

Izazovi projektiranja i izvedbe energetskih tunela

Mravunac, Ivona

Master's thesis / Diplomski rad

2024

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Civil Engineering / Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:237:725059>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-05**

Repository / Repozitorij:

[Repository of the Faculty of Civil Engineering,
University of Zagreb](#)





Sveučilište u Zagrebu

GRAĐEVINSKI FAKULTET

Ivona Mravunac

**IZAZOVI PROJEKTIRANJA I IZVEDBE
ENERGETSKIH TUNELA**

DIPLOMSKI RAD

Zagreb, 2024.



Sveučilište u Zagrebu

GRAĐEVINSKI FAKULTET

Ivona Mravunac

IZAZOVI PROJEKTIRANJA I IZVEDBE ENERGETSKIH TUNELA

DIPLOMSKI RAD

Mentor: izv. prof. dr. sc. Mario Bačić

Zagreb, 2024.



University of Zagreb

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

Ivona Mravunac

CHALLENGES OF DESIGN AND CONSTRUCTION OF THE ENERGY TUNNELS

MASTER THESIS

Supervisor: assoc. prof. Mario Bačić

Zagreb, 2024.



OBRAZAC 3

POTVRDA O POZITIVNOJ OCJENI PISANOG DIJELA DIPLOMSKOG RADA

Student/ica :

Ivona Mravunac	0082059500
(Ime i prezime)	(JMBAG)

zadovoljio/la je na pisanom dijelu diplomskog rada pod naslovom:

Izazovi projektiranja i izvedbe energetske tunela
(Naslov teme diplomskog rada na hrvatskom jeziku)

Challenges of design and construction of the energy tunnels
(Naslov teme diplomskog rada na engleskom jeziku)

i predlaže se provođenje daljnjeg postupka u skladu s Pravilnikom o završnom ispitu i diplomskom radu Sveučilišta u Zagrebu Građevinskog fakulteta.

Pisani dio diplomskog rada izrađen je u sklopu znanstvenog projekta: (upisati ako je primjenjivo)

-
(Naziv projekta, šifra projekta, voditelj projekta)

Pisani dio diplomskog rada izrađen je u sklopu stručne prakse na Fakultetu: (upisati ako je primjenjivo)

-
(Ime poslodavca, datum početka i kraja stručne prakse)

Datum:

18.09.2024

Mentor:

izv.prof.dr.sc. Mario Bačić

Potpis mentora:

Komentor:



OBRAZAC 5

IZJAVA O IZVORNOSTI RADA

Ja :

(Ime i prezime, JMBAG)

student/ica Sveučilišta u Zagrebu Građevinskog fakulteta ovim putem izjavljujem da je moj pisani dio diplomskog rada pod naslovom:

(Naslov teme diplomskog rada na hrvatskom jeziku)

izvorni rezultat mojega rada te da se u izradi istoga nisam koristio/la drugim izvorima osim onih koji su u njemu navedeni.

Datum:

Potpis:

I. Mrazumac



OBRAZAC 6

IZJAVA O ODOBRENJU ZA POHRANU I OBJAVU PISANOG DIJELA DIPLOMSKOG RADA

Ja :

(Ime i prezime, OIB)

ovom izjavom potvrđujem da sam autor/ica predanog pisanog dijela diplomskog rada i da sadržaj predane elektroničke datoteke u potpunosti odgovara sadržaju dovršenog i obranjenog pisanog dijela diplomskog rada pod naslovom:

(Naslov teme diplomskog rada na hrvatskom jeziku)

koji je izrađen na sveučilišnom diplomskom studiju Građevinarstvo Sveučilišta u Zagrebu Građevinskog fakulteta pod mentorstvom:

(Ime i prezime mentora)

i obranjen dana:

(Datum obrane)

Suglasan/suglasna sam da pisani dio diplomskog rada u cijelosti bude javno dostupan, te da se trajno pohrani u digitalnom repozitoriju Građevinskog fakulteta, repozitoriju Sveučilišta u Zagrebu te nacionalnom repozitoriju.

Datum:

Potpis:

ZAHVALE

Htjela bih se zahvaliti mentoru izv. prof. dr. sc. Mariu Bačiću na podršci, pruženom znanju i pomoći pri izradi ovog diplomskog rada.

Hvala ekipi "Perspektiva" koja je putovanje diplomskog studija učinila puno zabavnijim i ljepšim. Veliko hvala mojim prijateljima, koji su sa mnom provodili studentske dane, hvala na dugim razgovorima, kavama, hrpi smijeha i izlascima... ništa ne bih mijenjala. Dora i Lara, hvala na dugogodišnjem zajedničkom putovanju zvano odrastanje. Hvala mojoj Mateji, na svim savjetima i podršci. I naravno, najbitnije, hvala mojoj obitelji na svemu što su mi pružili.

SAŽETAK

Ključni element strategija održivog razvoja u urbanim sredinama je ubrzana primjena energetske učinkovitih rješenja. Važnu ulogu u takvoj transformaciji igraju energetske tuneli, kao inovativni sustavi za prijenos toplinske energije. Međutim, projektiranje i izvedba takvih tunela suočava se s brojnim izazovima koji mogu utjecati na njihovu trajnost i učinkovitost. Ovaj rad analizira glavne izazove povezane s projektiranjem i izvedbom energetskih tunela, uključujući tehničke, geotehničke i strukturalne aspekte. U ovom radu analiziraju se problemi poput optimizacije sustava prijenosa energije, utjecaja temperaturnih promjena na stabilnost okolnog tla, te očuvanja trajnosti tunela u različitim uvjetima opterećenja i okoliša. Provedena je simulacija utjecaja rada energetskog tunela na okolno tlo, s fokusom na temperaturne promjene i njihovo djelovanje na ponašanje tla. Pratilo se slijeganje površine tla u različitim režimima grijanja i hlađenja, koristeći napredne numeričke analize i termo-mehanički model tla. Kroz pregled suvremenih tehnologija izvedbe i pristupa, rad pruža pregled mogućih rješenja za prevladavanje tih izazova i preporuke za buduće projekte. Na temelju analize slučajeva i iskustava iz prakse, cilj je unaprijediti projektiranje i izvođenje energetskih tunela, povećati njihovu učinkovitost te smanjiti potencijalne rizike, čime se doprinosi održivom urbanom razvoju.

Ključne riječi: Energetske tuneli, geotermalna energija, tehnologije izvedbe, projektiranje, temperatura tla

SUMMARY

A key element of sustainable development strategies in urban areas is the accelerated implementation of energy-efficient solutions. Energy tunnels are crucial in this transformation as innovative systems for transferring thermal energy. However, the design and construction of such tunnels face numerous challenges that can affect their durability and efficiency. This thesis analyzes the main challenges associated with the design and construction of energy tunnels, including technical, geotechnical, and structural aspects. It addresses issues such as optimizing energy transfer systems, the impact of temperature fluctuations on the stability of surrounding soil and preserving durability and structural integrity of tunnels under various load and environmental conditions. A simulation was conducted to assess the impact of an energy tunnel on the surrounding soil, with a focus on temperature changes and their effect on soil behavior. Surface settlement was monitored under various heating and cooling regimes using advanced numerical analyses and a thermo-mechanical soil model. Reviewing construction technologies and approaches, the thesis offers potential solutions to overcome these challenges and provides recommendations for future projects. Based on case studies and practical experiences, the goal is to improve the design and construction of energy tunnels, improve their efficiency, and reduce potential risks, contributing to sustainable urban development.

Key words: Energy tunnels, geothermal energy, construction technologies, design, soil temperature

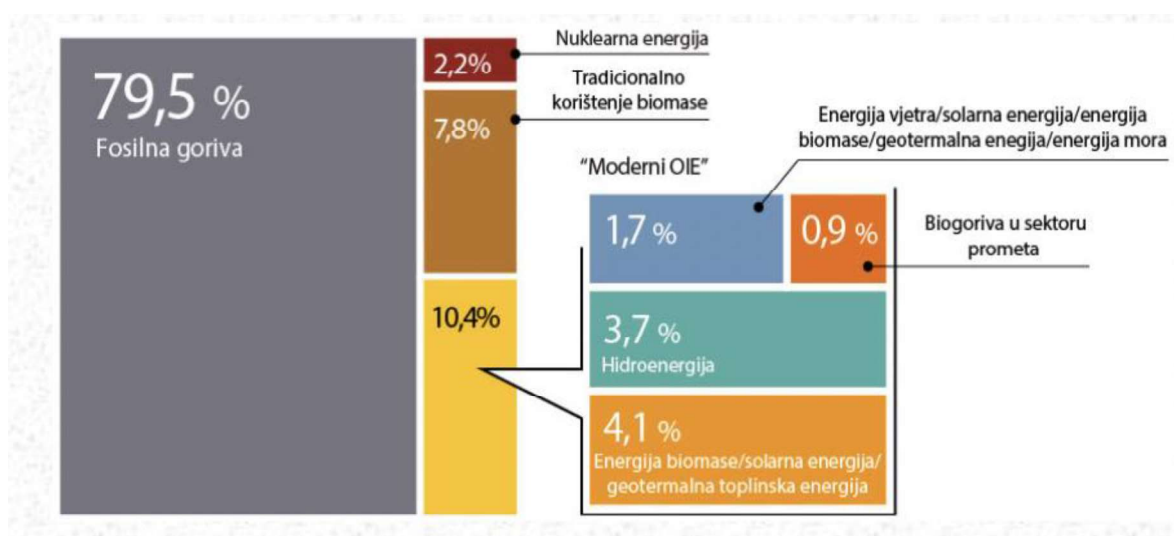
SADRŽAJ

ZAHVALE.....	i
SAŽETAK.....	ii
SUMMARY.....	iii
SADRŽAJ.....	iv
1. UVOD.....	1
2. GEOTERMALNI SUSTAVI.....	3
2.1. Geotermalna energija i geotermalni sustavi.....	3
2.2. Energetske građevine.....	4
3. ENERGETSKI TUNELI.....	6
3.1. Općenito.....	6
3.2. Podjela energetskih tunela.....	7
3.3. Princip rada energetskog tunela.....	8
3.4. Tehnologija izvedbe.....	10
4. PROJEKTIRANJE I UTJECAJ ENERGETSKIH TUNELA NA OKOLNO TLO.....	15
4.1. Uvod.....	15
4.2. Toplinsko i mehaničko projektiranje segmentne obloge.....	16
4.2.1. Karakteristike sučelja tlo – konstrukcija.....	17
4.2.2. Utjecaj temperaturnih promjena na svojstva sučelja tlo – konstrukcija.....	18
4.3. Prijenos topline između komponenti energetskih tunela.....	18
4.4. Termohidraulička svojstva tla.....	20
4.5. Utjecaj temperaturnih promjena na geotehničke karakteristike tla.....	22
4.5.1. Deformacije tla pri temperaturnim promjenama.....	22
4.5.2. Utjecaj temperaturnih promjena na plastičnost tla.....	24
4.5.3. Utjecaj temperaturnih promjena na parametre čvrstoće.....	25
4.5.4. Utjecaj temperaturnih promjena na krutost tla.....	26
5. PRIMJERI ENERGETSKIH TUNELA.....	27
5.1. Primjeri prvih izgrađenih energetskih tunela.....	27

5.2.	Linija 1 metroa u torinu.....	29
5.3.	Tunel nove željezničke pruge torino – lyon	33
5.4.	Željeznički projekt crosstrail (elizabeth line) u londonu.....	36
5.4.1.	Segmenti za toplinsku energiju	37
5.4.2.	Hlađenje tunela.....	39
5.4.3.	Prednosti tes sustava	40
6.	SIMULACIJA TERMALNOG UTJECAJA ENERGETSKOG TUNELA.....	41
6.1.	Uvod u problematiku i metodologija simulacije.....	41
6.2.	Termo – mehanički konstitucijski model tla.....	41
6.3.	Ulazni podaci.....	42
6.3.1.	Geometrijske karakteristike modela.....	42
6.3.2.	Mehaničke i termalne karakteristike tla i tunelske obloge.....	43
6.3.3.	Termalni rubni uvjeti.....	44
6.3.4.	Proračunske situacije	45
6.4.	Rezultati numeričkih analiza i diskusija.....	47
6.5.	Zaključak simulacija	51
7.	ZAKLJUČAK	52
	Popis slika	56
	Popis tablica.....	58

1. UVOD

Energija postoji u različitim oblicima i zapravo je ključ ljudskog razvoja i aktivnosti. Konstantni porast populacije, razvoj zemalja i njihovog gospodarstva zahtjeva sve veću potrebu i potrošnju energije, što utječe na klimatske promjene, globalno zatopljenje i samo onečišćenje okoliša. Svjetski problem klimatskih promjena i onečišćenja okoliša leži u tome da se još uvijek većina korištene energije dobiva iz neobnovljivih izvora (slika 1.), u koja se ubrajaju fosilna goriva (nafta, ugljen, zemni plin) i nuklearna goriva [1]. Fosilna goriva i dalje čine više od 75% globalnih emisija stakleničkih plinova (slika 1.) i gotovo 90% svih emisija ugljikovog dioksida [2]. Opstanak života na Zemlji je ugrožen i zato je nužno shvatiti hitnost zaštite Planeta te racionalno upravljanje energijom. Zbog navedenog razni propisi, regulacije i direktive, pogotovo u Europskoj uniji i razvijenijim zemljama sve više fokus stavlja na iskorištavanje obnovljivih izvora energije (sunca, vjetra, riječnih tokova, morskih mijena i valova, geotermalne energije i energije biomase) te održivi razvoj (razvoj koji zadovoljava potrebe današnjice bez mogućnosti ugrožavanja budućih generacija da udovolje svoje potrebe).



Slika 1. Prikaz ukupne potrošnje pojedinih izvora energije iz 2019. godine (Izvor: [3])

Građevinski sektor svrstava se u najveće potrošače energije i stoga se sve više zahtijeva i promiče korištenje tehnologije koje imaju minimalan utjecaj na okoliš, uključujući rješenja sa uporabom obnovljivih izvora energije. Oko 10,4% ukupne svjetske potrošnje energije [3] dolazi iz "modernih" obnovljivih izvora energije, gdje samo 0,15% čini geotermalna energija. Geotermalna energija [4] je toplinska energija koja se dobiva iz Zemljine unutrašnjosti i

koristiti se u energetske ili neke druge svrhe, a uz to neovisna je o vremenskim prilikama i iskoristiva 24 sata na dan. Upravo uporaba geotermalne energije može uvelike doprinijeti razvoju, ponajviše s aspekta grijanja i hlađenja, iskorištavanjem podzemnih građevina. Podzemne građevine [5] osim svoje osnovne funkcije (osiguravanje nosivosti ili stabilnosti tla i stijene, reduciranje slijeganja itd.) mogu biti dio geotermalnog sustava, zbog izravnog kontakta sa tlom, gdje sudjeluju u procesu prijenosa energije, odnosno izmjenjuju toplinu s okolnim tlom kako bi se osiguralo grijanje i hlađenje ili odleđivanje okolne infrastrukture. Kada se podzemne građevine koriste kao dio geotermalnog sustava tada se nazivaju energetske geotehničke građevine ili konstrukcije i dijele se na energetske temeljne konstrukcije, energetske potporne konstrukcije i energetske tunele [5]. Energetske geotehničke konstrukcije preporučuju se kao rješenja za suočavanje s problemom globalnog zatopljenja, a upravo energetske tunele mogu u većoj mjeri potaknuti energetske tranzicije za velike gradove. Osnovni cilj ovog rada je analiza energetske tunela. Opisani su energetske tunele, njihova podjela i princip rada, način njihova izvođenja, prednosti i nedostaci, kao i izazovi pri njihovoj izgradnji. Pri analizi navedenih tunela bitno je istaknuti njihov utjecaj na okolno tlo i karakteristike, kako se karakteristike tla (deformacija tla, parametri čvrstoće, itd.) mijenjaju s obzirom na promjene temperature što se detaljno razrađuje u nastavku ovog rada. Prikazani su i primjeri projekata energetske tunela koji su izvedeni u svijetu, a na kraju ovog rada napravljen je primjer analize ponašanja okolnog tla u odnosu na energetske tunel u programu Rocscience RS2.

2. GEOTERMALNI SUSTAVI

2.1. Geotermalna energija i geotermalni sustavi

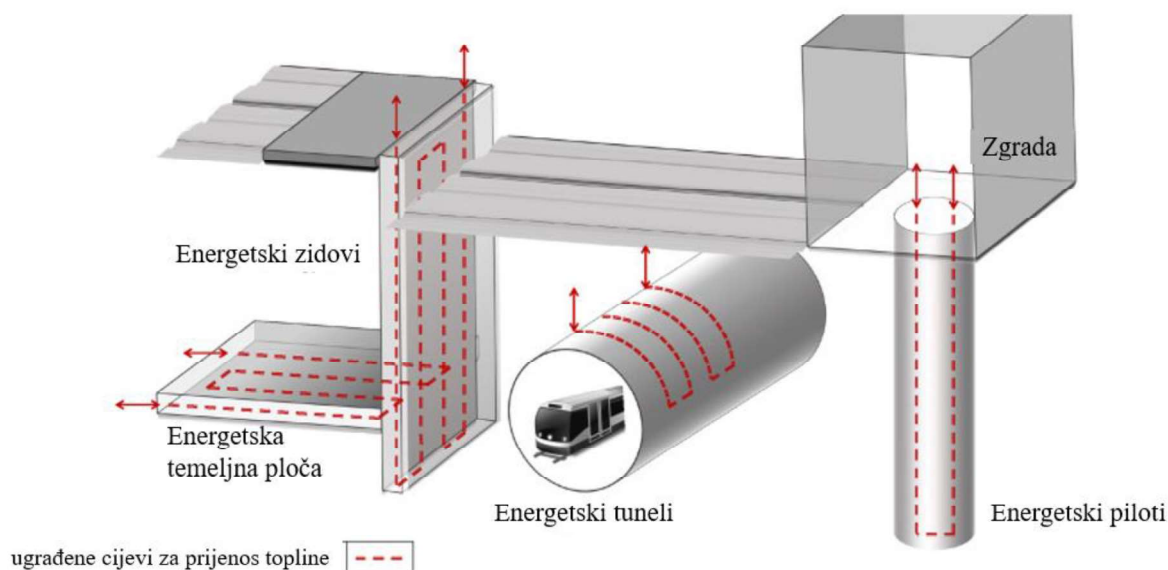
Geotermalna energija, smatra se najzastupljenijim izvorom energije na Zemlji nakon Sunčeve, a definira se kao toplinska energija koja potječe iz unutrašnjosti Zemlje. Koristi se u razne energetske svrhe, a može nastati formiranjem Zemlje, radioaktivnim raspadanjem minerala u jezgri te apsorpcijom sunčeve topline na površini. Kao obnovljiv i održiv izvor energije, geotermalna energija postaje sve važnija u razvoju građevinskog sektora, osobito u projektima usmjerenima na smanjenje emisija CO₂. Zahvaljujući činjenici da ne stvara ili stvara minimalne emisije stakleničkih plinova, geotermalna energija se smatra čistom i ekološki prihvatljivom. To je rezultat procesa pretvorbe i iskorištavanja energije koji ne uključuju kemijske reakcije poput izgaranja [1, 5, 6]. Jedna od ključnih prednosti geotermalne energije je njena kontinuirana dostupnost, neovisna o vremenskim uvjetima, što je čini privlačnijom u usporedbi s drugim obnovljivim izvorima energije, poput solarne i energije vjetra. Unatoč njenim prednostima, ulaganje u geotermalne projekte ima visok rizik zbog nesigurnosti u kvalitetu izvora i visokih troškova ispitivanja, bušenja i testiranja. Lokacija izvora mora biti u blizini područja gdje će se energija koristiti, što dodatno komplicira izvedbu projekata. No, zemlje poput Francuske i Islanda pokazale su da uz odgovarajuću potporu geotermalna energija može biti temelj za uspješan i održiv razvoj energetskih sustava. Geotermalna energija ima ključnu ulogu u budućnosti čovječanstva, jer može služiti za grijanje, proizvodnju električne energije i mnoge druge svrhe [1, 4]. Prema istraživanjima, geotermalna energija je jedan od četiri glavna podzemna resursa, uz prostor, vodu i geomaterijale, koji doprinose održivom razvoju urbanih sredina [5]. Prikupljanje i iskorištavanje geotermalne energije omogućuju tehnološki sustavi poznati kao geotermalni sustavi. Geotermalni sustavi koriste geotermalnu energiju (toplinu) za zagrijavanje objekata ili proizvodnju električne energije, čime se dodatno potiče održivost i smanjuje emisija stakleničkih plinova, a nalaze sve širu primjenu u raznim vrstama građevina. Mogu se klasificirati prema dubini iskorištavanja energije iz podzemlja [5], pri čemu se razlikuju plitki i duboki sustavi. Plitki geotermalni sustavi, koji djeluju na dubinama manjim od 400 metara i koriste temperature niže od 25 °C, pogodni su za grijanje, hlađenje i proizvodnju tople vode, a primjenjivi su na gotovo svim lokacijama, osobito za male i kućne instalacije. Nasuprot tome, duboki geotermalni sustavi, koji djeluju na većim dubinama i temperaturama do 200 °C, koriste se i za proizvodnju električne energije, ali su prikladni samo za specifične

geografske lokacije. Upravo u tom kontekstu energetske građevine predstavljaju inovativna rješenja koja povezuju strukturnu potporu građevina s funkcijom izmjenjivača topline [6].

2.2. Energetske građevine

Korištenje tla i stijena kao spremnika topline odavno je poznato, a danas se uz njihovu tradicionalnu ulogu sve više koriste i geotehničke konstrukcije poput pilota, zidova i tunela kao potporne konstrukcije koje učinkovito zadovoljavaju energetske potrebe. Energetske građevine predstavljaju inovativna i višenamjenska rješenja koja, uz svoju primarnu namjenu pružanja strukturne potpore, omogućuju prijenos energije između tla i objekta. Ova rješenja uključuju različite građevinske elemente, koji se mogu podijeliti na duboke temelje (piloti, stupovi, barijere), potporne konstrukcije (dijafragme, potporni zidovi), plitke temelje (temelji i temeljne ploče) te tunelske obloge i sidra. Kada ove geotehničke konstrukcije ili njihovi dijelovi preuzimaju (slika 2.) i ulogu izmjenjivača topline, nazivaju se energetskim pilotima, energetskim zidovima ili energetskim tunelima [1]. Postoje razne primjene za koje energetske građevine mogu poslužiti, uključujući grijanje i hlađenje objekata, proizvodnju tople vode za potrebe agrokulture, sprječavanje zaleđivanja infrastrukture te skladištenje topline u podzemlju za kasniju upotrebu. Operativna dubina energetskih građevina ovisi o položaju i dimenzijama potrebne konstrukcije [8]. Konstantna temperatura tijekom cijele godine nužna je za ovakvu tehnologiju. U većini dijelova Europe na dubinama većim od 5 – 8 metara temperatura tla obično varira između 8 °C i 16 °C i do dubine od 50 metara ta temperatura ostaje stabilna, čime je zadovoljen uvjet konstantne temperature. Pri takvim uvjetima, tlo može služiti kao izvor topline tijekom zime i kao toplinski spremnik za hlađenje tijekom ljeta [1, 8]. Zidovi dijafragme, duboki i plitki temelji, tunelske obloge i sidra sve su popularniji kao energetske geotehničke konstrukcije u Europi i širom svijeta. Ovi sustavi se termički aktiviraju ugradnjom apsorpcijskih cijevi unutar geotehničkih konstrukcija u kojima cirkulira fluid i prenosi toplinu iz tla ili u njega. Takvi sustavi svrstavaju se u kategoriju geotermalnih postrojenja niske entalpije i često su povezani s toplinskim pumpama. Napredak tehnologije omogućio je integraciju izmjenjivača topline s navedenim konvencionalnim geotehničkim konstrukcijama [10]. Kada su izmjenjivači topline integrirani u zidove ili obloge tunela, tada govorimo o energetskim tunelima. Uspoređujući tunele i druge geotehničke konstrukcije ili njihove dijelove, poput pilota, za što učinkovitiju izmjenu topline tuneli pružaju značajan potencijal jer omogućuju veću kontaktnu površinu sa tlom i veći volumen tla [9, 10]. Unatoč velikom potencijalu energetskih tunela, njihova primjena je još uvijek relativno rijetka. To se pripisuje činjenici da omjer početnih troškova instalacije i energetske koristi tijekom operativnog razdoblja značajno varira ovisno o specifičnoj

lokaciji. Usprkos tome, ubrzano raste interes za ovu tehnologiju i sve se više znanstvenih radova bavi analizom izvedivosti i učinkovitosti energetske tunela.



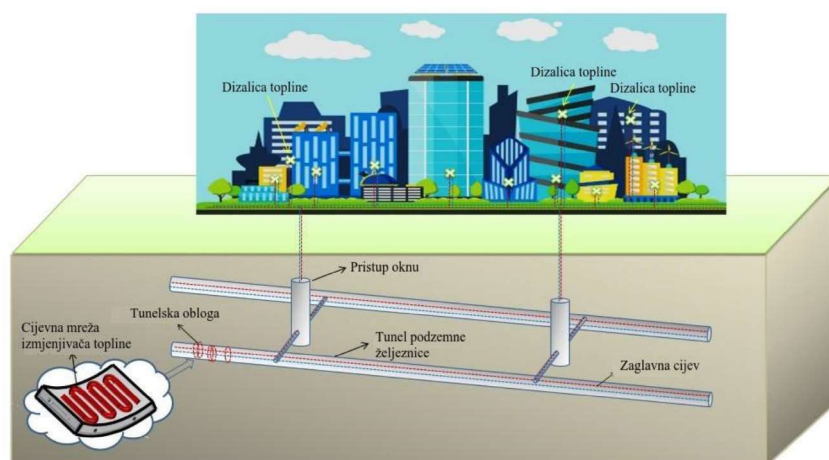
Slika 2. Shema energetske geotehničke konstrukcije koja uključuje: energetske zidove, energetske tunele, energetske temelje i energetske pilote (Izvor: [11])

Energetske građevine nude niz značajnih prednosti koje doprinose njihovoj učinkovitosti i isplativosti. Integracijom sustava za izmjenjivanje topline u konstrukcijske elemente, kao što su betonski zidovi, temelji i obloge, smanjuje se potreba za dodatnim instalacijama i smanjuju troškovi gradnje. Procjene pokazuju da se geotermalnom aktivacijom tunelske infrastrukture, ovisno o uvjetima pojedinog projekta, troškovi minimalno povećavaju, a moguće je ostvariti velike uštede. U usporedbi sa drugim geotermalnim sustavima gdje se koriste materijali poput bentonita, energetske građevine osiguravaju veću učinkovitost izmjene topline jer beton ima povoljnija toplinska svojstva. Osim navedenog, veći polumjer savijanja cijevi u energetske građevine smanjuje otpor protoka tekućine, što rezultira manjim operativnim troškovima zbog smanjene potrošnje energije za pumpanje. S obzirom na fleksibilnost sustava energetske građevine, one mogu funkcionirati i kao sustavi za izmjenu topline i za skladištenje topline u podzemlju, prilagođavajući se različitim potrebama za grijanje i hlađenje. Na taj način povećavaju energetske učinkovitosti sustava i omogućuju kasnije iskorištavanje topline koja bi inače bila izgubljena. Sve ove karakteristike doprinose povećanju energetske učinkovitosti zgrada, smanjujući potrebu za dodatnim sustavima grijanja i hlađenja, te na taj način smanjujući emisije i troškove energije [1, 5].

