Napredni geotermalni sustav (EGS)

Marciuš, Karlo

Master's thesis / Diplomski rad

2018

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering / Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:169:541030

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-29**



Repository / Repozitorij:

Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering Repository, University of Zagreb







SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

RUDARSKO-GEOLOŠKO-NAFTNI FAKULTET

Diplomski studij naftnog rudarstva

NAPREDNI GEOTERMALNI SUSTAV (EGS)

Diplomski rad

Karlo Marciuš

N - 229

Zagreb, 2018.

Sveučilište u Zagrebu
Rudarsko-geološko-naftni fakultet

Diplomski rad

NAPREDNI GEOTERMALNI SUSTAV (EGS)

KARLO MARCIUŠ

Diplomski rad izrađen: Sveučilište u Zagrebu
Rudarsko-geološko-naftni fakultet
Zavod za naftno inženjerstvo
Pierottijeva 6, 10 000 Zagreb

Sažetak

EGS (engl. *enhanced or engineered geothermal system*) poboljšani ili projektirani geotermalni sustav tehnologija je u iskorištavanju geotermalne energije. Tehnolgija se temelji na visokoj temperaturi ležišta koja se postiže dubokim bušenjem. Temelji se i na stimuliranju ležišta odnosno na hidrauličkom frakturiranju kako bi se povećala propusnost stijena što rezultira boljim protjecanjem radnog fluida kroz ležište. Ujedno osigurava i veću kontaktnu površinu između radnog fluida i stijene. Na taj način poboljšan je prijenos topline sa stijene na fluid koji se proizvodi. Pregled literature i projekata dio su prvog dijela rada, a nakon toga slijede teorijski apsekti EGS-a, prema kojima je napravljen model dobivanja toplinske energije iz geotermalnog ležišta EGS-a.

Ključne riječi: EGS, temperatura, hidrauličko frakturiranje, toplinska energija

Diplomski rad sadrži: 61 stranica, 12 slika, 8 tablica, 8 grafikona i 57 referenci.

Jezik izvornika: Hrvatski

Diplomski rad pohranjen: Knjižnica Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta
Pierottijeva 6, Zagreb

Mentor: Dr. sc. Tomislav Kurevija, izvanredni profesor RGNF-a

Ocjenjivači: 1. Dr. sc. Tomislav Kurevija, izvanredni profesor RGNF-a
2. Dr. sc. Domagoj Vulin, izvanredni profesor RGNF-a
3. Dr. sc. Luka Perković, docent RGNF-a

Datum obrane: 28. rujna 2018., Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Sveučilište u Zagrebu

Faculty of Mining, Geology
and Petroleum Engineering
University of Zagreb

Master's thesis

ENHANCED GEOTHERMAL SYSTEM (EGS)

KARLO MARCIUŠ

Thesis completed at: University of Zagreb
Faculty of Mining, geology and Petroleum Engineering
Department of petroleumengineering
Pierottijeva 6, 10 000 Zagreb

Summary

EGS enhanced or engineered geothermal system is a technology that deals with the use of geothermal energy. The technology is based on high temperature of reservoirs which is achieved by deep drilling. It is also based on the stimulation of the reservoir or hydraulic fracturing to increase the permeability of the rock which results in better flow of a working fluid through the reservoir. At the same time, it provides a larger contact surface among the working fluid and the rock. With this process, the heat transfer from the rock to the produced fluid is improved. First part of thesis consists of literature and project review. Further come the teoretical aspects of EGS, according to which a model of obtaining thermal energy from geothermal reservoir of EGS is made of.

Key words: EGS, temperature, hydraulic fracturing, thermal energy

Master's Thesis contains: 61 pages, 12 figures, 8 tables, 8 graphs i 57 references.

Original in: Croatian

Thesis deposited at: The Library of Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering
Pierottijeva 6, Zagreb

Supervisor: Associate Professor Tomislav Kurevija, PhD

Reviewers:
1. Associate Professor Tomislav Kurevija, PhD
2. Associate Professor Domagoj Vulin, PhD
3. Assistant Professor Luka Perković, PhD

Date of defence: September 28th, 2018,
Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering, University of Zagreb

SADRŽAJ

POPIS TABLICA ..... **I**
POPIS SLIKA ..... **I**
POPIS GRAFIKONA ..... **II**
POPIS KORIŠTENIH KRATICA ..... **II**
POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I JEDINICA ..... **III**
1. UVOD **1**
2. PREGLED LITERATURE **2**
2.1. Poboljšani geotermalni sustav (EGS) 2
2.2. Modeliranje ili numerička simulacija 3
2.3. Potencijal i okoliš 4
2.4. Procjena učinka 5
2.5. Tehnika frakturiranja 6
3. PREGLED EGS POLJA **8**
3.1. Pilot projekti 8
3.2. Europa 10
3.3. Australija 11
3.4. Sjedinjene Američke Države 12
4. TEORIJSKI ASPEKTI EGS **15**
4.1. EGS 15
4.2. Geologija EGS ležišta 17
4.2.1. EGS u sedimentnim stijenama iscrpljenih polja ugljikovodika 18
4.2.2. Pridobivanje toplinske energije iz EGS ležišta 18
4.2.3. Frakturirani volumen stijene i geometrijski raspored bušotina 20
4.3. Frakturiranje i stvaranje EGS ležišta 21
4.4. Promjena temperature i tlaka kroz EGS 26
4.4.1. Termička svojstva stijena 26
4.4.2. Promjena temperature u bušotinama i ležištu 28
4.4.3. Promjena tlaka u bušotinama i ležištu 35
5. MODEL DOBIVENE TOPLINSKE ENERGIJE IZ EGS SUSTAVA **39**
5.1. Ulazni podaci 42
5.1.1 Utisna bušotina 44

5.1.2 Ležište 44
5.1.3 Proizvodna bušotina 45
5.1.4 Snaga i toplinska energija 45
5.1.5 Pad tlaka u bušotinama i ležištu 51
5.2. Bušotina 3500/0.04/300 53
6. ZAKLJUČAK 56
7. LITERATURA 57

POPIS TABLICA

Tablica 5-1. Parametri konstantnih vrijednosti 42
Tablica 5-2. Prosječna toplinska vodljivost stijene, prosječna specifična obujamska toplina stijene, toplinska vodljivost stijene, specifični toplinski kapacitet stijene i gustoća stijene za određene dubine 43
Tablica 5-3. Dobivena temperatura na ušću proizvodne bušotine i dobivena toplinska energija pri konstantnom masenom protoku od 30 kg/s. 46
Tablica 5-4. Dobivena temperatura na ušću proizvodne bušotine i dobivena toplinska energija pri konstantnom masenom protoku od 30 kg/s. 47
Tablica 5-5. Dobivena temperatura na ušću proizvodne bušotine i dobivena toplinska energija pri konstantnom masenom protoku od 30 kg/s. 48
Tablica 5-6. Dobivena temperatura na ušću proizvodne bušotine i dobivena toplinska energija pri konstantnom masenom protoku od 30 kg/s. 49
Tablica 5-7. Dobivena temperatura na ušću proizvodne bušotine i dobivena toplinska energija pri konstantnom masenom protoku od 30 kg/s. 50
Tablica 5-8. Ulazni podaci EGS-a bušotine 3500/0.04/300 53

POPIS SLIKA

Slika 3-1. Slika glavnih projekata EGS-a u svijetu 8
Slika 4-1. Poboljšani geotermalni sustav 16
Slika 4-2. Pregled različito postavljenih bušotina i orijentiranih jednostrukih fraktura u frakturiranom EGS ležištu 22
Slika 4-3. Shematski prikaz stimuliranja klizanjem 23
Slika 4-4. Shematski prikaz novih fraktura koje nastaju od postojećih fraktura 24
Slika 4-5 Geotermalni gradijent Hrvatske (°C/100m) 28
Slika 4-6. Prijenos topline između utisne i proizvodne bušotine i formacije 30
Slika 4-7. Konceptualna skica jednostruke frakture kroz koju protječe voda 32
Slika 4-8. Shematski prikaz promjene tlaka kroz EGS sustav 36
Slika 5-1. EGS koncept s horizontalnom utisnom i proizvodnom bušotinom međusobno povezanim s jednostrukim frakturama 39

Slika 5-2. Proces kretanja temperature u EGS sustavu i dobivene toplinske energije 41
Slika 5-3. Visina dizanja pumpe H u ovisnosti o protoku Q i snaga pumpe P..... 55

POPIS GRAFIKONA

Grafikon 4-1. Faktor iskoristivosti topline iz EGS ležišta u odnosu na volumen ležišta 20
Grafikon 4-2. Kretanje toplinske vodljivosti stijena u odnosu na temperaturu..... 27
Grafikon 4-3. Kretanje difuznosti stijena u odnosu na temperaturu 28
Grafikon 5-1. Pad tlaka u utisnoj i proizvodnoj bušotini u ovisnosti o masenom protoku . 51
Grafikon 5-2. Pad tlaka u utisnoj i proizvodnoj bušotini u ovisnosti o promjeru zaštitnih cijevi 52
Grafikon 5-3. Pad tlaka u ležištu različitih protoka u ovisnosti o propusnosti..... 53
Grafikon 5-4. Kretanje temperature kroz 30 godina za različite protoke vode 54
Grafikon 5-5. Pad tlaka u odnosu na protok..... 54

POPIS KORIŠTENIH KRATICA

EGS (engl. *Enhanced or engineered geothermal system*) - poboljšani geotermalni sustav

MIT (engl. *Massachusetts Institute of Technology*)

GEOPHIRES (engl. *Geothermal energy for the Production of Heat and Electricity Economically Simulated*) – softverski alat geotermalne energije za proizvodnju toplinske i električne energije

CT (engl. *Computed tomography*) - računalna tomografija

GEISER (engl. *Geothermal Engineering Integrating Mitigation of Induced Seismicity in Reservoirs*) - geotermalno inženjerstvo za smanjenje inducirane seizmike u ležištu

POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I JEDINICA

A - geotermalni gradijent (°C/m)

A_p - površina poprečnog presjeka zaštitnih cijevi (m)

B - temperatura na površini (°C)

b - pola debljine frakture (m)

BHP_{prod} - tlak na dnu proizvodne bušotine (Pa)

BHP_{inj} - tlak na dnu utisne bušotine (Pa)

c - specifična toplina (J/kg°C)

c_p - specifična toplina fluida (J/kg°C)

c_r - specifična toplina stijene (J/kg°C)

c_w - specifična toplina vode (J/kg°C)

$c\rho$ - specifična obujamska toplina (J/m^3°C)

$c\rho_r$ - specifična obujamska toplina stijene (J/m^3°C)

D - udaljenost između utisne i proizvodne bušotine (m)

d - promjer bušotine ili cijevi (m)

D_{wb} - promjer kanala bušotine (m)

D_{ci} - unutarnji promjer zaštitnih cijevi (m)

D_{co} - vanjski promjer zaštitnih cijevi (m)

E - toplinska energija (Wh)

f - faktor trenja (bezdimenzionalna veličina)

g - ubrzanje sile teže (m/s^2)

G_t - geotermalni gradijent (°C/m)

H - dubina ležišta (m)

h - visina jednostruke frakture (m)

h_c - koeficijent prijenosa topline konvekcijom između vanjske i unutarnje površine tubinga (W/m^2°C)

h_L - koeficijent prijenosa topline fluida konvekcijom (W/m^2°C)

h_r - koeficijent prijenosa topline zračenjem (W/m^2°C)

k - propusnost (m^2)

L - dužina jednostruke frakture (m)

L_R - koeficijent relaksacije (m)

ṁ - maseni protok fluida (kg/s)

N - broj frakturiranih zona (bezdimenzionalna veličina)

n - ukupni broj godina proizvodnje (bezdimenzionalna veličina)

$P(t)$ - snaga (W)

Q - volumetrijski protok fluida kroz frakturu po jedinici visini h (m^2/s)

q - protok fluida (l/s)

Re - Reynoldsov broj (bezdimenzionalna veličina)

r_{ci} - unutarnji polumjer zaštitnih cijevi (m)

r_{co} - vanjski polumjer zaštitnh cijevi (m)

r_{fc} - polumjer isplačnog kolača (m)

r_{ins} - polumjer izolacije (m)

r_o - vanjski polumjer cijevi (m)

r_{to} - vanjski polumjer tubinga (m)

r_{ti} - unutarnji polumjer tubinga (m)

r_{wb} - polumjer kanala bušotine (m)

s - Laplaceova bezdimenzionalna varijabla

T - transmisivnost fracture (m^3)

T_e - temperatura formacije (°C)

T_{ebh} - temperatura na dnu proizvodne bušotine (°C)

T_{ro} - temperatura ležišta (°C)

$T_{f,prod}$ - temperatura proizvodnog fluida na ušću proizvodne bušotine (°C)

T_{wo} - temperatura utisnute vode u ležište (°C)

T_o - temperatura utisnutog fluida (°C)

$T_{f,inj}$ - temperatura utisnutog fluida na dnu utisne bušotine (°C)

T_D - bezdimenzionalna temperatura

$\overline{T}_{WD(z_D,s)}$ - bezdimenzionalna temperatura Laplaceove transformacije

t - vrijeme proizvodnje (s)

t_D - bezdimenzionalno vrijeme

t_D* - bezdimenzionalno vrijeme u Laplaceovoj transformaciji

t' - vrijeme utiskivanja s obzirom na vremensko kašnjenje između točke utiskivanja i izlaza fluida iz frakture (s)

U - ukupni koeficijent prijenosa topline (W/m^2°C)

v - brzina protjecanja fluida (m/s)

WHP_{prod} - tlak na ušću proizvodne bušotine (Pa)

WHP_{inj} - tlak na ušću utisne bušotine (Pa)

X_e - polovica udaljenosti između jednostrukih fraktura (m)

X_{ED} - bezdienzionalna duljina polovice udaljenosti između jednostrukih fraktura

y - dubina proizvodnje (m)

z - stvarna vertikalna dubina (m)

z_D - bezdimenzionalna dužina jednostruke frakture

z* - duljina frakture (m)

α - temperaturna vodljivost ili difuznost (m^2/s)

α_r - temperaturna vodljivost ili difuznost stijene (m^2/s)

α* - bezdimenzionalni parametar

β - broj radnih sati godišnje u postocima (%)

β* - bezdimenzionalni parametar

ΔP_{inj} - pad tlaka u utisnoj bušotini (Pa)

ΔP_{prod} - pad tlaka u proizvodnoj bušotini (Pa)

ΔP_{res} - pad tlaka u ležištu (Pa)

ΔT - razlika između temperature proizvodnog fluida i temperature utisnutog fluida (°C)

Δt_i - određeni period proizvodnje (s)

ε - apsolutna hrapavost cijevi (m)

Λ - bezdimenzionalni veličina za izračun faktora trenja

λ - toplinska vodljivost (W/m°C)

λ_{cement} - toplinksa vodljivost cementa (W/m°C)

$\lambda_{filtercake}$ - toplinska vodljivost isplačnog kolača (W/m°C)

λ_{ins} - toplinska vodljivost izolacijskog materijala (W/m°C)

$\lambda_{invaded}$ - toplinska vodljivost područja ispunjenog filtratom isplake (W/m°C)

λ_r - toplinska vodljivost stijene (W/m°C)

λ_{steel} - toplinska vodljivost čelika (W/m°C)

μ - koeficijent dinamičke viskoznosti fluida (Pas)

θ - kut što ga bušotina zatvara s horizontalom (°)

ρ - gustoća (kg/m^3)

ρ_r - gustoća stijene (kg/m^3)

ρ_w - gustoća vode (kg/m^3)

τ - vrijeme prolaženja toplinskog toka (s)

ω - geotermalni gradijent (°C/m)

(dp/dz) - ukupni gradijent pada tlaka (Pa/m)

$(dp/dz)_A$ - gradijent pada tlaka zbog ubrzanja (Pa/m)

$(dp/dz)_H$ - hidrostatski gradijent pada tlak (Pa/m)

$(dp/dz)_F$ - gradijent pada tlaka zbog trenja (Pa/m)

1. UVOD

Tema diplomskog rada je EGS (engl. *enhanced or engineered geothermal system*) poboljšani ili projektirani geotermalni sustav kao jedan vid tehnologije u iskorištavanju geotermalne energije. EGS se odnosi na metodu izdvajanja toplinske energiju iz vruće stijene cirkulirajući fluid u frakturiranoj sredini. Bolje iskorištavanje geotermalne energije postiže se bušenjem do dubine visokih temperatura, stvaranjem dovoljne propusnosti da utisnuti fluid prođe kroz ležište i da je u što većem kontaktu s vrućom stijenom. Na površini se dobije toplinska energija koja najčešće služi za proizvodnju električne energije ili energije grijanja. Prvi dio rada posvećen je pregledu literature i bitnim EGS projektima koji su doprinjeli razvoju ove tehnologije koja se primjenjuje posljednjih 40 godina. Nadalje su opisani najbitniji aspekti ključni za zadovoljavajuće funkcioniranje EGS-a, poboljšanje izmjene topline između radnog fluida i ležišta i način pridobivanja što veće količine topline iz vruće stijene. Napravljena je detaljana analiza kretanja temperature i pada tlaka kroz sustav koji je podijeljen na utisnu i proizvodnu bušotinu i EGS ležište. Na temelju teorijskog dijela modelirani su slučajevi različitih parametara od koji su izdvojeni dubina, geotermalni gradijent i duljina jednostruke frakture ležišta. Dio parametara izračunat je u ovisnosti o dubini ležišta dok je ostatak parametara fiksiran. Prema nizu temperatura dobivenih iz modela računata je toplinska energija koja je i najbitniji faktor iskorištavanja resursa EGS-a.

2. PREGLED LITERATURE

2.1. Poboljšani geotermalni sustav (EGS)

Izraz EGS (engl. *enhanced or engineered geothermal system*) vuče korijene početkom sedamdesetih godina prošlog stoljeća kada je započeo rad Nacionalnog laboratorija Los Alamos na projektu vruće suhe stijene (engl. *hot dry rock*) na Fentom Hillu (Cummings i Morris, 1979). Vruća suha stijena poznata je kao gotovo nepropusna formacija koju je potrebno frakturirati ili kao vruća stijena gdje su prisutne slabopropusne prirodne frakture. Isto tako postoji vruća mokra stijena (engl. *hot wet rock*) kada je utvrđeno da formacija nije posve suha već da sadrži fluid. Primjer vruće mokre stijene je EGS projekt Soultz-sous-Forets u Francuskoj (Duchane, 1998). Daljnja terminologija koja se susreće u literaturi uključuje stimuliranje geotermalnog sustava, iskorištavanje geotermalne energije na većim dubinama iz kojeg proizlazi koncept EGS-a.

Prema Potteru i suradnicima (1974) najbolji tip stijene za vruću suhu stijenu je granit ili ostale kristalne, bazaltne stijene čija temperatura bi se trebala kretati od 150 do 500 °C na dubini od 5 do 6 kilometara, s prosječnim protokom fluida od 265 l/s u trajanju proizvodnje više od deset godina. Hidrauličkim frakturiranjem kontaktna površina stijene i fluida trebala bi iznositi približno 16 km^2, pri ukupnoj prosječnoj toplinskoj instaliranoj snagi od 250 MW koja se može dobiti iz površinskog izmjenjivača topline u koji ulazi voda pod tlakom na temperaturi od 280 °C i izlazi na 65 °C. Na temelju tih kriterija, potencijalna električna energija koja bi se mogla generirati iz sustava iznosila bi oko 450 GWh električne energije, uz učinkovitost od 20 %.

Tijekom godina predložene su različite definicije EGS-a, koje pokrivaju različite tipove stijena, dubine, temperature, propusnosti ležišta i poroznosti, te frakturiranje stijena različitim metodama. U nastavku su navedeni neki primjeri definicija EGS-a koji se koriste u javnoj domeni.

Massachusetts Institute of Technology (MIT) vodio je interdisciplinarnu komisiju koja je definirala EGS kao projektirana ležišta koja su stvorena za izvlačenje, ekstrakciju ekonomične količine topline iz geotermalnih formacija s niskom propusnošću i / ili poroznosti. Za tu procjenu, ova definicija prilagođena je tako da uključuje sve geotermalne resurse koji nisu u komercijalnoj proizvodnji i zahtijevaju stimulaciju odnosno

frakturiranje. EGS isključuje visoko kvalitetne produktivne geotermalne sustave, ali uključuje slabo propusne resurse u sedimentnim i bazaltnim formacijama, kao i magmatske sustave, formacije pod visokim tlakom i neproduktivne geotermalne resurse. Proizvodnja vruće slojne vode pri vađenju nafte i plina uključuje nekonvencionalni tip resursa EGS-a koji bi se mogao razviti u kratkom vremenu i pružiti prvi korak klasičnoj EGS ekspoataciji (MIT, 2006).

Australski odbor za geotermalnu energiju smatra EGS kao dio stijene koji sadrži korisnu energiju, čije je pridobivanje energije povećano primjenom frakturiranja.

Williams i suradnici (2011) predložili su da EGS uključuje dio geotermalnog resursa za koji možemo mjeriti povećanje u proizvodnji u odnosu na njegovo prirodno stanje ako se primjeni mehaničko, termalno i / ili kemijsko stimuliranje. U ovoj definiciji nema ograničenja glede temperature, vrste stijene ili već postojeće geotermalne eksploatacije.

Nema univerzalne definicije EGS-a, pa se ona jednostavno može uzeti skraćeno kao „nekonvencionalni geotermalni sustav“.

2.2. Modeliranje ili numerička simulacija

Numerička simulacija jedna je od glavnih alata za istraživanje EGS sustava. Istraživanja se temelje na konceptu vruće suhe stijene i uključuje procjenu temperature stijene, umjetno stvorenog geotermalnog ležišta, izmjene topline i pridobivanje energije. Huang i suradnici (2015) provodili su numeričku simulaciju procesa ekstrakcije topline u frakturiranom ležištu i prognozirali promjene glavnih parametara u sljedećih 30 godina na temelju podataka ležišta vruće suhe stijene u Songlio u Kini. Chen i suradnici (2013) prognozirali su dugoročne procese EGS sustava s različitim geološkim uvjetima s vlastitim razvojem numeričkog modela. Wang i Zhang (2011) predstavili su simulacije mrežnih fraktura u analizi procesa hidrauličkog frakturiranja i ispitivanja različitih konceptualnih modela za protok kroz frakture u EGS sustavu.

Razvoj EGS-a kao jedan vid geotermalne tehnologije usporio se zbog inducirane seizmike. Sofisticirani sustavi koji ocjenjuju učinkovitost provedenog procesa stimuliranja, može pomoći u uspješnom razvoju EGS tehnologije. Karvounisu i Wimer (2015) predstavili su hibridni model koji kombinira numeričke proračune s geomehaničkim modeliranjem. Hibridni model može pomoći u procjenjivanju izazvane opasnosti od seizmičnosti i pridobivanja toplinske energije nakon procesa stimuliranja ležišta.

Struktura propusnosti koja nastaje zbog visokog tlaka fluida protjecanjem kroz geotermalni resurs najvažniji je parametar u kontroli izvedivosti i održivosti EGS-a. Miller (2015) je koristio minimalistički pristup pri modeliranju koji pokazuje da se sva zapažanja pri eksperimentu utiskivanja fluida na geotermalnom polju u Baselu u Švicarskoj dobro slažu s jednostavnim modelom gdje je dominantna kontrola sustava nad velikom promjenom u propusnosti pri početnom klizanju. Poveznica između promatranja i najjednostavnijih modela pokazuje da sustavi mogu biti manje kompliciran nego je to predviđeno, nudeći sofisticiraniju budućnost u modeliranju koja pridonosi iskorištavanju i razvoju EGS-a.

McClure i Horne (2014) izvršili su računalno modeliranje sa simulatorom odvojenih mrežnih fraktura koje se povezuju s protokom fluida koji uzrokuju naprezanje, prilikom čega dolazi do deformacije fraktura. Rezultati modeliranja pokazuju da kod izazivanja klizanja u postojećim frakturama mora postojati nekoliko geoloških uvjeta kako bi se spriječilo značajno formiranje novih ili proširenje postojećih fraktura.

Numerička simulacija i modeliranje postala je standardni analitički alat za znastvenike i inženjere u procijenjivanju potencijala i performansi EGS-a. Razni numerički simulatori razvijeni su od strane industrije, sveučilišta i nacionalnih laboratorija za razumjevanje i primjenu na različitim geotermalnim poljima EGS-a.

2.3. Potencijal i okoliš

Chamorro i suradnici (2014) izračunali su temperature u Europi na dubini od 3500 metara do 9500 metara. Procjenili su da je potencijalna energija koja se može dobiti EGS tehnologijom izrazito velika i iznosi oko 6560 GWe, dok održiv potencijal iznosi 35 GWe. Geotermalni resurs za EGS u Europi ekonomski je ograničen primjenom smanjenja novčanih sredstava za različite tehno ekonomske scenarije za buduće EGS projekte. Prvi važan korak je izgradnja podzemnog modela temperature kopna u Europe kako bi se procjenio geotermalni resurs odnosno baza za EGS. S modelom podzemne temperature i novim tehnologijama, smanjit će se troškovi i lako izračunati tehnički odnosno temperaturni potencijal određenog polja koji je dobar uvodu u EGS projekt (Limberger i sur., 2014).

