Rijeka highway (Croatia), *Acta carsologica* 39 (2010), 61-77
- [31] Jelić, K.; Kovačić, M.; Koščak-Kolin, S.: State of the Art of the Geothermal Resources in Croatia in the Year 2004, *Proceedings of World Geothermal Congress 2005, Antalya* (2005), pp. 9
- [32] Kovačević, M.S.: *Idejno rješenje: Geotermalni projekt*, *Građevinski fakultet IR-GTP-125-2012, ožujak 2012.*