3. ENERGETSKI TUNELI

3.1. Općenito

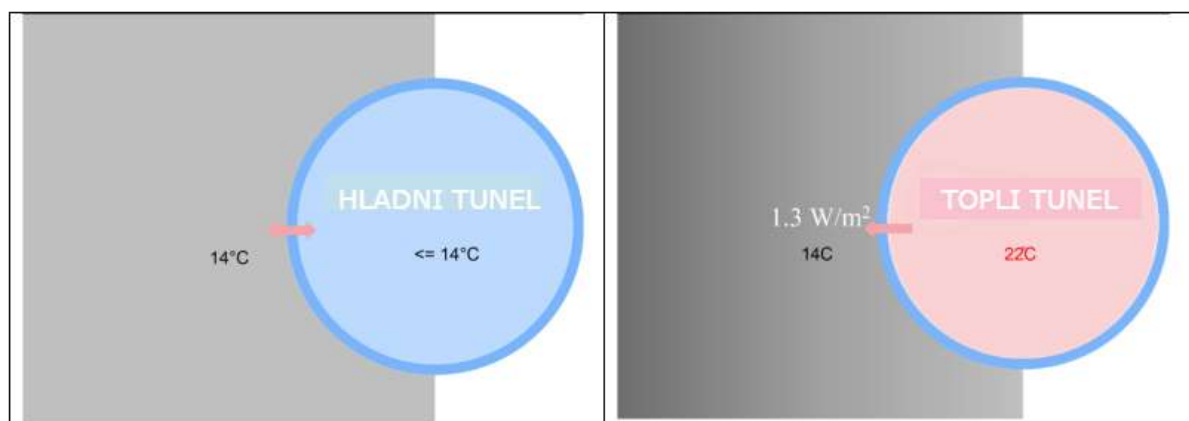
Jedan od najmanje istraženih i najzahtjevnijih načina za iskorištavanje geotermalne energije su energetskih tuneli. Svrstavaju se u posebnu vrstu podzemnih građevina, jer kao što je već navedeno, uz svoju primarnu funkciju (promet ili infrastruktura), imaju dodatnu ulogu u iskorištavanju geotermalne energije ili drugih oblika obnovljive energije. Najveća prednost energetskih tunela u usporedbi sa ostalim energetskim građevinama je njihova značajna dužina, zahvaćaju veliki volumen tla i površinu za potencijalnu izmjenu topline sa okolnim tлом [8]. Budući da energetski tuneli često prolaze ispod gusto naseljenih urbanih područja, izuzetno su prikladni za distribuciju geotermalne energije na razini cijelih četvrti ili gradova putem energetskih mreža (slika 3.). Iako imaju velik potencijal, energetski tuneli su manje poznati i rjeđe korišteni u usporedbi s drugim metodama, poput bušotina za izmjenu topline u tlu (GHE - engl. *ground heat exchanger*) i energetskih pilota. Međutim, kada tunel ima značajnu duljinu, gust promet, te se nalazi na većim dubinama ili u područjima s visokim geotermalnim gradijentom, prijenos topline može biti izuzetno učinkovit i koristan [1, 9]. Jedinstvena karakteristika tunela je da toplina koja se koristi za zagrijavanje objekata na površini nije samo rezultat geotermalne energije tla, već se dodatno generira i od prometa unutar tunelske cijevi. Ovo dodatno iskorištavanje topline ima pozitivan utjecaj i na hlađenje samog tunela. S obzirom na to da tuneli mogu doseći duljine od nekoliko desetaka kilometara, veliki volumen tla ili stijene može sudjelovati u procesu iskorištavanja geotermalne energije. Ključni faktor u iskorištavanju geotermalne energije tunela je veličina nadsloja, odnosno dubina na kojoj se tunel nalazi [5].



Slika 3. Shematski prikaz prijenosa energije energetskim tunelom (Izvor: [6])

3.2. Podjela energetskih tunela

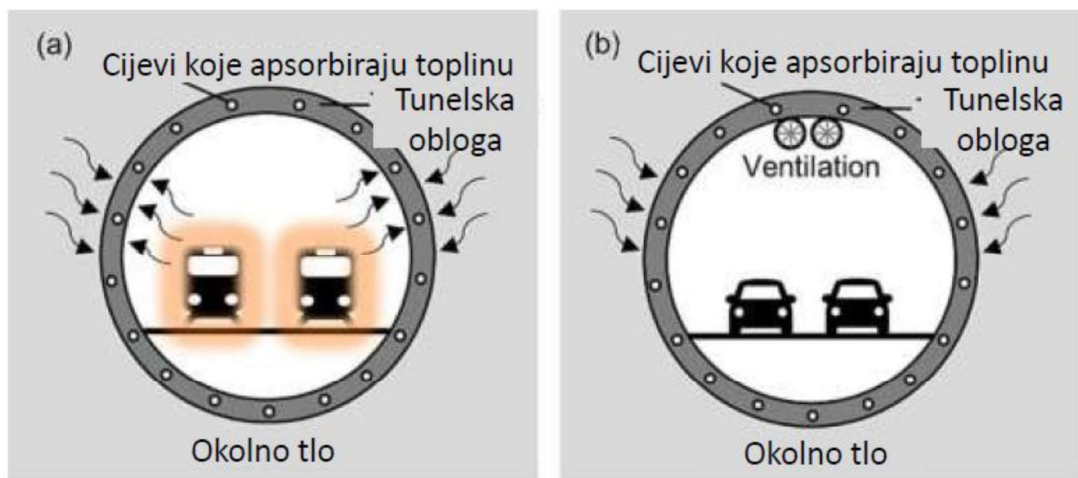
Energetski tuneli mogu se razvrstati na otvorene (hidrotermalne) sustave i zatvorene geotermalne sustave [10]. Otvoreni sustavi tipični su za tunele smještene ispod debelog sloja stijena i gdje se podzemna voda pojavljuje u velikim količinama pa se kao izvor energije koristi drenažna voda. U zatvorenim sustavima, energija se prenosi cirkulacijom tekućine od tla ili prema tlu kroz apsorpcijske cijevi integrirane u konstrukciju tunela. Dodatno, tuneli se mogu podijeliti na "hladne" i "tople" prema njihovim značajkama i lokalnim toplinskim uvjetima (slika 4.). U "hladnim" tunelima, temperatura zraka je relativno niska (oko 15 °C) tijekom cijele godine, a prolazak vlakova nije dovoljno čest da bi značajno podigao temperaturu unutar tunela. Tuneli koji se svrstavaju u hladne obično imaju veliki unutarnji promjer, između 10 – 12 metara, a temperature unutar tunela imaju samo ograničen utjecaj na okolno tlo. U kategoriju hladnih tunela možemo svrstati cestovne tunele. Suprotno njima, "topli" tuneli, poput tunela u urbanom okruženje (kao što su podzemne željeznice) i dubokih alpskih tunela, često imaju visoke unutarnje temperature (oko 30 °C) zbog brzih ciklusa prolaska vlakova (koji zbog broja stanica pri kočenju i pokretanju stvaraju dodatnu toplinu), automobila ili visokovoltaznih kabela, kao i zbog geotermalnog zagrijavanja tla na većim dubinama. Osim što ih karakterizira visoka unutarnja temperatura, za razliku od hladnih tunela imaju manje promjere, oko 7 metara [8, 12].



Slika 4. Prikaz hladnog i toplog tunela u prirodnim uvjetima (Izvor: [12])

I "hladni" i "topli" tuneli mogu se iskoristiti termalnu aktivaciju (slika 5.). U slučaju zatvorenih geotermalnih sustava, cijevi za apsorpciju topline integrirane su u konstrukciju tunela, gdje niska entalpijska energija cirkulira kroz fluid za razmjenu topline [8]. Ovaj sustav prikuplja toplinu iz zraka ili vode unutar tunela, kao i iz tla koje ga okružuje. "Hladni tuneli" nemaju izvore energije unutar tunela, pa je temperatura zraka unutar tunela slična onoj u tlu ili

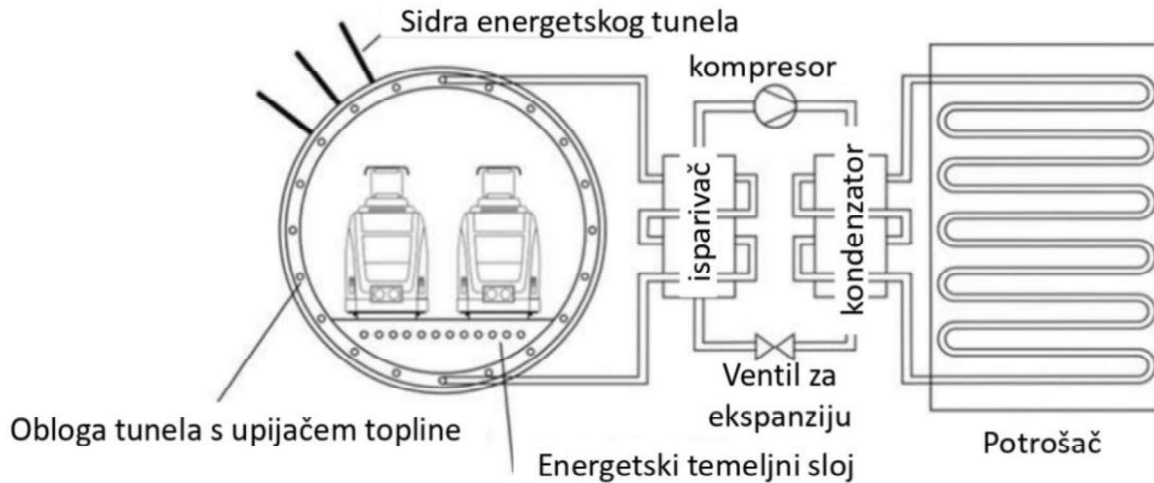
atmosferskoj temperaturi, dok "topli tuneli" imaju izvore topline unutar tunela, što zahtijeva ventilaciju za hlađenje kako bi se temperatura održala u operativnom rasponu [12].



Slika 5. Prikaz a) toplog i b) hladnog tunela pri termalnoj aktivaciji (Izvor: [9])

3.3. Princip rada energetskog tunela

Energetski tuneli koriste dizalice topline kao ključni element za termičku aktivaciju. Rad sustava dijeli se na primarni i sekundarni krug [1]. Primarni krug uključuje polietilenske cijevi smještene unutar betonske obloge tunela, koje apsorbiraju toplinu iz okolnog tla, dok sekundarni krug prenosi prikupljenu toplinu do potrošača na površini pomoću dizalice topline. Kroz integrirane cijevi unutar tunela cirkulira tekućina koja omogućuje prijenos topline. Dizalica topline (slika 6.) sastoji se od četiri osnovna elementa [5]: isparivača, kompresora, kondenzatora i ekspanzijskog ventila. Rad dizalice započinje kada tekućina u isparivaču apsorbira toplinu iz tla, prelazeći iz tekućeg u plinovito stanje. Nakon toga, plin se komprimira u kompresoru, čime se povećava njegova temperatura. Vrući plin ulazi u kondenzator, gdje se hladi i kondenzira natrag u tekućinu, otpuštajući toplinu koja se koristi za grijanje objekata na površini. Tekućina zatim prolazi kroz ekspanzijski ventil, vraćajući tlak i temperaturu na početne vrijednosti, čime se ciklus ponavlja. Toplina izmijenjena na razini tunela može se prenijeti na površinu postavljanjem cijevi u ventilacijska okna, portale ili metro stanice. Tijekom zime, izmjena topline odvija se s okolnim tлом, dok se ljeti većina topline prenosi s površine u tlo. Ovisno o potrebama za toplinom, duljina cjevovoda može se optimizirati kako bi se smanjili gubici topline i omogućila distribucija na razini cijelog kvarta. Alternativno, sustav može poslužiti i za hlađenje tunela, čime se povećava samoodrživost infrastrukture [8].



Slika 6. Shema koncepta energetskog tunela (Izvor: [12])

U početnoj fazi projektiranja, ključno je analizirati razliku između temperature fluida za prijenos topline i temperature nepromijenjenog tla. Ova razlika direktno utječe na potrebnu brzinu protoka fluida te na dimenzioniranje svih komponenti sustava. Veća temperaturna razlika može omogućiti izgradnju manjeg i ekonomičnijeg geotermalnog postrojenja, ali istovremeno ima značajan utjecaj na toplinski balans tla te smanjuje učinkovitost toplinske pumpe. S druge strane, manja temperaturna razlika poboljšava učinkovitost toplinske pumpe, ali zahtijeva veće i skuplje postrojenje. Optimalno rješenje postiže se kada je razlika između temperature fluida na izlazu (T_{wo}) i temperature tla (T_g) unutar raspona [10]:

- $|T_{wo} - T_g| = 6 - 11 \text{ }^\circ\text{C}$ u režimu grijanja
- $|T_{wo} - T_g| = 11 - 17 \text{ }^\circ\text{C}$ u režimu hlađenja

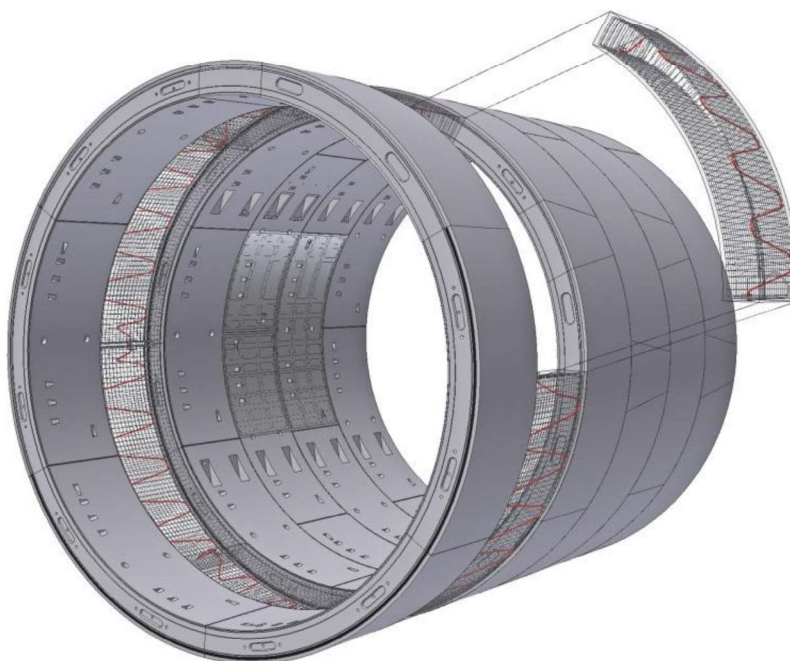
Razlika između ulazne i izlazne temperature fluida mora biti dovoljno velika da osigura turbulentan protok unutar cijevi i minimizira gubitke tlaka, što smanjuje potrebu za skupim pumpama. To se obično postiže kada je razlika ($|T_{wo} - T_{wi}|$) temperature fluida na izlazu i temperatura fluida na ulazu u rasponu od 3 - 5 $^\circ\text{C}$ [10]. Na temelju ovih parametara, sustav se može projektirati uzimajući u obzir geotermalne i hidrauličke zahtjeve, uključujući odabir odgovarajuće toplinske pumpe.

3.4. Tehnologija izvedbe

Energetske građevine, uključujući tunele, obično su izgrađene od armiranog betona. Sa tehničkog aspekta razlikuju se od klasičnih građevina zbog specifične ugradnje cijevi za prijenos topline. Cijevi se fiksiraju na armaturu ili unutar betonske obloge [8], mogu biti instalirane u predgotovljenim elementima ili na gradilištu, ovisno o metodi izvedbe. Za izgradnju tunela koriste se različite metode izgradnje, koje omogućuju različite primjene podzemnih elemenata u iskorištavanju geotermalne energije.

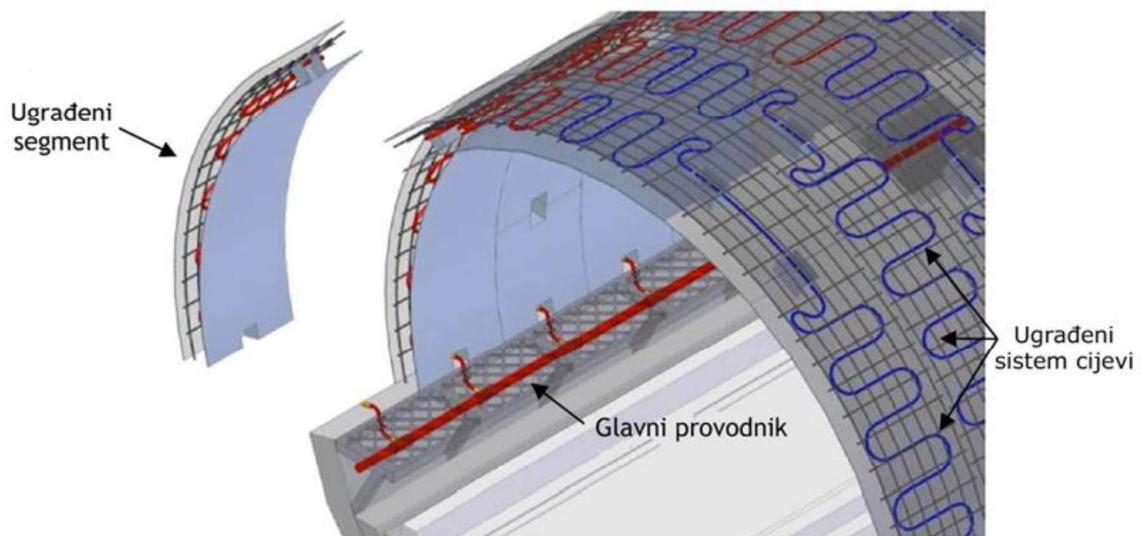
Prva metoda uključuje "cut and cover" metodu [5], koja se temelji na iskopu tla projektirane dionice, izgradnji konstrukcije tunela i potom zatrpavanju tunela iskopanim materijalom. Tunelska konstrukcija [8] se sastoji od vertikalnih (AB zidovi ili pilotske stijene) i horizontalnih elemenata (AB ploče) u koje se lako integriraju cijevi za iskorištavanje geotermalne energije.

Druga metoda izgradnje tunela koristi strojeve pod nazivom TBM (engl. *Tunnel Boring Machine*), poznate kao krtice, za iskopavanje punog profila tunela. Na čelu krtice rotirajuća rezna glava vrši iskop, a nakon svakog segmenta iskopa ugrađuju se prefabricirani AB prstenovi (slika 7.). Pri korištenju TBM, prstenovi mogu se unaprijed pripremiti i optimizirati za geotermalnu primjenu [8].



Slika 7. Prikaz postavljenih energetskih segmenata putem TBM (Izvor: [17])

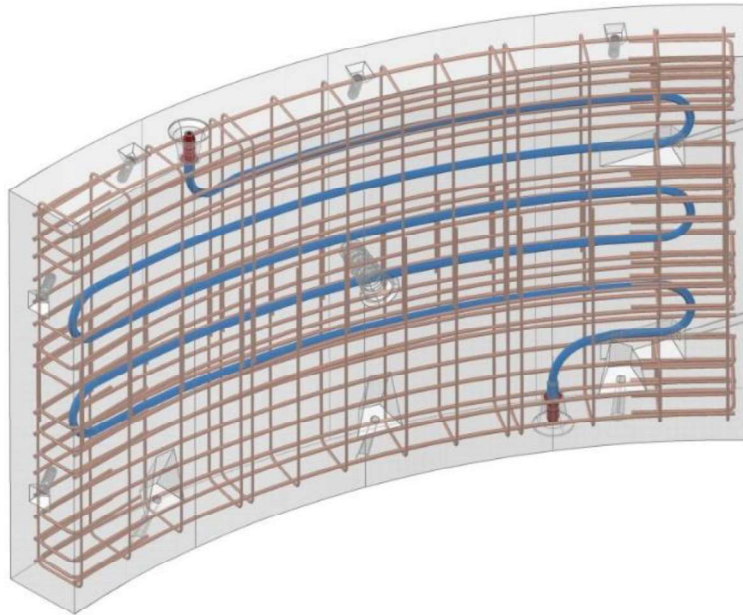
Izvođe se u tvornici, gdje se cijevi instaliraju i pričvršćuju na armaturu, a zatim se betonira tunelski segment, kojeg kasnije krtice postavljaju prefabricirane na terenu. Svaki segment obloge povezuje se hidrauličkim spojnica ma sa susjednim segmentom, stvarajući krugove obloga prstena. Obično, svaki krug obuhvaća 6–7 segmenata [8]. Dva ili više krugova mogu biti paralelno povezani kako bi tvorili podkrugove. Ovi podkrugovi zatim se spajaju na glavni vod koji usmjerava fluid za prijenos topline između sustava i toplinske pumpe. Ovakvo povezivanje smanjuje broj priključaka na glavnom vodu, čime se smanjuju i značajni gubitci tlaka [10].



Slika 8. Shematski prikaz tunelske segmentne obloge opremljene kao izmjenjivač topline (Izvor: [8])

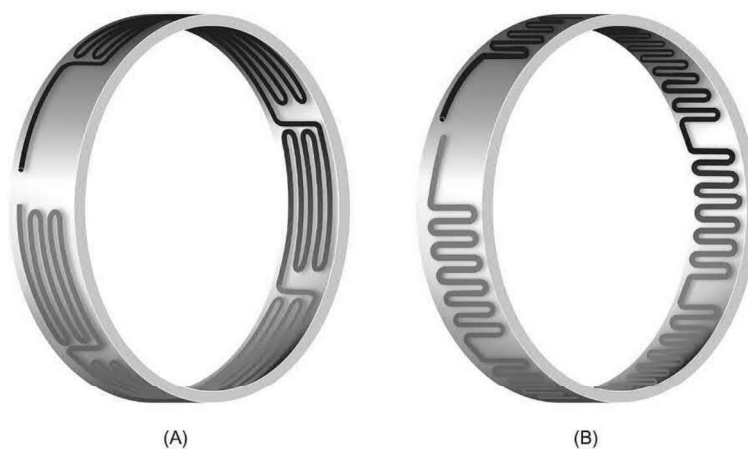
Kako bi se osigurala odgovarajuća zaštita armature preporučuje se integracija cijevi unutar betona. Zbog toga su na ulazu i izlazu cijevi postavljeni zaporni ventili i manometri (slika 9.) koji omogućuju održavanje tlaka u rasponu od 5–8 bara za provjeru integriteta sustava [1]. Tijekom betoniranja, ovi uređaji pomažu u očuvanju otpornosti mokrog betona i sprječavanju urušavanja, a 24 sata nakon betoniranja preporuča se testirati tlak. Unutar cijevi, tekućina se pumpa električnim strojevima i koristi se za prijenos toplinske energije. Cijevi se sastoje od unutarnjeg sloja visoke gustoće polietilena, srednjeg sloja od polimernog materijala i vanjskog sloja koji se sastoji od barijere etilen – vinil alkohola koji sprječava propusnost kisika [8]. Cijevi ovakvog sastava mogu izdržati visoke tlakove, otporne su na koroziju i dug im je životni vijek. Obično su promjera između 10 i 40 mm te debljine stijenke od 2 do 4 mm. Na početnim i završnim segmentima cijevi primjenjuje se toplinska izolacija kako bi se smanjio utjecaj vanjskih klimatskih uvjeta na prijenos topline i poboljšala energetska učinkovitost. Tekućina koja cirkulira unutar cijevi i služi za prijenos topline obično se sastoji od vode, mješavine vode i antifrizu ili slane vode. Antifrizi poput etilen glikola (koji je toksičan i zahtijeva pažljivo rukovanje) ili propilen glikola (koji je sigurniji) koriste se za snižavanje točke smrzavanja tekućine [1, 8]. Nakon postavljanja i ugrađivanja segmenata

na terenu, cijevi se ispunjavaju radnim fluidom i tunelska obloga se stavlja u funkciju. Ovaj sustav može služiti za prijenos topline iz tla ili topline generirane prometom u tunelu, što omogućuje grijanje objekata na površini, ali također može služiti i za hlađenje [5].