Menberg i suradnici (2016) predstavili su studiju koja primjenjuje metodologije procjene utjecaja na okoliš EGS postrojenja. Zbog malog broja komercijonalno instaliranih elektrana EGS-a, takve studije su rijetke i obično predstavljaju vrlo specifične uvjete i

karakteristike samog postrojenja. Detaljno ispitivanje pokazuje da je kod postojećih EGS elektrana okoliš najviše ugrožen tijekom proces bušenja, kao jednog od elemenata pri realizaciji cijelog projekta. Kada postrojenje počinje s radom radni fluid kruži u zatvorenom sustavu i utjecaj na okoliš je minimalan, gotovo nikakav.

2.4. Procjena učinka

GEOPHIRES (engl. *Geothermal energy for the Production of Heat and Electricity Economically Simulated*) softverski je alat koji kombinira model ležišta, bušotine i model elektrane s kapitalnim i operativnim troškovima za procjenu tehničkih i ekonomskih parametara EGS-a. Softver omogućuje studije izvodljivosti korištenja geotermalnog resursa ne samo za proizvodnju električne energije, već i za izravno zagrijavanje i ostale kombinacije primjene topline.

Razumjevanje procesa izmjene topline u geotermalnom ležištu, ključno je za učinkovitost pridobivanja, ekstrakcije topline i održivog korištenja geotermalnog ležišta. Jiang i suradnici (2013) razvili su novi trodimenzionalni model za proučavanje procesa izmjene topline u susatvu EGS-a.

Read i suradnici (2016) predstavili su istraživanje o upotrebi konvencionalnog Rankine ciklusa, trilateralni flash ciklus i sustav Rankine ciklus vodene pare za proizvodnju energije iz EGS-a. Rezultati pokazuju relativne prednosti različitih energetskih sustava i pružaju uvid u operativne zahtjeve određene opreme za proizvodnju energije. Li i Lior (2015) modelirali su i izračunali potrošnju energije za izgradnju EGS sustava bušotina, protok i prijenos topline radnog fluida. Konačno, predložene su smjernice za projektiranje EGS sustava bušotina temeljene na ekonomskoj analizi i izračunatom povratu ulaganja izražen u energiji. Za predložene sustave EGS-a omjer dobivene energije i energije koja pokriva troškove realizacije projekta bio je 33.8 – 286.2.

Mudunuru i suradnici (2016) predstavili su studiju pomoću podataka iz projekta vruće suhe stijene iz Fenton Hilla. Cilj rada bio je formirati nove modele pomoću kojih će se analizirati i predvidjeti izlazna geotermalna energiju EGS ležišta. Izmijenjeni modeli koristili su se za procjenu utjecaja ležišnih svojstava na dobivenu izlaznu energiju. Svojstva koja su uzeta u obzir su propusnost frakturiranih zona, tlak na dnu bušotine, protok utisnutog fluida itd.

2.5. Tehnika frakturiranja

EGS sustavi potrebni su za ekonomki prihvatljivu ekstrakciju topline iz slabo propusnih geotermalnih ležišta. Zimmermann i suradnici (2015) su predstavili razne oblike hidrauličkog frakturiranja za razvijanje prikladne izmjene topline. Primijenili su koncept višestrukog frakturiranja i cikličkih postupaka stimulacije. Svrha je kontrolirati širenje fraktura i istodobno smanjiti rizik od neželjenih seizmičkih aktivnosti izvan granica polja, ovisno o izloženosti ljudi i naselja.

Van Oversteeg i suradnici (2014) pokazali su analizom da se toplinska konvekcija i svojstva protočnih fraktura za naftne i plinske bušotine mogu upotrijebiti za procjenu propusnosti prirodnih fraktura i njihovog volumetrijskog povećanja, to uvelike pridonosi razvoju geotermalnih polja i pokazuje velik EGS potencijal.

Zang i suradnici (2014) opisali su tehnologiju frakturiranja za horizontalne bušotine koje se koriste u vrućim suhim stijenama. U tom se slučaju kombiniraju proces frakturiranja i proizvodnja vrućeg fluida na površinu. Zhang i suradnici (2014) su provodili eksperimente između hrapavih i glatkih fraktura. Numeričke modele hrapavih i glatkih fraktura radili su na temelju podataka dobivenih CT skeniranjem. Zaključeno je da na prijenos topline u hrapavim frakturama može utjecati kanalno strujanje fluida.

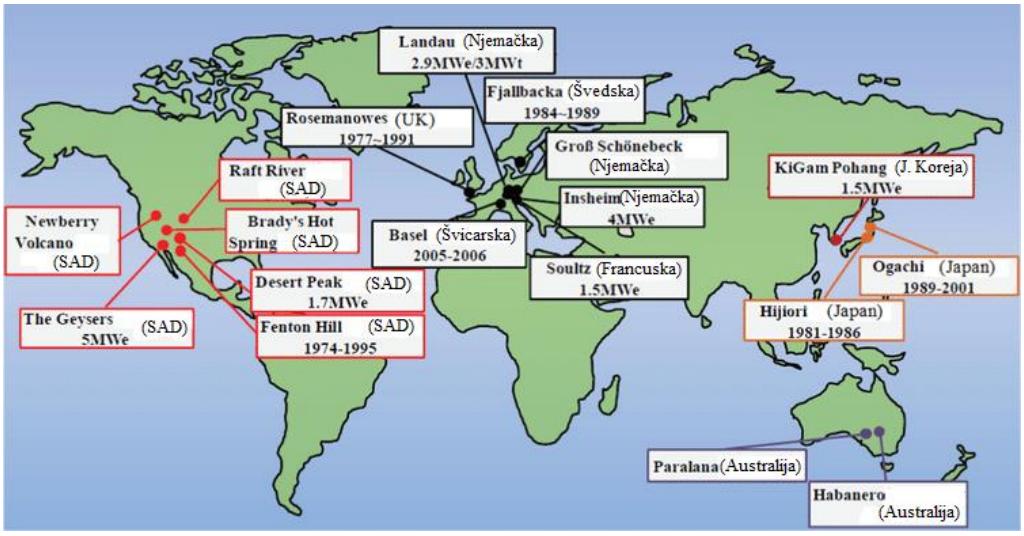
Safari i Ghassemi (2015) razmotrili su trodimenzionalnu analizu mreže fraktura u EGS sustavu s posebnim naglaskom na ulogu povezanih termo hidrodinamičkih procesa i mehaničkih međudjelovanja fraktura. Ponašanje sustava modelirano je povezivanjem metode termo poroelastičnim pomicanjem plohe koja razdvaja dvije različite stijene s metodom konvekcije i kondukcije, provođenje topline unutar fraktura. Svrha je utvrditi protok i provođenje topline u frakturama matrice ležišta.

U EGS-u hladni radni fluid, obično je to voda, utiskuje se u frakturirano ležište kako bi se poboljšala učinkovitost dobivene energije povećavajući provodljivost kroz postojeće i novo nastale frakture. Kod jednofaznog protoka dolazi do promjene fraktura u ležištu, za modeliranje takvog sustava predstavljen je novi pristup, koji se temelji na rangiranju frakture što rezultira mrežom višestrukih dominantnih fraktura koje se javljaju kod većine strujanja fluida. Glavna prednost novog pristupa je da ne zahtjeva dodatne troškove kada se povezuju domene pri dodavanju novih fraktura (Karvounis i Jenny, 2017).

Hofmann i suradnici (2016) razvili su sučelje koje služi kod specifičnog, složenog razvoja hidrauličkih fraktura i toplinskog ponašanja, prilagođeno za EGS. Zaključuje se da treba stimulirati utisnu kao i proizvodnu bušotinu kako bi se postigla bolja hidraulička veza između njih. Preporuka je da se upotrijebi razmak između mjesta frakturiranja, oko 100 metara, kako bi se povećala složenost mreže fraktura. Bušotine bi trebale biti bušene pod kutom od 45° da se ostvare bolja toplinska i hidraulička svojstva.

3. PREGLED EGS POLJA

Prvi projekt EGS-a bio je Fenton Hill u Novom Meksiku godine 1974. Gotovo 40 godina neprestanog tehničkog ispitivanja i poboljšanja utvrđeno je izvedivost EGS koncepta, stvaranje frakturiranog geotermalnog ležišta i pridobivanje topline. Slika 3-1. pokazuje lokacije važnih EGS polja diljem svijeta. Svaka pojedina zemlja ima određene specifične ciljeve u razvoju EGS-a. Neka polja su još u fazi razvoja, pilot projekti i bit će izgrađena i dovršena u bliskoj budućnosti. Analiza i karakteristike svih polja pomoći će u formuliranju strategije razvoja EGS-a.



Slika 3-1. Slika glavnih projekata EGS-a u svijetu (Dobson, 2013)

Dobson (2013) je istaknuo da je razvoj EGS-a vrlo rizičan, posebno u stvaranju umjetnih ležišta, odnosno kod frakturiranja. Tijekom proteklih 40 godina tehnologija stvaranja fraktura u vrućim i tvrdim stijenama razvila se isključivo zbog iskustva proizvodnje nafte i plina. Budući da je tehnologija hidrauličkog frakturiranja dostigla vrlo visok stupanj, postotak uspješnosti EGS-a se povećava. Tehnička izvedivost ovisi o lokalnim uvjetima pojedinih polja, prema tome odabir mjesta za EGS vrlo je važan.

3.1. Pilot projekti

Prvo sjedište EGS projekta bilo je Fenton Hill u Sjedinjenim Američkim Državama, u sjevernom dijelu Novog Meksika. Projekt je razvio Nacionalni laboratorij Los Alamos. Zadatak je bio stvaranje ležišta u granitu na dubini od 4400 metara, gdje je temperatura 300 °C, te ispitivanje binarnog ciklusa koji generira električnu energiju od 60 kW koji je radio na niskim i srednjim temperaturama. Međutim, projekt je bio ukinut zbog

nemogućnosti dostizanja očekivanog kapaciteta energije. Iako se elektrana za komercijalnu upotrebu nije mogla napraviti, projekt je dao sljedeće važne rezultate. Provela se tehnička izvedivost bušenja do 5 kilometara u tvrdu stijenu, granit. Projekt je potvrdio da se tehnologija hidrauličkog frakturiranja može koristiti u eruptivnoj ili metamorfnoj stijeni niske propusnosti kako bi se stvorile frakture s ukupnim volumenom od 1 km^3. Ako se ležišna formacija nalazi u okruženju velikog naprezanja, potreban je kontinuirani visoki tlak kod utiskivanja da bi se frakture održavale otvorenim. I budući da se temperatura s dubinom mijenja, potrebno je razviti opremu otpornu na visoke temperature za prikupljanje podataka o formiranju naprezanja, orijentaciji fraktura, temperaturi u formaciji, brzini protoka i tlaku (MIT, 2006).

Rosemanowes projekt realizirala je rudarska škola Cornwall u Velikoj Britaniji u regiji Cornwall. Potencijal energije EGS-a iznosio je oko 3 GWe. Ciljevi razvoja bili su održavanje kapaciteta proizvodnje od 50 do 100 l/s, s minimalnim radnim vijekom od 5 godina i bez smanjenja temperature proizvodnog fluida. Zbog velikih gubitaka cirkulacijskog radnog fluida koji je prelazio i 70 %, nije bilo moguće stvoriti umjetne frakture hidrauličkim frakturiranjem. Izmjena topline ostvarivala se kroz prirodne frakture što nije bilo dovoljno da bi se ostvarili zacrtani ciljevi i ubrzo se prekinuo rad na projektu. Rezultati EGS Rosemanowes poslužili su kasnije Velikoj Britaniji za pridobivanje komercijalne enerije iz EGS-a (Law, 2011).

Polje Hijiori je prvi EGS u Japanu. Geološki uvjeti tog polja slični su onima na Fenton Hillu, oba mjesta su smještena u blizini kratera. Projekt je napravljen od strane Japanske organizacije za razvoj novih tehnologija u energiji i industriji. Za proizvodnju električne energije korišteni je binarni ciklus od 130 kW instalirane snage. Maksimalna temperatura u frakturiranoj zoni bila je 250 °C na dubini od samo 1800 metara. No problem su stvarali veliki gubici cirkulirajućeg radnog fluida koji su premašivali čak 70 %, iako su utisna i proizvodna bušotina bile udaljene svega 50 metara. Taloženje kamenca, veliki gubici kao i drugi čimbenici rezultirali su prekidom projekta, ali su ostale važne informacije proizašle iz EGS Hijiori. Drugi Japanski projekt bio je EGS Ogachi. Temperatura na dubini 1000 metara premašila je 230 °C, no komercijalna upotreba energije nije se mogla ostvariti, isto tako zbog velikih gubitaka cirkulacijskog fluida od 75 do 90 % (Kaieda, 2015).

U zapadnoj Švedskoj nalazi se Fjällbacka gdje je napravljen EGS u svrhu razvoja toplinske pumpe za staklenik. Dvije bušotine koje su bile približno 500 metara duboke korištene su

za test hidrauličkog frakturiranja. Udaljenost između bušotina iznosila je oko 100 metara. Utiskivala se voda na temperaturi od 7 °C, pri tlaku od 50 bara i pri protoku od 1.8 l/s kroz utisnu bušotinu. Proizvodnja je iznosila 0.9 l/s, a temperatura fluida podigla se na 16 °C. Premda je udaljenost između bušotina bila mala, zbog gubitaka fluida oko 50 % sustav nije bio ekonomičan (Wallroth i sur., 1999).

Pilot projekt EGS Basel imao je cilj razviti komercijalnu EGS elektranu i toplinske pumpe. Geotermalno polje nalazi se u Baselu u Švicarskoj. Provedeno je hidrauličko frakturiranje u granitnom sloju na dubini od oko 5000 metara, gdje je temperatura oko 200 °C. Proces je prouzročio tisuće mikro potresa, zbog velikog porasta seizmičke aktivnosti, hidrauličko frakturiranje je zaustavljeno. Po završetku utiskivanja fluida u bušotinu, došlo je do potresa jakosti 3.4 prema Richterovoj ljestvici. Zbog tog slučaja Europska komisija je kreirala agenciju Geothermal Engineering Integrating Mitigation of Induced Seismicity in Reservoirs (GEISER) Geotermalno inženjerstvo za smanjenje inducirane seizmike u ležištu, za reguliranje razvoja EGS-a (Wyss i Rybach 2010).

3.2. Europa

Rezultati i iskustva prije navedenih EGS pilot projekata uvelike su pridonjeli razvoju EGS-a u Europi. U Njemačkoj i Francuskoj instalirane su geotermalne elektrane koje kontinuirano rade i ekonomski su isplative. EGS Soultz u Francuskoj prva je komercijalna elektrana u svijetu. Izbušene su tri bušotine do dubine 5000 metara gdje temperatura iznosi više od 180 °C. Kapacitet proizvodnje vrućeg fluida dosegao je 35 l/s, što osigurava postrojenju kontinuiranu proizvodnju hidrotermalne energije od 1.5 MW. Projekt Soultz provodila je Europska komisija i kada je bila postignuta kontinuirana proizvodnja, upravljanje postrojenjem predalo se privatnim korporacijama koje imaju bogato iskustvo u području geotermalne energije, ali i u području proizvodnje nafte i plina. Iz analize Soultz EGS-a, za uspješan EGS karakteristike ležišta i prirodna povezanost fraktura primarni su uvjeti i važni čimbenici. Pribušotisnska zona ležišta Soultz bila je oštećena, skin efekt u bušotini bio je podvrgnut kiselinskom obradom kako bi se održala protočnost fraktura. Korištene su uronjive pumpe za povećanje proizvodnje i svladavanje tlaka u ležištu. Podzemni detektori za očitavanje različitih parametara u bušotini bili su podvrgnuti visokoj temperaturi. Postojala je potreba za razvijanjem visoko temperaturnih materijala i dimenzioniranja sustava na visoke temperature.

Budući da je većina geotermalnih ležišta u Njemačkoj niske temperature, tehnologija za geotermalnu proizvodnju električne energije fokusira se na EGS. Inshein i Landau Njemački su geotermalni projekti EGS-a, nalaze se u zapadnoj Njemačkoj. Litologija je gotovo identična kao i u Soultzu u Francuskoj, granit. U oba projekta napravljene su dvije bušotine do dubine 3500 metara, gdje je temperatura 160 °C. Proizvodnja polja Landau je 80 l/s, kapaciteta 3.8 MWe, dok je na polju Inshein proizvodnja 85 l/s, kapaciteta 4 MWe. Iako je hidrauličkim frakturiranjem izazvana mikroseizmika, aktivnost je ipak unutar granica prihvatljivog. Njemačka je uspješno demonstrirala komercijalnu održivost EGS polja i planira do 2020. na ukupno 150 geotermalnih projekata instalirati kapacitet od 280 MWe (Schellschmidt i sur., 2010).

Groß Schönebeck je mjesto u Njemačkoj u okolici Berlina. Geotermalni potencijal ovog područja je oko 10 MWe. EGS bušotine su stare istražne bušotine u svrhu istraživanja plinskog polja. Naknadno su izbušene geotermalne bušotine i primjenilo se hidrauličko frakturiranje. Naknadno su stare bušotine bušene do dubine 4440 metara gdje je zabilježena temperatura 150 °C. Ponovo se primjenilo hidrauličko frakturiranje zbog boljeg povezivanja proizvodne i utisne bušotine. Na temelju proizvodnih uvjeta instalirano je više jedinica za proizvodnju električne energije u binarnom ciklusu, 500 kWe, 350 kWe i 150 kWe (Huenges i sur., 2007).

3.3. Australija

Oko 1 % površine Australije na dubini od 5000 metara ima temperaturu veću od 150 °C, što je veliki potencijal za razvoj EGS-a. Iako su uvjeti za tradicionalno korištenje geotermalne energije slabi, dublji geotermani potencijal prilično je dobar, osobito kod primjene EGS-a u sedimentnim tipovima stijena koji su različite od ležišta EGS-a koja nastaju u granitu. Tijekom iskorištavanja konvencijonalnog geotermalnog sustava, razvojni rizik znatno se smanjuje nakon bušenja prve bušotine kako bi se potvrdili uvjeti za proizvodnju geotermalne energije. Međutim na lokacijama EGS-a, rizik je i dalje visok čak i nakon bušenja istražnih bušotina, zbog većih dubina i procesa stvaranja prihvatljive propusnosti. Tako da su EGS projekti u većini zemalja financirani od strane vlade. U Australskom razvoju EGS-a, vlada provodi preliminarne istraživanja i određuje lokacije za projekte EGS-a, dok privatne tvrtke podnose zahtjeve za dozvole kako bi pristupili razvoju i realiziranju projekta. Oko pedesetak EGS tvrtki posjeduje istraživačka prava. Područje za razvoj projekata je ogromno, ukupni investicijski kapital veći je od 1.5 milijardi

Australskih dolara. Olympic Dam u južnoj Australiji najveće je EGS polje gdje se do 2020. planira izgradnja geotermalnih elektrana instalirane snage 400 MWe.

Cooper Basin nalazi se u sjevernom dijelu Južne Australije. Ciljevi projekta su razviti uspješan EGS u homogenom granitu i izgraditi sustav binarnog ciklusa instalirane snage od oko 100 MWe. Granit u Južnoj Australiji sadži puno radioaktivnih elemenata, kao što je uran, što rezultira mnogim visoko temperaturnim plitkim lokalnim slojevima. Na određenom dijelu polja stara bušotina za proizvodnju nafte, ponovo je bušena do dubine 4421 metara i prenamjenjena je u utisnu bušotinu, gdje je temperatura oko 260 °C. Proizvodnja fluida iznosi oko 30 l/s, a instalirana snaga elektrane je 40 MWe.

Paralana EGS projekt izveden je na način da se proces hidrauličkog frakturiranja i izmjena topline provode na granici između sedimentnih slojeva stijena i granita. No pošto je mehanička čvrstoća sedimentnih stijena manja od granita, lakše je uspješno stvoriti umjetne frakture u tim dijelovima geotermalnog ležišta, a i troškovi i rizici su manji. Stopa proizvodnje na polju Paralana iznosila je 6 l/s, a temperatura na dnu bušotine je 170 °C. Kasnije je napravljena treća bušotina, uključujući i hidrauličko frakturiranje, da se poveća protok radnog fluida i napravi elektrana s binarnim ciklusom snage 3.5 MWe.

3.4. Sjedinjene Američke Države

Tehnološki razvojni prioriteti EGS-a u Sjedinjenim Američkim Državama u suradnji tvrtki, istraživačkih laboratorija, akademskih institucija i privatnih istraživačkih i razvojnih grupa je smanjenje troškova dobivene električne energije na 0.06 Američkih dolara po jednom kWh do 2030. godine.

Newberry EGS je vulkansko geotermalno polje granitnog sastava s velikim potencijalom i visokom razinom razvoja. Ležište Newberry duboko je 3067 metara i ima temperaturu od 330 °C. Planira se proizvodnja iz dviju bušotina. Razvojni zadaci podijeljeni su na timove koji zajedno sudjeluju na projektu. Državno sveučilište Oregon i Nacionalni laboratorij za energetsku tehnologiju odgovorni su za novu tehnologiju praćenja ležišta. Sveučilište u Oklahomi odgovorno je za uspostavu simulacijske tehnologije EGS-a mikro potresa temeljene na geološkim i in situ naprezanjima. Institut za energiju i geoznanost Sveučilišta Utah zaduženo je za novu razvojnu tehnologiju za frakture. Tvrtka Fugro - WLA odgovorna je za trodimenzionalnu sliku brzine fluida, dok je Lawrence Livermore nacionalni laboratorij zadužen za odabir lokacije bušotina. Ukupna sredstva koja su

predviđena za razvoj Newberry EGS-a iznose 43.8 milijuna dolara, od čega je 21.4 milijuna subvencionirano od strane Odjela za energetiku. Glavana tehnologija primjenjena na ovom polju bio je termo razgradivi izolacijski materijal za više zonalno hidrauličko frakturiranje bez tradicionalnog zatvaranja bušotine kako bi se minimaliziralo vrijeme rada tornja i smanjili troškovi. Postavljena je električna visoko tlačna centrifugalna pumpa koja omogućuje utiskivanje fluida 63 l/s pri tlaku od 14 MPa. Uspješno je svoreno geotermalno ležište površine 1500 metara puta 700 metara, s ukupnim volumenom od 1.5 km^3 i indeksom utiskivanja 2 kg/s/Mpa (Petty, 2013).

Geysers polje, koje je konvencionalno geotermalno polje, ima najveći instalirani geotermalni kapacitet na svijetu s ukupno 22 geotermalne elektrane. Dio polja na kojem slabi proizvodnja geotermalne energije primjenjuje se EGS tehnologija. Koriste se postojeće geotermalne bušotine i radi se hidrauličko frakturiranje. Cilj je postaviti 20 novih geotermalnih elektrana snage od 5 MWe. Ležište se sastoji od metamorfnih pješćenjaka na dubini bušotina 3396 metara pri temperaturi 280 °C. Kroz proizvodnu bušotinu kontinuirano se proizvodi visoko kvalitetna hidrotermalna para. Lawrence Berkeley nacionalni laboratorij (LBNL) jedan je od razvojnih timova na polju Geysers i odgovoran je za procijenu tehnike frakturiranja, zatim za istraživanje površinske deformacije i geomehaničke simulacije za induciranje seizmičke aktivnosti proizašlo iz utiskivanja fluida. Zadužen je također za postavljanje najmanje 14 nazornih stanica za mikro potrese. Važne karakteristike koje opisuju ovo polje su korištenje hladnog fluida kod frakturiranja i uspješno stvaranje fraktura u području oko bušotine zbog toplinskog efekta bez upotrebe visokog tlaka pumpi. Koristi se izotop vodikovog kisika da se utvrdi dali radni fluid, voda geokemijski reagira sa stijenom. Budući da razvoj EGS-a na ovom polju uključuje postojeće bušotine, troškovi su znatno niži jer je bušenje jedan od skupljih procesa u realiziranju EGS postrojenja čiji postotak se kreće između 20 i 30 % (Walters, 2013).

Geotermalno polje Ormat u Nevadi posjeduje nekoliko geotermalnih elektrana. Kako bi se povećala proizvodnja geotermalne energije, Ormat je trenutačno u procesu realiziranja dva EGS projekta, Desert Peak i Bradys Hot Spring. Na geotermalnom ležištu Desert Peak gradi se elektrana kapaciteta snage od 1.7 MWe za proizvodnju energije iz 15 od 27 starih geotermalnih bušotina. Prosječna dubina bušotina je oko 1770 metara sa stopom utiskivanja radnog fluida 100 l/s. Potrebna sredstva za primjenu EGS-a dosegla su 7.6 milijuna dolara, od kojih je 5 milijuna subvencionirano od strane države. Drugi EGS projekt na polju Ormat je Bradys Hot Spring. Koristi se 12 postojećih geotermalnih

bušotina, gdje je napravljeno hidrauličko frakturiranje radi stvaranja geotermalnog ležišta s temperaturom 205 °C. Cilj projekta je povećati proizvodni kapacitet snage svake bušotine na 2 – 3 MWe, dok su potrebna sredstva za realizaciju 6.6 milijuna dolara, od čega 3.4 milijuna subvencionira država (Snyder, 2013).