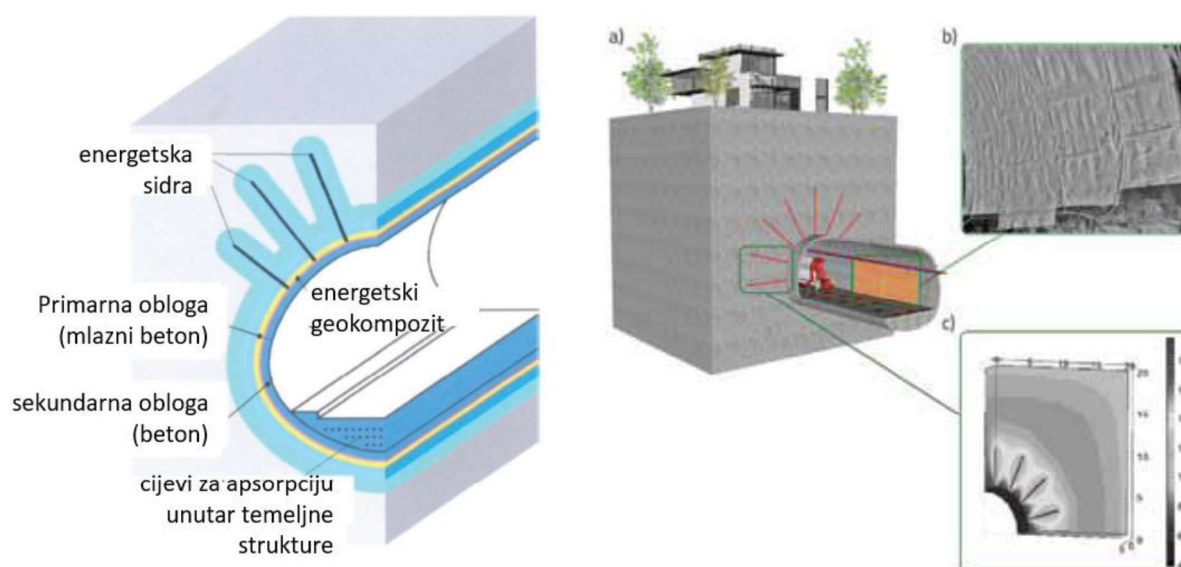
Slika 9. Prikaz segmenta energetskog tunela opremljenog s cijevima za apsorpciju unutar armature, s prstenastim spojem (Izvor: [20])

Cijevi u energetskim tunelima mogu biti postavljene okomito ili paralelno s aksijalnim smjerom tunela (slika 10.). Važno je pažljivo planiranje konfiguracije cijevi zbog mogućih ograničenja povezanih s njihovim položajem. Konfiguracija ima ključan utjecaj na instalaciju, rad, učinkovitost i troškove energetskih sustava [1, 8]. Projektna rješenja trebaju omogućiti maksimalnu učinkovitost izmjene topline i minimalni gubitak tlaka, u cilju optimizacije energetske učinkovitosti.



Slika 10. Primjer konfiguracije cijevi a) okomito i b) paralelno s osi energetskih tunela (Izvor: [1])

Poznata je još i "Nova austrijska tunelska metoda" (NATM) ili "Norveška metoda tunelogradnje" (NTM) kao metoda izgradnje tunela [5], a koja omogućava postavljanje specifičnih elemenata za apsorpciju topline. Međutim instalacija kontinuiranih apsorpcijskih cijevi u uzdužnom smjeru može biti tehnički izazovna zbog složenih građevinskih segmenata. Nakon što se segment tunela iskopa, postavljaju se elementi podgradnog sustava, poput sidara, betonske podgrade i čeličnih lukova, kako bi osigurali stabilnost tunelskog otvora i spriječili urušavanje stijenske mase, ali također služe kao zasebni dijelovi geotermalnog sustava. Između primarne i sekundarne ili unutar sekundarne armirano-betonske obloge tunela postavljaju se apsorpcijske cijevi, koje se pričvršćuju na geosintetiku izvan gradilišta čime je omogućena brza i jednostavna instalacija na licu mjesta [14].



Slika 11. Shema energetskog tunela s podgradnim elementima iskopanog prema NATM metodi
(Izvor: [5, 14])

Tri su ključna građevinska elementa [14] koja se mogu koristiti za ekstrakciju i pohranu toplinske energije u tunelima:

- Energetska sidra ili čavli – omogućuju termičku aktivaciju okolnog tla ili stijene, čime povećavaju njihovu sposobnost pohrane i prijenosa topline.
- Energetski geosintetici – postavljaju se oko opsega tunela kako bi se optimiziralo iskorištavanje toplinske energije tla.
- Termoaktivna sekundarna obloga – unutarnja armirano-betonska obloga tunela može biti termoaktivirana, čime se poboljšava učinkovitost prijenosa topline.

Primjer korištenja geotermalne energije u tunelu Jenbach u Austriji, gdje se ovom metodom izvedbe tunela demonstrirala uporaba geotekstila na pričvršćene cijevi između primarne i sekundarne tunelske obloge [14]. Primjer će biti detaljnije opisan u nastavku rada.



Slika 12. Prikaz energetskog geotekstila (geokompozita) instaliranog u energetskom tunelu (Izvor: [14])

Energetski tuneli imaju specifična sučelja [1] koja omogućuju izmjenu topline s obje strane tunela (s oba medija), a to su sučelje zrak–kruto i kruto–kruto. Ova karakteristika značajno utječe na učinkovitost sustava. Odabir odgovarajuće lokacije cijevi može potaknuti ili ograničiti izmjenu topline između sučelja zrak–obloga i obloga–tlo. U nekim slučajevima, može biti korisno izolirati dijelove geotehničke konstrukcije, primjerice, ako se hladni tunel koristi kao geotermalni izmjenjivač topline. Preporuča se da se cijevi postavljaju minimalno 200 mm od ruba tunelske obloge, smanjujući tako rizik od požara i da bi se spriječilo slučajno oštećenje. Time se još osigurava sigurnost i dugotrajnost sustava, a istovremeno se omogućuje učinkovito upravljanje toplinskim procesima unutar tunela [8].

4. PROJEKTIRANJE I UTJECAJ ENERGETSKIH TUNELA NA OKOLNO TLO

4.1. Uvod

Energetski tuneli kao sustavi sastoje se od tri glavne komponente, fluida za prijenos topline u cijevima, okolnog tla ili stijenske mase te zraka unutar tunela. Zbog uloge u opskrbi energijom, razumijevanje reakcije tla i betona pod termo-mehaničkim opterećenjem, kao i promjene njihove čvrstoće, deformacijskih i toplinskih svojstava s promjenama temperature, ključno je za njihovo projektiranje. Toplinska učinkovitost energetskih tunela ovisi o nekoliko čimbenika, koji imaju ključnu ulogu pri projektiranju. Raspored i orijentacija cijevi, termohidraulička svojstva tla koja određuju njegovu sposobnost za provođenje i prijenos topline, prisutnost i brzina podzemnih voda koja može povećati prijenos topline advekcijom od iznimnog su značaja. Uvjeti unutar tunela, poput temperature zraka, utječu na razmjenu topline s okolinom, dok temperatura tla u dalekom polju (engl. *far field ground temperature*) određuje granične uvjete prijenosa topline [22]. Ključna je i krivulja toplinskog opterećenja koja predstavlja potražnju za grijanjem ili hlađenjem tijekom vremena, što utječe na potrebe prijenosa topline. Sve ove karakteristike zahtijevaju razvoj konstitutivnih modela koji točno opisuju specifična termalna i mehanička svojstva materijala, kako bi se optimizirala učinkovitost prijenosa topline u energetskim tunelima [21]. Optimalni uvjeti tla variraju ovisno o namjeni sustava. Ukoliko se sustav isključivo koristi za grijanje ili hlađenje, potrebno je tlo s visokom vodopropusnošću te podzemnom vodom koja ima veći hidraulički gradijent kako bi se osigurala brza razmjena topline. Za razliku od toga, kada se sustav koristi i za grijanja i hlađenje, poželjno je tlo s manjom vodopropusnošću i manjim hidrauličkim gradijentom kako bi se tlo moglo koristiti kao skladište topline [5]. Promjene temperature tla mogu utjecati na nosivost temeljnih konstrukcija, osobito kada temperatura padne ispod 0°C, što može dovesti do smrzavanja tla i gubitka nosivosti. Ključno je predvidjeti utjecaj ciklusa grijanja i hlađenja tunela na okolno tlo, budući da imaju utjecaj na geotehničke karakteristike tla, uključujući deformacije, parametre čvrstoće, posmične parametre, parametre stišljivosti tla te cjelokupno fizičko-mehaničko ponašanje. Važno je uzeti u obzir svojstva tla kao što su toplinska provodljivost, specifični toplinski kapacitet, mineralni sastav, vlažnost i gustoća, kao i karakteristike poput gustoće geomedija, koeficijenta poroznosti te potencijalnih promjena volumena uslijed smrzavanja i odmrzavanja tla [21], jer one izravno utječu na kretanje i skladištenje topline te na njegovu sposobnost apsorpcije i prijenosa toplinske energije. Pravilno projektiranje energetskih

tunela i drugih geotehničkih konstrukcija mora uzeti u obzir sve te čimbenike kako bi se ograničila slijeganja, ali i osigurala njihova dugoročna stabilnost i funkcionalnost.

4.2. Toplinsko i mehaničko projektiranje segmentne obloge

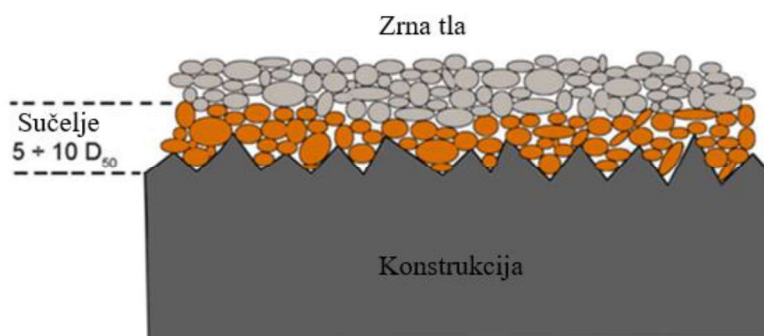
Toplinska aktivacija segmentne obloge energetskog tunela zahtijeva pažljivo razmatranje i analizu kako bi se osigurala učinkovitost i dugoročna cjelovitost konstrukcije. U analizi i projektiranju energetskih građevina, mogu se pojaviti dvije vrste problema:

1. Problemi povezani s prijenosom topline i medija (tekućina) koji se odvijaju u cijevima ugrađenim unutar podzemnih energetskih građevina ili u njihovoj blizini. Ovi problemi se rješavaju iz perspektive mehanike fluida, gdje se fokus stavlja na dinamiku protoka tekućina i njihov utjecaj na toplinske i mehaničke karakteristike sustava.
2. Problemi povezani s prijenosom topline i mase, te deformacijama koje karakteriziraju geomaterijale koji čine energetske građevine i okolno tlo. Ova problematika uključuje gledište mehanike tla i statičkog gledišta, gdje se analizira kako toplinska i hidraulička opterećenja utječu na tlo i materijale oko energetske građevine.

Toplinska i mehanička analiza segmentne obloge uključuje povezane termo-hidro (TH) i termo-mehaničke (TM) analize [8]. U TH analizi, ključni je cilj kvantificirati iskoristivu toplinu i učinkovitost sustava. Ova analiza uzima u obzir i protok fluida unutar cijevi za apsorpciju topline, koji se modelira s pomoću jedno-dimenzionalnih diskretnih elemenata. S druge strane, TM analize, fokusiraju se na mehaničke aspekte, uključujući termički uzrokovane napone i deformacije. Ovdje se prati kako promjene temperature utječu na napetosti u konstrukciji, dok mehaničke promjene ne uzrokuju promjene u temperaturi. Važno je razumjeti da su prijenos topline i mase povezani fenomeni [1]. Toplinska ponašanja materijala i hidraulička ponašanja često su međusobno povezana. Gradijent u jednom fenomenu može potaknuti promjene u drugom. Stoga je razumijevanje tih fenomena i njihovih međusobnih interakcija ključno za pravilno projektiranje i analizu energetskih građevina. Unatoč mogućnosti da potpuna termo-hidro-mehanička (THM) analiza pruži sveobuhvatnije uvide, često se koristi pojedinačne TH i TM analize zbog njihovih specifičnih prednosti i manje složenosti [8]. Ovaj pristup omogućava projektantima da na učinkovit način procijene i optimiziraju performanse energetskih tunela, dok minimiziraju računalne resurse i kompleksnost modeliranja. U daljnjem radu (šestom poglavlju) simuliran je termalni utjecaj energetskog tunela na okolno tlo, pri čemu je korištena termo-mehanička analiza (TM model).

4.2.1. Karakteristike sučelja tlo – konstrukcija

Sučelja tlo – konstrukcija ključna su za prijenos opterećenja s konstrukcijskih elemenata na tlo, a njihova debljina obično varira od 5 do 10 puta prosječnog promjera čestica tla. U energetskim geotehničkim konstrukcijama, karakterizacija ovih sučelja pomaže u razumijevanju prijenosa mase, topline i deformacija uzrokovanih opterećenjima. Postoje dva glavna aspekta, a to su cikličko širenje i skupljanje konstrukcije te izravan utjecaj temperature na sučelje [1]. Hrapavost (slika 13.) sučelja određuje se omjerom između maksimalne vertikalne udaljenosti i srednje veličine čestica tla. Ukoliko je omjer manji od kritične vrijednosti, sučelje je glatko, a ako je veći sučelje je hrapavo. Hrapavost utječe na posmičnu čvrstoću sučelja. Glatka sučelja imaju manju posmičnu čvrstoću, a hrapava veću. Volumna deformacija sučelja je manja u usporedbi s deformacijom tlo – tlo, a hrapavost smanjuje količinu volumnog širenja tla tijekom smicanja. Na sučeljima se mogu pojaviti različiti mehanizmi deformacije, uključujući smicanje tla i klizanje između čestica tla i sučelja. Gruba sučelja uzrokuju smicanje u tlu, dok glatka sučelja omogućuju klizanje na sučelju. Kada se tlo izlaže cikličnom opterećenju, intenzitet posmičnih deformacija raste s povećanjem amplitude tog opterećenja. S obzirom na broj ciklusa opterećenja, klizanje između tla i konstrukcije koja je u kontaktu s njim također se povećava, jer površine u kontaktu mogu postati manje adhezivne i izložene većem klizanju. Ciklična degradacija, koja se odnosi na smanjenje svojstava tla zbog ponovljenih opterećenja, osobito je kritična u tlu s velikim zrnem, kao što je pijesak, gdje takva degradacija može značajno utjecati na stabilnost tla i konstrukcije u dodiru s tlom.



Slika 13. Shematski prikaz sučelja tlo – konstrukcija (Izvor: [24])

Veće efektivno normalno naprezanje povećava posmičnu čvrstoću sučelja. Gustoća tla također utječe na ponašanje sučelja, sučelja veće gustoće pod mehaničkim opterećenjem povećavaju svoj volumen, dok sučelja manje gustoće smanjuju svoj volumen [1]. Ovo je važno za razumijevanje reakcije sučelja geotehničke konstrukcije, jer volumno širenje ili skupljanje betona može biti ograničeno zbog prisutnosti okolnog tla.

4.2.2. Utjecaj temperaturnih promjena na svojstva sučelja tlo – konstrukcija

Temperaturne promjene utječu na svojstva sučelja između tla i betona na različite načine, ovisno o vrsti tla. Kod sučelja s krupnozrnim tlima (npr. pijeska), temperatura ne čini značajnu promjenu, ali kod sučelja sa sitnozrnim tlima, kao što je glina, primjećuje povećanje čvrstoće s temperaturom. Ova promjena može biti posljedica povećane adhezije koja prevladava smanjenje kuta trenja [1]. U proračunima kapaciteta geotehničkih konstrukcija, kut trenja sučelja obično se uzima kao konstantan, što može biti opravdano zbog stabilnosti adhezije. Međutim, ciklička mehanička degradacija uzrokovana širenjem i skupljanjem materijala na sučelju također može značajno utjecati, osobito kod krupnozrnih tla, zbog njihovog izraženijeg cikličkog volumnog skupljanja. Povećanje temperature može smanjiti cikličko skupljanje sitnozrnih tla, što smanjuje potencijal za kolaps tijekom smicanja. U analizi i projektiranju energetskih građevina, ovi ciklički degradacijski učinci trebaju se uzeti u obzir, osobito kada su prisutna značajna mehanička opterećenja. Ukoliko su ciklički učinci minimalni ili ne postoje, mogu se izostaviti iz analize.

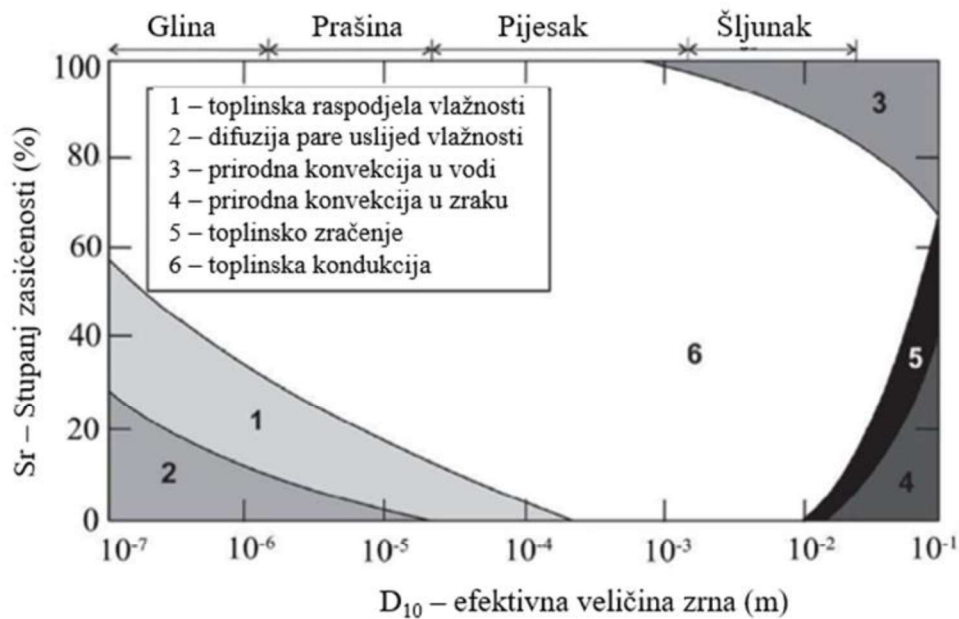
4.3. Prijenos topline između komponenti energetskih tunela

Prijenos topline između različitih komponenti energetskih tunela ovisi o dvije ključne fizičke veličine, to su temperatura (T) i količina topline (Q). Temperatura kvantitativno opisuje stanje topline sustava i predstavlja mjeru prosječne kinetičke energije čestica unutar materijala, što određuje smjer prijenosa topline. Toplina se uvijek kreće od toplijeg prema hladnijem tijelu sve dok se ne postigne termodinamička ravnoteža. Ovaj proces je ključan za razumijevanje dinamike toplinskog prijenosa u energetskim tunelima, gdje temperatura zraka unutar tunela, tla u dalekom polju i temperature fluida za prijenos topline igraju ključne uloge. Količina topline, koja se izražava u džulima (J), definira se kao oblik energije koja prelazi između sustava zbog razlike u temperaturi [21]. Prijenos topline može se odvijati na različite načine:

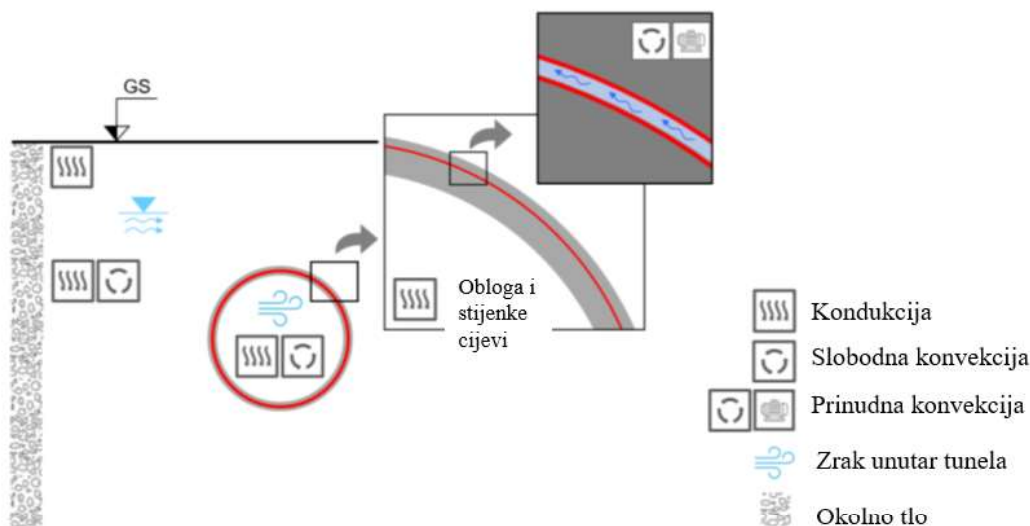
- **Kondukcija (vođenje)** se odvija kroz izravni kontakt između čestica unutar tijela ili između tijela. U čvrstim materijalima, molekule su raspoređene unutar kristalne rešetke, a prijenos topline ovisi o njihovoj međusobnoj udaljenosti i jačini međumolekulskih sila. Toplina se prenosi kada se molekule s viškom kinetičke energije sudaraju s „sporijim“ molekulama, prenoseći im dio svoje energije. U tlu, prijenos topline kondukcijom odvija se kroz čvrste čestice koje imaju različite toplinske provodljivosti. Učinkovitost kondukcije u tlu ovisi o čvrstim česticama, ali i o vodi i zraku prisutnim u porama tla.

Voda i zrak u porama igraju značajnu ulogu u ukupnom termičkom stanju tla (slika 14.), jer njihova prisutnost može značajno utjecati na brzinu prijenosa topline [21].

- Konvekcija se odvija premještanjem zagrijanih čestica između dviju sredina s različitim temperaturama. Ovaj prijenos topline omogućuje se kretanjem fluida (tekućine ili plinova). U tlu, konvekcija može nastati samo ako su pore dovoljno velike, a slobodna konvekcija postaje značajna pri temperaturama iznad 30°C ili uz visoki temperaturni gradijent. Prirodna konvekcija može utjecati na sustav skladištenja energije ako je hidraulička provodljivost u oba pravca oko 10^{-5} m/s. Međutim, prinudna konvekcija, koja je važnija u tlu, nastaje kada podzemne vode teku kroz tlo ili stijene. U takvim slučajevima, prijenos topline se odvija kroz premještanje čestica uzrokovano vanjskim utjecajima, poput razlike tlakova ili kretanja podzemne vode [21].
- Zračenje je prijenos topline putem elektromagnetskih valova, kao što je infracrveno zračenje. Ovaj način prijenosa topline ne zahtijeva posredni medij između tijela i u tlu je obično zanemariv pri normalnim atmosferskim temperaturama, osim u slučajevima grubih materijala [21].



Slika 14. Mehanički prijenos topline u ovisnosti o veličini zrna i stupnju zasićenosti (Izvor: [21])



Slika 15. Prikaz načina prijenosa topline u energetskim tunelima (Izvor: [22])

U energetskim tunelima, svi ovi načini prijenosa (slika 15.) igraju ulogu u osiguravanju učinkovite razmjene toplinske energije između sustava cijevi, tla ili stijenske mase i zraka u tunelu, što je važno za održavanje ravnoteže temperature i ukupne energetske učinkovitosti. Dakle, kako bi se osigurala optimalna funkcionalnost i stabilnost energetskih tunela, potrebno je pažljivo razmotriti sve termodinamičke parametre i razviti modele koji točno opisuju međudjelovanja između temperature, količine topline, svojstva materijala i dinamike prijenosa topline u sustavu [21].

4.4. Termohidraulička svojstva tla

Termalne karakteristike tla odnose se na svojstva koja utječu na način na koji tlo apsorbira, prenosi, pohranjuje i oslobađa toplinu. Ključna su za razumijevanje kako tlo reagira na promjene temperature i kako se ponaša u različitim uvjetima, poput klimatskih promjena i gradnje geotermalnih sustava. Termohidraulička svojstva tla [21], koja su usko povezana s njegovim termalnim karakteristikama, odnose se na sposobnost tla da provodi i prenosi toplinu, uzimajući u obzir utjecaj vlage, poroznosti i strukture tla. Ova svojstva dodatno utječu na toplinsko ponašanje tla i ključna su za precizno modeliranje njegovih termalnih odgovora u različitim situacijama.

Toplinska provodljivost (λ) predstavlja mjeru sposobnosti tla za prijenos topline, odnosno brzinu kojom toplina prolazi kroz tlo. Veća toplinska provodljivost ukazuje na brži prijenos topline. Osim utjecaja na naponsko-deformacijska svojstva tla, toplinska provodljivost ima velik značaj u prijenosu geotermalne energije. Na toplinsku provodljivost tla utječu brojni čimbenici, u njih se ubrajaju sastav tla (udio pijeska, gline, organske tvari), vlažnost, stupanj

zasićenosti, kemijski sastav porne vode, gustoća i temperatura. Analiza protoka topline kroz tlo može biti složena zbog poteškoća u definiranju početnih i rubnih uvjeta, kvantificiranju termičkog opterećenja ovisno o vremenu i položaju, nedovoljnog poznavanja termalnih karakteristika tla te njihovih varijacija kroz vrijeme, kao i nehomogenih i anizotropnih termičkih svojstava te povezanosti toplinskih tokova s podzemnim vodama. Ovisno o mineralnom sastavu tla, različiti minerali imaju različitu toplinsku provodljivost. Kvarc ima najveću toplinsku provodljivost, za razliku od njega glineni materijali imaju puno manju toplinsku provodljivost. Voda ima bolju provodljivost topline od zraka, pa se zaključuje da tlo zasićeno vodom i s visokim udjelom kvarca ima najveću toplinsku provodljivost. Bitno je spomenuti permeabilnost, odnosno sposobnost tla da propušta vodu. Ukoliko tlo ima visoku permeabilnost, voda se može brzo kretati kroz njega, što može ubrzati prijenos topline putem advekcije. Tlo i stijene općenito imaju nižu toplinsku provodljivost u usporedbi s drugim materijalima, ali posjeduju visok specifični toplinski kapacitet, što im omogućuje značajan kapacitet za skladištenje topline. Zrak ima toplinsku provodljivost oko 25 puta manju od vode i 100 puta manju od većine minerala, što znači da udio zraka u tlu značajno utječe na ukupnu toplinsku provodljivost. Povećanje zapremine gustoće tla, koje smanjuje udio zraka, obično rezultira boljom toplinskom provodljivošću jer uzorci s većom gustoćom imaju više čvrstih čestica i manje zraka. Stoga zbijanje tla poboljšava prijenos topline između čestica. Krupnozrna tla, zbog manjeg broja kontaktnih točaka između čestica, zahtijevaju manju količinu vode za zasićenje, što značajno povećava njihovu toplinsku provodljivost. Daljnje dodavanje vode zamjenjuje zrak i dodatno povećava toplinsku provodljivost krupnozrnog tla. Zbog toga su suha pješčana tla imaju manju toplinsku provodljivost, dok vlažna ili zasićena tla, poput gline, pokazuju veću toplinsku provodljivost [5, 21].