4. TEORIJSKI ASPEKTI EGS

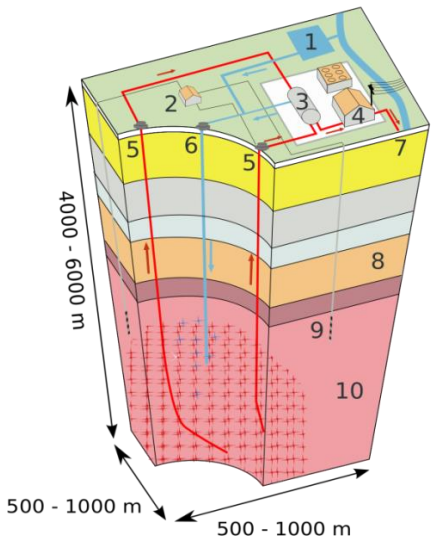
4.1. EGS

Geotermalna energija je toplinska energija koja se stvara i pohranjuje u Zemljinoj kori. Naš planet sam generira toplinsku energiju prilikom raspadanja radioaktivnih elemenata, kemijskih reakcija ili trenja usred tektonskih aktivnosti. Toplinska energija prelazi u Zemljinu koru zbog kontinuirane toplinske provodljivosti koja je prirodni rezultat postojanja razlike gradijenta temperature između jezgre i površine Zemlje (Turcotte i Schubert, 2002). Toplinska energija se pohranjuje u stijene i fluid koji se nalazi u frakturama i porama. Najčešći fluid u porama je voda s različitom količinom otopljenih soli, prisutna kao tekuća faza, ali ponekad se može sastojati i od zasićene mješavine vodene pare ili pregrijane vodene pare. Znatno je više vrućih stijena koje sadrže vodu u odnosu na ugljikovodike koji se nalaze u sedimentnim stijenama, no postoje i vruće suhe stijene koje nisu zasićene fluidom.

Lokalna i regionalna geološka i tektonska pojava igraju važnu ulogu u određivanju lokacije i kvalitete pri iskorištavanju geotermalne energije. Područja s višim toplinskim tokom povezana su s aktivnosti tektonskih ploča, nedavnim eruptivnim i / ili vulkanskim događanjima. To je razlog što se geotermalna energija povezuje samo s tim mjestima, dok se zanemaruje razamatranje mogućnosti geotermalne energije u drugim regijama. U svim slučajevima moraju biti zadovoljeni određeni uvjeti prije no što postoji održiv geotermalni resurs. Prvi uvjet je dostupnost, što se obično postiže bušenjem do proizvodnih dubina, često korištenjem uobičajenih metoda koje se koriste kod pridobivanja ugljikovodika iz ležišta. Drugi uvjet je produktivnost, gdje ležište mora sadržavati dovoljne količine vruće vode, fluida u vodonosniku s visokom propusnošću i poroznosti stijene kako bi se osigurala dugoročna proizvodnja na ekonomski prihvatljiv način. Često je slučaj da nema dovoljnog punjenja hidrotermalnog sustava i tada je potrebno utiskivanje fluida kako bi se osigurala održiva stopa proizvodnje. Termalna energija dobiva se konvekcijskim prijenosom topline u poroznim i / ili frakturiranim područjima stijene i provođenjem topline kroz samu stijenu. Proces pridobivanja topline mora biti dimenzioniran s ograničenjima koja su nametnuta hidrološkim, litološkim i geološkim uvjetima. Tipično se proizvodi vruća voda ili para, a njihova se energija najčešće pretvara u električnu energiju ili služi kao energija grijanja. Mnogi aspekti geotermalnog dobivanja topline slični su onima koji se nalaze u industriji ugljikovodika, zbog tih sličnosti opreme, tehnike i

tehnologije posuđeni su i prilagođeni za upotrebu u geotermalnoj industriji i u određenoj mjeri su pridonjeli ubrzanom razvoju geotermalne energije.

Konvencionalna geotermalna ležišta zadovoljavaju hidrotermalne, litološke i geološke uvjete. Lokacije na kojima su dostupni ti resursi pružaju dobre rezultate pri iskorištavanju geotermalne energije koji mogu biti ekonomski jako konkurentni, isplativi čak i bez subvencija. Na drugoj strani postoje i vruće suhe stijene koje su u načelu dostupne bilo gdje u svijetu. Iskorištavanje geotermalne energije iz tih regija može se razmatrati i privesti u proizvodnju pomoću EGS tehnologije. U usporedbi s konvencionalnim razvojem geotermalne energije, EGS ima prednost pristupa većoj količini topline stavranjem umjetnih fraktura u vrućim stijenama i utiskivanjem fluida u njih. EGS se odnosi na metode, projektiranje ležišta koje je stvoreno za izdvajanje ekonomski isplative količine topline iz nisko propusnih i / ili poroznih geotermalnih resursa, a glavni koraci u razvoju su istraživanje i procjena ležišta, bušenje proizvodne i utisne bušotine, stvaranje ležišta frakturiranjem, ciklus utiskivanja i proizvodnje fluida, pogon elektrane i održavanje ležišta i postrojenja. EGS postrojenje je prikazano na slici 4-1. Sastoji se od: 1. Spremnik, 2. Pumpa, 3. Izmjenjivač topline, 4. Generator, 5. Proizvodna bušotina, 6. Utisna bušotina, 7. Topla voda za upotrebu grijanja, 8. Porozne naslage, 9. Opažačka bušotina, 10. Suha vruća stijena.



Slika 4-1. Poboljšani geotermalni sustav (Wikipedia, 2017)

Ključno je bušenjem postići dovoljnu dubinu u kojoj će stijene imati zadovoljavajuću visoku temperaturu. Dubine se kreći između 3 i 6 kilometara. Zatim je bitno stimulacijom, frakturiranjem stvoriti dovoljnu propusnost da se omogući veći protok fluida, ali i prijenos topline sa stijene na fluid. Proces proizvodnje geotermalne energije odvija se utiskivanjem fluida kroz utisnu bušotinu. Fluid struji kroz propusnu suhu vruću stijenu prilikom čega se zagrijava i izlazi na površinu kroz proizvodnu bušotinu. Time se stvara zatvoreni proizvodni ciklus. Zagrijani fluid na površini najčešće se koristi kao energija za dobivanje električne energije ili u svrhu grijanja. Osim stravaranja fraktura u ležištu, razvoj EGS-a gotovo je identičan tradicionalnom geotermalnom sustavu. Primjena EGS-a najčešće uključuje geotermalne izvore iz slabopropusnih visokotemperaturnih sedimentnih formacija i eruptivnih ili metamorfnih stijena, te neproduktivnih hidrotermalnih resurasa. Pošto je matrična propusnost spomenutih formacija izuzetno niska, mnoge značajke ležišta EGS-a slične su određenim ležištima ugljikovodika, naročito nekonvencionalnim. Stoga znanje i primjena iz naftnog inženjerstva može poslužiti u procesu koji vodi do iskorištavanja geotermalne energije iz EGS ležišta. Međutim, još uvijek su troškovi EGS-a izrazito visoki i mnogo se ulaže u razvoj novih tehnologija kako bi se troškovi ulaganja smanjili. EGS tehnologija se razvijala tijekom proteklih četrdeset godina. Iako se EGS nije prvi put primjenio u Europi, Francuski Soultz i Njemački Landau postrojenja bila su prve dvije komercijalne EGS elektrane. Dok je najveća EGS elektrana realizirana u Australiji, u Habanero s instaliranom snagom od 40 MWe. Uz kontirnuirani razvoj današnje geotermalne tehnologije, pretpostavlja se proizvodnja više od 70 GWe iz EGS-a do 2050. godine, a nakon toga iskoristivi geotermalni kapaciteti fokusirat će se na EGS. Razvoj istraživanja, stvaranja i održavanja ležišta omogućit će izvedivost EGS-a u konvencionalnim geotermalnim sustavima i u iscrpljenim naftnim i plinskim ležištim (Hollett, 2013).

4.2. Geologija EGS ležišta

Većina toplinske energije koja se može ekstrahirati nalazi se u stijenama koje se nalazi ispod pokrova sedimentnog dijela. Razmatrano područje obično je sastavljeno od metamorfnih ili eruptivnih, magmatskih stijena čiji sastav i litologija zapravo izuzetno varira. Kod primjene EGS-a najviše se razmatraju upravo spomenute stijene zbog toplinske energije koja je u njima akumulirana. Litologija i uzimanje najpovoljnijeg sastava i strukture stijene za razvoj EGS-a zapravo nije točno specificirana i treba je tek obaviti. Većina projekata provedena je u granitu u strogom geološkom smislu, zbog očekivane

homogenosti tog tipa stijne. Međutim, neki EGS resursi nalaze se u sedimentnim stijenama. Općenito kod povećanja dubine i temperature, smanjuje se propusnost i poroznost stijene. Na dubinama preko 3000 metara i temperaturi većoj od 150 °C svojstva stijena slična su metamorfnim ili eruptivnim stijenama. U mnogim područjima rade se opsežna bušenja za proizvodnju ugljikovodika gdje su temperature unutar granice za razvoj EGS-a. Zbog male propusnosti stijena, ekonomski isplativa proizvodnja ugljikovodika moguća je samo uz primjenu hidrauličkog frakturiranja. Prema tome postoji povezanost između dubokih vrućih stimuliranih ležišta ugljikovodika i ležišta EGS-a. Čini se da bi poznata ležišta ugljikovodika mogla poslužiti kao resurs u primjeni EGS-a, zbog manjeg rizika u traženju povoljnijeg ležišta u odnosu na granite gdje je realizirana većina projekata (Tester, 2006).

4.2.1. EGS u sedimentnim stijenama iscrpljenih polja ugljikovodika

Moguć je razvoja geotermalne energije iz dubokih naftno plisnkih ležišta koja su iscrpljena. U takvim područjima u dubokim, visoko temperaturnim sedimentnim dijelovima razvoj EGS-a mogao bi biti efikasniji od klasičnog EGS-a. Na određenim iscrpljenim ležištima postoje bušotine čija je temperatura na dnu veća od 150 °C, u nekim bušotinama bušeni su horizontalni dijelovi i ležište je stimulirano. Sve su to direktni troškovi kod razvoja EGS-a. Prema tome jasno je da se mnogi radovi netrebaju obavljati već se polje treba prilagoditi geotermalnoj proizvodnji na načina da se najbolje iskoristi postojeća infrastruktura. Postojeće bušotine mogu se prema potrebi naknadno bušiti ili stimulirati da se postignu što bolji uvjeti kod realizacije EGS-a iz iscrpljenih ležišta ugljikovodika. U industriji nafte i plina podaci ukazuju da postoje područja ležišta proizvodnje ugljikovodika gdje je na dnu bušotina visoka temperatura i moguć je značajan protok vode, što se može iskoristiti kao EGS resurs. A i postoje mnoge bušotine koje nisu u proizvodnji ugljikovodika zbog velikog udjela slojne vode koja se smatra otpadom koji treba zbrinuti, dok bi u nekoj varijanti EGS-a mogla poslužiti kao sredstvo za dobivanje energije.

4.2.2. Pridobivanje toplinske energije iz EGS ležišta

Baza resursa EGS-a definirana je kao ukupna toplinska energija koja se nalazi u Zemljinoj kori do dubine koja se može dosegnuti trenutnom tehnologijom. Aspekt izvlačenja topline, ekstrakcije zatijeva dodatna istraživanja i detalje. Geotermalna energija se često klasificira

kao obnovljivi resurs, ali vremenski period za njegovu obnovu svakako je duži nego kod energiju sunca ili vjetra. Frakturirano EGS ležište znatno se hladi tijekom radnog vijeka od 20, 30 godina, kao rezultat ekstrakcije topline. Da bi ležište postiglo početnu temperaturu vrijeme oporavka traje tri puta i više od radnog vijeka proizvodnje. Da se oporavi ležište koje je bilo aktivno 30 godina treba proći 100 godina. Prema tome ležište EGS-a ne može se okarakterizitati kao održiv energetski resurs.

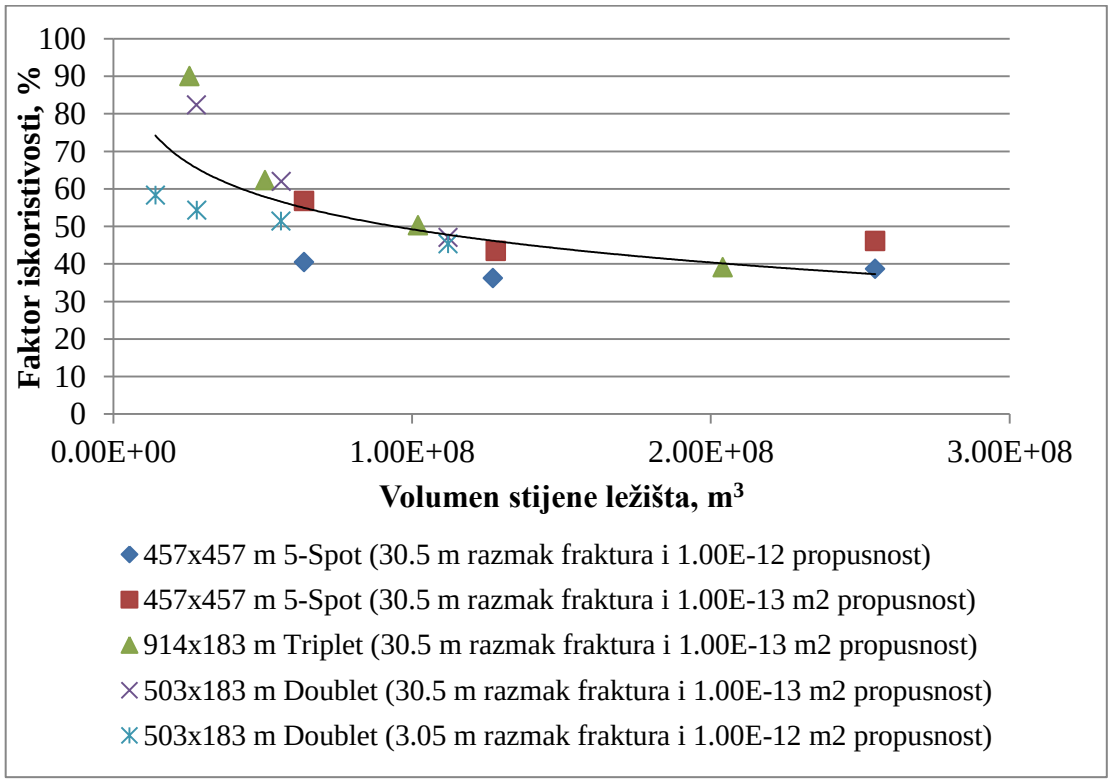
Nekoliko čimbenika kontrolira postotak energije koji se može pridobiti kao toplina iz EGS ležišta. To uključuje početnu temperaturu stijene, zatim volumen stijene kroz koji prolazi fluid i koji se može stimulirati. Aktivno i djelotvorno područje izmjene topline koje je određeno duljinom, širinom i razmakom postojećih i novonastalih fraktura. Zatim maseni protoka fluida kroz povezane frakture i raspored geometrije utisne i proizvodne bušotine kroz koje cirkulira radni fluid.

Volumen stijene koji se može frakturirati i prosječni razmak između fraktura, zajedno s njihovom duljinom i širinom, odredit će učinkovito područje izmjene topline u ležištu, što će odrediti brzinu protoka fluida, izlazne energije i životni vijek EGS ležišta. Početna temperatura radnog fluida koji se utiskuje također će utjecati na udio toplinske energije pohranjene u ležištu koja se može ekstrahirati tijekom vremena. Kritični parametar je brzina radnog fuida u sustavu, oblik protjecanja između utisne i proizvodne bušotine, te koliki će volumen fraktura ispuniti cirkulrajući fluid.

Brzina ekstrakcije topline iz stijene ovisi o razlici između temperature stijene i radnog fluida u ležištu. Što je veća razlika u temperaturama, brže će toplina sa stijene preći na fluid i dobivena energija bit će veća. Ako utisnuti hladan fluid doseže do proizvodne bušotine, a da se pri tome ne zagrije dovoljno, ukupna količina toplinske energije dobivena iz stijene bit će manja od očekivane, a postrojenje neće zadovoljiti svoje radne uvjete. No ako se temperatura na ušću proizvodne bušotine ne smanjuje tijekom vremena, tada brzina protoka fluida nije dovoljna da bi se učinkovito ekstrahirala toplina iz stijene. Postrojenje opet neće biti ekonomski optimizrano jer će se dobivati manje toplinske energije nego je to moguće. Za EGS ležište brzina izdvajanja topline jednaka je masenom protoku radnog fluida i specifičnoj entalpijskoj razlici između proizvedenog i utisnutog fluida. Kod određenog protoka fluida postiže se optimalna ravnoteža između ekstrakcije topline i pada temperature u stijeni ležišta (Armstead i Tester, 1987; Elsworth, 1990).

4.2.3. Frakturirani volumen stijene i geometrijski raspored bušotina

Dok je čvrsta konsolidirana stijena izvrsna za pohranu toplinske energije, brzina ekstakcije topline provođenjem je spora. Samo dio volumena stijene koji je stimuliran može se smatrati aktivnim gdje dolazi do ekstrakcije topline. Osnovna ideja je stvoriti dovoljnu hidrauličku propusnost kako bi se otvorili kanali za protok fluida kroz stijenu, kako bi se povećalo provođenje topline povećanjem kontaktne površine. Prijenos topline u frakturiranom ležištu je složen proces koji nije lako modelirati analitički. Sanyal i Butler (2005) napravili su studije na utjecaj raznih svojstava ležišta kao što su frakturirani volumen stijene, duljinu fraktura, propusnost, poroznost i raspored bušotina na postotak pridobive toplinske energije pomoću trodimenzionalnog modeliranja elemenata. Mijenjali su propusnost, protok, duljinu fraktura, udaljenost između bušotina, položaj utisne i proizvodne bušotine i volumen frakturirane stijene ležišta. Otkrili su da je najvažniji parametar koji utječe na postotak dobivene toplinske energije volumen frakturirane stijene.



Grafikon 4-1. Faktor iskoristivosti topline iz EGS ležišta u odnosu na volumen ležišta (Sanyal i Butler, 2005)

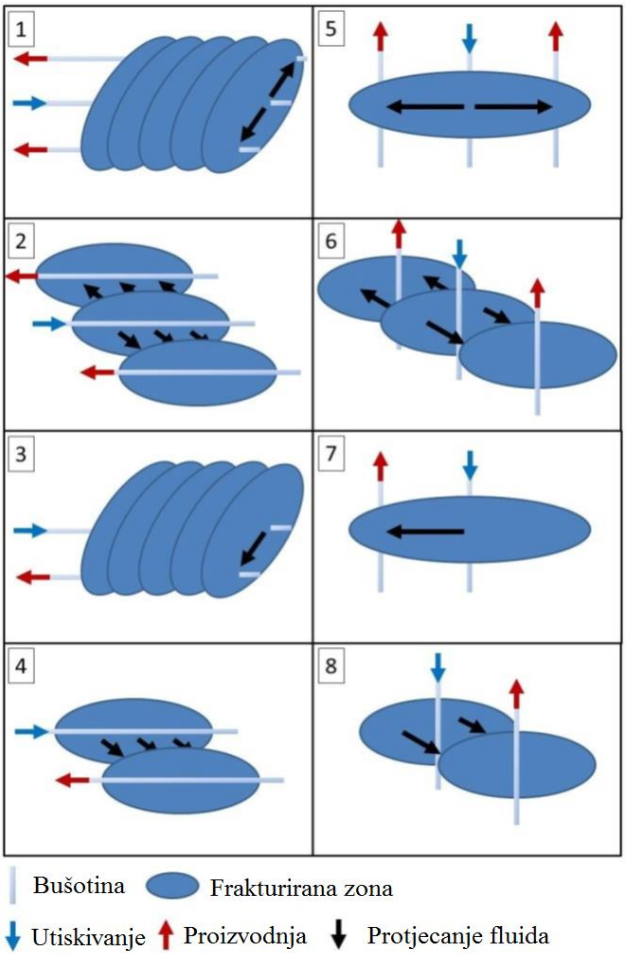
Također su zaključili da za razne duljine frakture, geometrijske rasporede bušotina i propusnosti frakture, postotak toplinske energije koji se može dobiti iz ležišta volumena od

najmanje 1 x 10^8 m^3 u uvjetima ekonomski prihvatljive proizvodnje iznosi gotovo 40 %, s rasponom od 34 do 47 %. Ovaj faktor iskoristivosti ležišta neovisan je o nabrojenim parametrima sve dok volumen stijene ležišta prelazi 1 x 10^8 m^3.

Temeljem ranijeg ispitivanja EGS koncepta, geometrijski raspored utisnih i proizvodnih bušotina utječe na volumen stijene koji se može stimulirati i biti dostupan pri proizvodnji odnosno biti u kontaktu s radnim fluidom u ležištu. EGS bušotine mogu se konfigurirati na različite načine. S jednom proizvodnom bušotinom za svaku utisnu bušotinu (DOUBLET), dvije proizvodne za svaku utisnu bušotinu (TRIPLET) i četiri proizvodne za svaku utisnu (5-Spot). Imajući više od jedne proizvodne bušotine za svaku utisnu bušotinu, povećava se volumen ležišta u kojem radni fluid cirkulira i time se povećava efikasnost EGS-a (Sanyal i Butler, 2005).

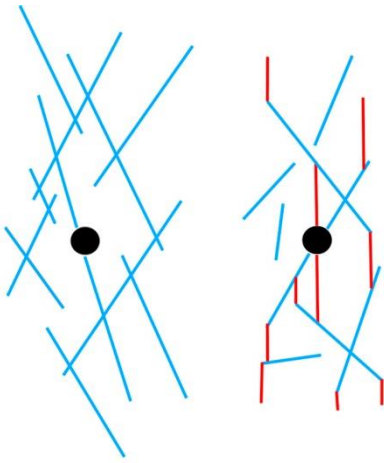
4.3. Frakturiranje i stvaranje EGS ležišta

Do danas većina EGS projekata izvedena je u vertikalnim bušotinama, gdje se hidrauličko frakturitanje radilo u jednom stupnju, u otvorenom kanalu bušotine. Na primjer u Schönbeck projektu frakturiranje se izvršilo upotrebljavanjem pakera kako bi se odvojilo više zona i u svakoj napravila faza stimuliranja. Dok je u Newberryu bušena usmjerena bušotina kako bi se napravilo učinkovito višezonalno stimuliranje. Na slici 4-2. su prikazani idealizirana frakturirana ležišta i geometrije bušotina EGS-a koji omogućuje protok radnog fluida između utisne i proizvodne bušotine. Frakturiranje se vrši u obije bušotine pomoću tehnologije zonalne izolacije korištenjem pakera. Pakerima se odvaja nekoliko zona u horizontalnom ili vertikalnom dijelu kanala bušotine i u svakoj zoni se radi zasebno hidrauličko frakturiranje ležišta. Stimulirano područje svakog stupnja odnosno jednostruka fraktura okomito je orijentirana u odnosu na vodoravni ili vertikalni dio kanala bušotine i usmjerena prema drugoj paralelnoj bušotini (Jung, 2013; Shiozawa i McClure, 2014).



Slika 4-2. Pregled različito postavljenih bušotina i orijentiranih jednostrukih fraktura u frakturiranom EGS ležištu (Hofman, 2014)

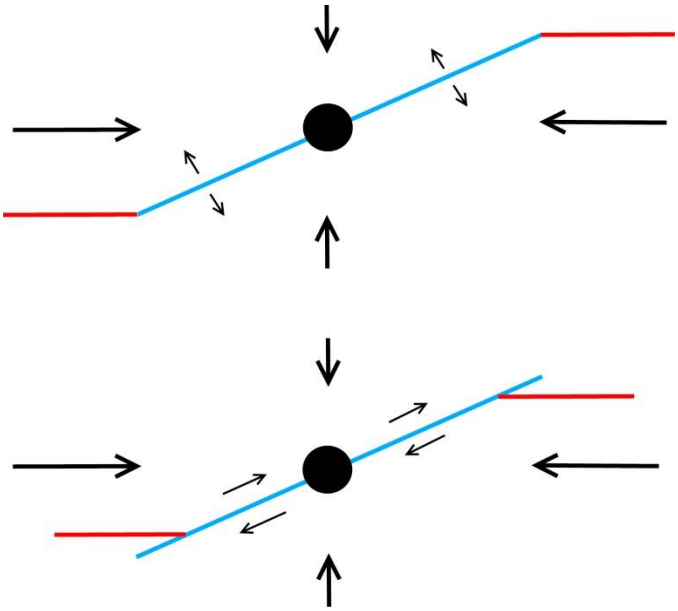
Izvorni koncet EGS-a bio je stvaranje jednostruke frakture koja se prostire daleko od bušotine. Međutim, rana iskustva na projektima EGS-a pokazala su da fluid protječe kroz postojeće frakture. Prema tome počela se prihvaćati ideja da se utiskivanjem fluida ne uzrokuje stvaranje novih fraktura, već su stimulirane postojeće frakture izazivane klizanjem. Stimuiranje klizanjem ili smikom je mehanizam koji se najčešće pretpostavlja da se dešava tijekom hidrauličkog frakturiranja u EGS ležištu. Stimulacija se javlja samo kroz inducirano klizanje po postojećim frakturama. Tijekom procesa šire se postojeće prirodne frakture, ali u manjoj mjeri mogu nastati i nove frakture. Slika 4-3. prikazuje mehanizma klizanja fraktura. U prvom dijelu slike postojeće frakture se otvaraju, dok u drugom dijelu slike postoje i novonastale frakture koje se stvaraju iz širenja postojećih. Bušotina je označena crnom točkom. Plave crte označavaju postojeće frakture, a crvene novonastale.