Količina topline potrebna da se temperatura 1 kg tla poveća za 1 °C pri konstantnom tlaku naziva se specifični toplinski kapacitet (c). Veći specifični toplinski kapacitet znači da je potrebno više energije da bi se temperatura određene mase materijala povisila za određenu temperaturnu razliku (ΔT). Ovisi o sastavu tla, vlažnosti, mineralnom sastavu i gustoći tla. Specifični toplinski kapacitet vode raste s porastom temperature, dok se smanjuje s povećanjem tlaka. Kod poroznih sedimentnih stijena specifična toplina je veća ako su pore ispunjene vodom, jer voda ima veći specifični toplinski kapacitet od zraka ili drugih plinova [21, 23]. Za opisivanje termičkih svojstava geomedija i fluida uz toplinsku provodljivost, specifični toplinski kapacitet bitna je još i toplinska difuzivnost (α), koja predstavlja brzinu promjene temperature u tlu ili tijeku širenja topline [5]. Definira se kao omjer toplinske provodljivosti i produkta gustoće i specifičnog toplinskog kapaciteta tla ($\lambda = \alpha \cdot c \cdot \rho$). Tlo s visokom toplinskom difuzivnošću brzo reagira na promjene temperature, jer se toplina kroz takvo tlo brže širi [1]. Pješčana tla obično imaju veću toplinsku difuzivnost od glinovitih tla

zbog svoje veće toplinske provodljivosti i nižeg toplinskog kapaciteta. Brzina i dubina prodiranja temperaturnih promjena u tlo ili stijenu ovisi o toplinskoj difuzivnosti. S povećanjem sadržaja vode, toplinska difuzivnost tla se obično smanjuje, jer voda povećava specifični toplinski kapacitet, ali istovremeno povećava i toplinsku provodljivost tla. Kod glinovitih tala, toplinska difuzivnost može se povećati s povećanjem vlažnosti do čak 25%. Pješčana tla, zbog veće toplinske provodljivosti i nižeg specifičnog toplinskog kapaciteta, općenito imaju višu toplinsku difuzivnost u odnosu na glinovita tla [21].

Tablica 1. Karakteristične vrijednosti termalnih svojstava (Izvor: [23])

TLO, STIJENA	Toplinska provodljivost λ (W/m ⁰ K)		Specifični toplinski kapacitet c (MJ/m ³ ⁰ K)		Permeabilnost K _f (m/s)
	dry	saturated	dry	saturated	
Glina	0.2-0.3	1.1-1.6	0.3-0.6	2.1-3.2	10 ⁻¹⁰ -10 ⁻⁸
Mulj	0.2-0.3	1.2-2.5	0.6-1.0	2.1-2.4	10 ⁻⁸ -10 ⁻⁵
Pijesak	0.3-0.4	1.7-3.2	1.0-1.3	2.2-2.4	10 ⁻⁴ -10 ⁻³
Šljunak	0.3-0.4	1.8-3.3	1.2-1.6	2.2-2.4	10 ⁻³ -10 ⁻¹
Kalcit	3.6				
Kvarc	7.7				
Zrak	0.024				
Voda	0.57				

4.5. Utjecaj temperaturnih promjena na geotehničke karakteristike tla

4.5.1. Deformacije tla pri temperaturnim promjenama

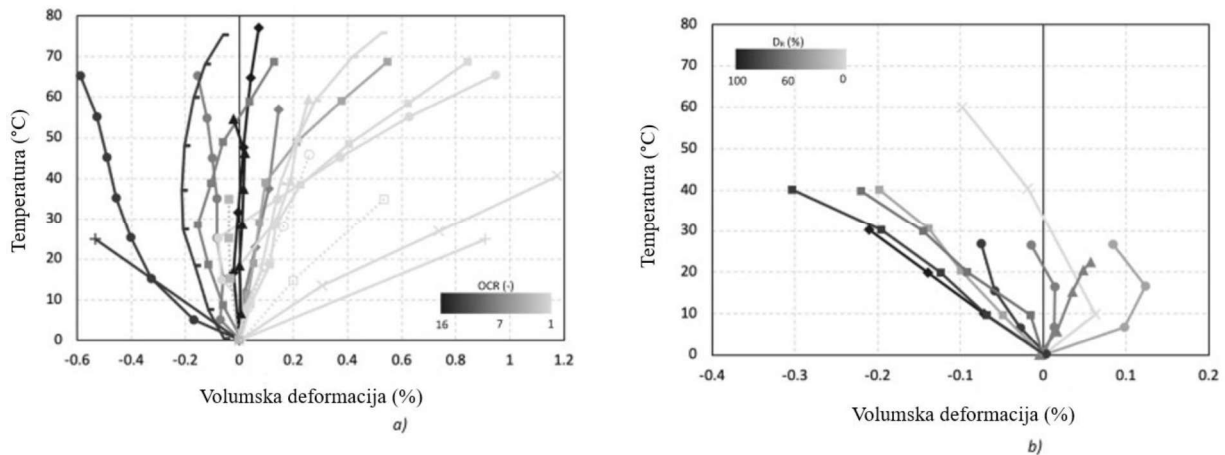
Deformacije i prijenos topline su pojave koje proizlaze iz gradijenta fizikalnih veličina i mogu se promatrati neovisno jedna o drugoj. Deformacija, koja se odnosi na mehaničko ponašanje materijala, često je povezana s utjecajem mehaničkih opterećenja, dok je prijenos topline, koji opisuje termičko ponašanje materijala, povezan s termičkim opterećenjima. Mehaničkim opterećenjem mogu biti uzrokovane volumne i devijatroske deformacije, dok se toplinskim opterećenjem uzrokuju samo volumne deformacije [1]. Zagrijavanje tla uzrokuje širenje svih njegovih sastavnica, uključujući čvrste čestice i vodu u potpuno zasićenim uvjetima, prema koeficijentu toplinske ekspanzije i veličini promjene temperature. Nasuprot tome, hlađenje dovodi do skupljanja svih sastavnica tla. Međutim, zagrijavanje može izazvati i širenje i skupljanje tla, ovisno o uvjetima. Iako se fenomeni deformacije i prijenosa topline mogu proučavati zasebno, oni su međusobno povezani, slično kao i prijenos topline i mase. Prijenos topline može utjecati na deformaciju materijala, baš kao što i deformacija može utjecati na prijenos topline, što ukazuje na međusobnu zavisnost termičkih i mehaničkih svojstava materijala. Pod neizotermnim uvjetima (uvjeti u

kojima se temperatura mijenja unutar sustava ili materijala), deformacijski fenomeni karakteriziraju energetske građevine kroz termomehanički odgovor materijala. Tlo djeluje kao medij kroz kojim se prenose opterećenja nastala u energetskom tunelu preko njegovog sučelja, odnosno sučelja tla i strukture. Zbog višestruke uloge energetskih tunela, tlo i sučelja tla i strukture izloženi su i termičkim i mehaničkim opterećenjima. Priroda tih opterećenja, zajedno s međudjelovanjima koja utječu na ponašanje materijala, može uzrokovati promjene u naprezanju, deformacijama ili drugim mehaničkim svojstvima tla pa tako čini termohidromehaničko ponašanje tla te sučelja tla i strukture ključnim za analizu i projektiranje energetskih geotehničkih konstrukcija [1].

Efektivno naprezanje ključan je faktor za razumijevanje ponašanja tla pod toplinskim i mehaničkim utjecajima, budući da se fizičko-kemijske interakcije među česticama tla mijenjaju s promjenom temperature. Porast temperature uzrokuje širenje vode u porama tla, povećavajući porni tlak i smanjujući efektivno naprezanje, što može rezultirati dodatnom deformacijom tla.

U normalno konsolidiranim (NC) uvjetima, toplinske deformacije uzrokuju skupljanje tijekom zagrijavanja, dok se te deformacije ne oporavljaju prilikom hlađenja, što može dovesti do nepovratnih deformacija, poznatih kao toplinski kolaps, do 6% pri promjenama temperature do 80°C. Nasuprot tome, u prekomjerno konsolidiranim (OC) tlima, efektivno naprezanje ostaje stabilnije, omogućavajući reverzibilne volumne promjene pri toplinskim ciklusima. Volumne deformacije mogu dosegnuti do 20,5% za iste temperaturne promjene, što je karakteristično za mnoge materijale poput metala i betona [1]. Promjene u naprezanju prekonsolidacije također utječu na stupanj prekonsolidacije (OCR), koji se definira kao omjer najvećeg vertikalnog napona u prošlosti (σ_p) i onoga kome je tlo izloženo u sadašnjem trenutku (σ_v'), a prikazuje povijest naprezanja tla i također igra ključnu ulogu u toplinskim deformacijama tla. U prekonsolidiranim tlima (s višim OCR), efektivno naprezanje ostaje stabilnije i deformacije pri toplinskim ciklusima su obično reverzibilne. Nasuprot tome, u normalno konsolidiranim tlima, gdje je OCR niži, toplinske deformacije mogu uzrokovati nepovratne promjene [24]. Više temperature mogu smanjiti poroznost i povećati gustoću tla, što utječe na stabilnost i kapacitet tla za podršku opterećenju. Kod sitnozrnatih tla, povećanje relativne gustoće može pojačati toplinske deformacije (slika 16.). S druge strane, kod krupnozrnatih tla, toplinski učinci mogu varirati. Eksperimentalni rezultati pokazuju da zagrijavanje krupnozrnatih tla u dreniranim uvjetima obično uzrokuje širenje volumena, dok hlađenje dovodi do skupljanja. Međutim, dostupni podaci ukazuju da zagrijavanje može također izazvati smanjenje volumena zbog rubnih efekata eksperimentalnih metoda. Gusta krupnozrna tla, poput pijeska Toyoura [1], mogu pokazati značajno širenje volumena pri zagrijavanju, dok gusta do rahla krupnozrna tla obično pokazuju početno skupljanje i

naknadno širenje, s toplinski induciranim volumnim deformacijama do 20,1% za temperaturne promjene do približno 530 °C.



Slika 16. Prikaz utjecaja a) OCR u sitnozrnim tlima i b) D_r u krupnozrnim tlima na volumske deformacije pri zagrijavanju (Izvor: [24])

Ponašanje tla pod višestrukim toplinskim ciklusima pokazuje složenost, gdje se nakon prvog ciklusa može primijetiti skupljanje, dok kasniji ciklusi mogu uzrokovati širenje ili skupljanje ovisno o stanju tla, temperaturi i relativnoj gustoći. Ovo ponašanje upućuje na kompleksne interakcije između toplinskih i mehaničkih opterećenja, što je ključno za precizno modeliranje i analizu termohidromehaničkog ponašanja tla u projektiranju geotehničkih konstrukcija.

4.5.2. Utjecaj temperaturnih promjena na plastičnost tla

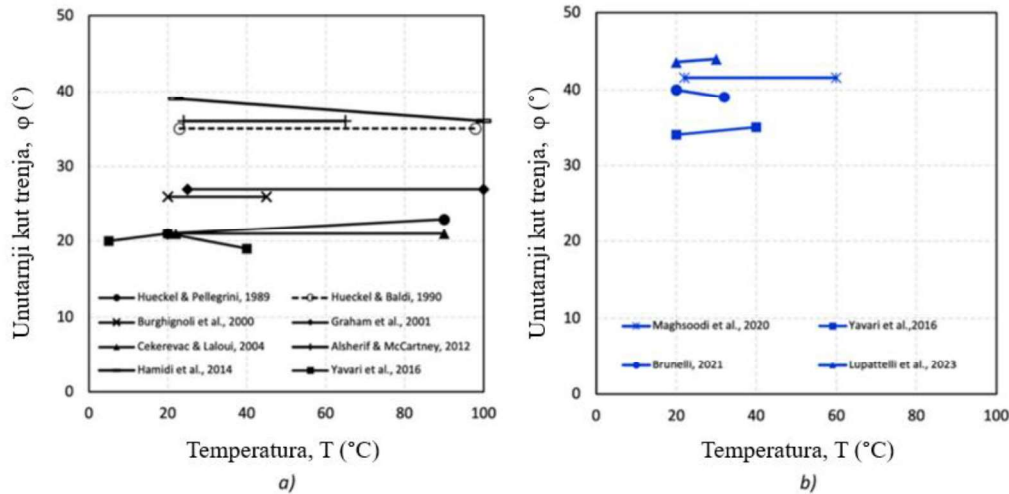
Granica tečenja tla, koja se opisuje kao površina u dvodimenzionalnom prostoru koji povezuje srednje efektivno i devijatorsko naprezanje, može se smanjiti s porastom temperature [1]. Smanjenje granice tečenja nije jednako u svim uvjetima, već ovisi o vrsti tla, stupnju zagrijavanja i povijesti naprezanja, a povezano je s toplinskim omekšavanjem tla. Kada se tlo zagrijava, može doći do promjene u granici tečenja zbog promjena u toplinskoj dinamici i mehaničkim svojstvima tla. Povećanje temperature može uzrokovati omekšavanje tla (tlo postane manje čvrsto i sklono daljnjim deformacijama), što može rezultirati većim plastičnim deformacijama pod istim opterećenjem. Visoke temperature mogu također uzrokovati odstupanja od pravila tečenja, koje predviđa da su vektori prirasta plastičnih deformacija okomiti na granicu tečenja. Takva odstupanja mogu promijeniti način na koji se tlo ponaša pod opterećenjem, što može utjecati na granicu tečenja tla, odnosno na nivo naprezanja pri kojem tlo prelazi iz elastičnog u plastično stanje. Promjene u granici tečenja mogu utjecati na stabilnost i ponašanje tla u stvarnim uvjetima opterećenja.

4.5.3. Utjecaj temperaturnih promjena na parametre čvrstoće

Temperatura može značajno utjecati na čvrstoću tla kroz različite mehanizme. Kada se tlo izloži toplinskim opterećenjima, temperatura može uzrokovati promjene u poroznosti, svojstvima vode u porama, ali i u čvrstoći i krutosti tla. Ove promjene mogu biti povezane s promjenama u granici tečenja tla, posmika i plastičnih deformacija.

Utjecaj temperature na smicanje tla pokazuje raznolike rezultate. U sitnozrnatim tlima [1], temperaturne promjene mogu uzrokovati promjene u omjeru pora, što može dovesti do smanjenja ili povećanja smicanja. Za prekonsolidirana tla, visoka temperatura može uzrokovati smicanje pri nižem devijatorskom naprezanju, dok za normalno konsolidirana tla temperatura može uzrokovati kombinaciju termičkog omekšavanja i otvrdnjavanja deformacija (pod utjecajem topline i deformacija, tlo povećava svoju čvrstoću ili otpornost na daljnje deformacije). Ovisno o početnim uvjetima tla i temperaturnim ciklusima, smicanje može se značajno promijeniti. U krupnozrnim tlima poput pijeska [1], istraživanja su pokazala da su parametri čvrstoće manje osjetljivi na temperaturne varijacije u usporedbi sa sitnozrnatim tlima. Eksperimentalni rezultati pokazali su minimalne promjene u kutu trenja pijeska s porastom temperature. Sve ove promjene mogu otežati precizno modeliranje ponašanja tla, posebno u situacijama gdje su prisutne značajne temperaturne varijacije, što je ključno za projektiranje i analizu građevinskih objekata i geotehničkih struktura izloženih promjenama temperature.

Eksperimentalni podaci o utjecaju temperature na kut trenja pri uvjetima konstantnog volumena za krupnozrna i sitnozrna tla ukazuju na to da temperatura može uzrokovati promjene u ovom parametru. Istraživanja [1] su pokazala da se kut trenja za neke gline blago mijenja s temperaturom, dok je za druge gline neosjetljiv na temperaturne promjene. Međutim, promjene kuta trenja pri uvjetima konstantnog volumena s temperaturom obično su male i iz praktički zanemarive. Ova tvrdnja usklađena je s zaključcima istraživača pa se zaključuje da se kut trenja tla smatra neovisnim o temperaturi, što se može uočiti na slici 17., gdje su linije varijacije kuta trenja minimalnih nagiba s obzirom na promjenu temperature za različita ispitana sitnozrna i krupnozrna tla. Ova činjenica je važna za procjenu nosivosti energetskih geotehničkih konstrukcija, budući da matematičke formulacije koje se koriste u tim analizama često ovise o ovom parametru.



Slika 17. Utjecaj temperature na kut trenja za a) sitnozrna tla i b) krupnozrna tla (Izvor: [24])

4.5.4. Utjecaj temperaturnih promjena na krutost tla

U praksi, temperaturne promjene povezane s geotermalnim radom obično nemaju značajan utjecaj na većinu tla. Ipak, primijećene su određene varijacije u svojstvima materijala koje je važno uzeti u obzir za napredne analize ponašanja tla. Kada je riječ o stišljivosti tla, temperatura obično ne utječe značajno na ključne parametre poput indeksa stišljivosti (C_c), indeksa rekompresije (C_r) i indeksa bubrenja (C_s). Ovi parametri, određeni iz odnosa između srednjeg efektivnog naprezanja i poroznosti, ostaju uglavnom nepromijenjeni s promjenama temperature. Istraživanja pokazuju da se nagib linije stišljivosti ne mijenja značajno s temperaturom, dok su indeks rekompresije i indeks bubrenja neosjetljivi na temperaturne promjene. S druge strane vrijednosti dobivene na temelju indeksa stišljivosti i bubrenja, indeks plastične krutosti (β_p) blago se smanjuje s porastom temperature, dok se volumenski modul (K_{ref}) blago povećava. Ove varijacije mogu poboljšati točnost analiza za energetske građevine, ali zanemarivanje ovih promjena je prihvatljivo za većinu projektiranja [1]. Youngov modul elastičnosti (E), koji predstavlja mjeru krutosti tla, pokazuje minimalnu osjetljivost na temperaturne promjene kod krupnozrnih tla, dok kod sitnozrnih tla može doći do varijacija, često blagog povećanja zbog toplinskog kolapsa. Varijacije Youngovog modula elastičnosti na promjenu temperature događaju se zbog različitih stanja konsolidacije. Uzimanje u obzir mogućih varijacija Youngovog modula tla s temperaturom može poboljšati točnost analiza u energetskim građevinama, no zanemarivanje tih promjena obično je prihvatljivo za praktične potrebe projektiranja. Odnosno, osim ako se radi o posebno osjetljivim tlima, korištenje konstantne vrijednosti Youngovog modula bez obzira na temperaturu smatra se prikladnim [1].

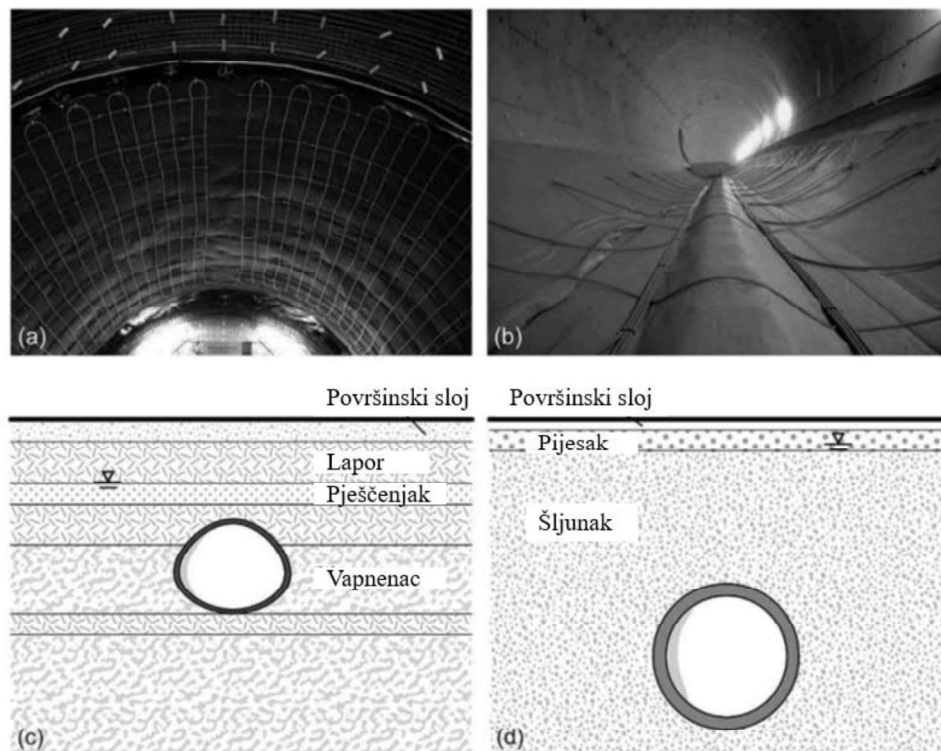
5. PRIMJERI ENERGETSKIH TUNELA

Prema podacima iz 2023. godine postoji 19 projekata energetske tunela širom svijeta [9], većinom u Istočnoj Aziji i Europi, koji uključuju operativne i pilot-projekte te one koji su prošli preliminarne procjene ili studije izvodljivosti, ali još nisu implementirani. Novi projekti se neprestano pokreću i neki su još uvijek u razvoju, dok se svake godine, kao dio urbanog razvoja i infrastrukture, širom svijeta grade novi tuneli. Dodatno ulaganje u integraciju geotermalnog sustava u tunele relativno je malo u usporedbi s ukupnim troškovima projekta, a prihodi dolaze od prodaje prikupljene energije. S obzirom na to da je životni vijek tunela 100 godina ili više, takva dugoročna operativna potreba može ublažiti izazove povezane s dugim razdobljem povrata ulaganja [12]. U ovom poglavlju prikazani su primjeri realiziranih energetske tunela te primjene tehnologije u praksi.

5.1. Primjeri prvih izgrađenih energetske tunela

Među prve izgrađene energetske tunele u svijetu ubrajaju se Stuttgart-Fasanenhof tunel u Njemačkoj i Jenbach tunel u Austriji. Stuttgart-Fasanenhof tunel, koji se koristi za prigradski dvokolosijski metro, primjer je hladnog tunela dugačkog 380 metara, a unutar njega nalazi se termoaktivna dionica od 20 metara postavljen 2011. godine. Tunel se nalazi približno 10 metara ispod površine i okružen je laporom i sedimentnom stijenom (slika 18.). Na duljini od otprilike 800 metara opremljen je cijevima, postavljenih u petljama, s termoaktivnim područjem površine oko 360 m². To područje sastoji se od visokotlačnih polietilenskih cijevi promjera 525 mm [1, 12]. Tunel je bio opremljen brojnim sensorima za mjerenje temperature zraka u tunelu, temperature obloge tunela i temperature tla, uz to mjeren je volumenski protok, ulazne i izlazne temperature u cijevima tunnelske obloge. Cilj mjerenja bio je testirati toplinsku učinkovitost, potvrditi numeričke modele i razumjeti učinak toplinskih opterećenja na tlo. Prva stacionarna mjerenja na fiksnom ulazu u cijevi pokazala su varijacije između 5 i 37 W/m² toplinske energije po području izmjene topline [12]. Tunel, koji sadrži dva odvojena termoaktivna segmenta izravno povezana sa stanicom koja uključuje dizalicu topline, električni grijač, izmjenjivač topline za hlađenje i glavnu pumpu za cirkulaciju tekućine, služio je kao testno postrojenje tijekom četiri godine, od 2011. do 2015. Rezultati testiranja pokazuju da temperatura izlaza i stopa ekstrakcije energije u načinu hlađenja ovise o temperaturi zraka u tunelu. Kako se temperatura tunela povećava, stopa ekstrakcije energije pada, a povećanje protoka smanjuje temperaturne promjene. Pri

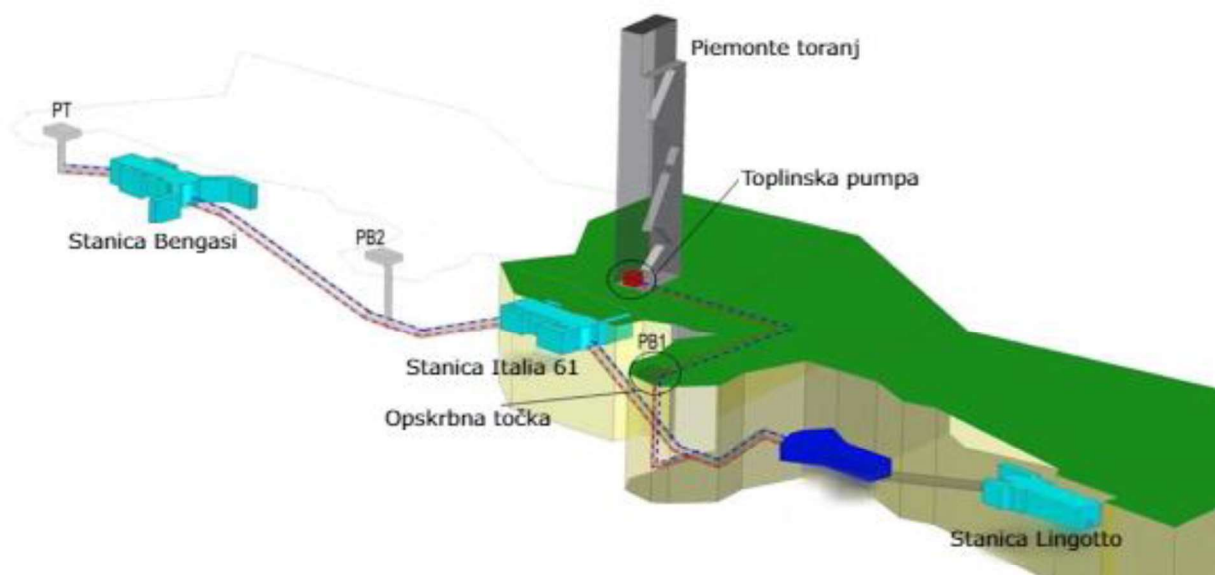
ciklusima grijanja utvrđeno je da nema utjecaja na tlo, a toplinski tok lagano pada u večernjim satima. Tunnel utječe na toplinsko polje u okolnom tlu, povećavajući temperaturu za do $5,5^{\circ}\text{C}$ unutar prstena širine 7 m, s dodatnim porastom od 3°C u neposrednoj blizini. Rezultati potvrđuju da toplinska eksploatacija ima minimalan utjecaj na okolno tlo u usporedbi s antropogenim toplinskim tokom te da je razumijevanje klimatskih promjena u tunelu ključno za projektiranje geotermalnih postrojenja. Geotermalni izmjenjivači topline u tunelu imaju značajan utjecaj na toplinsku učinkovitost sustava [1, 22]. Za razliku od Stuttgart-Fasanenhof tunela koji je služio samo kao testno postrojenje, u navedenom tunelu Jenbach, termoaktivna dionica je i dalje u funkciji i služi za grijanje zgrade gradskog vijeća u Jenbachu. Tunnel Jenbach, primjer je toplog tunela i dio je željezničkog tunela Brenner Base, dužine je 3740 metara i ima termoaktivnu dionicu dugu 54 metra, koja je instalirana 2008. godine. Tunnel ima nadsloj od oko 27 metara šljunka. Održavanje tunela obuhvaća sustav apsorbera i cijevi unutar glavnog tunela, dok je gradsko vijeće odgovorno za cijeli sustav dizalice topline. Jenbach tunnel opremljen je cijevima postavljenim u petljama na ukupnoj duljini od oko 4700 metara, a termoaktivno područje obloge iznosi približno 2200 m^2 . Ovdje su korištene visokotlačne polietilenske cijevi promjera 525 mm. Tunnel Jenbach je projektiran za opskrbu zgrade općinskog vijeća toplinskom energijom od oko 15 kW. Preliminarna terenska ispitivanja pokazala su toplinske snage između 10 i 20 W/m^2 [1, 12].



Slika 18. (a) energetski tunel Stuttgart-Fasanenhof, (b) energetski tunel Jenbach, (c) skica relevantnog vertikalnog presjeka energetskog tunela Stuttgart-Fasanenhof i (d) skica relevantni vertikalni presjek Jenbachovog energetskog tunela (Izvor: [1])

5.2. Linija 1 metroa u Torinu

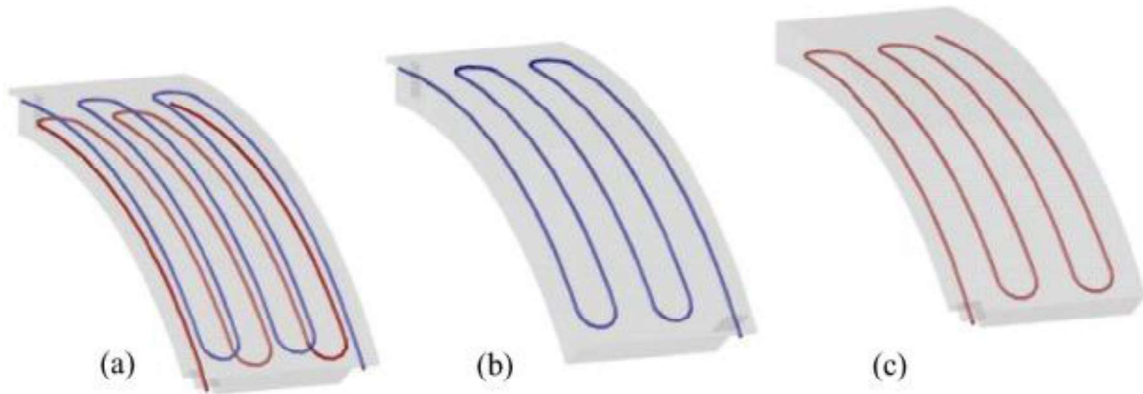
Linija 1 metroa u Torinu primjer je plitkog tunela koji povezuje sjeverozapadni i jugoistočni dio grada, od postaje Ferni do multifunkcionalnog centra Lingotto s ukupnom duljinom od 13,4 km i 21 postajom. Izgradnja linije započela je 2000. godine, a dijelovi su postepeno otvarani od 2006. do 2011. godine kada je otvoren posljednji dio prema Lingottu. Tunel leži u potpunosti ispod podzemne vode, a smjer protoka podzemne vode je okomit na os tunela što čini povoljne uvjete za poboljšanje toplinske izmjene. U blizini tunela (slika 19.) je predviđen toranj visok 220 m [8] u kojem će biti uredi i sjedište regionalne vlade Piemonta. Stoga je istražena mogućnost iskorištavanja topline za spomenutu zgradu. Pomoću TBM-a kopao se tunel koji je dug 100 m, promjera približno 8 m i teži više od 400 t. Prosječna dubina tunela iznosi 20 m. Iskop se odvijao ispod razine podzemne vode. U smislu toplinskih karakteristika, tunel se može svrstati u hladni tip jer je ventilacija zajamčena brojnim bunarima koji omogućuju ulazak vanjskog zraka u tunel pa mu je temperatura zraka slična temperaturi na površini tla. Podaci praćenja iz postojećeg metro tunela potvrđuju ovu karakteristiku. Tunelska obloga, debljine 30 cm, sastoji se od šest prefabriciranih betonskih segmenata koje postavlja stroj TBM i tijekom kopanja, osigurava nepropusnost podzemne vode. Kako bi se postigao potpuni kontakt sa zemljom, ubrizgava se cementna pjena, a segmenti su dodatno zapečaćeni da spriječe prodor vode, s obzirom da se cijeli iskop odvija ispod razine podzemne vode [25].



Slika 19. Metro Torino od stanice Bengasi do stanice Lingotto (Izvor: [25])

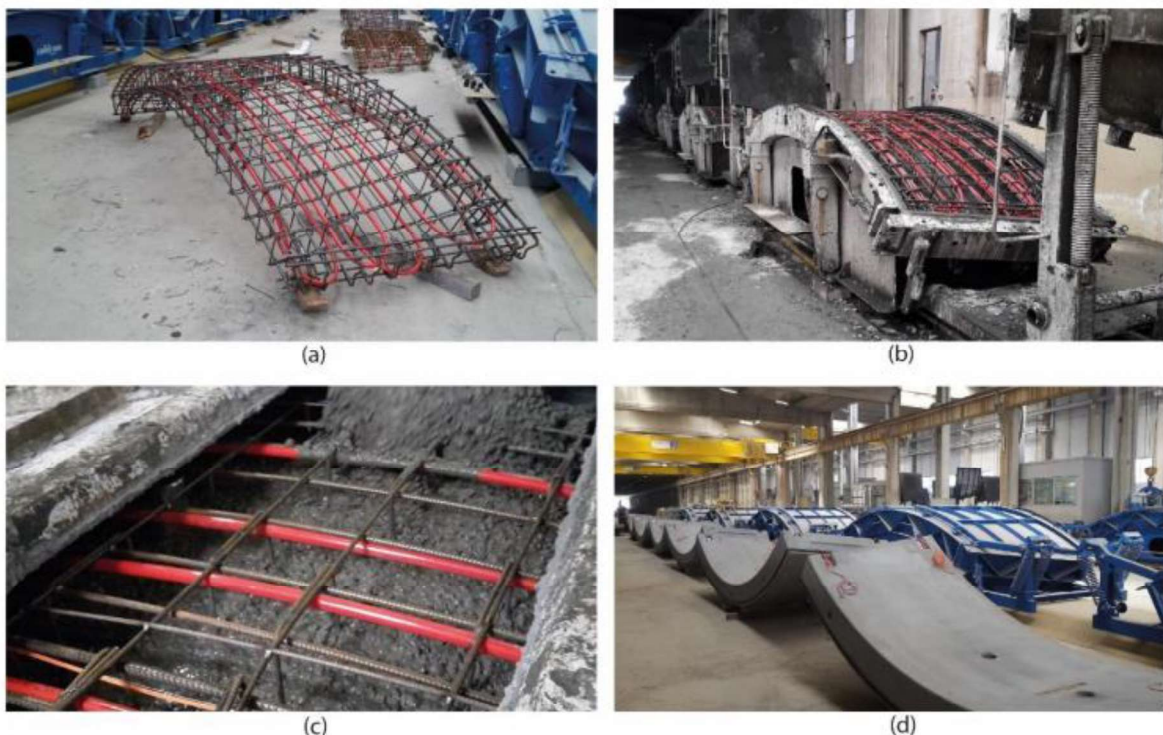
Južno proširenje od Lingotta do Piazza Bengasi koje je trenutno u izgradnji, dužine je 1,9 km, s 2 ventilacijska okna i jednim završnim oknom na kraju trase, a na novom dijelu linije nalazi se križanje koje omogućuje daljnju izgradnju pruge do željezničke stanice Lingotto. Ovaj odjeljak metroa je razmatran zato što pruža dobru priliku za testiranje inovativnog energetskeg segmenta pod nazivom ENERTUN predstavljenog na Politecnico di Torino. Postrojenje u svrhu istraživanja inovativnog energetskeg segmenta ENERTUN-a postavljeno je u tunelu 40 m sjeverno od stanice Bengasi. Ova lokacija je uvjetovana radovima na gradilištu i odabrana je kako bi na iste imala što manji utjecaj. Prototip ugrađen u cilju proučavanja termičke aktivacije tunela s planom korištenja sustava za grijanje i hlađenje susjednih zgrada [8, 10]. Glavni zadaci obuhvaćali su projektiranje i optimizaciju geotermalnog postrojenja, procjenu količine iskoristive topline i analizu utjecaja termičke aktivacije tunela na okolno tlo.

U tu svrhu razvijena su dva modela konačnih elemenata, koji su korišteni u termo-hidro analizama. Za proučavanje učinkovitosti sustava putem simulacije dijela tunelske obloge izrađen je 3D model, a za ispitivanje održivosti tehnologije i njezinog utjecaja na okoliš korišten je 2D model velikih razmjera torinskog vodonosnika [8]. Ostvareno je smanjenje gubitka tlaka od 20% do 30% za svaki tunelski prsten u usporedbi s ranijim segmentima, poboljšana je učinkovitost, osobito u uvjetima kada je protok podzemnih voda okomit na os tunela zahvaljujući inovativnoj geometriji cijevi, koje su postavljene okomito na os tunela. Uz korištenje istih materijala, geometrije i uvjeta tla, došlo je do povećanja toplinske izmjene za 5% do 10%. Još jedna prednost ENERTUN – a je njegova fleksibilnost pa su predložene tri različite konfiguracije (slika 20.), a ovisno o potrebama može se usvojiti najprikladnija konfiguracija kako bi se optimizirala razmjena topline. GROUND konfiguracija, odnosno konfiguracija tla, projektirana je za izmjenu topline s tлом i prikladna je za daljinsko grijanje i hlađenje u urbanim područjima. Druga, AIR konfiguracija ili konfiguracija zraka omogućuje izmjenu topline sa zrakom unutar tunela i pogodna je za hlađenje vrućih tunela korištenjem unutarnje proizvedene topline ili topline okolnog tla. Može se koristiti i u dubokim tunelima, gdje geotermalni gradijent tla može uzrokovati da se unutarnja temperatura zraka tunela podigne iznad granica prihvatljivosti. Konfiguracija GROUND&AIR ili tla i zraka je kombinirano rješenje koje u isto vrijeme zadovoljava navedeno prvo i drugo pojedinačno rješenje. Ova prilagodljivost omogućava odabir optimalne konfiguracije ovisno o specifičnim zahtjevima projekta, čime se dodatno optimizira izmjena topline [8, 10].



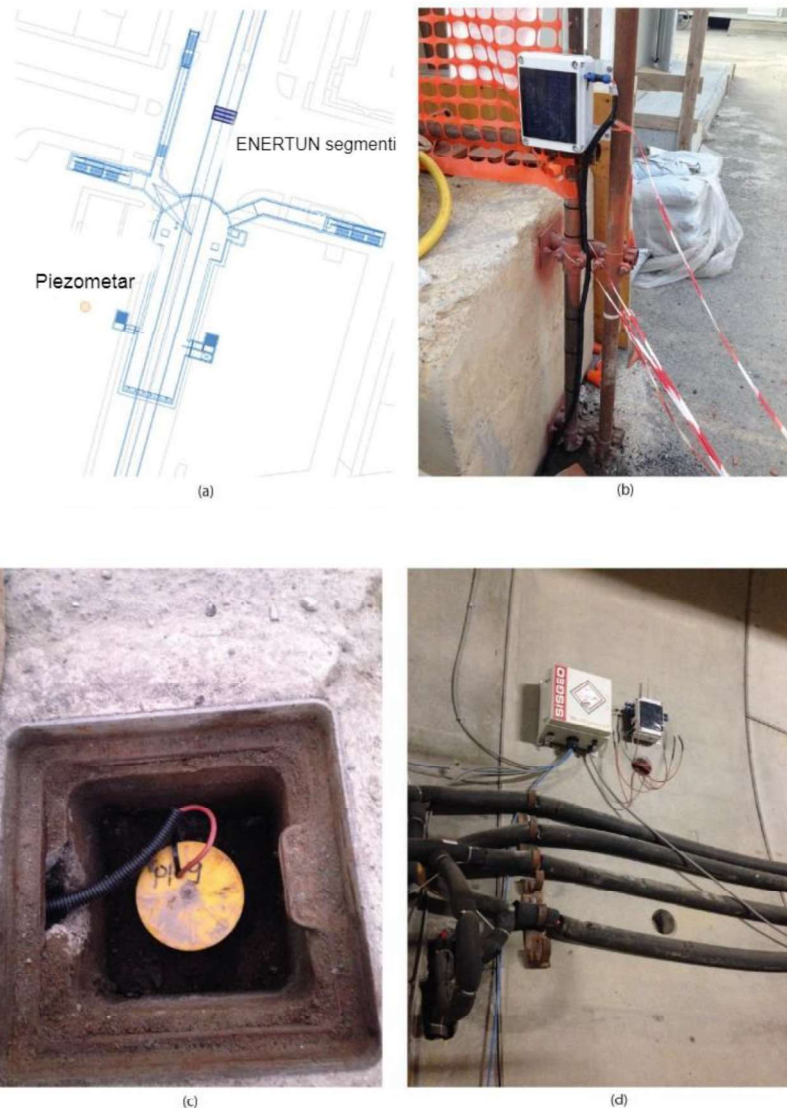
Slika 20. a) ENERTUN konfiguracija GROUND b) ENERTUN konfiguracija AIR c) ENERTUN konfiguracija GROUND&AIR (Izvor: [8])

Prototip na Liniji 1 metroa u Torinu sastojao se od dva prstena opremljena konfiguracijom tlo i zrak [25]. Svaki prsten sastojao se od pet segmenata i svi su bili termički aktivirani. Postavljene su dvije mreže cijevi, jedna blizu gornje površine, a druga blizu donje, što je omogućilo ispitivanje sve tri različite konfiguracije. Korištene su cijevi vanjskog promjera 20 mm, debljine 2 mm, osim cijevi za dovod i povrat koja je veća i deblja. Materijal od kojeg su izrađene je rebrasti polietilen PE-Xa [8]. Cijevi su za armaturu vezane ručno u tvornici.



Slika 21. a) Armaturni koš s ugrađenim cijevima b) Armaturni koš u kalupu segmenta c) Betoniranje segmenta d) Betoniran segment (Izvor: [25])

Postavljen je i sveobuhvatan sustav praćenja (slika 22.) kako bi se pratila učinkovitost energetske tunela. Unutar dva prstena ENERTUN-a, ugrađen je posebno projektiran sustav praćenja napreznja, deformacija i temperature [25]. Temperatura podzemne vode se također neprekidno mjerila pomoću sonde koja je bila unutar bunara piezometra na gradilištu. Postojale su i dodatne sonde za mjerenje temperature zraka unutar tunela i na površini segmenata.



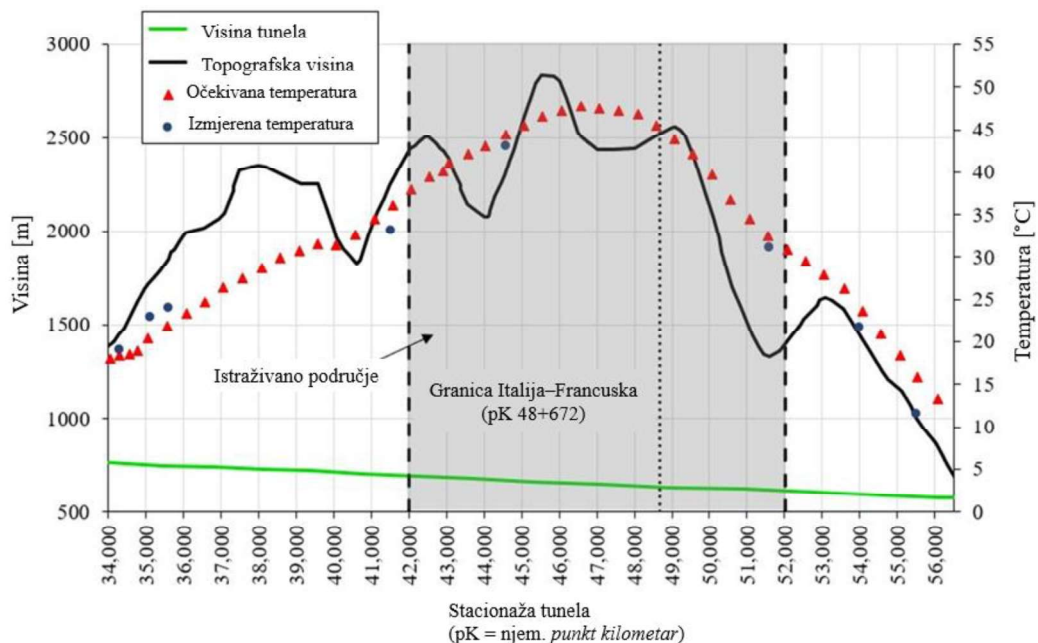
Slika 22. a) Lokacija piezometra na gradilištu b) Mjerenje temperature c) Bušotina d) dodatne sonde za mjerenje temperature zraka unutar tunela i na površini (Izvor: [25])

Nakon što je istraživanje pokazalo pozitivne rezultate, utvrđeno je da je termička aktivacija obloge tunela metroa u Torinu posebno korisna. Ključni razlog je značajna brzina protoka podzemnih voda koje teku okomito na os tunela [8], čime se omogućuje stalno toplinsko punjenje tla koje poboljšava učinkovitost prijenosa topline. Istraživanjem je utvrđeno da bi energetske sustav tunela bio sposoban zadovoljiti zahtjeve za grijanje i hlađenje predviđene

zgrade u blizini tunela. Troškovi termičke aktivacije tunela bili bi manji od 1% ukupnih troškova cijelog projekta, što je 41% manje u odnosu na troškove upotrebe vertikalnih pilota i toplinskih pumpi [25]. Osim toga, utjecaj na temperaturne varijacije okolnog tla zbog protoka podzemnih voda je minimalan, s promjenama unutar 5°C na udaljenosti od 10 metara od konture tunela, a te promjene se potpuno vraćaju u normalu nakon cjelogodišnjeg ciklusa.

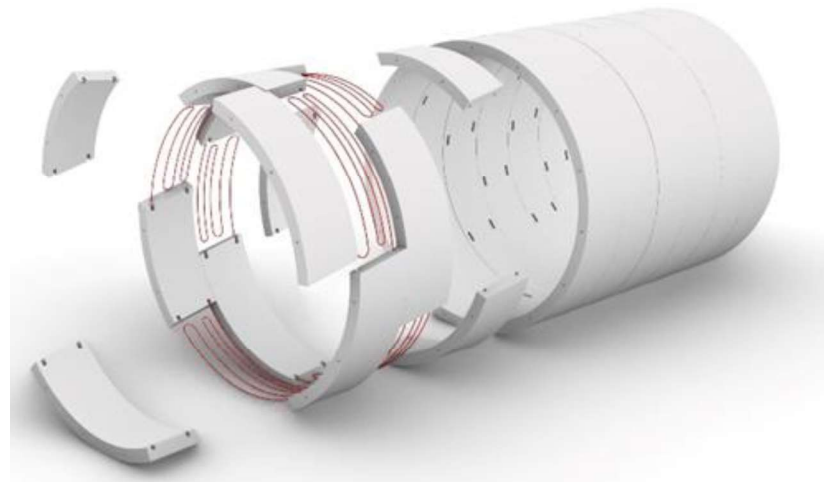
5.3. Tunel nove željezničke pruge Torino – Lyon

Kao primjer primjene dubokog hlađenja u tunelima [8], kao alternativa sustavima ventilacije razmatrana je opcija termičke aktivacije tunela u kombinaciji s ENERTUN tehnologijom, za novu željezničku prugu Torino – Lyon. Ova infrastruktura će povezati Italiju i Francusku, prolazeći kroz Alpe i suočavajući se s izuzetnim klimatskim uvjetima. Temperatura u ovom području može doseći do 47°C zbog visokog opterećenja stijena u masivu Ambin, gdje se dubina može penjati do 2500 m [26]. Ključna komponenta projekta je tunel koji će preći Alpe između doline Susa u Pijemontu i Maurienea u Savoiji. Kada bude završen, bit će ovo najduži željeznički tunel na svijetu, dug 57,5 km. Iskop je planiran uz pomoć TBM (tunelske bušilice) s blatom, osim prvih 350 – 400 m na strani Susa. TBM bušilica s blatom stvara tlak veći od hidrostatskog tlaka podzemne vode, čime se sprječava prodor vode u tunel. Analiza geotermalnog profila tunela pokazuje da temperatura u središtu masiva Ambin doseže 47°C . Ovi uvjeti omogućavaju iskorištavanje geotermalne energije koja nastaje zbog visokih temperatura stijena i zraka unutar tunela.



Slika 23. Geotermalni profil dijela tunela na željezničkoj pruzi Torino - Lyon (Izvor: [26])

ENERTUN konfiguracija AIR, koja se koristi u ovom sustavu prilagođena je uvjetima u središnjem dijelu tunela, gdje se bilježe najviše temperature. Ova konfiguracija uključuje cijevne krugove integrirane u betonske segmente tunela koji se nalaze na intradosu, čime se omogućuje učinkovita razmjena topline sa zrakom unutar tunela [26].

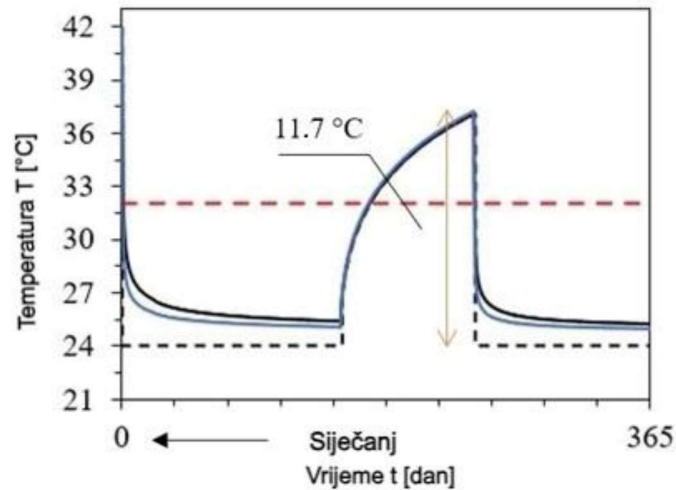


Slika 24. 3D konfiguracija ENERTUN sustava (Izvor: [26])

ENERTUN sustav omogućava snižavanje temperature u tunelu s trenutne na radnu temperaturu koja iznosi najviše 32 °C. Toplina koja se akumulira tijekom procesa hlađenja tunela može se prenijeti do portala tunela i koristiti za energetske potrebe u okolini [26]. Istražene su četiri varijante radnih uvjeta (slika 26.):

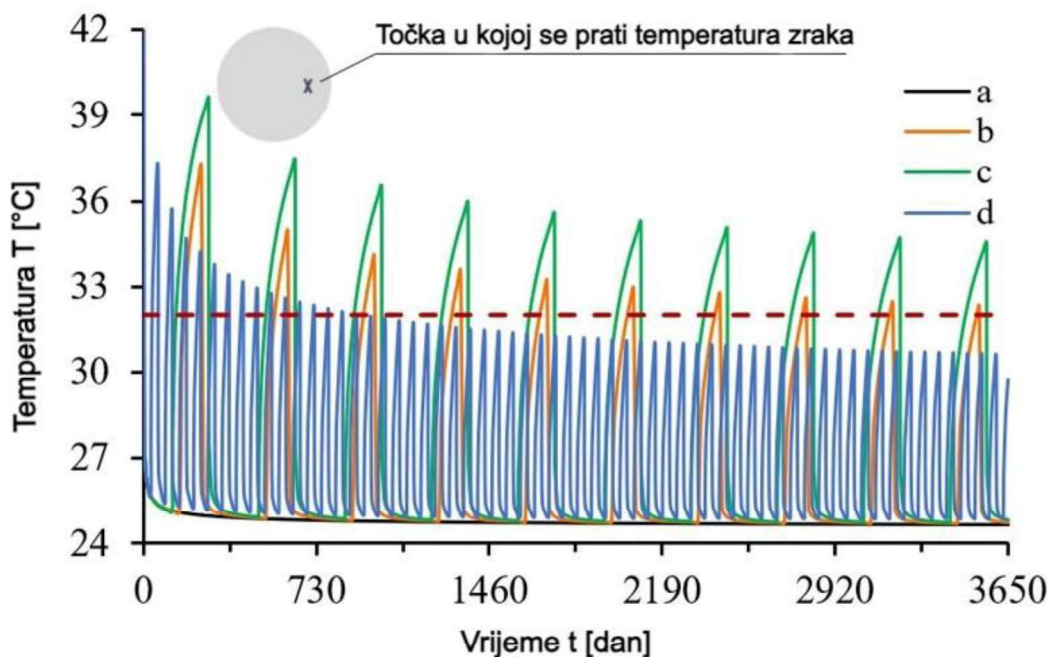
- a) geotermalni izmjenjivač topline aktivan je tijekom cijele godine,
- b) geotermalni izmjenjivač topline je suspendiran tijekom ljetne sezone (tri mjeseca),
- c) geotermalni izmjenjivač topline je suspendiran tijekom duljeg razdoblja (pet mjeseci od svibnja do rujna),
- d) geotermalni izmjenjivač topline se aktivira ciklički mjesečno (s uključivanjem i isključivanjem toplinske pumpe s trajanjem ciklusa od 30 dana)

Sezonsko aktiviranje geotermalnih izmjenjivača topline ključno je za očuvanje izvora, jer bi stalno i neprekidno djelovanje moglo dovesti do iscrpljivanja resursa i dugoročnog smanjenja učinkovitosti toplinske pumpe. Rješenje za ovaj problem je uvođenje privremenih pauza koje omogućuju ponovno termičko punjenje tla [26]. Navedene varijante radnih uvjeta (pod a), c) i d)) su korištene pri modeliranju u poglavlju 6. kako bi se potvrdio utjecaj temperaturnih promjena na primjeru tla. Kada je geotermalni izmjenjivač topline suspendiran (radni način b), što je prikazano na slici 25., temperatura unutar tunela se povećava za oko 11,7 °C. Zbog navedenog, preporučljivo da geotermalni izmjenjivač topline radi kontinuirano, posebno tijekom prve godine uporabe tunela, kako bi se temperatura unutar tunela održala unutar prihvatljivih granica.