Slika 4-3. Shematski prikaz stimuliranja klizanjem (McClure i Horne, 2014)

Tijekom stimulacije kod većine EGS projekata, tlak tekućine na dnu bušotine desegao je minimum glavnog naprezanja stijene, ali zbog aksijalne čvrstoće frakture se nisu formirale i širile, propagirale od bušotine. To se dogodilo zbog toga što je vlačna čvrstoće granita iznimno visoka i nedozvoljava stvaranje novih fraktura. Pretpostavlja se da je u mnogim slučajevima utiskivanje fluida uzrokovalo otvaranje prirodnih fraktura. Prirodne frakture nisu nužno orijentirane okomito na minimalno glavno naprezanje formacije, ali obično imaju znatno manju vlačnu čvrstoću od okolne netaknute stijene. Ako se prirodna fraktura pruža relativno blizu optimalnog smjera otvaranja frakture, da se prirodna fraktura proširi ili da nastane potpuno nova fraktura potreban je niži tlak fluida u odnosu na tlak koji mora svladati vlačnu čvrstoću formacije.

Proces smicanja i otvaranja prirodnih fraktura stvara koncentraciju naprezanja koja može potaknuti širenje fraktura. Slika 4-4. prikazuje dva moguća mehanizma. Prvi mehanizam je da se prirodne frakture otvaraju, šire utiskivanjem fluida i koncentracija naprezanja u njima uzrokuje daljnje širenje fraktura. Drugi mehanizam je stvaranje frakture prije vrha postojeće frakture na način da se koncentrira određeno naprezanje u frakturi koje nastaje pri smicanju. Isto kao i na slici 4-3. crna točka označava bušotinu, plave crte postojeće frakture, a crvene novonastale.



Slika 4-4. Shematski prikaz novih fraktura koje nastaju od postojećih fraktura (McClure i Horne, 2014)

Budući da se naprezanje na lokalnoj razini koncentrira pri smicanju, može doći do stvaranja razgranatih fraktura pod uvjetom da je tlak utisnutog fluida veći od minimalnog glavnog naprezanja stijene. Jednom kada se formiraju frakture, koncentracija naprezanja u njihovim vrhovima može omogućiti širenje mreže fraktura kroz formaciju. S visokim tlakom fluida iznad minimalnog naprezanja, mreža fraktura može se širiti duboko u formaciju. Dok tlak fluida ispod minimalnog naprezanja ne omogućava širenje fraktura već se stimuliranje vrši na lokaliziranom području (McClure i Horne, 2014).

Kada se fluid utiskuje u bušotinu pod visokim tlakom prilikom frakturiranja dugog dijela kanala bušotine, tendencija fluida je da kreira frakture uz kanal bušotine koje ne sežu duboku u ležište, a i stimulirano područje je neravnomjerno raspoređeno uz bušotine. Ako se frakturiranje izvodi u više odvojenih zona jednakih duljina, gdje se ostvaruje približno jednak tlak fluida, kroz bušotinu mreža fraktura bit će ravnomjerno raspoređena. Problem kod višestrukog frakturiranja kod EGS-a je odjeljivanje zona pomoću pakera u otvorenom kanalu bušotine kojima je upitan rad na visokim temperaturama. Međutim, Shiozawa i McClure (2014) istaknuli su da pakeri koji se postavljaju u zacijevljenoj bušotini mogu biti pouzdani i na temperaturama višim od 200 °C. EGS projeki gotovo uvijek se realiziraju u otovrenom kanalu bušotine, jer to osigurava veću kontaktnu površinu između stijene i

radnog fluida. Cilj je stimulirati prirodne frakture u otvorenom kanalu, a ne perforacije u zacijevljenoj bušotini.

Primjena frakturiranja i način stimulacije ovisit će o lokalnim svojstvima i pojedinostima prirodnih fraktura i vrsti stijena na određenom polju. Može se pokušati i konvencijonalnim hidrauličkim frakturiranjem uz korištenje propanta prilikom čega nastaju nove frakture, ako se frakturiranje radi u nekoj ne tipičnoj stijeni za EGS. Postoje mnoga operativna rješenja koja bi mogla biti napravljena kako bi se povećala vjerojatnost nastanka novih hidrauličkih fraktura. Ako se provodi utiskivanje fluida u perforacije zacijevljenog kanala bušotine, nove frakture će se formirati prije nego je to slučaj u otvorenom kanalu bušotine gdje nema perforacija. Takve frakture su nepoželjne jer ne stvaraju mrežu fraktura kroz koje protječe fluid odnosno nestvaraju kvalitetano EGS ležište. Stoga se predlaže stvaranje velikog broja fraktura pomoću višestrukog frakturiranja, a ne da se pokušava napraviti jedna masivna mreža fraktura iz jedne faze. Bez obzira na stimulacijski mehanizam, bilo stvaranje novih fraktura ili proširenje postojećih, jasno je da stimulacija omogućuje dodatno formiranje protočnih kanala i bolju hidrauličku povezanost između utisne i proizvodne bušotine.

Iskustvo je pokazalo ograničenje kod EGS gdje nije obavljen proces frakturiranja. Razlog tome je što protok fluida u ne stimuliranom području teži da se lokalizira u malom broju širokih fraktura oko kanala bušotine. Numeričke stimulacije temeljene na modelima ležišta, kao što su modeli dvostrukih poroznosti, obično znatno podcjenjuju prirodnu tendenciju lokaliziranja protoka u mreži fraktura. Odvojena stimulirana mreža fraktura, koje povezuju protok fluida s naprezanjima izazvanim deformacijom fraktura, pokazuje kako međudjelovanje mehaničkih i hidrauličkih procesa pri protoku fluida kroz mrežu fraktura stvaraju lokaliziranu deformaciju i slabo popunjavanje fraktura. Čak i ako se stvori velika stimulirana mreža fraktura, samo manji dio te mreže može biti dio snažne hidrauličke povezanosti između utisne i proizvodne bušotine (Evans, 2005).

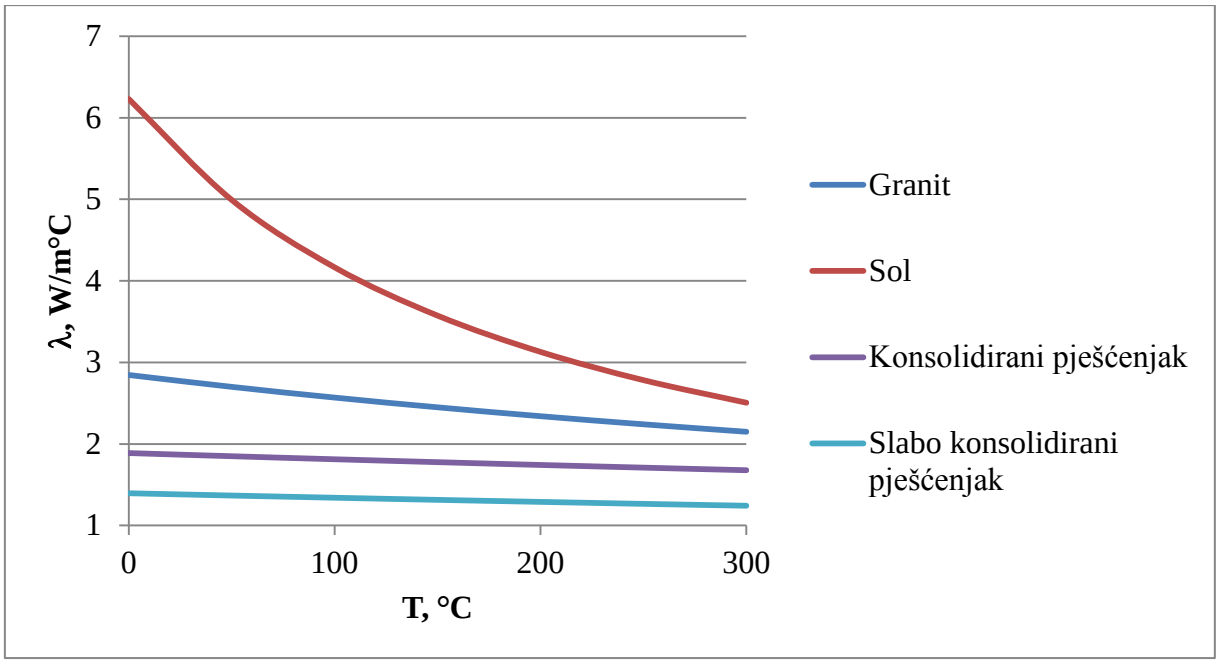
4.4. Promjena temperature i tlaka kroz EGS

4.4.1. Termička svojstva stijena

Poznavanje toplinskih svojstava stijena i fluida u visoko temperaturnoj sredini važan je aspekt pri poznavanju termalnih procesa u podzemnim ležištima. Za značajnije analize tih procesa bitna su toplinska svojstva kao i ostala svojstva stijena i njihovo ponašanje u interakciji s fluidom pri visokim temperaturama. Neki od tih procesa koji zahtjevaju poznavanje toplinskih svojstava uključeni su u metode za naprednijim upravljanjem geotermalnim resursom. Toplinska vodljivost, specifični toplinski kapacitet i temperaturna provodljivost ili difuznost najvažniji su parametri koji najbolje opisuju toplinska svojstva stijena. Ostala svojstva stijena koja su važna uključuju karakteristike protoka fluida u formaciji. U geotermalnim ležištima može se naći širok raspon vrsta stijena, od loše do dobro konsolidiranih, čvrstih pješčenjaka pa sve do vrućih suhih geotermalnih formacija koja se obično sastoje od eruptivnih, metamorfnih stijena koja imaju malu propusnost, poroznost i ograničenu sposobnost protoka fluida.

Toplinska vodljivost - Koeficijent toplinske vodljivosti označava se slovom λ, a jedinica je W/m°C. Predstavlja količinu energije koja je prošla u okomitom pravcu kroz presjek površine od 1 kvadratnog metra u sekundi kod gradijenta temperature od 1 °C/m. Prijelaz topline vrši se od viših izvora topline prema nižim. Toplinska vodljivost eruptivnih ili metamorfnih stijena koje se u potpunsti sastoje od relativno velikih mineralnih zrna smanjuje se s povećanjem temperature. Općenito, što je veća vodljivost određene stijene, veće je smanjenje vodljivosti s povećanjem temperature.

Naprezanje kojem je podvrgnuta stijena ima utjecaj na samu toplinsku vodljivost. U slučaju slabo konsolidiranih stijena povećanje naprezanja znatno će pridonjeti povećanju toplinske vodljivosti. Dok kod konsolidiranih i kompaktnih stijena povećanje naprezanja ima mali utjecaj na toplinsku vodljivost. Povećanje tlaka fluida u porama ima suprotan učinak, toplinska vodljivost se smanjuje kako se povećava tlak fluida u porama.

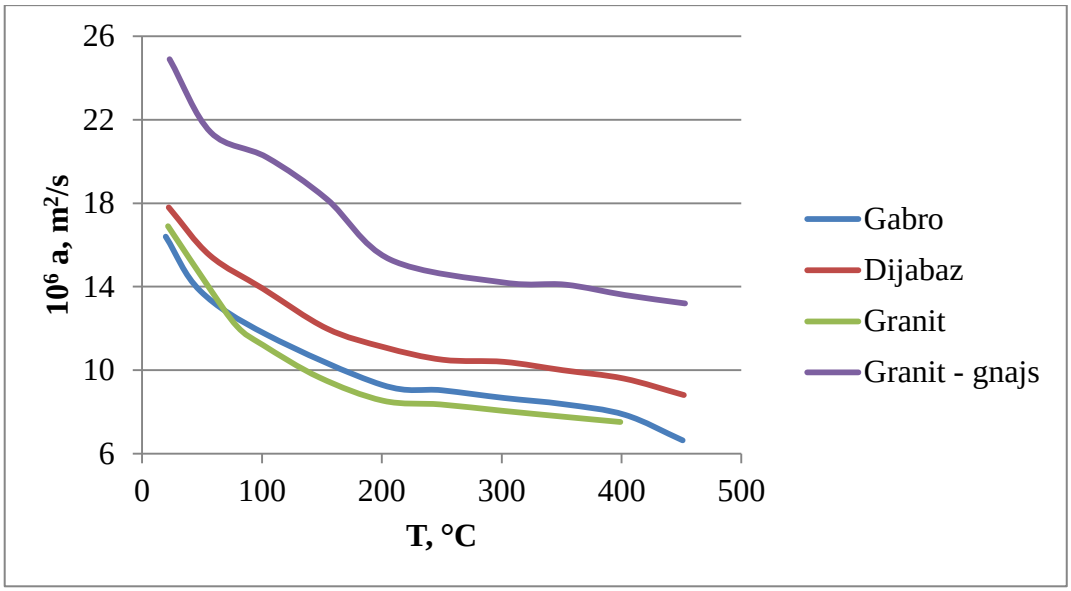


Grafikon 4-2. Kretanje toplinske vodljivosti stijena u odnosu na temperaturu (Blesh i sur., 1983)

Specifična toplina - Specifična toplina je sposobnost tvari da akumulira toplinu. Jedinica za specifičnu toplinu je J/kg °C i označava se sa slovom c. Definirana je kao količina topline koja je potrebna za podizanje temperature jednog kilograma neke tvari za jedan stupanj pri konstantnom tlaku. Specifična toplina suhih stijena je oko četri puta manja od specifične topline vode koja iznosi 4187 J/kg °C pri standardnim uvjetima, zbog čega je voda jedan od najpogodnijih medija za akumuliranje geotermalne energije. Toplinski kapacitet stijene se povećava s temperaturom, ali samo za 30 % u odnosu na raspon povećanja temperature.

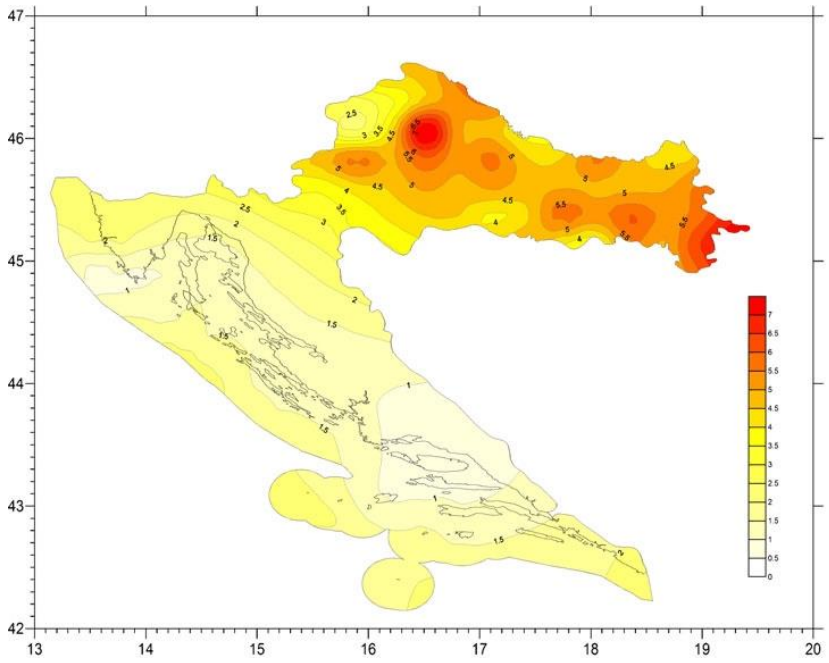
Specifična obujamska toplina - Specifična obujamska toplina $c\rho$ predsavlja umnožak specifične topline i gustoće. Jedinica za specifičnu obujamsku masu je J/m^3 °C, što označava količinu energije koja je potrebna da se obujmu od jednog metra kubnog temperatura poveća za jedan stupanj.

Temperaturna provodljivost ili difuznost - Difuznost α određuje brzinu izjednačavanja temperature neke formacije u određenom vremenu. Jednaka je omjeru toplinske vodljivosti i specifične obumajske topline, a jedinica je m^2/s. Kretanje vrijednosti difuznosti stijena općenito je stroga funkcija temperature. Njihova vrijednost se smanjuje s povećanjem temperature (Somerton, 1992).



Grafikon 4-3. Kretanje difuznosti stijena u odnosu na temperaturu (Dmitriev i sur., 1969)

Geotermalni gradijent - Porast temperature s dubinom Zemlje naziva se geotermalni gradijent. Upravo je geotermalni gradijent jedan od prvih pokazatelja koji upućuje na potencijalno geotermalno ležište. Srednja vrijednost geotermalnog gradijenta primjerice za Europu iznosi 0.03 °C/m, dok u Hrvatskoj postoje dva različita područja. Dinaridi i Jadran gdje se geotermalni gradijent kreće od 0.015° do 0.025 °C/m, dok u Panonskom dijelu on iznosi 0,04 °C/m.



Slika 4-5. Geotermalni gradijent Hrvatske (°C/100m) (Kurevija i sur., 2014)

4.4.2. Promjena temperature u bušotinama i ležištu

Kod geotermalnog sustava najbitniji je model prijenosa topline. Za radni fluid u sustavu postoje dva procesa prijenosa topline, primanje topline od okolnih stijena ili formacije kroz proces konvekciju i gubitak topline koja se prenosi na okolne stijene kroz proces kondukcije. Ovi procesi ovise o raspodjeli temperature formacije, temperaturnoj razlici i otporima pri prelasku topline unutar elemenata bušotine.

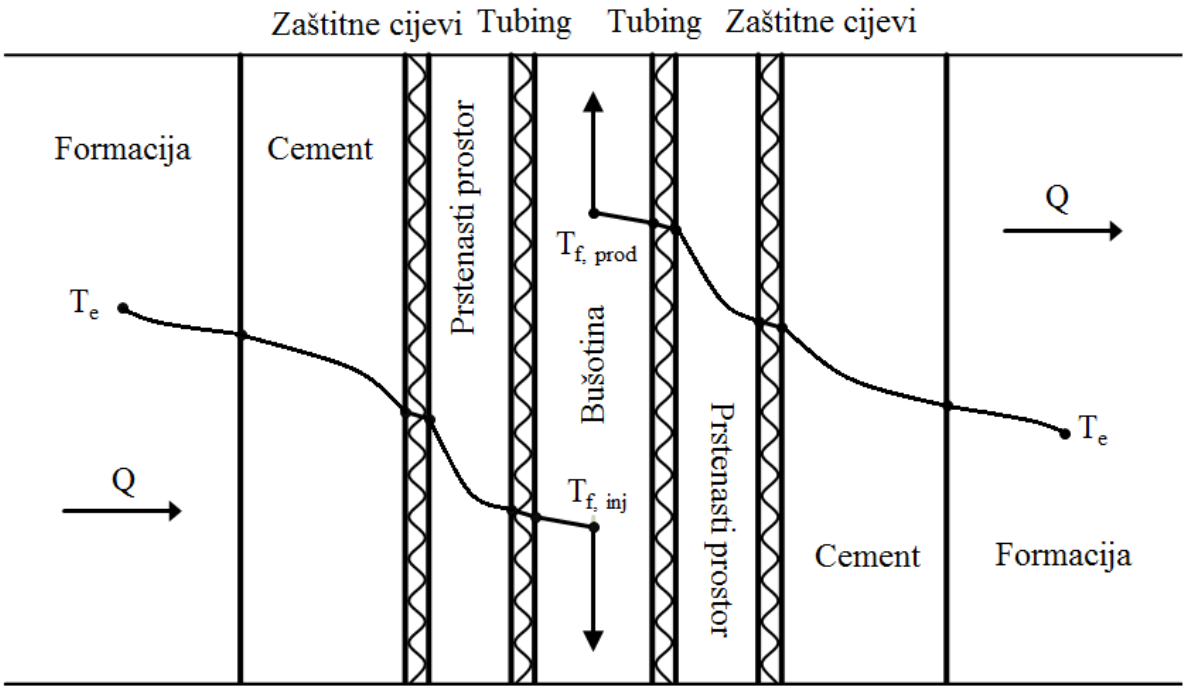
Da bi se dobila temperatura fluida na dnu utisne bušotine $T_{f,inj}$ i na ušću proizvodne bušotine $T_{f,prod}$ izvršena je energetska ravnoteža u bušotini. Pretpostavljaju se uvjeti stacionarnog stanja, jednofaznog protjecanja fluida u kojem ne varira brzina protoka s promjenom dubine i linearnim geotermalnim gradijentom. Koristi se Rameyjeva (1962) jednadžba čiji se rezultati najbolje podudaraju s mjerenjima na terenu. Rameyjeva jednadžba za procjenu temperature na dnu utisne bušotine prikazana je:

$$T_{f,inj} = Az + B - \frac{A}{L_R} + \left(T_o(t) + \frac{A}{L_R} - B \right) e^{-zL_R}, \tag{4-1}$$

gdje je A geotermalni gradijent, z je stvarna vertikalna dubina, B je temperatura na površini, $Az + B = T_e$ je temperatura formacije predstavljena linearnim geotermalnim gradijentom, $T_o(t)$ je temperatura fluida koji se utiskuje i L_R je koeficijent relaksacije. Horne i Shinohara (1979) proširili su Rameyjevo rješenje u jednadžbu temperature na ušću proizvodne bušotine kako slijedi:

$$T_{f,prod} = T_{ebh}(t) - Ay + \frac{A}{L_R}\left(1 - e^{-yL_R}\right), \tag{4-2}$$

gdje je T_{ebh} temperature na dnu proizvodne bušotine i y je dubina proizvodnje.



Slika 4-6. Prijenos topline između utisne i proizvodne bušotine i formacije

Koeficijent relaksacije L_R je:

$$L_R = \frac{2\pi}{c_p \dot{m}} \left(\frac{r_o U \lambda_r}{\lambda_r + r_o U T_D} \right), \tag{4-3}$$

prvenstveno je funkcija ukupnog koeficijenta prijenosa topline U i masenog protoka fluida $\dot{m}$. U jednadžbi c_p je specifična toplina fluida, r_o je vanjski polumjer cijevi korz koji se fluid utiskuje ili proizvodi i λ_r je toplinska vodljivost formacije. T_D je bezdimenzionalna temperatura, funkcija je samo bezdiemenzionalnog vremena t_D. Na temelju statistike puno podataka prikupljenih na bušotinama, nastali su razni odnosi između T_D i t_D. Za usvojenu konstantu toplisnkog toka unutar graničnih uvjeta, Skoczylas (2012) je predložio modificiranu korelaciju koja se izražava kao:

$$T_D = \ln\left[e^{-0.2 t_D} + \left(1.5 - 0.3719 e^{-t_D}\right) \sqrt{t_D} \right]. \tag{4-4}$$

t_D je bezdimenzionalno vrijeme utiskivanja i proizvodnje:

$$t_D = \frac{4\alpha_r \tau}{D_{wd}^2}, \tag{4-5}$$

gdje je τ vrijeme prolaženja toplinskog toka, D_{wb} je promjer kanala bušotine i α_r je temperaturna vodljivost ili difuznost okolnih stijena koja je definirana odnosom koeficijenta toplinske vodljivosti λ i specifičnom obujamskom toplinom $c\rho$:

$$\alpha_r = \frac{\lambda}{c\rho}. \tag{4-6}$$

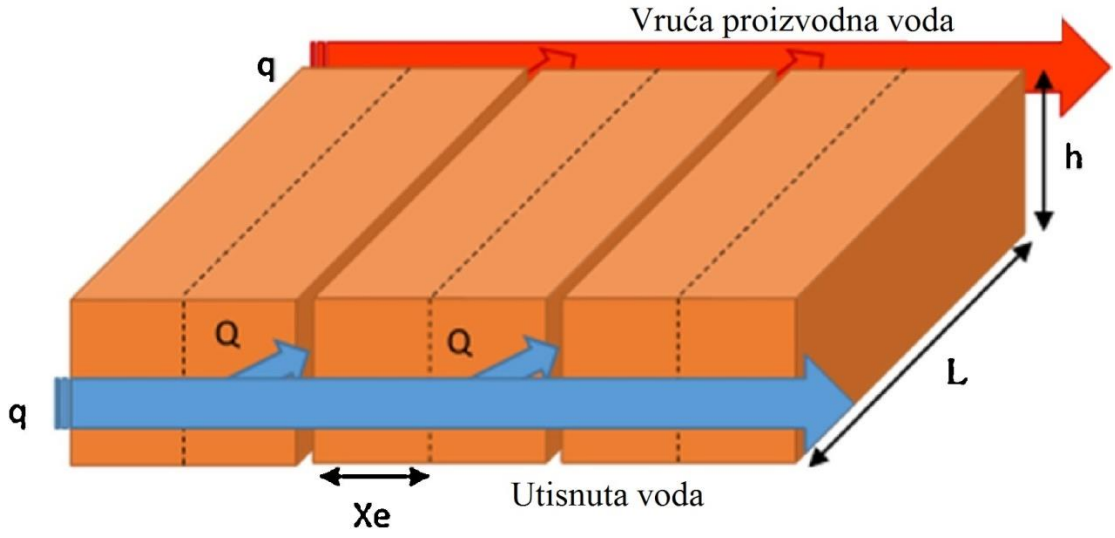
Ukupni koeficijent prijenosa topline predložili su Ichim i Teodoriu (2016) koji su proširili postojeću primjenu i uzeli u obzir dodatne elemente prijenosa topline kao cement, debljina isplačnog kolača i prodor islake u poroznu formaciju.

$$U = \left[\frac{r_{to}}{r_{ti} h_L} + \frac{r_{to} \ln\left(\frac{r_{to}}{r_{ti}}\right)}{\lambda_{steel}} + \frac{r_{to} \ln\left(\frac{r_{ins}}{r_{to}}\right)}{\lambda_{ins}} + \frac{1}{\left(h_c + h_r\right)} + \frac{r_{to} \ln\left(\frac{r_{co}}{r_{ci}}\right)}{\lambda_{steel}} + \frac{r_{to} \ln\left(\frac{r_{wb}}{r_{ci}}\right)}{\lambda_{cement}} + \frac{r_{to} \ln\left(\frac{r_{fc}}{r_{wb}}\right)}{\lambda_{filtercake}} + \frac{r_{to} \ln\left(\frac{r_e(t)}{r_{fc}}\right)}{\lambda_{invaded}} \right]^{-1} \tag{4-7}$$

gdje su $r_{to}, r_{ti}, r_{ins}, r_{ci}, r_{co}, r_{wb}$ vanjski polumjer tubinga, unutarnji polumjer tubinga, polumjer izolacije, unutrnji polumjer zaštitnih cijevi, vanjski polumjer zaštitnih cijevi i polumjer kanala bušotine, zatim $h_L, h_c, h_r, \lambda_{steel}, \lambda_{ins}, \lambda_{cement}$ su koeficijent prijenosa topline fluida konvekcijom, koeficijent prijenosa topline konvekcijom između vanjske i unutarnje površine tubinga, koeficijent prijenosa topline zračenjem, toplinska vodljivost čelika, izolacijskog materijala i cementa. Novi parametri u ovoj jednadžbi koje su uveli Ichim i Teodoriu (2016) su r_{fc} koji predstavlja polumjer ispalčnog kolača od središta bušotine, $r_e(t)$ je duljina radijalnog prodora filtrata isplake u formaciju u funkciji vremena, $\lambda_{filtercake}$ je toplinska vodljivost isplačnog kolača i $\lambda_{invaded}$ je toplinska vodljivost područja ispunjenog filtratom isplake, ove vrijensoti određuju se eksperimentalno. Izraz ukupnog prijenosa topline u određenim dubinama je neovisan o duljini bušotine, već isključivo ovisi o radijusu elemenata bušotine. Ovaj oblik ukupnog koeficijenta prijenosa topline dopušta detaljno podešavanje U kroz promjenu toplinske vodljivosti kod korištenja isplake i cementa pri izradi bušotine. Cilj je zadržati temperaturu ustisnutog ili proizvodnog fluida u gornjem dijelu bušotine, a to se može postići izolcijskim cijevima i cementom niske

provodljivosti. Kad fluid pređe dubinu pri kojoj je temperatura okolnih stijena veća od fluida, konstrukcija bušotine bi trebala biti izmjenjena i omogućiti prijenos topline s toplije formacije na fluid.