Slika 25. Prikaz radnog načina kada je geotermalni izmjenjivač topline suspendiran (Izvor: [26])

Za preliminarno istraživanje koje bi ocijenilo dugoročnu učinkovitost geotermalnog sustava, provedene su analize koje obuhvaćaju desetogodišnje razdoblje i pokazuju da unutarnje temperature zraka manje rastu kada je geotermalni izmjenjivač topline suspendiran. Ukoliko je izmjenjivač topline suspendiran tri mjeseca tijekom ljetne sezone, temperatura u posljednjoj godini analize može porasti za 7,3 °C, što je niže u odnosu na 11,7 °C zabilježenih u kratkoročnoj analizi. Važno je napomenuti da maksimalna granica temperature od 32 °C ipak može biti prekoračena. U slučaju kada je geotermalni izmjenjivač topline aktiviran ciklički mjesečno, nakon nešto više od dvije godine temperatura bi se održavala ispod maksimalne vrijednosti [26].



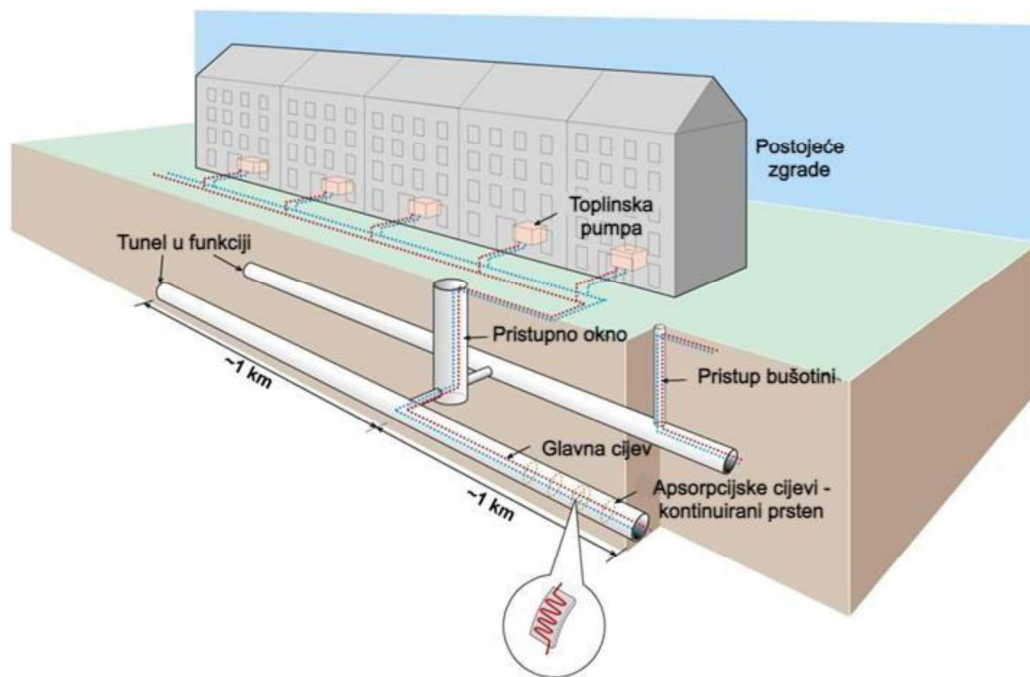
Slika 26. Prikaz radnog načina sve četiri vrste radnih uvjeta (Izvor: [26])

Analizirajući četiri razrađena scenarija rada geotermalnog izmjenjivača topline, važno je pronaći kompromis između ekonomskih troškova i održavanja temperature unutar tunela na prihvatljivom nivou. Kontinuirani način rada omogućava termalnu snagu od oko 0,18 kW/m nakon 10 godina, uz održavanje temperature unutar tunela ispod maksimalno dozvoljenih vrijednosti. S cikličkim ili sezonskim načinom rada, gdje je izmjenjivač suspendiran tijekom tri ili pet mjeseci, može se postići veća termalna snaga od 0,25 kW/m. U scenariju gdje se izmjenjivač aktivira mjesečnim ciklusima, dostupna termalna snaga je 0,26 kW/m. Međutim, jedini scenarij koji ne zadovoljava temperaturne uvjete je kada je geotermalni izmjenjivač suspendiran tijekom pet mjeseci. Dakle, idealan način rada ovisi o prioritetima projekta. Kada je primarni cilj opskrba energijom, kontinuirani rad izmjenjivača je najprikladniji. Za optimalnu ravnotežu između hlađenja i energetske potrebe, preporučuje se primjena prilagođenih ciklusa uključivanja i isključivanja izmjenjivača topline [26].

5.4. Željeznički projekt Crosstrail (Elizabeth line) u Londonu

Londonska podzemna mreža u posljednjih pedeset godina uzrokovala je zagrijavanje okolnog tla, što sada otežava učinkovito apsorpiranje otpadne topline koju proizvode vlakovi. Kao rezultat toga, temperatura u tunelima ostaje visoka tijekom cijele godine, a ponekad prelazi i 30 °C. Ovaj porast temperature predstavlja ozbiljan izazov, pogotovo uzimajući u obzir predviđanja da će klimatske promjene dodatno pogoršati situaciju, s mogućim porastom prosječnih temperatura između 2 i 6 °C u sljedećih 40 godina. Provedene su analize dostupne toplinske energije unutar tunela, budući da toplina dolazi iz motora vlakova, klimatizacijskih sustava i kočnica, čime se zagrijava zrak unutar tunela i okolno tlo. Analizom podataka uzeti su u obzir učestalost i trajanje prolaska vlakova, a procijenjeno je da osnovni toplinski izlaz iz tunela iznosi oko 7 W/m², dok vršni izlaz može doseći oko 30 W/m². Na temelju tih procjena, duljina od 500 metara u tunelu (ukupna duljina tunela je 42 km) mogla bi opskrbiti približno 100 obiteljskih stanova s ukupnim godišnjim zahtjevom za toplinom od 1,200 MWh, što bi se moglo postići kombinacijom plinskog bojlera i toplinske pumpe. Cijela mreža Crossrail tunela (sastavljena od dva tunela duljine po 21 km) mogla bi imati kapacitet za opskrbu toplinom za 8,400 obitelji (oko 30,000 ljudi) [27]. U ovom projektu, glavni izvor dolazi od otpadne topline koju proizvode vlakovi, dok je sekundarni izvor topline okolno tlo. Projektiran je sustav u kojem se toplina prenosi kroz cijevi do površine, gdje se povezuje s toplinskim pumpama koje distribuiraju ovu toplinu zgradama u okolini koje su predviđene za ovakvo grijanje. Ovaj sustav će se dalje nazivati TES sustav. Projektiran energetske segment tunela (TES) na projektu Crossrail (slika 27.) nudi inovativno rješenje za hlađenje tunela i okolnog tla, uz prijenos te topline u obližnje

zgrade [27]. U tim zgradama koriste se dizalice topline za podizanje temperature radi opskrbe toplom vodom tijekom cijele godine i za grijanje tijekom zime. Modeliranje TES sustava na Crossrail pokazuje da je ova tehnologija održiva za buduće "pametno" hlađenje tunela. Smatra se "pametnom" jer omogućava iskorištavanje topline u obliku koji može koristiti zgradama, pružajući potencijalni prihod i smanjujući ovisnost o sustavima za ventilaciju i ispušne plinove. Time se štedi električna energija, smanjuju emisije ugljika i postižu financijske uštede, posebno u kontekstu predviđenih velikih povećanja troškova goriva.



Slika 27. Prikaz TES sustava (Izvor: [27])

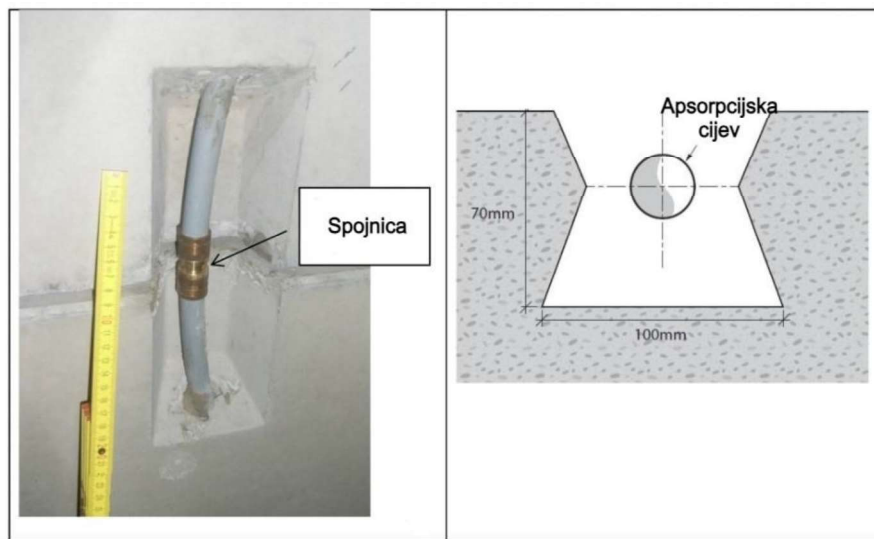
5.4.1. Segmenti za toplinsku energiju

Za ekstrakciju topline iz tunela, projekt uključuje integraciju apsorpcijskih cijevi promjera 20 mm u standardne betonske segmente prije lijevanja betona pri proizvodnji uobičajenih segmenata betonske obloge. Cijevi, dužine od 10 do 20 metara, postavljaju se u svaki segment u naizmjenično (slika 28.). U slučaju ojačanih segmenata, cijevi se mogu pričvrstiti na armaturu ili postaviti na posebnu potpornu mrežu. Na projektu Crossrail koriste se ojačani segmenti za dijelove s plutajućom prugom, dok se za segmente izvedene od betona ojačanog vlaknima cijevi prvo omekšavaju u toploj vodi, a zatim pričvršćuju na laganu armaturu unutar kalupa za segment. Da bi se smanjila opasnost od požara, cijevi su postavljene najmanje 200 mm od unutarnje strane segmenta. Kako bi se osigurali minimalni radijusi savijanja cijevi, primijenjen je razmak od 300 mm između cijevi koristeći PE-Xa polimernu specifikaciju [27].



Slika 28. Prikaz postavljanja cijevi TES sustava (Izvor: [27])

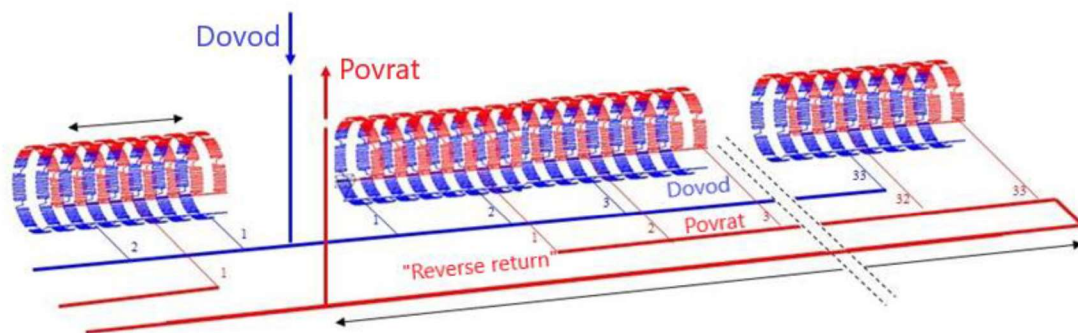
Za oblikovanje veza između segmenata tunela koriste se posebno projektirane praznine na njihovim krajevima. Ove praznine, dimenzija približno 200 mm dužine, 100 mm širine i 70 mm dubine (slika 29.), omogućuju trajno mehaničko povezivanje krajeva cijevi [27]. Praznine na Crossrail projektu imaju obrnuti konusni oblik kako bi zadržale mort za ispunjavanje. Spojevi cijevi formiraju se odmah nakon što se segmentni prsten postavi u tunel, koristeći montažni vlak koji vuče tunelsku bušilicu. Razvijen za termički aktivirane građevinske strukture, sustav omogućava brzo i pouzdano povezivanje PE-Xa cijevi. Spojevi su podvrgnuti su testovima tlaka kojima se potvrđuje njihova čvrstoća, pouzdanost i trajnost.



Slika 29. Prikaz veze segmenata (lijevo), Konusni oblik izbočine na Crossrail projektu (desno) (Izvor: [27])

Da bi se uspostavila cjelokupna cirkulacija, potrebno je povezati apsorpcijske cijevi kako bi se stvorio neprekidni prsten sastavljen od šest segmenata (petlji). Petlje se povezuju s dovodnim i povratnim cijevima, dok kontrolni ventili omogućavaju izolaciju i uklanjanje zraka u slučaju kvara. Budući da su segmenti blago konusni i njihova orijentacija se odabire tijekom gradnje, veze između prstenova formiraju se korištenjem kratkih duljina plastičnih cijevi montiranih na površini tunela. Jedan krug sadrži otprilike 11 metara cijevi unutar

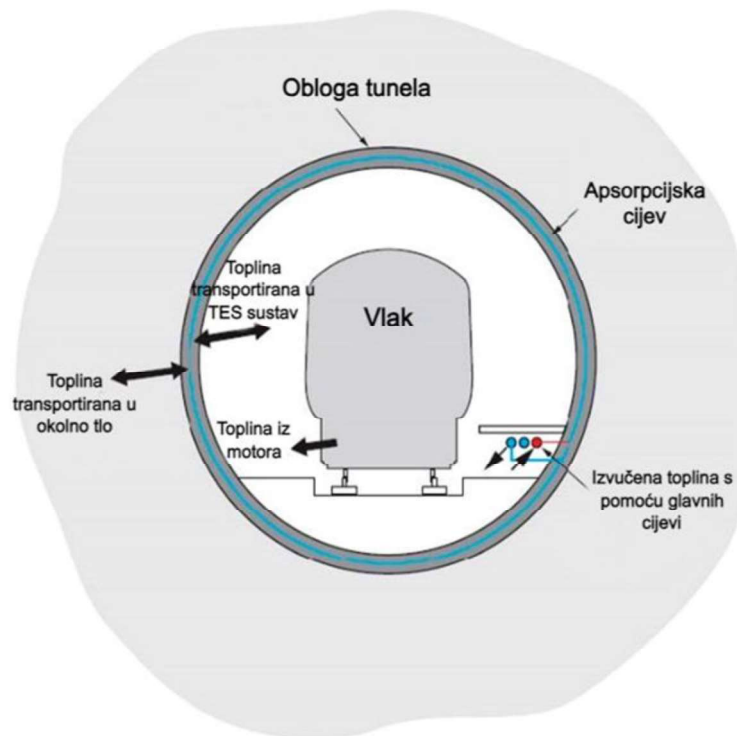
standardnog segmenta, uključujući šest segmenata i ključni segment. Pet krugova čini jednu petlju, a za pokrivanje 250 metara tunela potrebno je 31 krug. Glavne cijevi tunela povezuju se s površinom preko okana i stanica, ili alternativno, putem posvećenih bušotina. Sustav cijevi koristi "reverse return" konfiguraciju [27], pri čemu se umjesto klasičnih dvije, koriste tri glavne cijevi radi boljeg samobalansiranja (slika 30.). Ova konfiguracija pomaže u automatskom balansiranju sustava i smanjuje potrebu za dodatnim pumpama. Izračunati su i gubici tlaka, pa je razvijen postupak za uklanjanje zračnih mjehurića ispiranjem. Ovaj postupak omogućava smanjenje gubitaka tlaka i poboljšanje učinkovitosti sustava.



Slika 30. "Reverse return" metoda slaganja cijevi (Izvor: [27])

5.4.2. Hlađenje tunela

Za razumijevanje postupka i učinka hlađenja unutar tunela s pomoću TES sustava, razvijen je 1-D model ventilacije (slika 31.) koji pokazuje da se primjenom ovog sustava može smanjiti vršna temperatura zraka u tunelu za 4 °C [27]. Kada su ulazi topline vlakova manji, na primjer u ranim fazama rada, potrebna je manja ekstrakcija topline, što može utjecati na učinkovitost toplinskih pumpi. Sustav TES sprječava nakupljanje topline u tlu oko tunela i smanjuje temperaturu zraka u tunelu, što rezultira uštedama u troškovima ventilacije i omogućava prilagodbu tunela za buduće promjene u temperaturi uzrokovane klimatskim promjenama ili većim frekvencijama vlakova.



Slika 31. 1D model ventilacije tunela (Izvor: [27])

5.4.3. Prednosti TES sustava

Ugradnja TES sustava trebala bi biti razmotrena za sve buduće metro projekte, a razvoj ovog koncepta na Crossrail-u predstavlja važan korak u razumijevanju njegovih prednosti za primjenu na budućim projektima. TES sustav nudi značajne prednosti u operativnim troškovima, kapitalnim ulaganjima i smanjenju emisije ugljika [27]. Smanjuje operativne troškove ventilacije jer omogućava učinkovitije hlađenje tunela u usporedbi s prisilnom ventilacijom, smanjujući potrebu za ventilatorima. Kapitalni troškovi su niži zbog manjih dimenzija toplinskih pumpi u odnosu na ventilatore i zračne kanale, a moguće je i smanjenje promjera tunela i broj ventilacijskih okana. Smanjuje emisiju ugljika time što pruža obnovljivu toplinu zgradama, smanjujući potrebu za konvencionalnim energentima. Također omogućava generiranje prihoda prodajom topline i potencijalne uštede kroz poticaje za obnovljive izvore energije. S obzirom na rastuće cijene energije, TES predstavlja ekonomično i ekološki prihvatljivo rješenje.

6. SIMULACIJA TERMALNOG UTJECAJA ENERGETSKOG TUNELA

6.1. Uvod u problematiku i metodologija simulacije

Za razumijevanje ponašanja tla oko energetskih tunela nužno je provesti analizu utjecaja temperaturnih promjena na slijeganje tla jer temperaturne promjene uslijed grijanja i hlađenja mogu značajno utjecati na stabilnost i deformacije tla. Pri radu sustava energetskih tunela za grijanje i hlađenje događa se izmjena topline sa zemljom, pri čemu se stvaraju ciklusi širenja i skupljanja tla. Navedene termalne promjene, povezane su sa fizičkim karakteristikama tla, poput stišljivosti i posmičnih naprezanja, a mogu izazvati slijeganje tla, što je od velikog značaja za dugoročnu stabilnost infrastrukturnih projekata [1]. Teorijska osnova ove analize temelji se na zakonima termomehanike, koji povezuju temperaturne varijacije sa deformacijama i naprezanjima u tlu, dok se modeli simulacije koriste za preciznu procjenu ovih učinaka [28]. Za simulaciju nelinearnih termalno-mehaničkih interakcija između tunela i tla korišten je softver Rocscience RS2. RS2 [28] je vodeći softver tvrtke Rocscience za analizu metodom konačnih elemenata (FEM), koji sada uključuje termalni modul za 2D termalnu analizu geotehničkih modela. Ovaj modul omogućuje modeliranje prijenosa topline, definiciju termalnih svojstava za različite materijale, kao i ocjenu deformacije i stabilnosti modela. Također podržava termalno-hidro-mehaničku analizu, omogućujući simulaciju prirodnog i prisilnog skupljanja te termalnog širenja tla.

6.2. Termo – mehanički konstitucijski model tla

U simulaciji su primijenjeni odgovarajući materijali za tlo i oblogu tunela, a definirani su nestacionarni termalni uvjeti s periodima grijanja i hlađenja. Model obuhvaća rubne uvjete koji reflektiraju sezonske promjene, dok su geometrija i mreža precizno definirane kako bi se osigurala točnost rezultata. Termo-mehanički konstitucijski model tla integrira složenu interakciju toplinskih, hidrauličkih i mehaničkih čimbenika, omogućujući analizu utjecaja temperaturnih promjena na parametre čvrstoće i plastičnosti tla. Uzima u obzir i promjene u poroznosti, svojstvima vode u porama te dinamiku granice tečenja koja se može smanjiti s porastom temperature. Kroz naponsko-deformacijske i termalne analize prate se deformacije tla u odnosu na termalne cikluse. Korištenjem ovog modela, cilj je dobiti sveobuhvatan uvid u kompleksne interakcije koje se javljaju tijekom ciklusa grijanja i

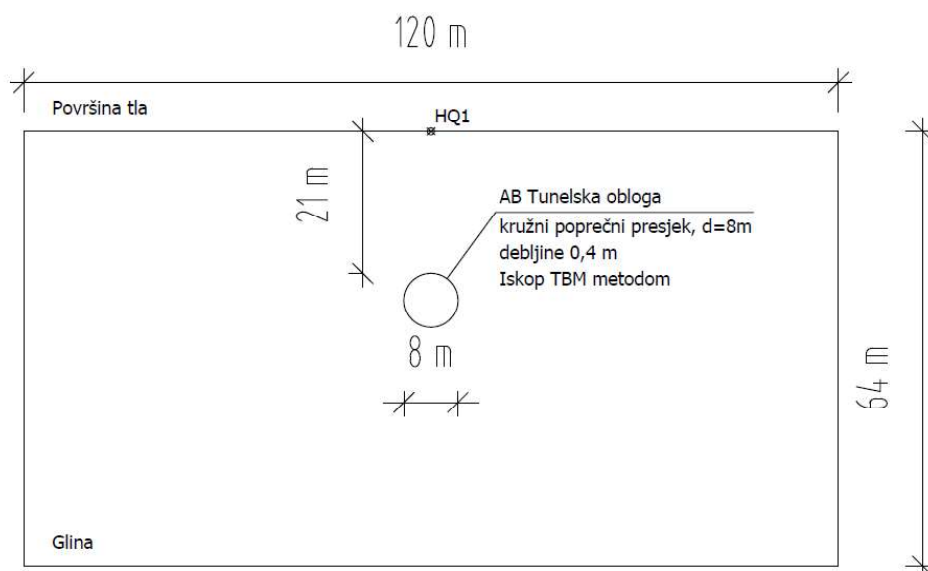
hlađenja, čime se doprinosi boljem razumijevanju mehanizama koji utječu na stabilnost i dugoročnu otpornost infrastrukturnih objekata.

6.3. Ulazni podaci

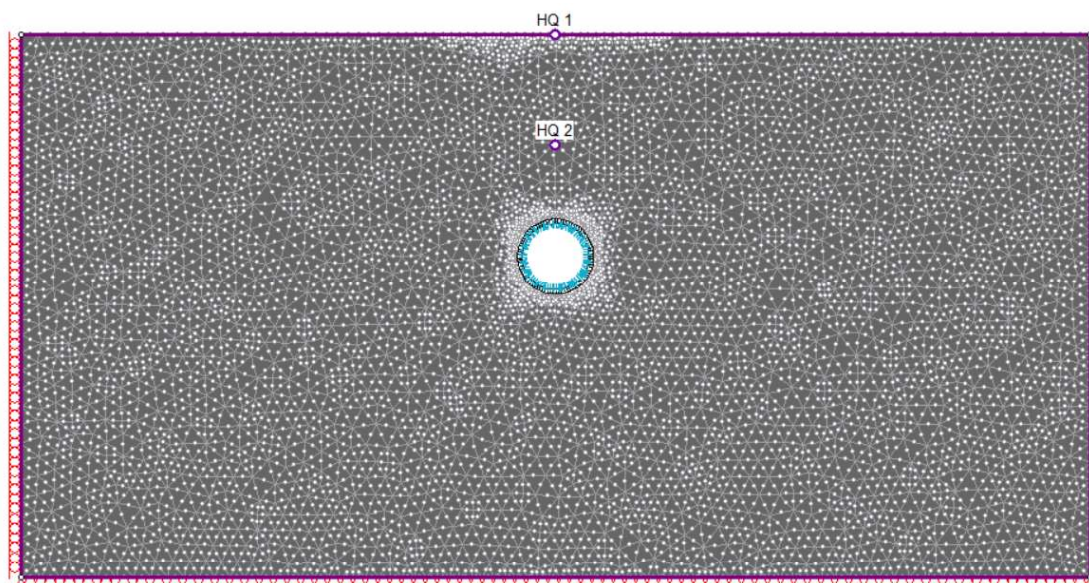
U ovom dijelu rada opisane su postavke modela (ulazni podaci) korišteni za simulaciju utjecaja nestacionarnog grijanja i hlađenja tunela na slijeganje površine. Model je izrađen u softveru RS2 i obuhvaća nekoliko ključnih komponenti koje su detaljno opisane u nastavku.

6.3.1. Geometrijske karakteristike modela

Geometrija modela uključuje tunel, promjera 8 metara sa tunelskom oblogom debljine 0,4 m, smještenog unutar tla (slika 32.) širine 120 m i dubine 64 m, s nadslojem od 21 m, kako bi se što bolje mogao vidjeti utjecaj temperaturnih promjena na tlo. Dimenzije tunela i konfiguracija su precizno postavljeni kako bi održali stvarni uvjeti. Model je izrađen kao 2D prikaz koji precizno odražava stvarne uvjete. Na slici 33. može se vidjeti mreža konačnih elemenata koja je postavljena, kao i mehanički rubni uvjeti bočno (engl. "fixed x") i na dnu modela (engl. "fixed x/y") je kako bi omogućila preciznu analizu. Uz to, mogu se vidjeti i točke HQ1 (na površini tla) i HQ2 (na polovici nadsloja tunela) u kojim se promatra slijeganje tla.