Izračun promjene temperature fluida koji protječe kroz vodoravno frakturirano ležište koristi analitičko rješenje koje je razvio Gringarten (1975). Temperatura fluida se izračunava na temelju proizvodnje kao funkcije vremena. Model proračuna umjesto mreže fraktura uzima u obzir jednostruku idealizranu frakturu zbog jednostavnosti računanja. Rješenje jednadžbe podrazumjeva niz paralelnih ravnina, fraktura u ležištu koje su opisane dužinom L i visinom h, udaljenost X_e koja je jednaka polovici udaljenosti između paralelnih jednostrukih fraktura koje se označavaju s N, što označava broj zona kod primjene višestrukog frakturiranja. Udaljenost između jednostrukih fraktura dovoljno je velika da nema termalne interferencije između jednostrukih fraktura. Drugim riječima prilikom ekstrakcije topline između fraktura hladne fronte se ne susreću. Voda iz utisne bušotine ulazi u ležište, teče kroz jednostruke frakture koje se ponašaju kao izmjenivači topline koji predaju toplinu. Voda se zagrijava i ulazi u proizvodnu bušotnu. Na slici 4-7. prikazan je shematski prikaz prolaska vode kroz jednostruku frakturu u ležištu.



Slika 4-7. Konceptualna skica jednostruke frakture kroz koju protječe voda (Li i sur., 2014)

Gringarten (1975) je za izračun izlazne temperature fluida koristio Laplaceovu transformaciju. Dobivena izlazna temperatura podrazumijeva periodički granični uvjet

paralelnih fraktura konačnih duljina i zahtjeva numeričku inverziju Laplaceove transformacije s obzirom na bezdimenzionalno vrijeme t_D.

$$\overline{T}_{WD(z_D,s)} = \left(\frac{1}{s}\right)\left[1+\left(\frac{\beta^*}{s^{\frac{1}{2}}\tanh\left[\frac{X_{ED}-1}{\alpha^*}\right]s^{\frac{1}{2}}}\right)\right]\exp\left[-z_D s^{\frac{1}{2}}\tanh\left(\frac{X_{ED}-1}{\alpha^*}\right)s^{\frac{1}{2}}\right]+\frac{\beta^* z_D}{s}-\frac{\beta}{s^{\frac{3}{2}}\tanh\left(\frac{X_{ED}-1}{\alpha^*}\right)s^{\frac{1}{2}}} \quad (4\text{-}8)$$

gdje je

$$\beta^* = \frac{\omega H}{\left(T_{ro}-T_{wo}\right)}, \quad (4\text{-}9)$$

$$\alpha^* = \frac{2\lambda_r H}{\rho_w c_w Q b}, \quad (4\text{-}10)$$

$$z_D = \frac{z^*}{H}, \quad (4\text{-}11)$$

$$t_D{}^* = \frac{\frac{\left(\rho_w c_w\right)^2}{4\lambda_r \rho_r c_r}}{\left(\frac{Q}{H}\right)^2 t'}, \quad (4\text{-}12)$$

$$X_{ED} = \left(\frac{\rho_w c_w}{\lambda_r}\right)\frac{Q}{z}X_e, \quad (4\text{-}13)$$

$$t' = \frac{t-z^*}{v}, \quad (4\text{-}14)$$

$$Q = \frac{\dot{m}}{N\rho_r h}. \quad (4\text{-}15)$$

U jednadžbi izlazne bezdimenzionalne temperature fluida $\overline{T}_{WD(z_D,s)}$, s je Laplaceova bezdimenzionalna varijabla, X_{ED} je bezdimenzionalna duljina polovice udaljenosti između jednostrukih fraktura, z_D je bezdimenzionalna dužina jednostruke frakture. α^* i β^* su bezdimenzionalni parametri koji se uvode u jednadžbu Gringartena (1975), gdje je ω geotermalni gradijent, H je dubina ležišta, T_{ro} je temperatura ležišta, T_{wo} je temperatura

utisnute vode u ležište, λ_r je toplinska vodljivost stijene, ρ_w je gustoća vode, c_w je specifična toplina vode, Q je volumetrijski protok fluida kroz frakturu po jedinici visini h i b je pola debljine frakture. U jednadžbama z_D, t_D* i X_{ED}, $z*$ je duljina, ρ_r je gustoća stijene, c_r je specifična toplina stijene, X_e je polovica udaljenosti između jednostrukih paralelnih fraktura. t' je vrijeme utiskivanja s obzirom na vremensko kašnjenje između točke utiskivanja i izlaza fluida iz frakture, gdje je t vrijeme proizvodnje, $z*$ je duljina frakture i v je brzina fluida u frakturi. Volumetrijski protok fluida Q definiran je masenim protokom fluida $\dot{m}$, N je broj jednostrukih horizontalnih fraktura, ρ_r je gustoća stijene i h je visina jednostruke frakture. Na osnovu rješenja Gringartena (1975) dobije se jednadžba za izlaznu temperaturu iz jednostruke frakture:

$$T_w = T_{wo} + \left(T_{ro} - T_{wo}\right) erf\left(\frac{\lambda_r}{c_w \rho_w Q \sqrt{\frac{\lambda_r}{\rho_r c_r} t}}\right). \tag{4-16}$$

Li i suradnici (2014) uveli su model računanja temperature fluida izmjenom prethodne jednadžbe Gringartena (1975) za jednostruku frakturu gdje se dobije pojednostavljena jednadžba za izračunavanje temperature proizvodne vode kod višestrukog frakturiranja:

$$T_w = T_{wo} + \left(T_{ro} - T_{wo}\right) erf\left(\frac{L\sqrt{\frac{\lambda_r c_r \rho_r}{t}}}{c_w \rho_w Q}\right), \tag{4-17}$$

gdje je T_{wo} temperatura utisnute vode u ležište, T_{ro} je temperatura ležišta, L je duljina jednostruke frakture između utisne i proizvodne bušotine, λ_r je toplinska vodljivost stijene, c_r je specifična toplina stijene, ρ_r je gustoća stijene, t je vrijeme proizvodnje, c_w je specifična toplina vode, ρ_w je gustoća vode i Q je volumetrijski protok fluida kroz frakturu po jedinici visini h.

Vrijednost snage toplinske energije iz EGS projekta dobije se sljedećom jednadžbom:

$$P(t) = \dot{m} c_w \Delta T, \tag{4-18}$$

$$\Delta T = T_w - T_{wo} \ , \tag{4-19}$$

gdje je ΔT razlika između temperature proizvodnog fluida i temperature fluida koji se utiskuje. Dok se proizvodnja toplinske energije može izračunati za svaki određeni vremenski period kroz vrijeme proizvodnje:

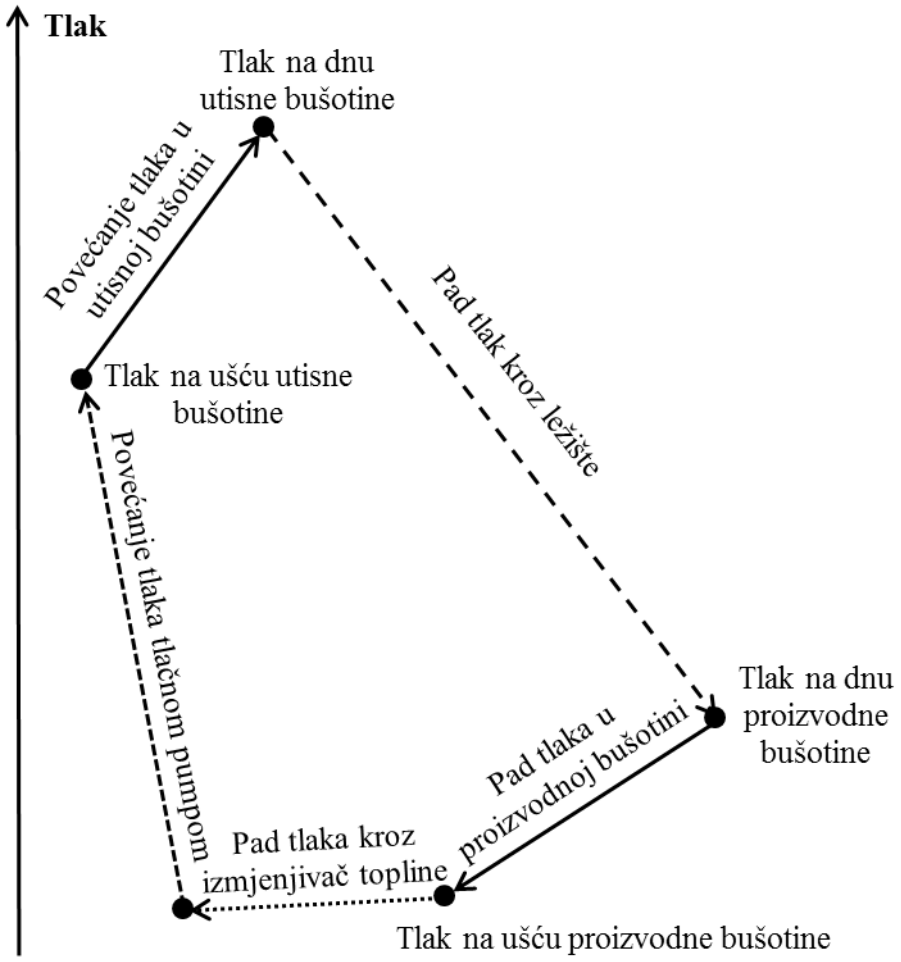
$$E = \sum_{i=0}^{n} P(t)\Delta t_i \ , \tag{4-20}$$

gdje je Δt_i je trajanje određenog perioda. U jednadžbu je uveden i koeficijent β koji označava broj radnih sati iskorištavanja energije izražen u postocima.

$$E = \sum_{i=0}^{n} P(t)\Delta t_i \beta \ . \tag{4-21}$$

4.4.3. Promjena tlaka u bušotinama i ležištu

Za izračunavanje pada tlaka u sustavu, pretpostavlja se da količina radnog fluida koja je utisnuta kroz utisnu bušotinu izlazi iz proizvodne bušotine. Ova pretpostavka u praksi nije česta i korištenje visokog tlaka na ušću utisne bušotine može dovesti do prekomjernog gubitka fluida. Sustav je modeliran na način da postoje četiri ključne točke povezane u seriji: WHP_{inj} - tlak na ušću utisne bušotine, BHP_{inj} - tlak na dnu utisne bušotine, ujedno je to tlak na ulazu u samo ležište, BHP_{prod} - tlak na dnu proizvodne bušotine, tlak na izlazu iz ležišta i WHP_{prod} - tlak na ušću proizvodne bušotine. Pad tlaka u bušotini koristi se za izračun ΔP_{inj} što je jednako $WHP_{inj} - BHP_{inj}$ i ΔP_{prod} što je jednako $WHP_{prod} - BHP_{prod}$. Korištenjem Darcyjevog zakona dobije se pad tlaka kroz ležište ΔP_{res} što je jednako $BHP_{inj} - BHP_{prod}$, naravno uz pretpostavku da se ostvaruje jednofazno laminarno protjecanje fluida u tekućem stanju.



Slika 4-8. Shematski prikaz promjene tlaka kroz EGS sustav

Pad tlaka u bušotini po jedinici dužine naziva se gradijent tlaka. Opća jednadžba gradijenta tlaka (dp/dz) suma je triju komponenata, primjenjiva za bilo koji fluid koji protječe u cijevi određenog nagiba prema horizontali (Hasan i Kabir, 2002):

$$(dp/dz) = (dp/dz)_H + (dp/dz)_A + (dp/dz)_F \tag{4-22}$$

Komponenta $(dp/dz)_H$ predstavlja gradijent tlaka gustoće stupca fluida, dok komponenta $(dp/dz)_A$ predstavlja gradijent tlaka uslijed kinetičke energije ili djelovanja ubrzanja:

$$(dp/dz)_H = -g\rho\sin\theta\,, \tag{4-23}$$

$$(dp/dz)_A = -(\dot{m}/A)dv/dz = -\rho v dv/dz\,, \tag{4-24}$$

gdje je g ubrzanje sile teže, ρ je gustoća fluida, θ je kut što ga bušotina zatvara s horizontalom, $\dot{m}$ je maseni protok fluida, A_p je površina poprečnog presjeka zaštitnih cijevi i v je brzina protjecanja.

Komponenta $(dp/dz)_F$ predstavlja gradijent tlaka uslijed trenja i prikazana je kao:

$$(dp/dz)_F = -fv^2\rho/2d = -\frac{f\rho\left(\frac{q}{\rho A_p}\right)^2}{2d}, \tag{4-25}$$

gdje je d promjer bušotine ili cijevi, q je protok fluida i f je faktor trenja koji ovisi o protjecanju fluida i hrapavosti cijevi. Chen (1979) je predložio slijedeću jednadžbu za izračunavanje Fanningovog faktora trenja:

$$f = \left[2\log\left(\frac{\varepsilon/d}{3.7065} - \frac{5.0452}{\mathrm{Re}}\log\Lambda\right)\right]^{-2}, \tag{4-26}$$

gdje je ε hrapavost cijevi, a Λ je bezdimenzionalna veličina koja se izračunava:

$$\Lambda = \frac{(\varepsilon/d)^{1.1098}}{2.8257} + \left(\frac{7.149}{\mathrm{Re}}\right)^{0.8981}, \tag{4-27}$$

gdje Re predstavlja Reynoldsov broj koji se dobije pomoću sljedeće jednadžbe:

$$\mathrm{Re} = \frac{\rho v d}{\mu}, \tag{4-28}$$

gdje je μ koeficijent dinamičke viskoznosti fluida.

Kod izračunavanja promjene tlaka u ležištu, u jednostrukoj frakturi kao na slici 4-7., ΔP_{res} koristi se Darcyjev zakon uz pretpostavku jednofaznog laminarnog protoka fluida i ustaljenog stanja protjecanja:

$$\Delta P_{res} = \frac{\dot{m}\mu D}{Th\rho}, \tag{4-29}$$

gdje je $\dot{m}$ maseni protok fluida kroz ležište, μ je koeficijent dinamičke viskoznosti fluida, D je udaljenost između utisne i proizvodne bušotine, T je transmisivnost frakture koja ovisi o propusnosti i debljini frakture:

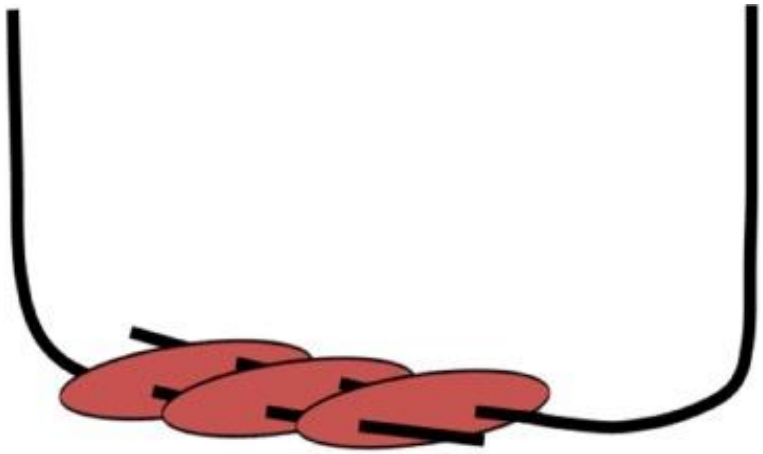
$$T = kh, \tag{4-30}$$

h je visina frakturiranog ležišta kroz koji protječe fluid, k je propusnost i ρ je gustoća fluida. Ova jednadžba opisuje pad tlaka u jednoj frakturiranoj zoni. Ako se primjenjuje kod ležišta koje je višestruko frakturirano, protok se raspodjeljuje po zonama $\dot{m}/N$ i uvodi se N što označava broj frakturiranih zona:

$$\Delta P_{res} = \frac{\dot{m}\mu D}{kh^2 \rho N}. \tag{4-31}$$

5. MODEL DOBIVENE TOPLINSKE ENERGIJE IZ EGS SUSTAVA

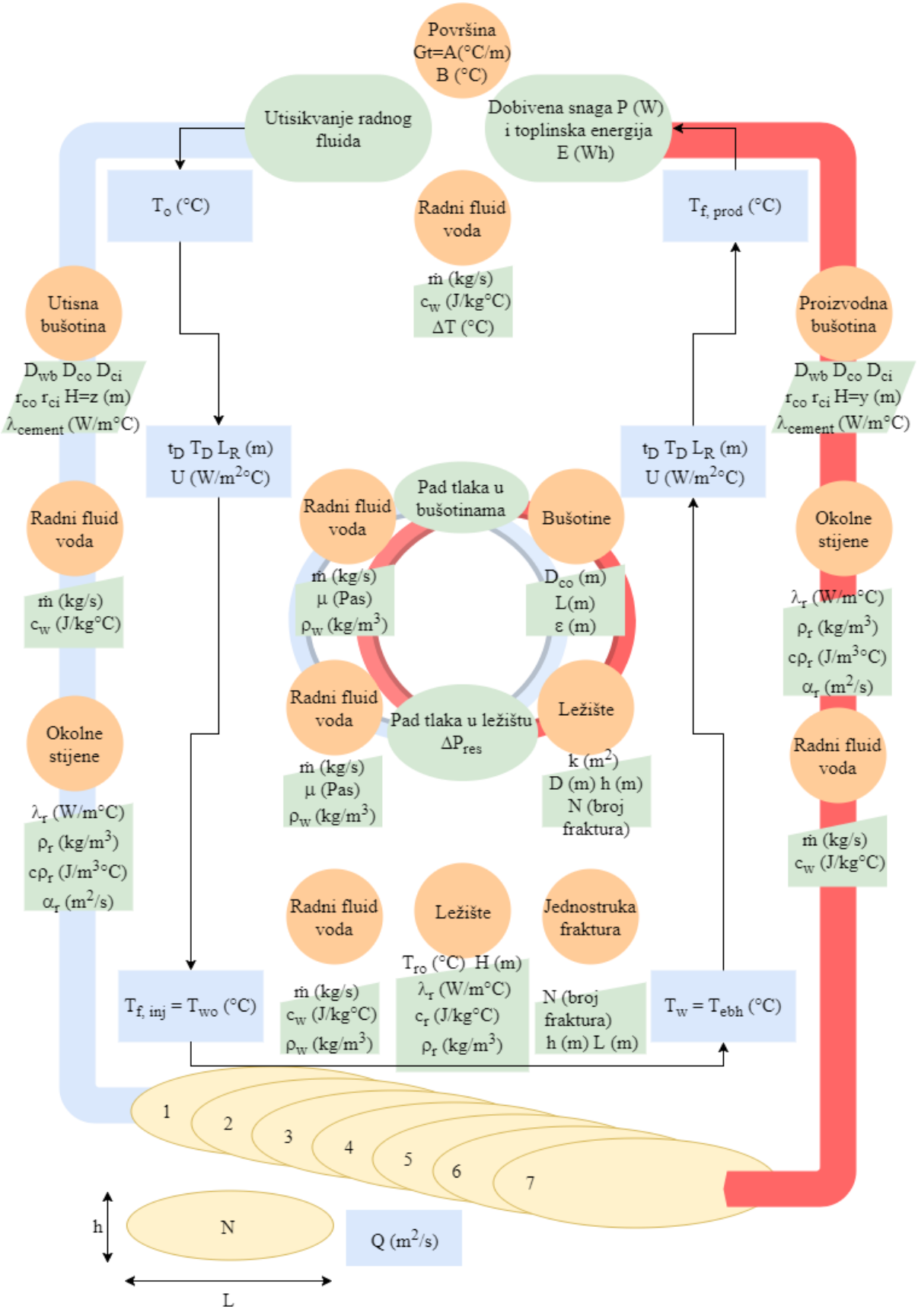
U modelu je prikazan tijek kretanja temperature vode kroz cijeloukupni EGS sustav. Osnovna zadaća modela je izračun temperature voda na ušću proizvodne bušotine pri čemu se iz te temperature dobije toplinska energija. Sam proces kreće utiskivanjem vode u utisnu bušotinu. Okolne stijene u kojoj je bušena utisna bušotina utječu na promjenu temperature koja se računa na dnu utisne bušotine i to je prva faza modela. Zatim slijedi druga faza gdje voda ulazi u ležište. To je najbitniji dio cijelog sustava EGS-a. Prolsakom kroz ležište zagrijana voda kreće se i ulazi u proizvodnu bušotinu. U trećoj fazi prikazana je promjena temperature vode kroz proizvodnu bušotinu i krajnja temperatura na ušću. Iz temperature vode proizvedene na ušću proizvodne bušotine dobije se toplinska energija EGS postrojenja, kao četvrta faza modela. Geometrija bušotina i orijentacija jednostrukih fraktura su idealizirani. Koncept se sastoji od jedne utisne i jedne proizvodne bušotine čiji su horizontalni dijelovi povezani međusobno jednostrukim frakturama kao što je prikazano na slici.



Slika 5-1. EGS koncept s horizontalnom utisnom i proizvodnom bušotinom međusobno povezanim s jednostrukim frakturama (Li i sur., 2014)

Svrha svakog EGS sustava je proizvodnja što je moguće veće količine toplinske energije koja se može koristiti za različite namjene. Kod rada postrojenja i dobivanja toplinske energije velik utjecaj ima protok radnog fluida. Uz paramatre koji su određeni svojstvima stijena ležišta i okolnih stijena gdje su smještene bušotine na koje se ne može utjecati, protokom se može odrediti režim rada postrojenja. Pri većem protoku dolazi do bržeg hlađenja ležišta i dugoročno manje iskoristivosti topline ležišta. Cilj je ostvariti

kontinuiranu i ujednačenu proizvodnju toplinske energije minimalno kroz deset godina. Tako bi se lakše osigurala prodaja energije potrošaču kojem bi se jamčila opskrba jednakom količinom energije više godina. To se potiže uglavnom manjim protocima radnog fluida što opet odgovara pri odabiru pumpe. Za manje protoke potrebna je manja pumpa, pa prema tome manje utoršene energije pri radu. Ali pri odabiru pumpe bitniji faktor je pad tlaka kroz sustav koji ona može svladati. U EGS praksi u utisoj i proizvodnoj bušotini voda struji kroz zaštitne cijevi koje su većih promjera od tubinga i kroz koje je pad tlaka mnogo manji. Kolona zaštitnih cijevi u modelu kroz koje struji voda je vanjskog promjera 0.2445 m. Utjecaj na pad tlaka u bušotinama ima unutarnji promjer zaštitnih cijevi, apsolutna hrapavost, protok i svojstva fluida. U ležištu pri protjcanju radnog fluida ponašanje pada tlaka je drugačije. Propusnost ležišta najviše utječe na pad tlaka zbog toga je i osnovni dio svakog EGS sustava stimulirati ležište. Pošto je pumpa glavni pokretač postrojenja bitno je da se dimenzionira na način da troši što je moguće manje energije uz to da obavi svoju funkciju utiskivanja i protiskivanja radnog fluida kroz cijeli sustav. U nastavku je shematski prikazan put koji voda prođe od trenutka utiskivanja u utisnu bušotinu, kroz ležište i preko proizvodne bušotine na površinu.



Slika 5-2. Proces kretanja temperature u EGS sustavu i dobivene toplinske energije

5.1. Ulazni podaci

Model se sastoji od pet slučaja za različite dubine ležišta 3000, 3500, 4000, 4500 i 5000 metara. Za svaku dubinu napravljeno je devet slučajeva u kojima se mijenja duljina jednostruke frakture i geotermalni gradijent pa prema tome i temperatura u ležištu. Vrijednosti u proračunu koje se ne mijenjaju su temperatura na površini, temperatura utisnutog fluida, broj jednostrukih fraktura i visina jednostruke frakture. Radni fluid je voda i kao konstantne vrijednsoti uzete su gustoća i specifični toplinski kapacitet vode. Naravno da se njihove vrijednosti mijenjaju kako se mijenja temperatura i tlak u sustavu, ali taj raspon kretanja vrijednosti nije velik i ima jako mali utjecaj na krajnje rezultate u proračunu pa su zato uzete kao konstantne vrijednosti. Također se ne mijenjaja promjer bušotina, promjer zaštitnih cijevi za utisnu i proizvodnu bušotinu i toplinska vodljivost cementa.

Tablica 5-1. Parametri konstantnih vrijednosti

H (m)	3000 m, 3500 m, 4000 m, 4500 m, 5000 m		
Gt (°C/m)/L (m)	0.04 °C/m/250 m	0.05 °C/m/250 m	0.06 °C/m/250 m
Gt (°C/m)/L (m)	0.04 °C/m/500 m	0.05 °C/m/500 m	0.06 °C/m/500 m
Gt (°C/m)/L (m)	0.04 °C/m/750 m	0.05 °C/m/750 m	0.06 °C/m/750 m

B - temperatura na površini (°C)	15
T_o - temperatura utisnutog fluida (°C)	40
N - broj jednostrukih horizontalnih fraktura	7
h - visina jednostruke frakture (m)	150

c_w - specifična toplina vode (J/kg°C)	4187
ρ_w - gustoća vode (kg/m3)	960

D_{wb} - promjer kanala bušotine (m)	0.269875
D_{co} - vanjski promjer zaštitnih cijevi (m)	0.2445
D_{ci} - unutarnji promjer zaštitnih cijevi (m)	0.2142
λ_c - toplinska vodljivost cementa (W/m°C)	1.136

Za svaku dubinu modela izračunate su vrijednosti toplinske vodljivosti stijene, specifični toplinski kapacitet stijene, gustoća stijene i specifična obujamska toplina. Ovi parametri

dobiveni su prema modelu koji je objavio Jelić (1979) za Dravsku potolinu. Prvi korak je računanje gustoće stijene u ovisnosti o dubini koja se dobije jednadžbom:

$$\rho_r = -0.747e^{-0.809H} + 2.72. \tag{5-1}$$

Zatim se iz dobivene gustoće stijene dobije toplinska vodljivost stijene:

$$\lambda_r = 0.142\rho_r^{2.86} \ . \tag{5-2}$$

Jednadžba za specifični toplinski kapacitet stijene izražava se kao:

$$c_r = 0.557e^{-1.460H} + 0.908. \tag{5-3}$$

Specifična obujamska toplina stijene dobije se kao umnožak gustoće i specifične topline:

$$c\rho = c_r\rho_r. \tag{5-4}$$

Kod izračuna promjene temperature u bušotinama koristi se prosječna vrijednosti toplinske vodljivosti stijene i specifične obujamske topline za određenu dubinu. Dok se za promjenu temperature radnog fluida u ležištu koristi toplinska vodljivost, gustoća stijene i specifični toplinski kapacitet stijene na točno određenoj dubini ležišta.

Tablica 5-2. Prosječna toplinska vodljivost stijene, prosječna specifična obujamska toplina stijene, toplinska vodljivost stijene, specifični toplinski kapacitet stijene i gustoća stijene za određene dubine prema Jeliću (1979)

H (m)	λ_r (W/m°C)	$c\rho$ (J/m^3°C)	λ_r (W/m°C)	c_r (J/kg°C)	ρ_r (kg/m^3)
3000	1.859	2491677.1	2.316	914.98	2654
3500	1.928	2483467.8	2.371	911.36	2676
4000	1.986	2478499.5	2.408	909.62	2691
4500	2.035	2475472.1	2.433	908.78	2700
5000	2.076	2473611.0	2.450	908.38	2707

5.1.1 Utisna bušotina

Na dnu utisne bušotine izračunava se promjena temperature radnog fluida kako slijedi:

1. Difuzivnost okolnih stijena ili temperaturna vodljivost: $\alpha_r = \frac{\lambda_r}{c\rho}$. (5-5)

2. Bezdimenzionalno vrijeme: $t_D = \frac{4\alpha_r \tau}{D_{wd}^2}$. (5-6)

3. Bezdimenzionalna temperatura: $T_D = \ln\left[e^{-0.2t_D} + \left(1.5 - 0.3719e^{-t_D}\right)\sqrt{t_D} \right]$. (5-7)

4. Ukupni koeficijent prijenosa topline: $U = \left[\frac{r_{ci} \ln\left(\frac{r_{wb}}{r_{co}}\right)}{\lambda_{cement}} \right]^{-1}$. (5-8)

Za izračun ukupnog koeficijenta prijenosa uzeta je pojednostavljna jednadžba.

5. Koeficijent relaksacije: $L_R = \frac{2\pi}{c_w \dot{m}} \left(\frac{r_{to} U \lambda_r}{\lambda_r + r_{to} U T_D} \right)$. (5-9)

6. Temperatura vode na dnu utisne bušotine ili temperatura utisnute vode u ležište:

$$T_{f,inj} = Az + B - \frac{A}{L_R} + \left(T_o(t) + \frac{A}{L_R} - B \right) e^{-zL_R} . \quad (5\text{-}10)$$

5.1.2 Ležište

Na izlazu iz ležišta dobije se zagrijana voda, temperatura na dnu proizvodne bušotine kako slijedi:

1. Volumetrijski protok vode kroz jednostruku frakturu po jedinici visine: $Q = \frac{\dot{m}}{N \rho_r h}$ (5-11)

2. Temperatura vode na izlasku iz ležišta: $T_w = T_{wo} + \left(T_{ro} - T_{wo}\right) erf\left(\frac{L\sqrt{\frac{\lambda_r c_r \rho_r}{t}}}{c_w \rho_w Q} \right)$. (5-12)

5.1.3 Proizvodna bušotina

Na ušću proizvodne bušotine izračunava se promjena temperature vode jednadžbom:

$$T_{f,prod} = T_{ebh}(t) - Ay + \frac{A}{L_R}\left(1 - e^{-yL_R}\right) \tag{5-13}$$

Da bi se dobio konačni rezltat koriste se prvih pet točaka kao i u primjeru promjene temperature u utisnoj bušotini. Prvih pet koraka identični su i za utisnu i za proizvodnu bušotinu.

5.1.4 Snaga i toplinska energija

1. Instalirana snaga postrojenja: $P(t) = \dot{m}c_w\Delta T$. (5-14)

2. Dobivena toplinska energija: $E = \sum_{i=0}^{n} P(t)\Delta t_i \beta$. (5-15)

Odabrani postotak broja radnih sati β=0.25, što označava postotak rada postrojenja. Kod primjene geotermalne energije za grijanje sati rada paralelno ovise o klimatskim parametrima nekog razmatranog područja gdje postoji potreba za korištenjem energije iz ovakvih sustava. Prema tome u nekom trenutku postrojenje će raditi i iznad svojih projektiranih vrijednosti, veći protok vode i brže hlađenje ležišta. Dok u nekom periodu sustav će biti zatvoren, što će omogućiti regeneraciju ležiša.

Modeliran je niz slučajeva gdje postoje velik broj ulaznih podataka. Za svaki model prikazana je temperatura na ušću proizvodne bušotine i dobivena toplinska energija za svaku godinu. Rješenja slučajeva uvijek se vežu uz projektna rješenja i potrebe investirora.

Model je zamišljen da je radni tlak u sustavu 20 bara što omogućava da voda bude u tekućem stanju do temperature 212°C. Temperatura je dobivena softverskim alatom SteamTab. Nekoliko slučajeva modela gdje su ulazni podaci geotermalnog gradijenta i duljine jednostruke frakture veći dobiju se visoke temperature na ušću proizvodne bušotine koje premašuju temperaturu od 212 °C. Što znači da voda prelazi u plinovito stanje čija je entalpija veća za istu temperaturu iste jednične mase u odnosu na vodu u tekućem stanju. Sustavi gdje se proizvodi vodena para zahtjeva drugačiju infrastrukturu nasuprot sustavima gdje se proizvodi isključivo kapljevina.

Tablica 5-3. Dobivena temperatura na ušću proizvodne bušotine i dobivena toplinska energija pri konstantnom masenom protoku od 30 kg/s.

	H=3000 m																	
	0.04 °C/m/250 m		0.04 °C/m/500 m		0.04 °C/m/750 m		0.05 °C/m/250 m		0.05 °C/m/500 m		0.05 °C/m/750 m		0.06 °C/m/250 m		0.06 °C/m/500 m		0.06 °C/m/750 m	
t (godine)	T (°C)	E (GWh)	T (°C)	E (GWh)	T (°C)	E (GWh)	T (°C)	E (GWh)	T (°C)	E (GWh)	T (°C)	E (GWh)	T (°C)	E (GWh)	T (°C)	E (GWh)	T (°C)	E (GWh)
1	116.0	20.91	116.0	20.92	116.0	20.92	149.9	30.23	145.0	28.90	145.0	28.90	174.0	36.86	174.1	36.88	174.1	36.88
2	115.2	20.69	116.3	21.00	116.3	21.00	148.3	29.80	145.4	29.00	145.4	29.00	172.5	36.45	174.5	37.00	174.5	37.00
3	112.9	20.05	116.5	21.04	116.5	21.04	144.8	28.83	145.6	29.05	145.6	29.05	168.4	35.33	174.7	37.06	174.7	37.07
4	110.0	19.26	116.6	21.06	116.6	21.07	140.5	27.66	145.7	29.07	145.7	29.09	163.4	33.94	174.8	37.09	174.9	37.11
5	107.1	18.45	116.5	21.05	116.7	21.09	136.3	26.49	145.6	29.06	145.8	29.12	158.3	32.53	174.7	37.06	175.0	37.14
6	104.3	17.69	116.4	21.00	116.7	21.11	132.3	25.38	145.4	28.99	145.9	29.14	153.4	31.20	174.4	36.98	175.1	37.16
7	101.8	16.99	116.1	20.93	116.8	21.12	128.6	24.36	145.0	28.88	146.0	29.15	148.9	29.97	173.9	36.84	175.2	37.18
8	99.4	16.35	115.7	20.82	116.8	21.13	125.2	23.44	144.4	28.73	146.0	29.16	144.8	28.84	173.2	36.65	175.2	37.19
9	97.3	15.76	115.2	20.68	116.8	21.13	122.1	22.59	143.8	28.55	146.0	29.16	141.1	27.82	172.4	36.41	175.2	37.19
10	95.4	15.23	114.6	20.52	116.8	21.13	119.3	21.83	143.0	28.33	146.0	29.16	137.7	26.88	171.4	36.13	175.2	37.19
11	93.6	14.74	114.0	20.35	116.8	21.12	116.8	21.12	142.1	28.09	145.9	29.15	134.6	26.03	170.3	35.83	175.1	37.17
12	92.0	14.30	113.3	20.17	116.7	21.10	114.5	20.48	141.2	27.84	145.9	29.12	131.8	25.25	169.1	35.51	175.0	37.14
13	90.5	13.89	112.6	19.97	116.6	21.08	112.3	19.89	140.2	27.57	145.8	29.09	129.2	24.53	167.8	35.17	174.9	37.10
14	89.1	13.51	111.9	19.77	116.5	21.05	110.3	19.34	139.2	27.30	145.6	29.05	126.7	23.86	166.6	34.82	174.7	37.05
15	87.8	13.15	111.1	19.57	116.4	21.02	108.5	18.84	138.2	27.02	145.4	29.01	124.5	23.24	165.3	34.46	174.5	36.99
16	86.6	12.83	110.4	19.37	116.3	20.98	106.8	18.37	137.2	26.73	145.2	28.95	122.4	22.67	164.0	34.10	174.2	36.92
17	85.5	12.52	109.7	19.16	116.1	20.93	105.2	17.93	136.2	26.45	145.0	28.88	120.5	22.14	162.7	33.74	173.9	36.83
18	84.5	12.24	108.9	18.96	115.9	20.88	103.7	17.52	135.1	26.17	144.7	28.81	118.7	21.64	161.4	33.39	173.6	36.74
19	83.5	11.97	108.2	18.76	115.7	20.82	102.3	17.14	134.1	25.89	144.4	28.73	117.0	21.17	160.1	33.03	173.2	36.64
20	82.6	11.72	107.5	18.56	115.5	20.76	101.0	16.78	133.1	25.62	144.1	28.64	115.4	20.73	158.8	32.68	172.8	36.53
21	81.7	11.48	106.7	18.36	115.2	20.69	99.8	16.44	132.1	25.35	143.8	28.55	113.8	20.31	157.6	32.34	172.4	36.41
22	80.9	11.26	106.0	18.17	115.0	20.62	98.6	16.12	131.2	25.08	143.4	28.45	112.4	19.92	156.3	32.00	171.9	36.29
23	80.2	11.05	105.3	17.98	114.7	20.55	97.5	15.82	130.2	24.82	143.1	28.35	111.1	19.55	155.1	31.67	171.4	36.16
24	79.4	10.85	104.7	17.79	114.4	20.47	96.5	15.53	129.3	24.56	142.7	28.25	109.8	19.20	153.9	31.34	170.9	36.02
25	78.7	10.66	104.0	17.61	114.1	20.39	95.5	15.26	128.4	24.31	142.3	28.14	108.6	18.87	152.8	31.02	170.4	35.88
26	78.1	10.48	103.4	17.43	113.8	20.31	94.5	15.00	127.5	24.07	141.9	28.02	107.5	18.56	151.6	30.71	169.9	35.74
27	77.5	10.31	102.7	17.25	113.5	20.22	93.6	14.76	126.6	23.83	141.4	27.91	106.4	18.25	150.5	30.40	169.4	35.59
28	76.9	10.14	102.1	17.08	113.2	20.14	92.8	14.52	125.8	23.59	141.0	27.79	105.3	17.97	149.4	30.10	168.8	35.44
29	76.3	9.98	101.5	16.92	112.9	20.05	92.0	14.30	124.9	23.36	140.6	27.67	104.3	17.69	148.4	29.81	168.3	35.29
30	75.8	9.83	100.9	16.75	112.6	19.96	91.2	14.09	124.1	23.14	140.1	27.55	103.4	17.43	147.3	29.52	167.7	35.13
E (GWh) ukupno=		418.27		579.00		623.88		599.87		799.36		861.03		738.82		1019.73		1098.17

Tablica 5-4. Dobivena temperatura na ušću proizvodne bušotine i dobivena toplinska energija pri konstantnom masenom protoku od 30 kg/s.

	H=3500 m																	
	0.04 °C/m/250 m		0.04 °C/m/500 m		0.04 °C/m/750 m		0.05 °C/m/250 m		0.05 °C/m/500 m		0.05 °C/m/750 m		0.06 °C/m/250 m		0.06 °C/m/500 m		0.06 °C/m/750 m	
t (godine)	T (°C)	E (GWh)	T (°C)	E (GWh)	T (°C)	E (GWh)	T (°C)	E (GWh)	T (°C)	E (GWh)	T (°C)	E (GWh)	T (°C)	E (GWh)	T (°C)	E (GWh)	T (°C)	E (GWh)
1	134.4	25.97	134.5	25.99	134.5	25.99	168.0	35.22	168.1	35.23	168.1	35.23	201.6	44.46	201.7	44.48	201.7	44.48
2	133.7	25.76	134.9	26.10	134.9	26.10	167.0	34.92	168.6	35.38	168.6	35.38	200.2	44.08	202.3	44.65	202.3	44.65
3	131.1	25.05	135.1	26.16	135.1	26.16	163.4	33.95	168.9	35.45	168.9	35.45	195.8	42.86	202.6	44.74	202.6	44.74
4	127.7	24.13	135.2	26.19	135.2	26.20	158.9	32.70	169.0	35.48	169.0	35.50	190.1	41.28	202.8	44.78	202.9	44.80
5	124.2	23.17	135.2	26.18	135.3	26.23	154.2	31.41	169.0	35.48	169.2	35.54	184.1	39.65	202.8	44.77	203.0	44.84
6	120.9	22.25	135.0	26.14	135.4	26.25	149.7	30.17	168.8	35.42	169.3	35.56	178.5	38.09	202.5	44.70	203.1	44.88
7	117.8	21.40	134.7	26.06	135.5	26.27	145.5	29.01	168.4	35.31	169.4	35.58	173.2	36.63	202.0	44.56	203.2	44.90
8	114.9	20.61	134.3	25.95	135.5	26.28	141.6	27.95	167.8	35.15	169.4	35.60	168.3	35.30	201.2	44.36	203.3	44.92
9	112.3	19.89	133.8	25.80	135.6	26.29	138.1	26.98	167.0	34.95	169.4	35.61	163.9	34.07	200.3	44.10	203.3	44.93
10	109.9	19.23	133.1	25.62	135.6	26.29	134.9	26.09	166.2	34.71	169.4	35.61	159.8	32.95	199.2	43.80	203.3	44.93
11	107.7	18.63	132.4	25.43	135.5	26.28	131.9	25.28	165.2	34.45	169.4	35.60	156.1	31.93	198.0	43.46	203.3	44.92
12	105.7	18.08	131.7	25.21	135.5	26.27	129.2	24.53	164.2	34.16	169.3	35.58	152.6	30.98	196.7	43.10	203.2	44.89
13	103.9	17.57	130.8	24.99	135.4	26.25	126.7	23.84	163.1	33.85	169.2	35.55	149.5	30.11	195.3	42.72	203.1	44.86
14	102.1	17.09	130.0	24.76	135.3	26.22	124.3	23.20	161.9	33.54	169.1	35.51	146.5	29.31	193.9	42.32	202.9	44.81
15	100.5	16.65	129.1	24.52	135.2	26.18	122.2	22.61	160.8	33.22	168.9	35.46	143.8	28.56	192.4	41.92	202.7	44.75
16	99.1	16.25	128.3	24.28	135.0	26.14	120.2	22.06	159.6	32.89	168.7	35.41	141.3	27.87	190.9	41.51	202.4	44.67
17	97.7	15.86	127.4	24.03	134.8	26.09	118.3	21.54	158.4	32.56	168.5	35.34	139.0	27.22	189.4	41.09	202.1	44.58
18	96.4	15.51	126.5	23.79	134.6	26.03	116.6	21.06	157.2	32.24	168.2	35.26	136.7	26.61	187.9	40.68	201.7	44.48
19	95.2	15.17	125.6	23.55	134.4	25.97	114.9	20.61	156.0	31.91	167.9	35.17	134.7	26.04	186.4	40.27	201.3	44.38
20	94.0	14.86	124.7	23.31	134.2	25.90	113.4	20.18	154.8	31.58	167.5	35.08	132.7	25.51	184.9	39.86	200.9	44.26
21	92.9	14.56	123.9	23.07	133.9	25.83	111.9	19.78	153.7	31.27	167.2	34.98	130.9	25.01	183.4	39.46	200.4	44.13
22	91.9	14.28	123.0	22.84	133.6	25.75	110.5	19.41	152.5	30.95	166.8	34.87	129.2	24.53	182.0	39.06	199.9	43.99
23	91.0	14.02	122.2	22.61	133.3	25.66	109.2	19.05	151.4	30.64	166.3	34.76	127.5	24.08	180.6	38.67	199.4	43.85
24	90.0	13.77	121.4	22.38	133.0	25.57	108.0	18.71	150.3	30.33	165.9	34.64	126.0	23.65	179.2	38.28	198.9	43.70
25	89.2	13.53	120.6	22.16	132.6	25.48	106.8	18.39	149.2	30.03	165.5	34.51	124.5	23.24	177.8	37.91	198.3	43.55
26	88.4	13.30	119.8	21.95	132.3	25.39	105.7	18.08	148.1	29.74	165.0	34.39	123.1	22.86	176.5	37.54	197.7	43.38
27	87.6	13.09	119.0	21.73	131.9	25.29	104.7	17.79	147.1	29.45	164.5	34.26	121.8	22.49	175.1	37.17	197.1	43.22
28	86.8	12.88	118.2	21.52	131.6	25.19	103.6	17.51	146.0	29.17	164.0	34.12	120.5	22.14	173.8	36.82	196.5	43.05
29	86.1	12.68	117.5	21.32	131.2	25.09	102.7	17.24	145.0	28.90	163.5	33.99	119.3	21.80	172.6	36.47	195.9	42.88
30	85.4	12.49	116.8	21.12	130.8	24.99	101.8	16.99	144.1	28.63	163.0	33.85	118.1	21.48	171.3	36.13	195.2	42.70
E (GWh) ukupno=		527.74		724.78		777.63		716.27		982.07		1053.38		904.80		1239.37		1329.12

Tablica 5-5. Dobivena temperatura na ušću proizvodne bušotine i dobivena toplinska energija pri konstantnom masenom protoku od 30 kg/s.