Slika 32. Geometrijske karakteristike modela



Slika 33. Prikaz slike modela sa postavljenom mrežom i rubnim uvjetima [29]

6.3.2. Mehaničke i termalne karakteristike tla i tunelske obloge

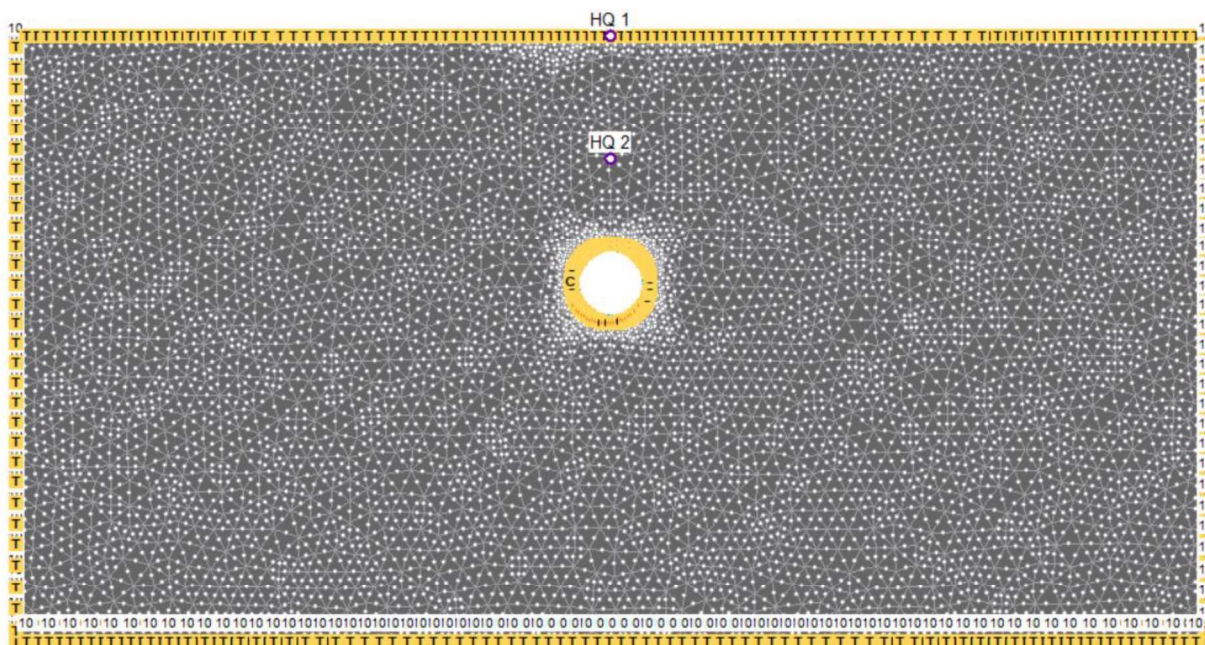
Za modeliranje tunela i okolnog tla korišteni su odabrani materijali prikazani u Tablici 2. sa zadanim termalnim i mehaničkim svojstvima. Glina (engl. *London clay*) je zadana kao materijal tla s pripadajućim vrijednostima toplinskog kapaciteta i provodljivosti i obloga tunela definirana kao engl. *Linear* element s odgovarajućim mehaničkim i termalnim svojstvima, uključujući i kapacitet za smrznuto i nesmrznuto stanje.

Tablica 2. Prikaz mehaničkih i termalnih karakteristike okolnog tla (engl. *London clay*) i tunelske obloge [30]

Parametar	Jedinica	Glina (engl. <i>London clay</i>)	Tunelska obloga
Zapreminska težina	[kN/m ³]	18	25
Zapreminska težina (saturirano tlo)	[kN/m ³]	20	-
Poroznost	-	0,6	-
Krutost tla pri ponovnom opterećenju/rastrećenju	[MPa]	115,5	-
Youngov modul elastičnosti	[MPa]	38,5	30 · 10 ³
Poissonov koeficijent	-	0,3	0,15
Kohezija	[kPa]	20	-
Kut trenja	[°]	25	-
Specifični toplinski kapacitet	[kJ/t/°C]	1500	800
Toplinska provodljivost	[kW/m/°C]	1,5 · 10 ⁻³	1,8 · 10 ⁻³
Koeficijent ekspanzije	[1/°C]	5 · 10 ⁻⁶	8,5 · 10 ⁻⁶

6.3.3. Termalni rubni uvjeti

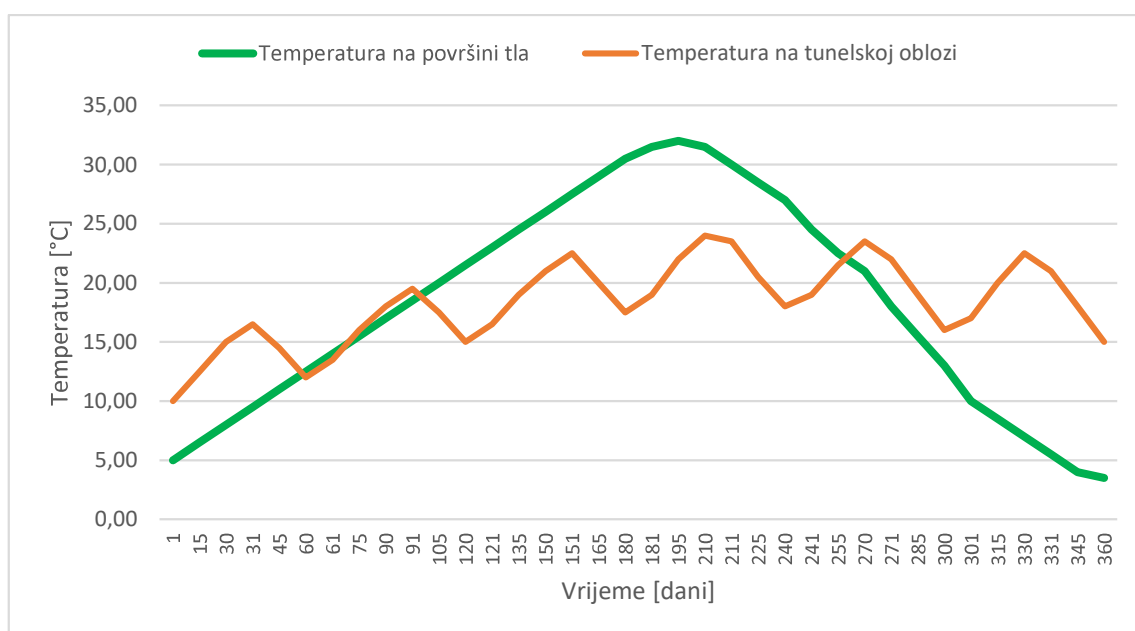
Za simulaciju su definirani specifični termalni i konvekcijski rubni uvjeti prilagođeni različitim dijelovima modela (slika 34.). Na površini tla primijenjeni su temperaturni rubni uvjeti koji simuliraju sezonske promjene temperature tijekom godine. Pretpostavljeni podaci o klimatskim uvjetima omogućuju variranje temperatura od minimalnih zimskih vrijednosti do maksimalnih ljetnih, u rasponu od 0 °C do 32 °C, ovisno o sezoni. Ovi uvjeti uneseni su u obliku funkcija (engl. *Thermal boundary condition – Temperature*) koje variraju tijekom vremenskih faza, pri čemu svaka faza predstavlja jedan mjesec. Za svaku fazu definirana je specifična funkcija koja simulira promjenu temperature s vremenom. Na primjer, za siječanj koji je simuliran u prvoj fazi, unesena je funkcija koja varira između 4 °C i 8 °C. Tako su unesene temperature u obliku funkcija koje su rastuće ili padajuće, ovisno o odgovarajućem mjesecu u godini. Termalni rubni uvjeti na bočnim stranama modela i na donjoj strani, postavljeni su kao konstantne temperature od 10 °C koje se ne mijenjaju kroz godinu. Na tunelskoj oblozi postavljeni su konvekcijski rubni uvjeti koji simuliraju prijenos topline između tunela i okolnog tla (engl. *Thermal boundary condition – Convection*). Koeficijent konvekcije zadan je kao konstantan kroz sve faze simulacije vrijednosti 12000 J/dan/m², dok se temperatura obloge, zadana kao funkcija (dan – temperatura), mijenja ovisno o odabranom scenariju, odnosno proračunskoj situaciji, što je opisano nastavku rada.



Slika 34. Prikaz postavljenih termalnih rubnih uvjeta na modelu [29]

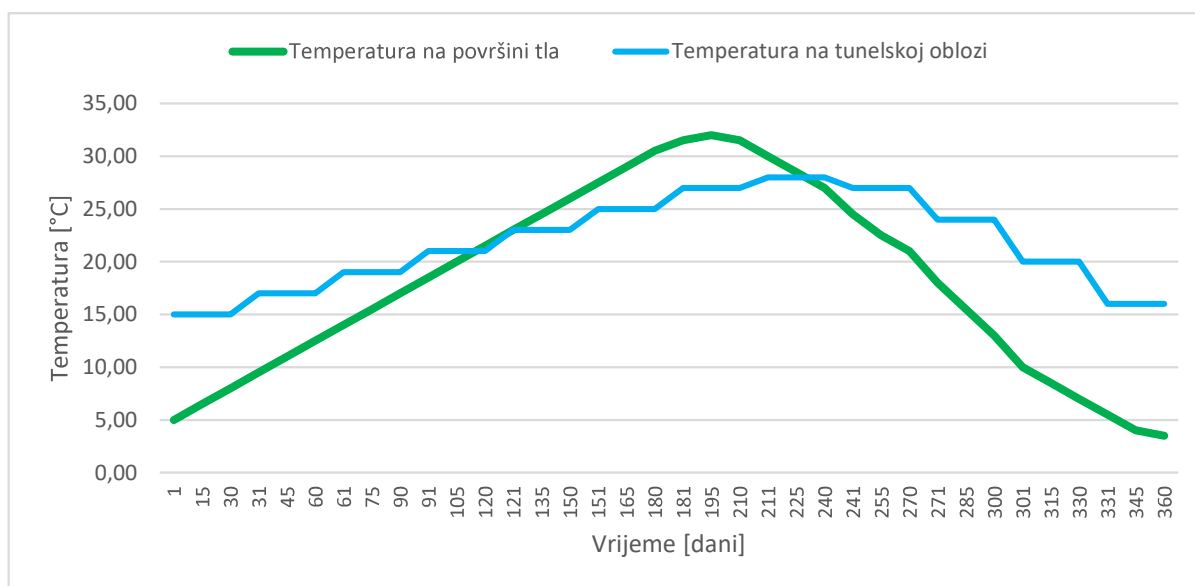
6.3.4. Proračunske situacije

Nakon zadavanja svih ulaznih parametara i rubnih uvjeta modela, zadaju se termalni rubni uvjeti u tunelu s obzirom na proračunske situacije. Prva proračunska situacija je početno stanje naprezanja, nakon koje slijedi faza iskopa tunela i onda se vrše simulacije grijanja i hlađenja tunelske obloge (12 faza, od kojih svaka predstavlja 1 mjesec u godini). U prvoj simulaciji (proračunskoj situaciji), grijanje i hlađenje tunela odvija se u cikličkim fazama (slika 35.), gdje se svaka faza grijanja, koja traje mjesec dana, izmjenjuje s fazom hlađenja, također u trajanju od jednog mjeseca. Tijekom faza grijanja, temperatura tunelske obloge raste, dok u fazama hlađenja opada, a zadane su kao funkcije u rasponu od 10 °C do 25 °C. Ovakva postavka omogućuje simulaciju realističnog ciklusa sezonskih promjena, gdje tunel zagrijava i hladi okolno tlo u kratkim intervalima.

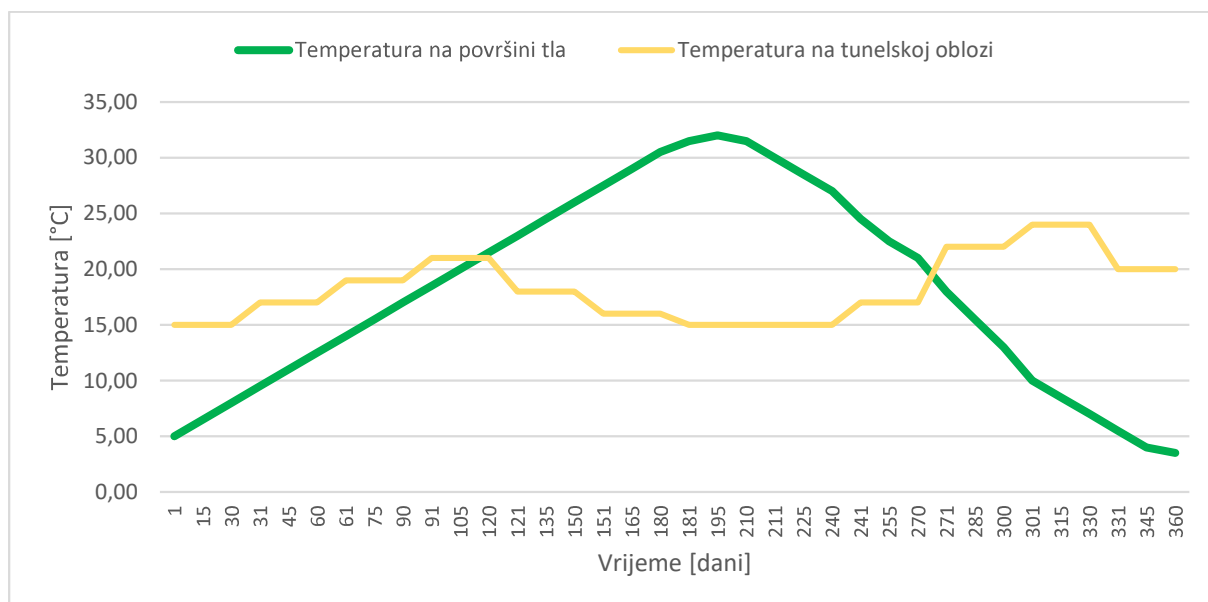


Slika 35. Prikaz odnosa temperatura-vrijeme na različitim mjestima u modelu pri cikličkom grijanju i hlađenju

Osim navedenog scenarija cikličkog grijanja i hlađenja, provedene su dvije dodatne simulacije s drugačijim režimom grijanja. U drugoj simulaciji (slika 36.) grijanje se odvija kontinuirano tijekom cijele godine, pri čemu temperatura obloge varira od 15 °C u zimskim mjesecima do 30 °C ljeti. Termalni rubni uvjeti zadani su kao funkcije koje linearno rastu kroz svaku fazu (svaki mjesec), do rujna kada temperatura kreće padati. U trećoj simulaciji (slika 37.), grijanje je suspendirano tijekom pet mjeseci (od svibnja do rujna), s temperaturom tunelske obloge koja tijekom tih mjeseci opada na 15 °C, dok u ostatku godine temperatura raste do 25 °C u fazama grijanja. Ovi scenariji omogućuju dodatnu analizu utjecaja različitih režima grijanja na ponašanje tunelske obloge i deformacije okolnog tla.



Slika 36. Prikaz odnosa temperatura-vrijeme na različitim mjestima u modelu pri grijanju tijekom cijele godine

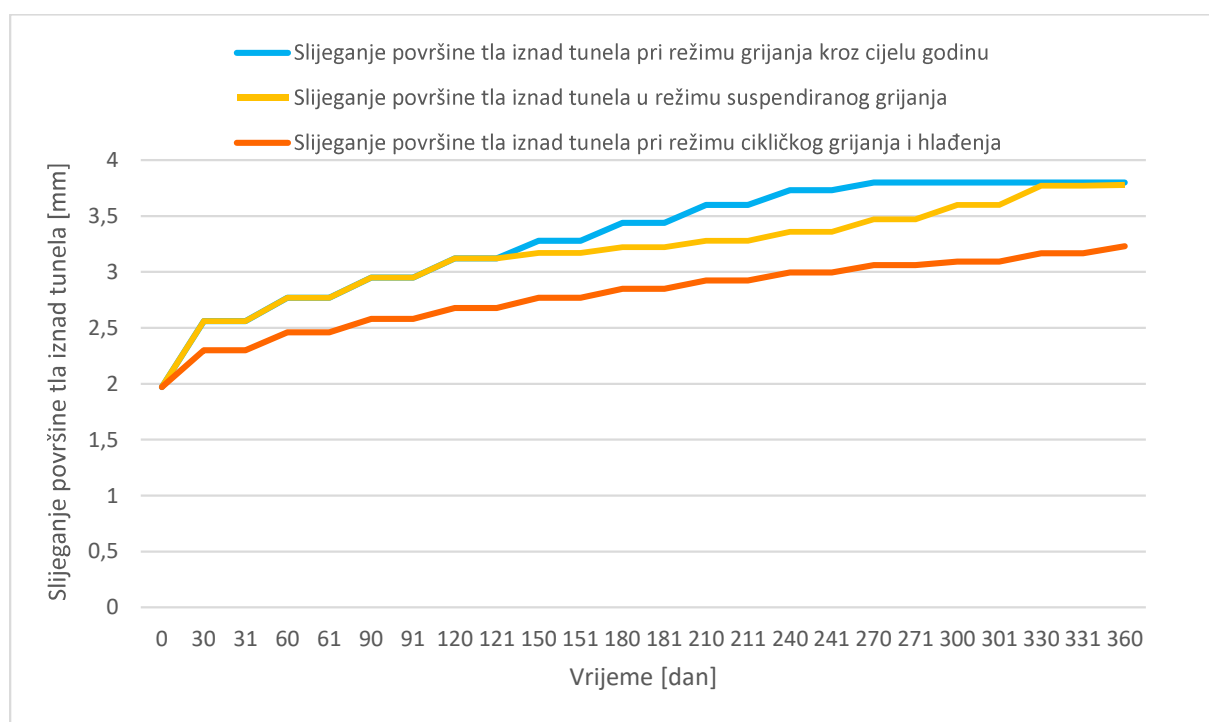


Slika 37. Prikaz odnosa temperatura-vrijeme na različitim mjestima u modelu pri suspendiranom režimu grijanja

Sve ove simulacije ključne su za analizu realnih klimatskih promjena i njihovih utjecaja na nestacionarno grijanje i hlađenje tunela, deformacije tla i površinsko slijeganje. Precizno definirani rubni uvjeti omogućuju detaljnu analizu promjena temperature tijekom godine i njihova utjecaja na stabilnost tunela i okolnog tla.

6.4. Rezultati numeričkih analiza i diskusija

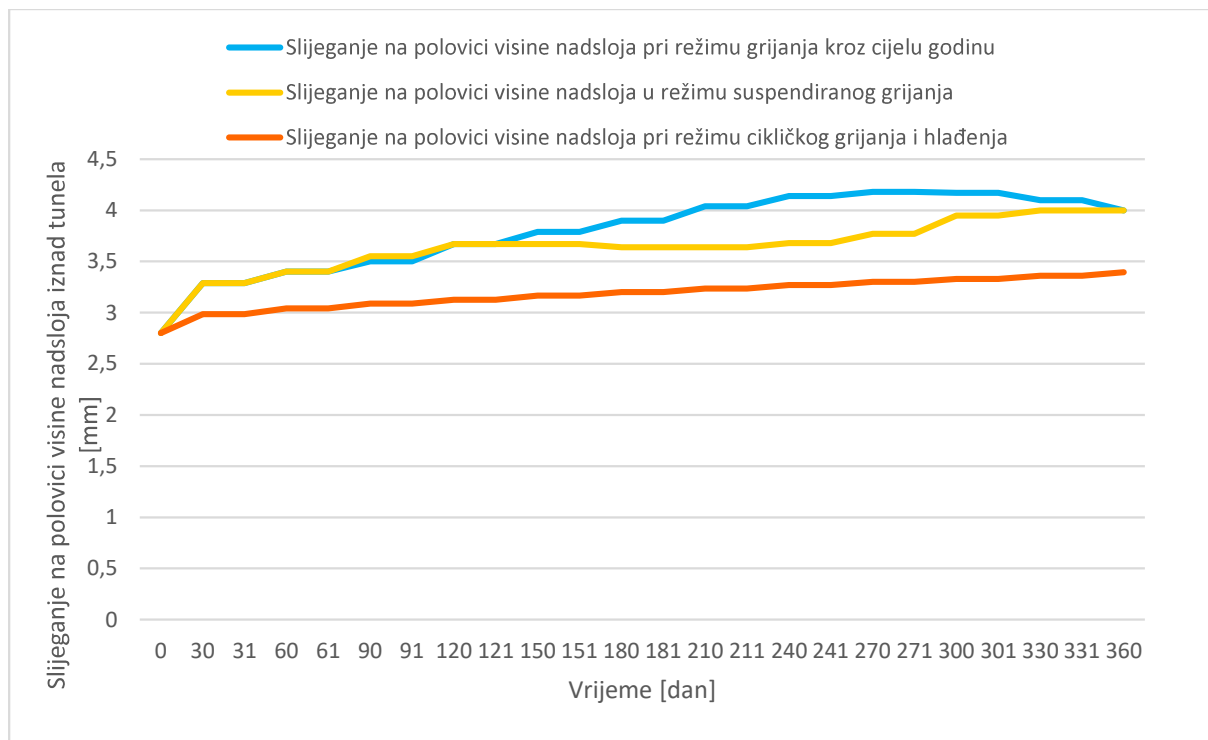
Rezultati simulacije prikazuju deformacije tla u obliku slijeganja površine iznad tunela i na sredini visine njegovog nadsloja. Prikazane su deformacije nakon iskopa i pod utjecajem različitih režima grijanja i hlađenja. Na dijagramima (slika 38. i slika 39.) su uspoređene simulacije kontinuiranog grijanja, režima suspendiranog grijanja, te cikličkog grijanja i hlađenja, gdje je vidljivo kako svaki režim ima specifičan utjecaj na deformacije tla kroz vrijeme.



Slika 38. Prikaz slijeganja površine tla iznad tunela za različite režime grijanja unutar tunela kroz godinu dana

Dijagram pokazuje vrijednosti slijeganja površine tla tijekom jedne godine, uz početnu vrijednost 1,97 mm koja predstavlja slijeganje površine tla nakon iskopa tunela, a nakon toga slijedi prikaz slijeganja uzrokovanog temperaturnim promjenama. U simulaciji kontinuiranog grijanja tijekom cijele godine (plava linija), slijeganje tla raste najviše, dostižući konačnu vrijednosti od 3,8 mm nakon godine dana, odnosno 1,83 mm ako se oduzme slijeganje uzrokovano iskopom tunela. Ovakav režim uzrokuje stalno zagrijavanje tla, što dovodi do postepenog, ali konstantnog povećanja deformacija, jer se toplinsko širenje odvija neprekidno. Kod režima suspendiranog grijanja (žuta linija), deformacije tla također postepeno rastu, ali nešto sporije u usporedbi s kontinuiranim grijanjem. Dostignuta je konačna vrijednost slijeganja od 3,78 mm (1,81 mm od temperaturnih promjena). Tijekom faza suspenzije grijanja (u periodu od svibanja do rujna), dolazi do manje izraženih deformacija jer temperatura opada na 15 °C, smanjujući pritisak na okolno tlo. Najmanje

slijeganje tla vidi se u simulaciji cikličkog grijanja i hlađenja (narančasta linija), s maksimalnim slijeganjem od 3,2 mm, odnosno 1,23 mm od temperaturnih promjena u godini dana. Ova simulacija omogućuje da se tijekom hlađenja tlu reducira pritisak i da se ono termalno skuplja, što rezultira manjim ukupnim deformacijama.

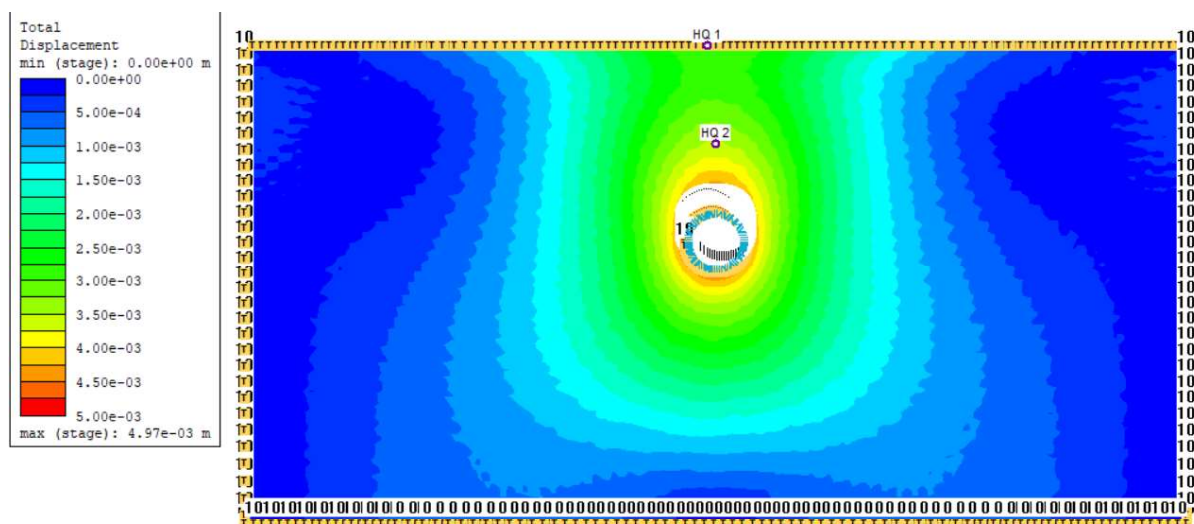


Slika 39. Prikaz slijeganja na polovici visine nadsloja tunela za različite režime grijanja unutar tunela kroz godinu dana

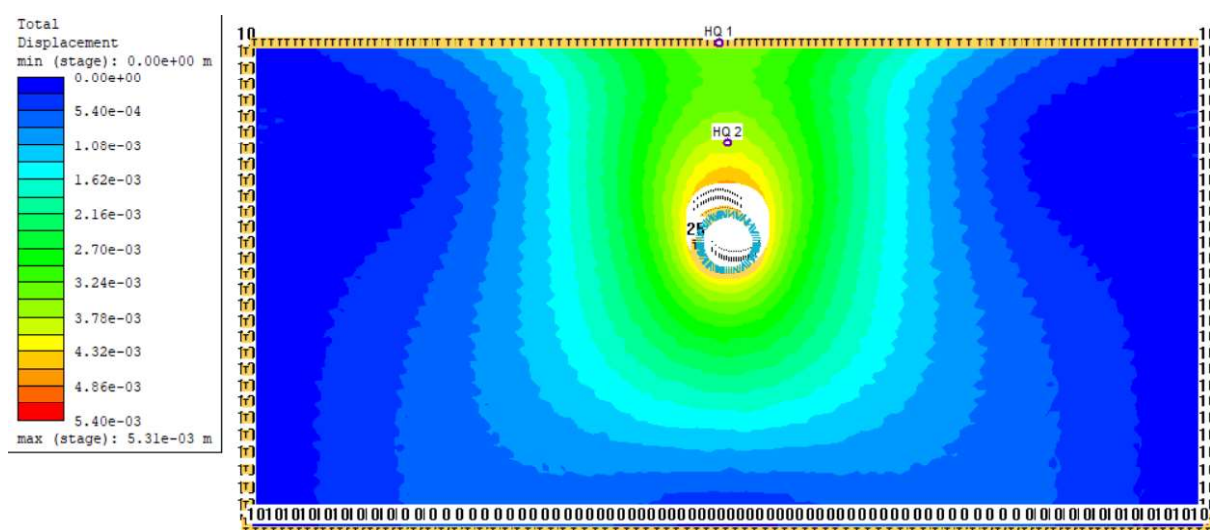
Dijagram na slici 39. prikazuje slijeganje tla na polovici visine nadsloja tunela, gdje je vidljiva veća početna vrijednost u odnosu na dijagram površinskog slijeganja (slika 38.). Kao i na prethodnom dijagramu, početna vrijednost predstavlja slijeganje uzrokovano iskopom tunela. Može se vidjeti da je početna vrijednost slijeganja na polovici visine nadsloja znatno veća (2,8 mm) u usporedbi sa slijeganjem na površini tla, koje iznosi 1,97 mm. Ostatak dijagrama prikazuje ponašanje tla na polovici visine nadsloja pod utjecajem različitih režima grijanja unutar tunela. Pri režimu grijanja tijekom cijele godine, slijeganje pokazuje kontinuirani rast i doseže maksimalnu vrijednost od 4,18 mm, što je slično tendenciji zabilježenoj na površini tla. Međutim, u režimu suspendiranog grijanja, slijeganje se stabilizira na nešto nižoj vrijednosti od približno 3,6 mm, prateći period suspenzije grijanja (od svibnja do rujna), nakon čega se slijeganje ponovno povećava prilikom ponovnog grijanja do vrijednosti od 4 mm na kraju godine dana. U režimu cikličkog grijanja i hlađenja, slijeganje je još niže, s maksimalnom vrijednošću od 3,4 mm.

Ova usporedba jasno pokazuje da toplinski režim unutar tunela utječe na slijeganje tla, kako na površini, tako i na polovici visine nadsloja, pri čemu su veće deformacije zabilježene u uvjetima kontinuiranog grijanja u odnosu na ciklički ili režim suspendiranog grijanja. Uočava se kako početne deformacije, one uzrokovane iskopom tunela, od površine tla prema tunelu rastu. Udaljavanjem od tunela smanjuje utjecaj iskopa, a veći utjecaj imaju temperaturne promjene zbog većeg volumena tla kojem je omogućeno širenje i skupljanje. Iako temperaturne promjene uzrokuju relativno male deformacije, ukupne deformacije (od iskopa i toplinskih promjena) smanjuju se s udaljavanjem od tunela prema površini tla, što je posebno vidljivo pri analizi cikličkih režima.

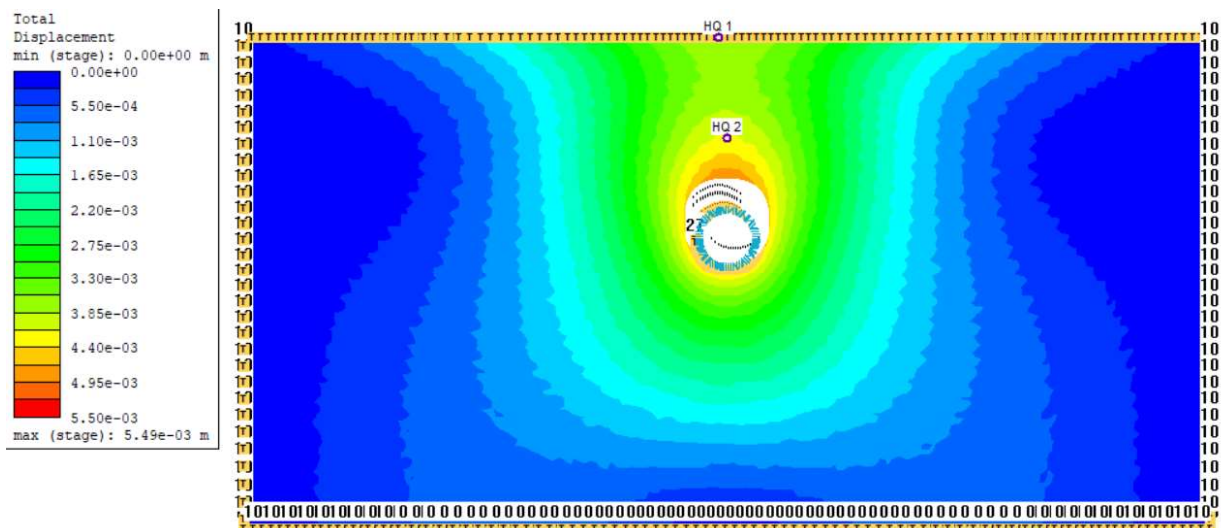
Na sljedećim slikama prikazane su konture slijeganja pri režimu kontinuiranog grijanja iz programa RS2, za karakteristične faze (nakon 3, 6, 9 i 12 mjeseci) tijekom godine.



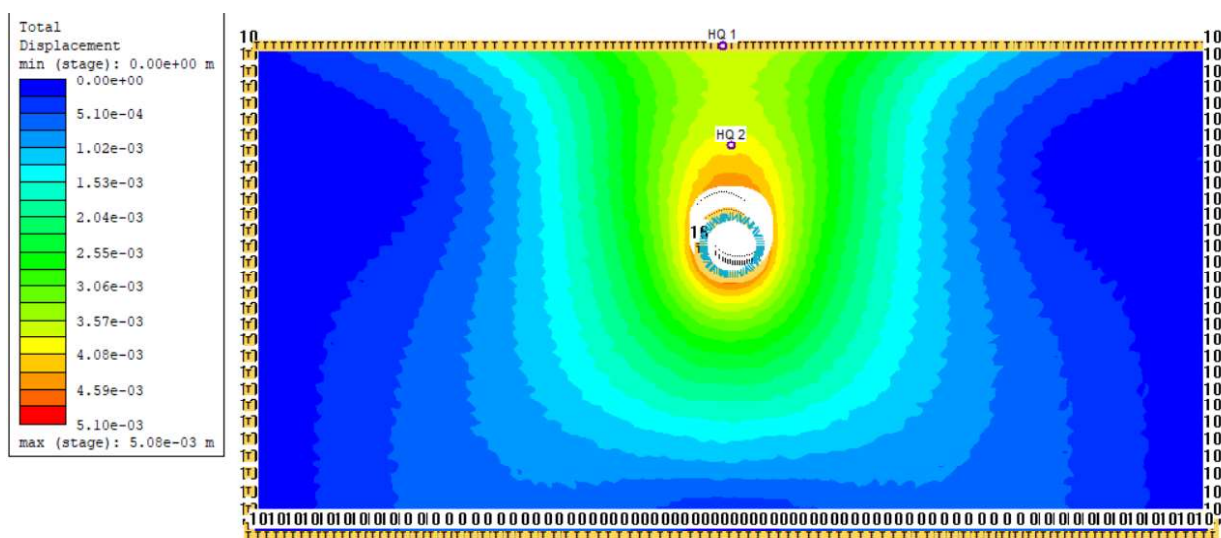
Slika 40. Prikaz kontura slijeganja nakon 3 mjeseca [29]



Slika 41. Prikaz kontura slijeganja nakon 6 mjeseca [29]



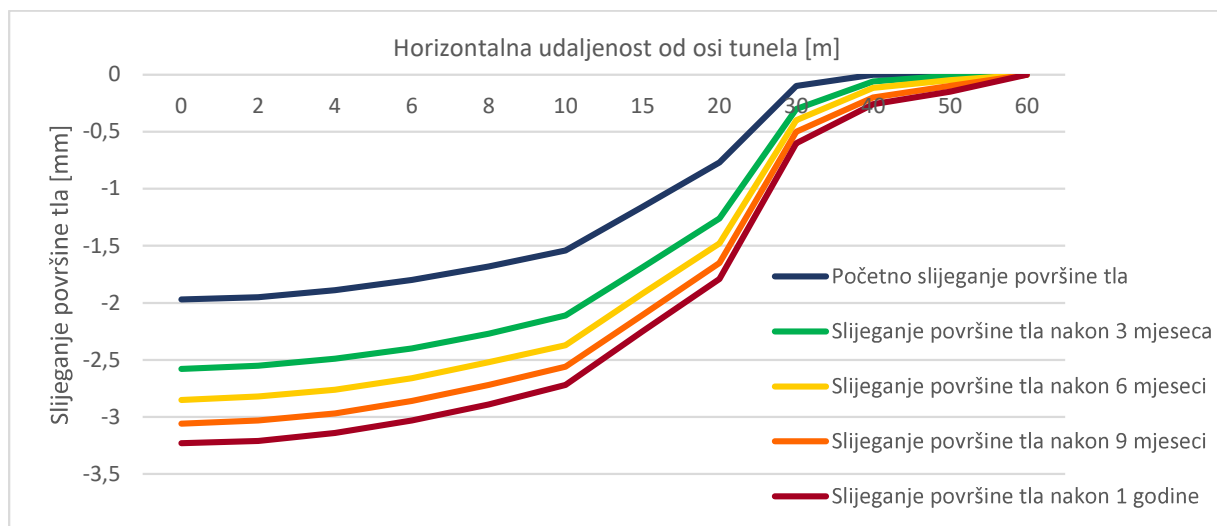
Slika 42. Prikaz kontura slijeganja nakon 9 mjeseca [29]



Slika 43. Prikaz kontura slijeganja nakon 12 mjeseca [29]

Režim cikličkog grijanja i hlađenja izaziva najmanje deformacije zbog ravnomjernije raspodjele toplinskih promjena, dok kontinuirano grijanje rezultira najizraženijim slijeganjem tla zbog stalnog širenja uzrokovanog toplinom.

Za režim cikličkog grijanja i hlađenja prikazano je slijeganje površine tla za karakteristične faze (nakon 3, 6, 9 i 12 mjeseci) na horizontalnoj udaljenosti od osi tunela (slika 44.). Na dijagramu, plavom linijom prikazana je početna vrijednost slijeganja koje je uzrokovano iskopom tunela, sve druge linije prikazuju slijeganje uzrokovano cikličkim režimom grijanja i hlađenja tunela. Može se uočiti kako se slijeganje povećava s vremenom, ali se u svakoj pojedinoj fazi smanjuje na većem horizontalnoj udaljenosti od tunela.



Slika 44. Prikaz slijeganja površine tla na horizontalnoj udaljenosti od osi tunela za karakteristične faze tijekom režima cikličkog grijanja i hlađenja

Ovi rezultati naglašavaju važnost razmatranja termalnih učinaka pri projektiranju energetskih tunela, ali i način grijanja u tunelu, budući da različiti scenariji grijanja mogu značajno utjecati na dugoročno slijeganje tla i stabilnost tunelske konstrukcije. Stoga je ključno pažljivo postaviti termalne rubne uvjete u budućim inženjerskim rješenjima.

6.5. Zaključak simulacija

Simulacija termalno-mehaničkih interakcija u RS2 pokazala je utjecaj grijanja i hlađenja tunela na deformacije tla, razmatrajući slijeganje površine tla i na polovici visine nadsloja tunela. Promjene temperature, definirane sinusoidalnim funkcijama, uzrokovale su toplinsko širenje tla tijekom faza grijanja, dok je hlađenje dovelo do blagog skupljanja. Analizom slijeganja na različitim dubinama, uočeno je da su početne deformacije od iskopa tunela značajno veće bliže tunelu, dok se utjecaj temperaturnih promjena izraženije očituje prema površini. Ukupno slijeganje variralo je u skladu s temperaturnim promjenama, ali je ostalo unutar prihvatljivih granica za stabilnost geotehničkih sustava. Simulacija je također pokazala da dugotrajni ciklusi termalnih uvjeta mogu imati kumulativni učinak na deformacije tla, iako su te deformacije relativno male.

Precizna definicija rubnih uvjeta bila je ključna za dobivanje vjerodostojnih rezultata, osobito u kontekstu tunelske obloge i deformacija tla na različitim dubinama. Rezultati naglašavaju važnost pažljivog projektiranja sustava grijanja i hlađenja kako bi se kontrolirale deformacije tla i osigurala stabilnost tunelske strukture. Simulirani scenariji, uključujući kontinuirano grijanje i grijanje s petomjesečnim prekidom, pokazuju različite utjecaje na slijeganje tla, što dodatno ističe potrebu za razmatranjem termalnih uvjeta na različitim dubinama tla i njihovih učinaka na dugoročnu stabilnost.

7. ZAKLJUČAK

Korištenje energetske tunela otvara nove mogućnosti za optimizaciju sustava grijanja i hlađenja iskorištavanjem geotermalnih resursa u urbanim područjima. Ova napredna tehnologija omogućuje učinkovitu integraciju u postojeću infrastrukturu, smanjujući potrošnju energije i emisije stakleničkih plinova te potiče održivi razvoj. Kroz ovaj rad analizirane su ključne komponente termo-mehaničkog ponašanja tunela, uz poseban fokus na interakciju tunelskih obloga s okolnim tlom i njihov dugoročni utjecaj na stabilnost sustava.

Osim rezultata dobivenih simulacijama u RS2 softveru, koje su pokazale kako promjene temperature uzrokuju deformacije tla, rad je kroz navedene primjere ukazao i na važnost optimizacije drugih parametara, kao što su toplinska provodljivost i vodopropusnost tla. Ti parametri značajno utječu na učinkovitost prijenosa topline te performanse energetske tunela. Uočeno je da pravilna kontrola kombiniranih termalnih i mehaničkih opterećenja može smanjiti štetna naprezanja unutar tunelskih obloga, osiguravajući stabilnost i funkcionalnost kroz vrijeme.

Tehnologija koja se koristi u projektiranju energetske tunela, kao što su napredni materijali za obloge s visokom toplinskom vodljivošću i sustavi za monitoring temperature i naprezanja, omogućava ne samo povećanje energetske učinkovitosti, nego i bolju kontrolu nad potencijalnim rizicima poput prekomjernih deformacija ili naprezanja. Implementacija takvih tehnologija, zajedno s pažljivim projektiranjem, bit će ključna za daljnji razvoj ovog inovativnog rješenja.

Unatoč izazovima vezanim uz početna ulaganja i potrebu za standardizacijom postupaka projektiranja, rezultati ovog rada potvrđuju velike mogućnosti energetske tunela za smanjenje troškova energije i doprinosa ekološki prihvatljivijoj budućnosti. Razvoj jasnih standarda i normi dodatno će ubrzati prihvaćanje ovih sustava te njihovu širu primjenu u urbanim sredinama.

POPIS LITERATURE

- [1] Laloui L.F.; Rotta Loria A.; Analysis and Design of Energy Geostructures. Theoretical Essentials and Practical Application. 2020.
- [2] Baradić M.; Čirjak J.; Obnovljivi izvori energije. Tehnička kultura 6 [Internet]. Dostupno na: <https://hr.izzi.digital/DOS/16293/16315.html> [citirano 31.07.2024.]
- [3] Tumara D.; Pavlović D.: *Geotermalna energija i njezin potencijal u vremenu energetske diversifikacije i tranzicije Republike Hrvatske*. Nafta i Plin. 2019;39:53-62.
- [4] Grad Zagreb - Gradski ured za gospodarstvo, ekološku održivost i strategijsko planiranje. Geotermalna energija [Internet]. Dostupno na: <https://eko.zagreb.hr/geotermalna-energija/97> [citirano 31.07.2024.]
- [5] Kovačević M.S.; Bačić M.; Arapov I.; *Mogućnosti podzemnog inženjerstva u iskorištavanju plitke geotermalne energije*. GRAĐEVINAR. 2012;64(12):1019-28.
- [6] Brunel University London. Geo-energy [Internet]. Dostupno na: <https://www.brunel.ac.uk/research/Groups/Geotechnical-and-Environmental-Engineering/Geo-energy> [citirano: 01.08.2024.]
- [7] Bolja Energija. Geotermalni potencijal Hrvatske – zelena energija koja osigurava velike uštede [Internet]. Dostupno na: <https://www.boljaenergija.hr/geotermalni-potencijal-hrvatske-zelena-energija-koja-osigurava-velike-ustede/> [citirano: 01.08.2024.]
- [8] Barla M.; Di Donna A.; Energy tunnels: concept and design aspects. Underground Space. 2018.
- [9] Dai X.; Bidarmaghaz A.; Narsilio G.A.; Energy tunnels: A review of the state of the art and knowledge gaps to harness renewable energy from underground infrastructure. Tunnelling and Underground Space Technology. 2023;142:105431.
- [10] Barla M.; Di Donna A.; Perino A.; *Application of energy tunnels to an urban environment*. Renew Sustain Energy Rev. 2016;65:1-14.
- [11] Meibodi S.S.; Loveridge F.; The future role of energy geostructures in fifth generation district heating and cooling networks. *Renew Sustain Energy Rev*. 2021;143:110898.
- [12] Chen A.; Nicholson D.; Geothermal use of tunnels. Technical report. 2022.

- [13] Geo-Solving. Design of energy tunnels for sustainable cities [Internet]. Dostupno na: <https://www.geo-solving.com/2023/12/01/design-of-energy-tunnels-for-sustainable-cities/> [citirano: 10.08.2024.]
- [14] Brandl H.; *Geothermal Geotechnics for Urban Undergrounds*. Geotechnique. 2006;56(2):81-122.
- [15] Energy tunnels and geothermal applications [Internet]. Politecnico di Torino; 2024 Dostupno na: http://www.rockmech.polito.it/research/energy_tunnels_and_geothermal_applications [citirano: 10.08.2024.]
- [16] Zero carbon tunnels: Is there light at the end? [Internet]. Mining Technology; 2024 Dostupno na: <https://www.mining-technology.com/sponsored/zero-carbon-tunnels-is-there-light-at-the-end/> [citirano: 10.08.2024.]
- [17] BFT International Concrete Plant + Precast Technology. Geothermal Segments: The Tunnel as Heat Supplier [Internet]. Dostupno na: https://www.bft-international.com/en/artikel/bft_Geothermal_Segments_The_Tunnel_as_Heat_Supplier-2568184.html [citirano: 11.08.2024.]
- [18] Oberhauser A.; *Verfahrens und Komponentenentwicklung zur Planung von Tunnelthermie – Anglen* [doktorski rad]. Beč: Vienna University of Technology; 2006.
- [19] Adam D.; Markiewicz R.; *Energy from earth-coupled structures, foundations, tunnels and sewers*. Geotechnique. 2009;59(3):229-36.
- [20] Tunnel Online. Geothermal segments in tunnels: Energy-efficient heating solutions [Internet]. Dostupno na: https://www.tunnel-online.info/en/artikel/artikel_en_1274298.html [citirano: 15.08.2024.]
- [21] Đurić T.; Rakić D.; Čaki L.; Ćorić S.; Thermal properties of soil. In: Proceedings of iNDiS 2018 Međunarodna naučna konferencija - International Scientific Conference; 2018 Nov; Novi Sad, Serbia. Novi Sad: Fakultet tehničkih nauka; 2018.
- [22] Insana A.; Thermal and structural performance energy tunnels [Internet]. June 2020
- [23] Rakić D.; Šušić N.; Basarić I.; Geotechnical aspects of the use of geothermal energy potential [Internet]. 2024 University of Belgrade, Faculty of Mining and Geology.
- [24] Lupattelli A.; Salciarini D.; Cecinato F.; Veveakis M.; Bodas Freitas T.M.; Bourne-Webb P.J.; Temperature dependence of soil-structure interface behaviour in the context of thermally-activated piles: A review. *Geotext Geomembranes*.

- [25] Barla M.; Insana A.; Energy Tunnel Segmental Lining: an Experimental Site in Turin Metro. Turin: Politecnico di Torino, Department of Structural, Building and Geotechnical Engineering; 2018.
- [26] Barla M.; Insana A.; Alvi MR.; Thermal performance assessment of an energy lining for the Lyon-Turin base tunnel. Turin: Politecnico di Torino, Department of Structural, Building and Geotechnical Engineering; 2022.
- [27] Duncan P.; Chen Q.; De Silva M.; Winter A.; Winterling R.; The design of thermal tunnel energy segments for Crossrail [Internet]. 2014 [pristupljeno 30.08.2024.].
- [28] Rocscience Inc.. RS2 Overview [Internet]. Dostupno na: <https://www.rocscience.com/help/rs2/overview> [pristupljeno 30.08.2024.].
- [29] Rocscience Inc. Rocscience RS2. Verzija 20.0 [softverski program]. Toronto: Rocscience Inc.; 2024. Dostupno na: <https://www.rocscience.com>
- [30] A. Anongphouth, *Investigating the Performance of Geothermal Energy Piles using Coupled Thermo-Hydro-Mechanical Finite Element Analyses*, Winnipeg, Manitoba, 2019.

POPIS SLIKA

Slika 1. Prikaz ukupne potrošnje pojedinih izvora energije iz 2019. godine (Izvor: [3]).....	1
Slika 2. Shema energetske geotehničke konstrukcije koja uključuje: energetske zid, energetske tunele, energetske temelje i energetske pilote (Izvor: [11])	5
Slika 3. Shematski prikaz prijenosa energije energetskim tunelom (Izvor: [6]).....	6
Slika 4. Prikaz hladnog i toplog tunela u prirodnim uvjetima (Izvor: [12])	7
Slika 5. Prikaz a) toplog i b) hladnog tunela pri termalnoj aktivaciji (Izvor: [9]).....	8
Slika 6. Shema koncepta energetske tunela (Izvor: [12]).....	9
Slika 7. Prikaz postavljenih energetske segmenata putem TBM (Izvor: [17]).....	10
Slika 8. Shematski prikaz tunelske segmentne obloge opremljene kao izmjenjivač topline (Izvor: [8])	11
Slika 9. Prikaz segmenta energetske tunela opremljenog s cijevima za apsorpciju unutar armature, s prstenastim spojem (Izvor: [20]).....	12
Slika 10. Primjer konfiguracije cijevi a) okomito i b) paralelno s osi energetske tunela (Izvor: [1]).....	12
Slika 11. Shema energetske tunela s podgradnim elementima iskapanog prema NATM metodi (Izvor: [5, 14]).....	13
Slika 12. Prikaz energetske geotekstila (geokompozita) instaliranog u energetskom tunelu (Izvor: [14]).....	14
Slika 13. Shematski prikaz sučelja tlo - konstrukcija (Izvor: [24]).....	17
Slika 14. Mehanizmi prijenosa topline u ovisnosti o veličini zrna i stupnju zasićenosti (Izvor: [21])	19
Slika 15. Prikaz načina prijenosa topline u energetskim tunelima (Izvor: [22]).....	20
Slika 16. Prikaz utjecaja a) OCR u sitnozrnim tlima i b) D_r u krupnozrnim tlima na volumske deformacije pri zagrijavanju (Izvor: [24]).....	24
Slika 17. Utjecaj temperature na kut trenja za a) sitnozrna tla i b) krupnozrna tla (Izvor: [24])	26
Slika 18. (a) energetske tunel Stuttgart-Fasanenhof, (b) energetske tunel Jenbach, (c) skica relevantnog vertikalnog presjeka energetske tunela Stuttgart-Fasanenhof i (d) skica relevantni vertikalni presjek Jenbachovog energetske tunela (Izvor: [1])	28
Slika 19. Metro Torino od stanice Bengassi do stanice Lingotto (Izvor: [25]).....	29
Slika 20. a) ENERTUN konfiguracija GROUND b) ENERTUN konfiguracija AIR c) ENERTUN konfiguracija GROUND&AIR (Izvor: [8]).....	31
Slika 21. a) Armaturni koš s ugrađenim cijevima b) Armaturni koš u kalupu segmenta c) Betoniranje segmenta d) Betoniran segment (Izvor: [25])	31

Slika 22. a) Lokacija piezometra na gradilištu b) Mjerenje temperature c) Bušotina d) dodatne sonde za mjerenje temperature zraka unutar tunela i na površini (Izvor: [25])	32
Slika 23. Geotermalni profil dijela tunela na željezničkoj pruzi Torino - Lyon (Izvor: [26])..	33
Slika 24. 3D konfiguracija ENERTUN sustava (Izvor: [26]).....	34
Slika 25. Prikaz radnog načina kada je geotermalni izmjenjivač topline suspendiran (Izvor: [26])	35
Slika 26. Prikaz radnog načina sve četiri vrste radnih uvjeta (Izvor: [26])	35
Slika 27. Prikaz TES sustava (Izvor: [27]).....	37
Slika 28. Prikaz postavljanja cijevi TES sustava (Izvor: [27])	38
Slika 29. Prikaz veze segmenata (lijevo), Konusni oblik izbočine na Crossrail projektu (desno) (Izvor: [27]).....	38
Slika 30. "Reverse return" metoda slaganja cijevi (Izvor: [27]).....	39
Slika 31. 1D model ventilacije tunela (Izvor: [27])	40
Slika 32. Geometrijske karakteristike modela.....	42
Slika 33. Prikaz slike modela sa postavljenom mrežom i rubnim uvjetima [29]	43
Slika 34. Prikaz postavljenih termalnih rubnih uvjeta na modelu [29].....	44
Slika 35. Prikaz odnosa temperatura-vrijeme na različitim mjestima u modelu pri cikličkom grijanju i hlađenju	45
Slika 36. Prikaz odnosa temperatura-vrijeme na različitim mjestima u modelu pri grijanju tijekom cijele godine.....	46
Slika 37. Prikaz odnosa temperatura-vrijeme na različitim mjestima u modelu pri suspendiranom režimu grijanja.....	46
Slika 38. Prikaz slijeganja površine tla iznad tunela za različite režime grijanja unutar tunela kroz godinu dana.....	47
Slika 39. Prikaz slijeganja na polovici visine nadsloja tunela za različite režime grijanja unutar tunela kroz godinu dana.....	48
Slika 40. Prikaz kontura slijeganja nakon 3 mjeseca [29]	49
Slika 41. Prikaz kontura slijeganja nakon 6 mjeseca [29]	49
Slika 42. Prikaz kontura slijeganja nakon 9 mjeseca [29]	50
Slika 43. Prikaz kontura slijeganja nakon 12 mjeseca [29].....	50
Slika 44. Prikaz slijeganja površine tla na horizontalnoj udaljenosti od osi tunela za karakteristične faze	51

POPIS TABLICA

Tablica 1. Karakteristične vrijednosti termalnih svojstava (Izvor: [23]).....	22
Tablica 2. Prikaz mehaničkih i termalnih karakteristike okolnog tla (engl. London clay) i tunelske obloge [30].....	43