	H=4000 m																	
	0.04 °C/m/250 m		0.04 °C/m/500 m		0.04 °C/m/750 m		0.05 °C/m/250 m		0.05 °C/m/500 m		0.05 °C/m/750 m		0.06 °C/m/250 m		0.06 °C/m/500 m		0.06 °C/m/750 m	
t (godine)	T (°C)	E (GWh)	T (°C)	E (GWh)	T (°C)	E (GWh)	T (°C)	E (GWh)	T (°C)	E (GWh)	T (°C)	E (GWh)	T (°C)	E (GWh)	T (°C)	E (GWh)	T (°C)	E (GWh)
1	152.6	30.97	152.6	30.98	152.6	30.98	190.7	41.46	190.8	41.48	190.8	41.48	228.9	51.96	228.9	51.97	228.9	51.97
2	151.9	30.77	153.2	31.13	153.2	31.13	189.7	41.19	191.5	41.67	191.5	41.67	227.6	51.60	229.8	52.20	229.8	52.20
3	149.0	29.98	153.5	31.21	153.5	31.21	185.9	40.13	191.8	41.76	191.8	41.76	222.7	50.27	230.2	52.32	230.2	52.32
4	145.2	28.93	153.6	31.25	153.6	31.26	180.8	38.72	192.0	41.81	192.1	41.83	216.3	48.51	230.4	52.38	230.5	52.40
5	141.1	27.82	153.6	31.26	153.8	31.30	175.4	37.24	192.0	41.82	192.2	41.88	209.6	46.66	230.4	52.38	230.7	52.45
6	137.2	26.75	153.5	31.22	153.9	31.33	170.2	35.81	191.8	41.77	192.4	41.91	203.1	44.88	230.2	52.31	230.8	52.50
7	133.6	25.75	153.2	31.14	154.0	31.35	165.3	34.48	191.4	41.66	192.5	41.94	197.1	43.20	229.7	52.17	231.0	52.53
8	130.2	24.82	152.7	31.01	154.0	31.37	160.8	33.24	190.8	41.49	192.5	41.96	191.4	41.66	228.9	51.96	231.1	52.56
9	127.2	23.97	152.2	30.85	154.1	31.38	156.7	32.11	190.0	41.27	192.6	41.98	186.3	40.24	227.9	51.69	231.1	52.57
10	124.3	23.19	151.4	30.66	154.1	31.39	152.9	31.07	189.1	41.01	192.6	41.98	181.6	38.94	226.7	51.37	231.1	52.58
11	121.7	22.48	150.7	30.44	154.1	31.38	149.5	30.11	188.0	40.72	192.6	41.98	177.2	37.75	225.4	51.00	231.1	52.57
12	119.3	21.82	149.8	30.20	154.1	31.37	146.3	29.23	186.9	40.40	192.5	41.96	173.2	36.64	223.9	50.60	231.0	52.55
13	117.1	21.21	148.9	29.95	154.0	31.35	143.3	28.42	185.6	40.06	192.4	41.94	169.5	35.63	222.4	50.17	230.9	52.52
14	115.0	20.64	147.9	29.68	153.9	31.33	140.6	27.67	184.3	39.71	192.3	41.90	166.1	34.69	220.8	49.73	230.7	52.47
15	113.1	20.12	146.9	29.41	153.7	31.29	138.0	26.97	183.0	39.34	192.1	41.85	162.9	33.81	219.1	49.27	230.5	52.41
16	111.4	19.63	145.9	29.13	153.6	31.24	135.7	26.32	181.7	38.97	191.9	41.79	160.0	33.00	217.4	48.81	230.2	52.33
17	109.7	19.18	144.9	28.85	153.4	31.19	133.5	25.71	180.3	38.60	191.6	41.71	157.2	32.24	215.7	48.34	229.9	52.24
18	108.2	18.75	143.9	28.57	153.2	31.13	131.4	25.14	178.9	38.22	191.3	41.63	154.6	31.53	214.0	47.87	229.5	52.13
19	106.7	18.35	142.8	28.29	152.9	31.06	129.4	24.60	177.6	37.85	191.0	41.54	152.2	30.86	212.3	47.41	229.1	52.02
20	105.3	17.97	141.8	28.01	152.6	30.98	127.6	24.10	176.2	37.48	190.6	41.44	149.9	30.23	210.6	46.94	228.6	51.89
21	104.0	17.62	140.8	27.73	152.3	30.90	125.9	23.63	174.9	37.11	190.2	41.33	147.7	29.64	209.0	46.48	228.1	51.75
22	102.8	17.28	139.8	27.46	152.0	30.81	124.3	23.18	173.6	36.74	189.8	41.21	145.7	29.08	207.3	46.03	227.6	51.61
23	101.7	16.96	138.9	27.19	151.7	30.72	122.7	22.75	172.3	36.39	189.4	41.08	143.8	28.54	205.7	45.58	227.0	51.45
24	100.6	16.66	137.9	26.93	151.3	30.62	121.3	22.35	171.0	36.03	188.9	40.95	141.9	28.04	204.1	45.14	226.4	51.29
25	99.5	16.37	136.9	26.67	150.9	30.52	119.9	21.97	169.7	35.69	188.4	40.82	140.2	27.56	202.5	44.70	225.8	51.11
26	98.5	16.10	136.0	26.41	150.6	30.41	118.5	21.60	168.5	35.35	187.9	40.68	138.5	27.11	201.0	44.28	225.2	50.94
27	97.6	15.84	135.1	26.16	150.2	30.30	117.3	21.26	167.3	35.01	187.3	40.53	137.0	26.67	199.4	43.86	224.5	50.75
28	96.7	15.59	134.2	25.92	149.8	30.19	116.1	20.93	166.1	34.68	186.8	40.38	135.5	26.26	198.0	43.45	223.8	50.57
29	95.8	15.36	133.3	25.68	149.3	30.08	114.9	20.61	164.9	34.36	186.2	40.23	134.0	25.86	196.5	43.05	223.1	50.37
30	95.0	15.13	132.5	25.44	148.9	29.96	113.8	20.31	163.8	34.05	185.7	40.07	132.6	25.49	195.1	42.66	222.4	50.18
E (GWh) ukupno=		636.03		868.84		929.57		852.29		1162.48		1243.39		1068.55		1456.13		1557.22

Tablica 5-6. Dobivena temperatura na ušću proizvodne bušotine i dobivena toplinska energija pri konstantnom masenom protoku od 30 kg/s.

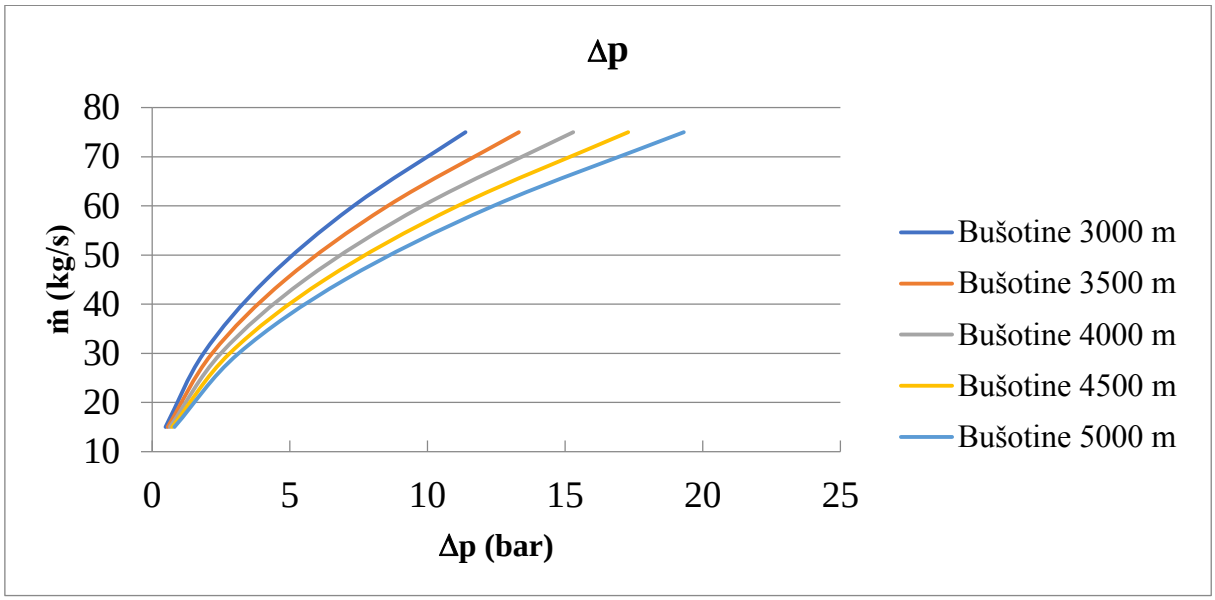
	H=4500 m																	
	0.04 °C/m/250 m		0.04 °C/m/500 m		0.04 °C/m/750 m		0.05 °C/m/250 m		0.05 °C/m/500 m		0.05 °C/m/750 m		0.06 °C/m/250 m		0.06 °C/m/500 m		0.06 °C/m/750 m	
t (godine)	T (°C)	E (GWh)	T (°C)	E (GWh)	T (°C)	E (GWh)	T (°C)	E (GWh)	T (°C)	E (GWh)	T (°C)	E (GWh)	T (°C)	E (GWh)	T (°C)	E (GWh)	T (°C)	E (GWh)
1	170.5	35.89	170.5	35.90	170.5	35.90	213.1	47.62	213.1	47.63	213.1	47.63	255.7	59.34	255.8	59.36	255.8	59.36
2	169.8	35.71	171.2	36.10	171.2	36.10	212.2	47.36	214.0	47.87	214.0	47.87	254.5	59.01	256.8	59.65	256.8	59.65
3	166.7	34.84	171.6	36.19	171.6	36.20	208.0	46.21	214.5	47.99	214.5	48.00	249.3	57.58	257.4	59.79	257.4	59.80
4	162.4	33.66	171.8	36.25	171.8	36.26	202.3	44.65	214.7	48.06	214.8	48.08	242.2	55.63	257.7	59.88	257.7	59.89
5	157.8	32.41	171.8	36.27	172.0	36.31	196.3	42.99	214.8	48.08	215.0	48.14	234.7	53.57	257.7	59.89	258.0	59.97
6	153.4	31.19	171.7	36.23	172.1	36.35	190.4	41.37	214.6	48.03	215.2	48.19	227.4	51.56	257.5	59.84	258.2	60.02
7	149.2	30.04	171.4	36.15	172.2	36.38	184.9	39.85	214.2	47.92	215.3	48.22	220.6	49.67	257.0	59.69	258.4	60.07
8	145.3	28.98	170.9	36.02	172.3	36.40	179.8	38.45	213.6	47.75	215.4	48.25	214.2	47.92	256.2	59.47	258.5	60.10
9	141.8	28.00	170.3	35.84	172.4	36.42	175.1	37.15	212.7	47.51	215.5	48.27	208.3	46.31	255.1	59.18	258.6	60.13
10	138.5	27.10	169.5	35.63	172.4	36.43	170.7	35.96	211.7	47.23	215.5	48.28	203.0	44.83	253.9	58.83	258.6	60.14
11	135.5	26.27	168.6	35.39	172.4	36.43	166.8	34.87	210.5	46.91	215.5	48.28	198.0	43.47	252.4	58.43	258.6	60.14
12	132.7	25.51	167.7	35.12	172.4	36.42	163.1	33.86	209.2	46.56	215.5	48.27	193.5	42.21	250.8	57.99	258.6	60.12
13	130.2	24.80	166.6	34.84	172.3	36.40	159.7	32.93	207.9	46.18	215.4	48.25	189.2	41.05	249.1	57.52	258.4	60.09
14	127.8	24.15	165.6	34.54	172.2	36.37	156.6	32.06	206.4	45.79	215.2	48.21	185.3	39.98	247.3	57.04	258.3	60.04
15	125.6	23.54	164.4	34.23	172.1	36.33	153.6	31.26	205.0	45.38	215.1	48.16	181.7	38.98	245.5	56.53	258.0	59.98
16	123.5	22.97	163.3	33.92	171.9	36.29	150.9	30.51	203.5	44.97	214.8	48.09	178.3	38.05	243.6	56.01	257.7	59.90
17	121.6	22.44	162.2	33.60	171.7	36.23	148.4	29.81	201.9	44.55	214.5	48.02	175.1	37.18	241.7	55.49	257.4	59.80
18	119.8	21.95	161.0	33.29	171.5	36.16	146.0	29.15	200.4	44.13	214.2	47.93	172.2	36.36	239.8	54.97	257.0	59.69
19	118.1	21.48	159.8	32.97	171.2	36.09	143.7	28.54	198.9	43.71	213.9	47.83	169.4	35.59	237.9	54.44	256.5	59.57
20	116.5	21.04	158.7	32.65	170.9	36.01	141.6	27.96	197.4	43.29	213.5	47.72	166.8	34.87	236.0	53.92	256.0	59.43
21	115.0	20.63	157.5	32.34	170.6	35.92	139.6	27.41	195.8	42.87	213.0	47.60	164.3	34.19	234.1	53.41	255.5	59.28
22	113.6	20.24	156.4	32.02	170.2	35.82	137.8	26.89	194.3	42.46	212.6	47.47	162.0	33.55	232.3	52.89	254.9	59.12
23	112.2	19.87	155.3	31.72	169.8	35.72	136.0	26.40	192.9	42.05	212.1	47.34	159.7	32.94	230.4	52.39	254.3	58.95
24	110.9	19.51	154.2	31.41	169.4	35.61	134.3	25.94	191.4	41.65	211.6	47.19	157.6	32.36	228.6	51.89	253.7	58.77
25	109.7	19.18	153.1	31.12	169.0	35.50	132.7	25.50	190.0	41.26	211.0	47.04	155.6	31.81	226.9	51.40	253.0	58.59
26	108.6	18.86	152.1	30.82	168.6	35.38	131.2	25.08	188.6	40.87	210.4	46.89	153.7	31.29	225.1	50.92	252.3	58.39
27	107.5	18.56	151.0	30.54	168.2	35.26	129.7	24.68	187.2	40.49	209.9	46.72	151.9	30.79	223.4	50.45	251.5	58.19
28	106.4	18.27	150.0	30.25	167.7	35.13	128.3	24.29	185.8	40.12	209.2	46.56	150.2	30.32	221.7	49.98	250.8	57.99
29	105.4	17.99	149.0	29.98	167.2	35.00	127.0	23.93	184.5	39.75	208.6	46.39	148.5	29.86	220.1	49.53	250.0	57.77
30	104.4	17.73	148.0	29.71	166.8	34.87	125.7	23.58	183.2	39.40	208.0	46.21	147.0	29.43	218.4	49.08	249.2	57.56
E (GWh) ukupno=		742.79		1011.04		1079.67		986.23		1340.46		1431.09		1229.67		1669.89		1782.52

Tablica 5-7. Dobivena temperatura na ušću proizvodne bušotine i dobivena toplinska energija pri konstantnom masenom protoku od 30 kg/s.

	H=5000 m																	
	0.04 °C/m/250 m		0.04 °C/m/500 m		0.04 °C/m/750 m		0.05 °C/m/250 m		0.05 °C/m/500 m		0.05 °C/m/750 m		0.06 °C/m/250 m		0.06 °C/m/500 m		0.06 °C/m/750 m	
t (godine)	T (°C)	E (GWh)	T (°C)	E (GWh)	T (°C)	E (GWh)	T (°C)	E (GWh)	T (°C)	E (GWh)	T (°C)	E (GWh)	T (°C)	E (GWh)	T (°C)	E (GWh)	T (°C)	E (GWh)
1	188.1	40.74	188.2	40.75	188.2	40.75	235.1	53.68	235.2	53.69	235.2	53.69	282.2	66.61	282.2	66.63	282.2	66.63
2	187.5	40.58	189.0	40.99	189.0	40.99	234.3	53.44	236.3	53.99	236.3	53.99	281.1	66.31	283.5	66.99	283.5	66.99
3	184.1	39.63	189.5	41.12	189.5	41.12	229.8	52.20	236.8	54.15	236.8	54.15	275.5	64.77	284.2	67.18	284.2	67.18
4	179.3	38.33	189.7	41.19	189.8	41.20	223.5	50.48	237.2	54.24	237.2	54.25	267.7	62.64	284.6	67.28	284.7	67.30
5	174.2	36.93	189.8	41.21	190.0	41.26	216.8	48.64	237.3	54.26	237.5	54.33	259.4	60.36	284.7	67.32	285.0	67.39
6	169.3	35.56	189.7	41.18	190.2	41.31	210.3	46.84	237.1	54.22	237.7	54.38	251.3	58.13	284.5	67.26	285.2	67.46
7	164.6	34.26	189.4	41.10	190.3	41.35	204.1	45.14	236.7	54.11	237.9	54.43	243.7	56.03	284.0	67.12	285.4	67.52
8	160.2	33.07	188.9	40.96	190.4	41.37	198.4	43.57	236.0	53.92	238.0	54.47	236.6	54.07	283.2	66.89	285.6	67.56
9	156.2	31.96	188.2	40.77	190.5	41.40	193.1	42.12	235.1	53.67	238.1	54.50	230.0	52.28	282.0	66.58	285.7	67.59
10	152.5	30.94	187.4	40.54	190.5	41.41	188.2	40.78	234.0	53.37	238.2	54.51	224.0	50.62	280.7	66.20	285.8	67.61
11	149.1	30.00	186.4	40.27	190.5	41.41	183.8	39.55	232.7	53.02	238.2	54.51	218.5	49.09	279.1	65.77	285.8	67.62
12	145.9	29.14	185.3	39.98	190.5	41.41	179.6	38.41	231.3	52.63	238.1	54.51	213.4	47.69	277.3	65.29	285.8	67.60
13	143.0	28.34	184.2	39.67	190.5	41.39	175.8	37.36	229.8	52.22	238.1	54.48	208.6	46.38	275.5	64.78	285.6	67.57
14	140.3	27.59	183.0	39.34	190.4	41.36	172.3	36.38	228.3	51.79	237.9	54.44	204.2	45.18	273.5	64.24	285.5	67.53
15	137.8	26.90	181.8	39.00	190.2	41.32	169.0	35.48	226.6	51.34	237.7	54.39	200.1	44.05	271.5	63.68	285.2	67.46
16	135.5	26.26	180.5	38.65	190.0	41.27	165.9	34.63	225.0	50.88	237.5	54.32	196.3	43.01	269.4	63.12	284.9	67.38
17	133.3	25.66	179.2	38.29	189.8	41.21	163.0	33.84	223.3	50.42	237.2	54.24	192.8	42.03	267.3	62.54	284.6	67.28
18	131.2	25.09	177.9	37.94	189.6	41.14	160.3	33.10	221.6	49.95	236.9	54.15	189.4	41.11	265.2	61.96	284.1	67.16
19	129.3	24.56	176.6	37.58	189.3	41.06	157.8	32.40	219.9	49.48	236.5	54.04	186.3	40.25	263.1	61.38	283.7	67.03
20	127.5	24.06	175.3	37.23	188.9	40.97	155.4	31.75	218.2	49.01	236.0	53.93	183.4	39.43	261.0	60.80	283.1	66.88
21	125.8	23.59	174.0	36.87	188.6	40.87	153.2	31.13	216.5	48.55	235.6	53.80	180.6	38.67	258.9	60.23	282.6	66.72
22	124.1	23.15	172.8	36.52	188.2	40.77	151.0	30.54	214.8	48.09	235.1	53.66	177.9	37.94	256.9	59.66	281.9	66.55
23	122.6	22.72	171.5	36.18	187.8	40.66	149.0	29.99	213.2	47.64	234.5	53.51	175.4	37.26	254.8	59.10	281.3	66.37
24	121.2	22.32	170.3	35.84	187.4	40.54	147.1	29.46	211.6	47.19	234.0	53.35	173.1	36.61	252.8	58.55	280.6	66.17
25	119.8	21.94	169.1	35.50	186.9	40.41	145.3	28.96	210.0	46.75	233.4	53.19	170.8	35.99	250.8	58.00	279.8	65.97
26	118.4	21.58	167.9	35.17	186.4	40.28	143.6	28.49	208.4	46.32	232.7	53.02	168.7	35.40	248.9	57.46	279.0	65.76
27	117.2	21.23	166.7	34.85	185.9	40.15	141.9	28.04	206.8	45.89	232.1	52.84	166.6	34.84	247.0	56.94	278.2	65.54
28	116.0	20.91	165.5	34.53	185.4	40.01	140.3	27.60	205.3	45.48	231.4	52.66	164.7	34.30	245.1	56.42	277.4	65.31
29	114.8	20.59	164.4	34.22	184.9	39.87	138.8	27.19	203.8	45.07	230.8	52.47	162.8	33.79	243.3	55.91	276.6	65.08
30	113.8	20.29	163.3	33.91	184.4	39.72	137.4	26.79	202.4	44.66	230.1	52.28	161.0	33.30	241.4	55.41	275.7	64.84
E (GWh) ukupno=		847.92		1151.35		1227.97		1118.01		1516.02		1616.52		1388.11		1880.68		2005.06

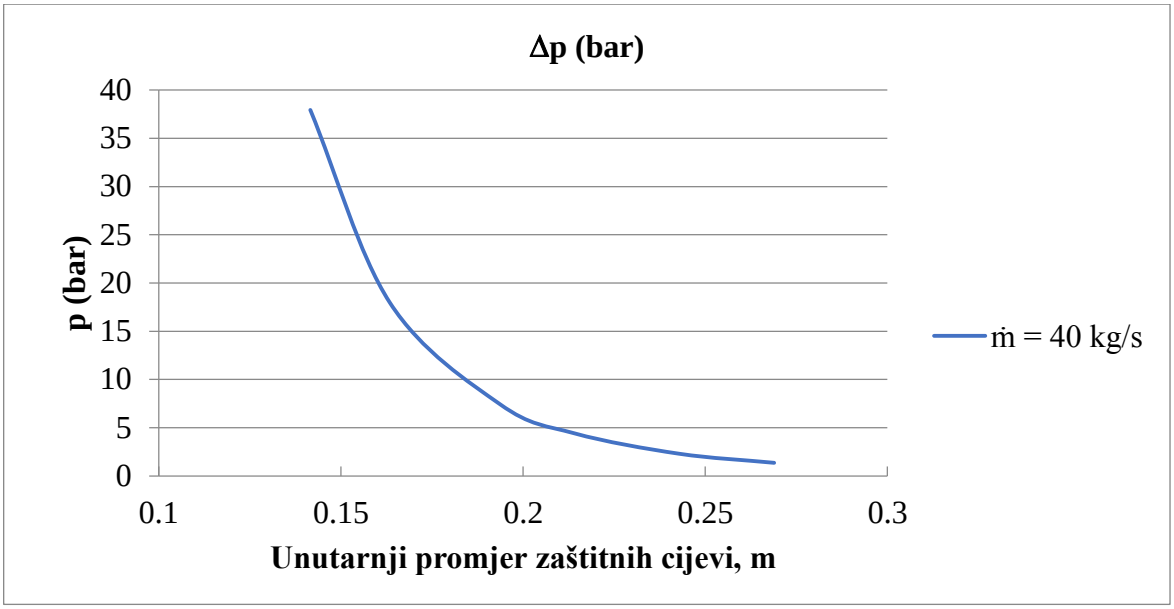
5.1.5 Pad tlaka u bušotinama i ležištu

Pad tlaka jedan je od ključnih parametara sustava EGS-a. Direktno nam utječe na dimenzioniranje pumpe koja je glavni element proizvodnje zagrijanog fluida. Pumpa svojim radnim karakteristikama mora utisnuti vodu određenog masenog protoka i pritom svladati sve otpore protjecanju kroz cjelokupni sistem. U modelu ponašanje tlaka u EGS-u odvojeno je u dva dijela. Prvi dio je pad tlaka u bušotinama koji se računa na način da utisnu i proizvodnu bušotinu razmatramo kao jednu bušotinu. Rezultati pada tlaka dobiveni su softverskim alatom SF Pressure Drop. Unutarnji promjer zaštitnih cijevi kroz koje protječe voda je 0.2142 metara, dok apsolutna hrapavost zaštitnih cijevi iznosi 0.15 milimetara.



Grafikon 5-1. Pad tlaka u utisnoj i proizvodnoj bušotini u ovisnosti o masenom protoku

Pad tlaka s obzirom na protok kroz zaštitne cijevi gotovo je linearan. No veći utjecaj na otpor protjecanju ovisi o promjeru zaštitnih cijevi. U EGS-u proizvodnja se odvija kroz zaštitne cijevi koje su značajno većih promjera nego je to slučaj kod proizvodnje ugljikovodika kroz tubing, pa prema tome manji je pad tlaka.



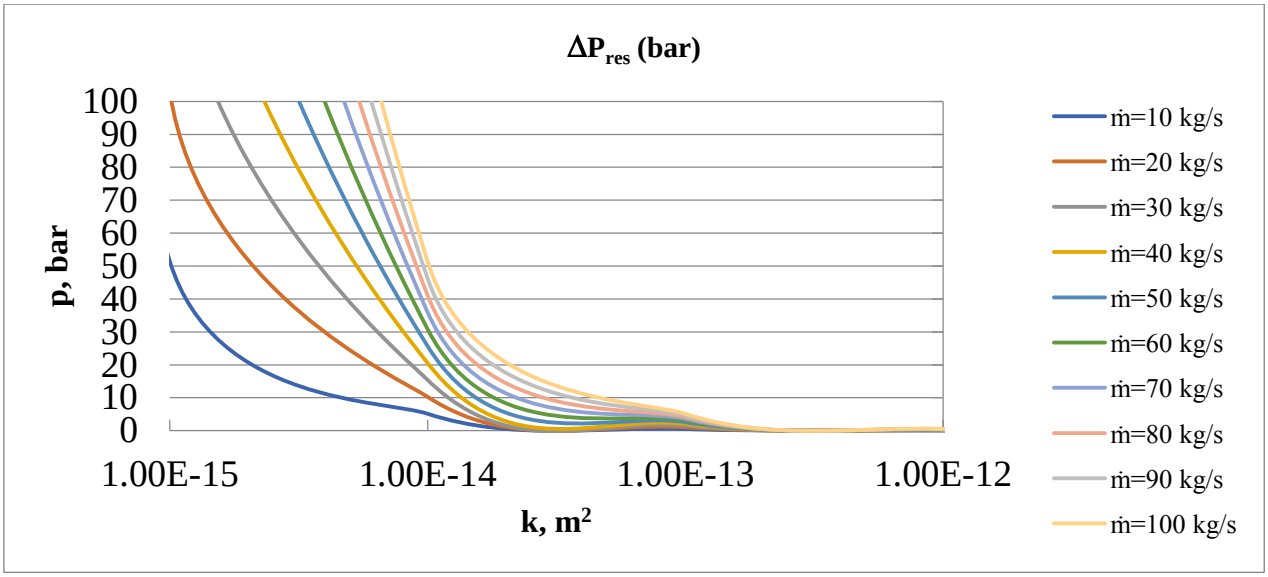
Grafikon 5-2. Pad tlaka u utisnoj i proizvodnoj bušotini u ovisnosti o promjeru zaštitnih cijevi

Drugi dio je pad tlaka u ležištu računat prema jednadžbi:

$$\Delta p_{res} = \frac{\dot{m}\mu D}{kh^2 \rho N}. \tag{5-16}$$

Odabrani su podaci jednog slučaja od 45 koji su razmatrani pri dobivanju toplinske energije. Ležište dubine 4000 metara sa 7 jednostrukih fraktura čija je duljina 500 metara i visina 150 metara. Dinamička viskoznost i gustoća fluida dobivene su iz prosječnih vrijednosti temperature i tlaka pri kretanju vode kroz sustav. Spomenuti parametri mogu se odrediti pri nekoj konstantnoj temperaturi i tlaku. No pri protjecanju temperatura i tlak koji utječu na svojstva vode mijenjaju se u svakom trenutku. Prema tome u svakom dijelu EGS-a dinamička viskoznost i gustoća vode su različiti i teško ih je odrediti.

Na pad tlaka u ležištu najviše utječe propusnost stijene. Kao što je vidljivo na grafikonu 5-3. kod povećanja protoka značajno je manje povećanje pada tlaka u odnosu na povećanje tlaka s promjenom propusnosti. Kao granična vrijednost može se uzeti 1 x 10^{-14} m^2 ili 10 mD. Do te vrijednosti pad tlaka je u granicama prihvatljivog no nakon toga se otpori protjecanju značajno povećavaju.



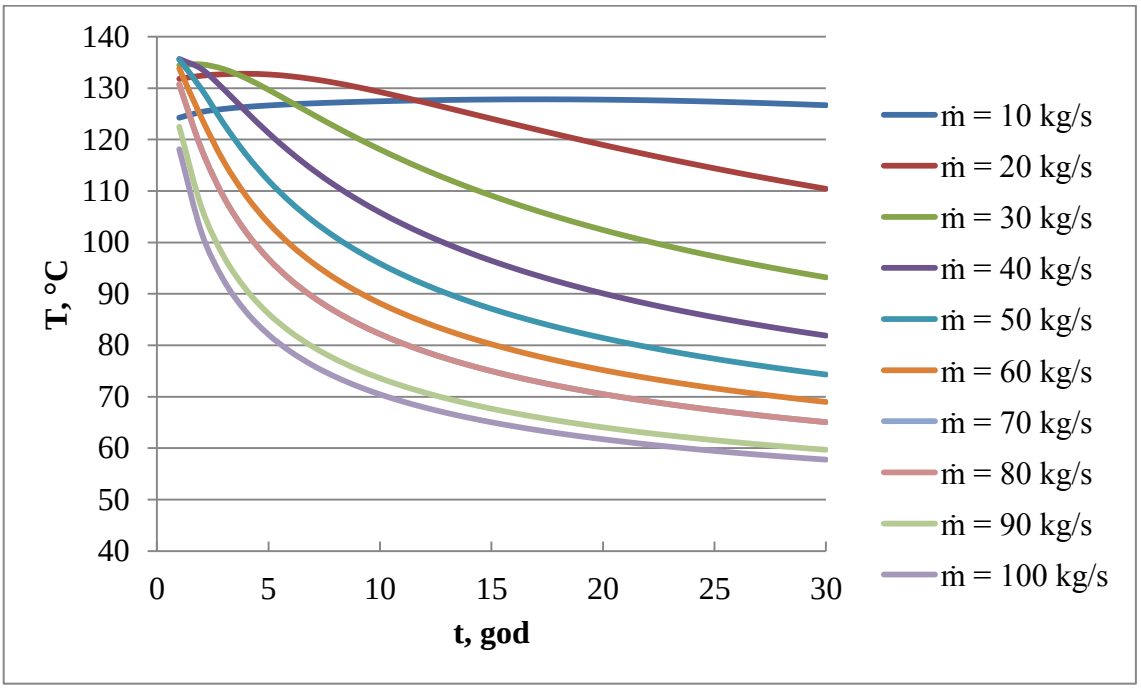
Grafikon 5-3. Pad tlaka u ležištu različitih protoka u ovisnosti o propusnosti

5.2. Bušotina 3500/0.04/300

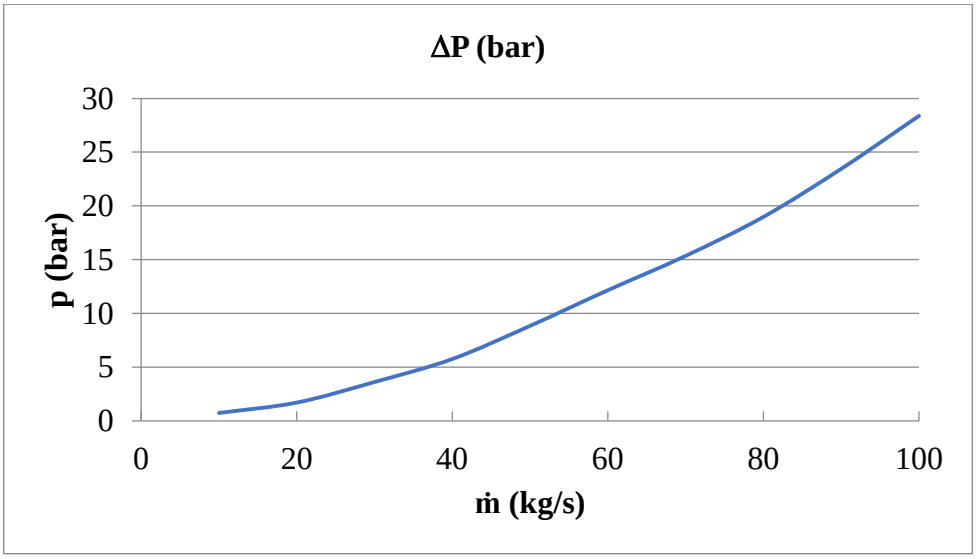
Tablica 5-8. Ulazni podaci EGS-a bušotine 3500/0.04/300

H - dubina ležišta (m)	3500
G_t - geotermalni gradijent (°C/m)	0.04
B - temperatura na površini (°C)	15
T_o - temperatura utisnutog fluida (°C)	40
D_{wb} - promjer kanala bušotine (m)	0.269875
D_{co} - vanjski promjer zaštitnih cijevi (m)	0.2445
D_{ci} - unutarnji promjer zaštitnih cijevi (m)	0.2142
λ_c - toplinska vodljivost cementa (W/m°C)	1.136
c_w - specifična toplina vode (J/kg°C)	4187
ρ_w - gustoća vode (kg/m3)	960
λ_r - prosječna vrijednost toplinske vodljivosti (W/m°C)	1.928
cρ - specifična obujamska toplina (J/m3°C)	2483468
T_{ro} - temperatura ležišta (°C)	140
L - duljina jednostruke frakture (m)	300
N - broj jednostrukih horizontalnih fraktura	7
h - visina jednostruke frakture (m)	150
λ_r - toplinska vodljivost ležišta (W/m°C)	2.371
c_r - specifična toplina ležišta (J/kg°C)	911.4
ρ_r - gustoća stijene (kg/m^3)	2676
k - propusnost (m^2)	1.00E-13

Modeliran je EGS za parametre koji su prikazani u tablici. Maseni protok je jedina vrijednost koja se mijenjala u rasponu od 10 do 100 kg/s. Dobiven je graf kretanja temperature u odnosu na protok. Pad tlaka je također napravljen prema vrijednostima iz tablice.



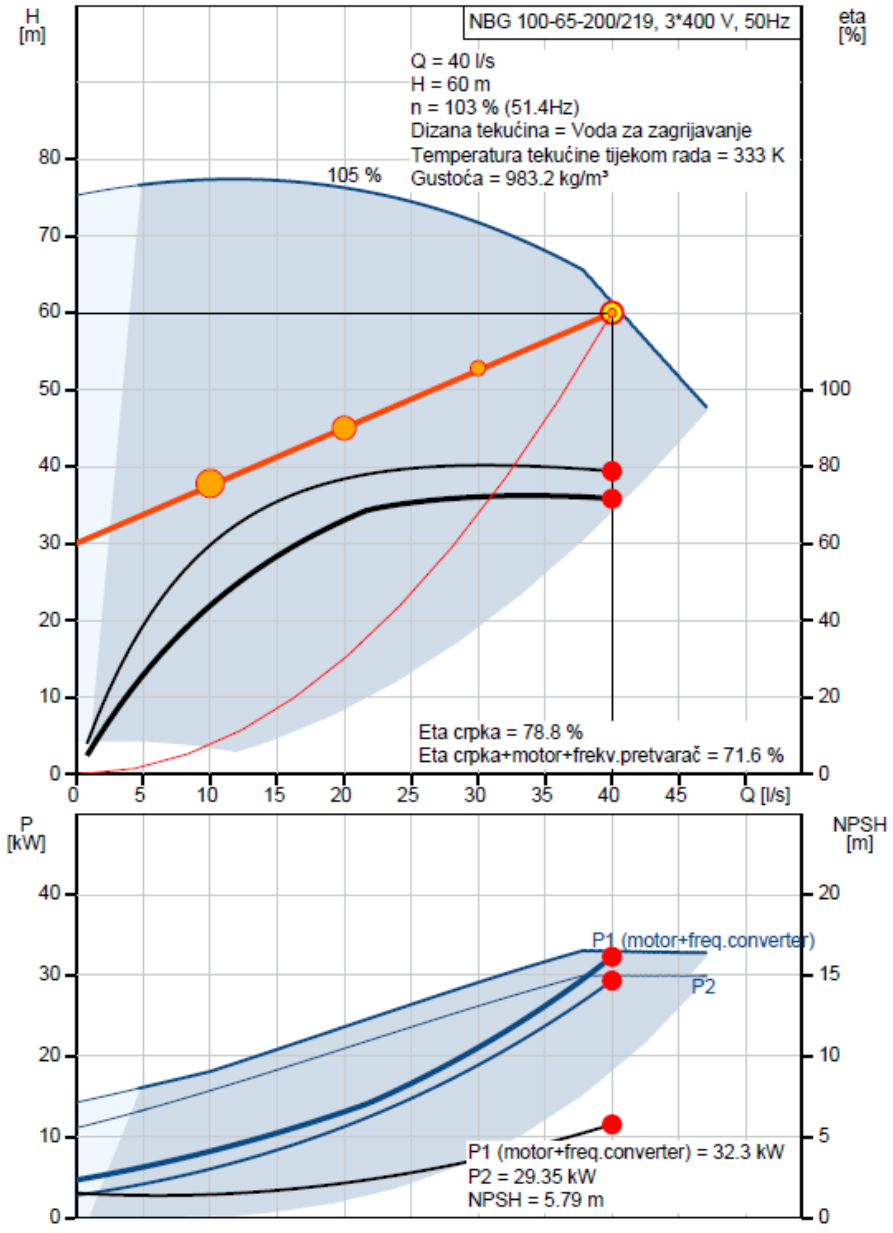
Grafikon 5-4. Kretanje temperature kroz 30 godina za različite protoke vode



Grafikon 5-5. Pad tlaka u odnosu na protok

Analizom i pregledom grafikona kretanja temperature i pada tlaka može se odrediti protok fluida najidealniji u odnosu na dobivenu toplinsku energiji prema kretanju temperature i padu tlaka s obzirom na dimenzioniranje pumpe. U ovom slučaju odabran je maseni protok

40 kg/s i za zadani protok dobiven je pad tlaka od 5.76 bara. Prema ovim parametrima dimenzionirana je pumpa koja bi omogućila rad postrojenja.



Slika 5-3. Visina dizanja pumpe H u ovisnosti o protoku Q i snaga pumpe P (Grundfos product center, 2016)

Plavo polje na slici označava moguće područje rada. Debela crvena linija je otpor cirkulacijskog kruga, crna linija prikazuje iskoristivost, dok plava linija opisuje karakteristike pumpe. Nazivna snaga pumpe je 30 kW. Uz β faktor koji iznosi 0.25 pumpa bi godišnje trošila 65700 kWh električne energije. Dok bi na primjer u 9. godini sustav EGS-a proizveo 25.054 GWh toplinkse energije iz koje se dobije 2.51 GWh elektične energije uz faktor učinkovitosti pretvorbe energije 10 %.

6. ZAKLJUČAK

EGS sustavi nisu jako zastupljeni zbog toga što su još uvijek u fazi razvoja. Glavni izazovi kod projektiranja su ekonomično bušenje i hidrauličko frakturiranje dubokih stijena velike čvrstoće i postizanje kontinuiranih visokih protoka fluida. Potrebni servisni radovi EGS-a vrlo su skupi, zahtjevaju bušenje dubokih bušotina da bi se upoće razmotrilo potencijalno ležište a kamoli realizirao projekt. Zbog toga su potrebna mnoga istraživanja i razvoj tehnologije efikasnijeg bušenja, poboljšanog modeliranja i tehnike upravljanja ležištem. Međutim rađeni su mnogi pilot projekti i utvrdilo se da je baza za iskorištavanje potencijala EGS ogromna. Resurs EGS-a postoji u svim područjima zemlje, no pitanje je dali se može na ekonomski prihvatljiv način proizvoditi geotermalna energija. Svako potencijalno ležište je specifično na svoj način i zahtjeva drugačiji pistup. U prednosti su područja gdje postoje visoke temperature na manjim dubinama. Svakako su prepreka široj primjeni EGS-a visoki kapitalni troškovi u startu. Ali iskorištavanje energije iz ovakvih sustava itekako može biti profitabilno. Sustav može proizvoditi toplinsku energiju u kontinuitetu 20, 30 godina. EGS se može smatrati zelenom energijom jer je emitiranje stakleničkih plinova skoro pa jednako nuli jer sustav je zatvorenog tipa.

U radu je napravljeno modeliranje za različite parametre i dobivena je toplinska energija. Ponašanje sustava prikazano je kroz 30 godina i rezultati su pokazali da za malo bolje uvjete u ležištu EGS-a u smislu više temerature i kvalitetnije hidrauličko povezivanje utisne i proizvodne bušotine stimuliranjem ležišta može se dobiti velika količina toplinske energije. Režimom rada postrojenja ovisino o zahtjevima potrošaća sustav može raditi pri različitim protocima pri čemu se dobiva različita količina toplinske energije ili može biti zatvoren.

Pošto se u zadnjih desetak godina hidrauličko frakturiranje jako primjenjuje i razvija u industriji nafte i plina, to paralelno utječe i na razvoj tehnike frakturiranja u EGS-u. Baza resursa EGS-a je ogromna pa se u budućnosti očekuje snažan napredak u razvoju ove tehnologije i povećanje projekata s obzirom da se dubine bušenja povećavaju i tehnike hidrauličkog frakturiranja usavršavaju.

7. LITERATURA

1. ARMSTEAD, H. C. H., TESTER, J. W. (1987). Heat Mining. New York: E. and F. N. Spon Ltd.
2. BLESH, C. J., KULACKI, F. A., CHRISTENSEN, R. N., (1983). Application of integral methods to prediction of heat transfer from a nuclear waste repository. Battelle Memorial Institute, Columbus, OH, str. 12-17.
3. CHAMORRO, C. R., GARCIA-CUESTA, J. L., MONDEJAR, M. E., LINARES, M. M., (2014). An estimation of the enhanced geothermal systems potential for the Iberian Peninsula. Renew Energy, 66(6), str. 1-14.
4. CHEN, J., LOU L., JIANG F., (2013). Thermal compensation of rocks encircling heat reservoir in heat extraction of enhanced geothermal system. Chin J. Comput Phys, 30(6), str. 862-870.
5. CHEN, N. H., (1979). An explicit equation for friction factor in pipe. Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals, 18(3), str. 296-297.
6. CUMMINGS, R.G., MORRIS, G. E., (1979). Economic modeling of electricity production from Hot Dry Rock geothermal reservoirs: methodology and analysis. EA-630, Research Project 1017 LASL (LA-7888-HDR). Palo Alto, California.
7. DMITRIEV, A. P., KUZYAEV, L. S., PROTASOV, Y., YAMSCHIKOV, V. S., (1969). Physical properties of rocks at high temperature. Moskva: Nedra.
8. DOBSON, P., (2013). Enhanced geothermal systems – DOE field demonstration projects, R & D innovations, and roadmapping efforts. Taiwan: Proceedings of APEC workshop on geothermal energy development.
9. DUCHANE, D., (1998). The history of HDR research and development. Strasbourg: Draft proceedings of the 4th international HDR forum.
10. ELSWORTH, D., (1990). A comparative evaluation of the parallel flow and spherical reservoir models of HDR geothermal systems. J. Volcanology and Geothermal Res., 44, str. 283-293.
11. EVANS, K. F., (2005). Permeability creation and damage due to massive fluid injections into granite at 3.5 km at Soultz: 2. Critical stress and fracture strength. Journal of Geophysical Research, 110(B4).
12. GRINGARTEN, A. C., 1975. Theory of Heat Extraction From Fractured Hot Dry Rock. J. Geophysical Research, 80, str. 1120-1124.

13. HASAN, A. R., KABIR, C. S., (2002). Fluid flow and heat transfer in wellbores. Richardson: Society of Petroleum Engineers.
14. HOFMANN, H., BABAFAGLI, T., YOON, J. S., BLOCHER, G., ZIMMERMANN, G., (2016). A hybrid discrete/finite element modeling study of complex hydraulic fracture development for enhanced geothermal systems (EGS) in granitic basements. Geothermics, 64, str. 362-381.
15. HOFMANN, H., WEIDES, S., BABADAGLI, T., ZIMMERMANN G., MOECK, I., MAJOROWICZ, J., (2014). Potential for enhanced geothermal systems in Alberta, Canada. Energy, Elsevier, 69, str. 578-591.
16. HOLLETT, D., (2013). Recnt advances in US geothermal R & D: implications for global development. Taiwan: Proceedings of APEC workshop on geothermal energy development.
17. HORNE, R., SHINOHARA, K., (1979). Wellbore heat loss in production and injection wells. Journal of Petroleum Technology, 31, str. 116-118.
18. HUANG, X., ZHU, J., LI J., (2015). Analysis of wellbore heat transfer in enhanced geothermal system using CFD modeling. Melbourne, Australia: Proceedings of world geothermal congress.
19. HUENGES, E., HOLL, H., BRUHN, D., BRAND, W., SAADAT, A., MOECK, I., (2007). Current state of the EGS project Groß Schönebeck – drilling into the deep sedimentary geothermal reservoir. Unterhaching, Germany: Proceedings European geothermal congress.
20. ICHIM, A., TEODORIU, C., (2016). Reflections on Overall Heat Transfer Coefficient with Application to Thermal Well Design. Banf, Alberta, Canada: SPE Thermal Well Integrity & Design Symposium.
21. JELIĆ, K., (1979). Termičke osobine sedimentacionog kompleksa jugozapadnog dijela Panonskog bazena. Rudarsko-geološkonaftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu
22. JIANG, F., LUO, L., CHEN, J., (2013). A novel three-dimensional transient model for subsurface heat exchange in enhanced geothermal systems. Int. Commun Heat Mass Transf., 41(2), str. 57-62.
23. KAIEDA, H., (2015). Multiple reservoir creation and evaluation in the Ogachi and Hijiori HDR projects, Japan. Melbourne, Australia: Proceedings world geothermal congress.
24. KARVOUNIS, D. C., JENNY, P., (2017). Adaptive hierarchical fracture model for enhanced geothermal systems. Multiscale Model Simul., 14(1), str. 207-231.

25. KARVOUNIS, D. C., WIMER, S., (2015). Decision making software for forecasting induced seismicity and thermal energy revenues in enhanced geothermal systems. Melbourne, Australia: Proceedings of world geothermal congress.
26. KUREVIJA, T., VULIN, D., MACENIĆ, M., (2014). Impact of geothermal gradient on ground source heat pump system modeling: Mining-Geological-Petroleum Engineering Bulletin, (28), str. 39-45.
27. LAW, R., (2011). Deep geothermal UK-United downs project, Redruth. UK: Proceedings of the ground source live workshop.
28. LI, M., LIOR, N., (2015) Energy analysis for guiding the design of well systems of deep enhanced geothermal systems. Energy, Elsevier, 93(P1), str. 1173-1188.
29. LI, T., SHIOZAWA, S., McCLURE, M., (2014). Thermal breakthrough calculations to optimize design of a multiple-stage Enhanced Geothermal System. Geothermal Resources Council Transactions 38.
30. LIMBERGER, J., CALCAGNO, P., MANZELLA, A., TRUMPY, E., BOXEM, T., PLUYMAEKERS, M. P. D., (2014). Assessing the prospective resource base for enhanced geothermal systems in Europe. Geotherm Energy Sci., 2, str. 55–71.
31. McCLURE, M. W., HORNE, R. N., (2014). An investigation of stimulation mechanisms in enhanced geothermal systems. Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 72, str. 242-260.
32. MILLER, S. A., (2015). Modeling enhanced geothermal systems and the essential nature of large-scale changes in permeability at the onset of slip. Geofluids, 15, str. 338-349.
33. MIT - Led Report, (2006). The future of geothermal energy: impact of enhanced geothermal system (EGS) on the United States in 21st Century. MIT-led interdisciplinary panel.
34. MUDUNURU, M. K., KELKAR, S., KARRA, S., HARP, D. R., GUTHRIE, G. D., VISWANATHAN, H. S., (2016). Reduced-order models to predict thermal output for enhanced geothermal systems. Stanford, California: Proceedings of the 41st workshop on geothermal reservoir engineering Stanford University.
35. PETTY, S., (2013). Newberry EGS demonstration. U.S. Department of Energy Geothermal Technologies Office 2013 Peer Review. Colorado.
36. POTTER, R., ROBINSON, E., SMITH, M., (1974). Method of extracting heat from dry geothermal reservoirs. Los Alamos, New Mexico: US Patent No. 3,786,858, USA.

37. RAMEY, Jr. H., (1962). Wellbore heat transmission. Journal of Petroleum Technology, 14, str. 427-435.
38. READ, M., SMITH, I., STOŠIĆ N., (2016). Fundamental investigation of whole-life power plant performance for enhanced geothermal systems. Proceedings of the 23rd international compressor engineering conference at Purdue.
39. SAFARI, R., GHASSEMI, A., (2015). 3D thermo-poroelastic analysis of fracture network deformation and induced micro-seismicity in enhanced geothermal systems. Geothermics, 11, str. 1-14.
40. SANYAL, S. K., BUTLER, S. J., (2005). An Analysis of Power Generation Prospects From Enhanced Geothermal Systems. Geothermal Resources Council Transactions, 29.
41. SCHELLSCHMIDT, R., SANNER, B., PESTER, S., SCHULZ, R., (2010). Geothermal energy use in Germany. Bali, Indonesia: Proceedings of the 2010 world geothermal congress.
42. SHIOZAWA, S., McCLURE, M., (2014). EGS designs with horizontal wells, multiple stages, and proppant. Stanford, Califorina: Paper presented at the Thirty-Ninth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering.
43. SKOCZYLAS, P., (2012). A Review of Methods for Calculating Heat Transfer from a Wellbore to the Surrounding Ground. Aberdeen, Scotland: World Heavy Oil Congress.
44. SNYDER, K., ZEMACH, E., (2013). Bradys EGS project. U.S. Department of Energy Geothermal Technologies Office 2013 Peer Review. Colorado.
45. SOMERTON, W. H., (1992). Thermal properties and temperature related behavior of rock/fluid systems. Amsterdam: Elsevier.
46. TESTER, J. W., (2006). The Future of Geothermal Energy: Impact of Enhanced Geothermal Systems (EGS) on the United States in the 21st Century. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology.
47. TURCOTTE, D. L., SCHUBERT, G., (2002). Geodynamics. 2. izd. Cambridge: Cambridge University Press.
48. VAN OVERSTEEG, K., LIPSEY L., PLUYMAEKERS, M., VAN WEES, J. D., FOKKER, P. A., SPIERS, C., (2014). Fracture permeability assessment in deeply buried carbonates and implications for enhanced geothermal systems: inferences from a detailed well study at Luttelgeest-01, The Netherlands. Stanford, California: Stanford University: Proceedings of the thirty-eighth workshop on geothermal reservoir engineering.

49. WALLROTH, T., ELIASSON, T., SUNDQUIST, U., (1999). Hot dry rock research experiments at Fjällbacka, Sweden. Geothermics, 28, str. 617-625.
50. WALTERS, M., (2013). Demonstration of an enhanced geothermal system at the northwest geysers geothermal field. U.S. Department of Energy Geothermal Technologies Office 2013 Peer Review. Colorado.
51. WANG, Y., ZHANG, K., (2011). Modeling approaches for fractures in enhanced geothermal system (EGS). Shanghai: Land Resour.
52. WILLIAMS, C. F., REED, M. J., ANDERSON, A. F., (2011). Updating the classification of geothermal resources. Stanford University, Stanford: Proceedings of the thirty-sixth workshop on geothermal reservoir engineering..
53. WYSS, R., RYBACH, L., (2010). Developing deep geothermal resources in Switzerland. Bali, Indonesia: Proceedings of the 2010 world geothermal congress.
54. ZHANG, Y. J., LI, Z. W., GUO, L. L., GAO, P., JIN, X. P., XU, T. F., (2014). Electricity generation from enhanced geothermal systems by oilfield produced water circulating through reservoir stimulated by staged fracturing technology for horizontal wells: a case study in Xujiaweizi area in Daqing Oilfield, China. Energy, Elsevier, 78, str. 788-805.
55. ZIMMERMANN, G., HOFMANN, H., BABADAGLI, T., YOON, J. S., ZANG, A., DEON, F., (2015). Multifracturing and cyclic hydraulic stimulation scenarios to develop enhanced geothermal systems – feasibility and mitigation strategies to reduce seismic risk. Melbourne, Australia: Proceedings of world geothermal congress 2015.

Internetski izvori:

56. GRUNDFOS PRODUCT CENTER. 2016.
URL: https://product-selection.grundfos.com/front-page.html?qcid=421872037
(02. 09. 2018.)
57. WIKIPEDIA. 2017.
URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Enhanced_geothermal_system
(06.07.2018.)

IZJAVA

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno na temelju znanja stečenih na Rudarsko-geološko-naftnom fakultetu služeći se navedenom literaturom.

_____

Karlo Marciuš