

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
RUDARSKO-GEOLOŠKO-NAFTNI FAKULTET
ZAVOD ZA NAFTNO INŽENJERSTVO

Kristina Strpić

RAZVOJ NOVE METODE IZVOĐENJA I INTERPRETACIJE TESTA TOPLINSKOG ODAZIVA TLA
PRIMJENOM MODELA HIDRODINAMIČKIH ISPITIVANJA U NAFTNOM INŽENJERSTVU

Zagreb 2017.

Ovaj rad je napisan na Zavodu za naftno inženjerstvo na Rudarsko-Geološko-Naftnom fakultetu i u Laboratoriju za rutinske i specijalne analize ležišnih stijena, pod vodstvom izv.prof. dr. sc. Tomislav Kurevija i predan je na natječaj za dodjelu Rektorove nagrade u akademskoj godini 2016./2017.

Popis korištenih oznaka:

$p(r, t)$ – tlak u funkciji radijusa i vremena (Pa)

∇p - gradijent tlaka (Pa/m)

p_i - početni tlak u ležištu (Pa)

p_D - bezdimenzionalna vrijednost tlaka

r_e - drenežni radijus u hidrodinamici (m), radijus toplinskog utjecaja u termogeologiji (m)

r_w - radijus bušotine (m)

t - vrijeme (h)

q - protok (m^3/h) u hidrodinamici

q' - narinuta toplinska snaga po metru bušotine (W/m) u termogeologiji

k - propusnost sloja (m^2)

κ - nagib

μ - viskoznost fluida (Pa s)

ϕ - poroznost (m^2)

c_z - ukupna stlačivost formacije (Pa^{-1})

s - skin faktor

$T(r, t)$ - temperatura u funkciji radijusa i vremena ($^{\circ}C$)

T_f - temperatura fluida ($^{\circ}C$)

T_D - bezdimenzionalna vrijednost temperature

∇T - gradijent temperature ($^{\circ}C/m$)

ΔT_{skin} - pad temperature uzrokovan skin efektom ($^{\circ}C$)

∂ - oznaka za parcijalnu derivaciju

T_0 - statična temperatura sloja ($^{\circ}C$)

λ - toplinska vodljivost ($W/m^{\circ}C$)

ρ - gustoća tvari (kg/m^3)

c_p - specifična toplina ($kgm^2/^{\circ}Cs^2$)

α - toplinska provodljivost (m^2/h)

Ei - eksponencionalni integral

u - integralni parametar

γ - Eulerova konstanta (0,5772)

R_b - toplinski otpor ($^{\circ}Cm/W$)

R_{bavrg} - prosječna vrijednost toplinskog otpora ($^{\circ}Cm/W$)

Popis korištenih kratica:

EST – *engl. entering source temperature* – izlazna temperatura iz izmjenjivača

LST – *engl. leaving source temperature* – ulazna temperatura u izmjenjivač

HDPE – *engl. high density poli-etilen* – polietilen velike gustoće

USS – *engl. unsteady state* – prijelazno stanje

SSS – *engl. semi-steady state* – poluustaljeno stanje

RGN – Rudarsko-Geološko-Naftni fakultet

TRT – *engl. Thermal Response Test* - Test toplinskog odaziva

Sadržaj

1. Uvod.....	1
2. Hipoteza i Opći ciljevi rada	4
3. Metode i plan rada	6
3.1. Jednadžba difuzije i primjena u naftnom inženjerstvu i primijenjenoj termogeologiji	6
3.2. Rješenje jednadžbe difuzije za slučaj radijalnog širenja tlaka/topline u homogenom neograničenom mediju	8
3.3. Metoda protočnog testa – ekvivalent testa toplinskog odaziva tla (TRT).....	11
3.4. Metoda testa porasta tlaka - Test toplinskog oporavka bušotinskog izmjenjivača....	17
3.5. Step testovi s promjenjivim protočnim/toplinskim uvjetima i načelo superpozicije.	22
3.6. Test s višestrukim toplinskim uvjetima	26
3.7. Izokronalni test	27
3.8. Modificirani izokronalni test	30
4. Rezultati istraživanja.....	31
4.1. Test odaziva topline (protočni test)	32
4.1.1. Određivanje vremena početka poluustaljenog stanja	33
4.1.2. Toplinski otpori.....	37
4.2. Rezultati testa oporavka temperature (analogno testu porasta tlaka)	39
4.2.1. Rezultati primijenjene Hornerove metode	40
4.3. Test s višestrukim toplinskim uvjetima (step test)	44
4.4. Izokronalni test	46
4.5. Modificirani izokronalni test	48
5. Zaključna razmatranja rezultata i diskusija.....	51
Reference.....	54
Popis tablica	55
Popis slika	56
Sažetak	57
Summary	58

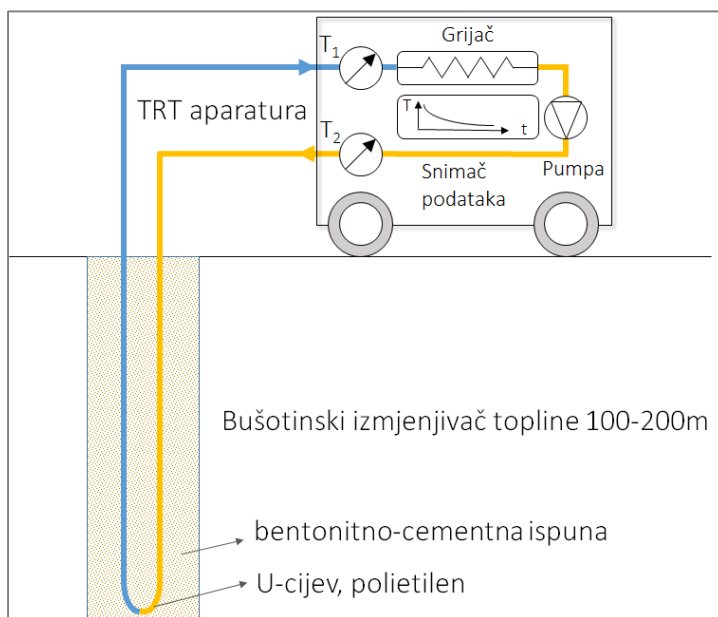
1. Uvod

Jedan od najučinkovitijih sustava grijanja i hlađenja u sektoru zgradarstva je korištenje plitke geotermalne energije pomoću bušotinskih izmjenjivača topline. Vrijednosti geotermalnog gradijenta i toplinskog toka za područje sjeverne Hrvatske više su od europskog prosjeka što je osnovni preduvjet i pokazatelj potencijala plitkih geotermalnih resursa. Ono što takve izvore energije poželjnim je konstantna temperatura tla tokom cijele godine na koju ne utječu atmosferski čimbenici. U pravilu se bušotinski izmjenjivači ugrađuju do dubina od 100 – 200 m, ovisno o potrebama sustava za koji se dimenzionira. Pri istaknutim dubinama temperatura horizonata je uobičajeno između 15 i 20°C, te je u termotehnički sustav potrebno ugraditi i dizalicu topline koja će dolaznu temperaturu fluida iz bušotina podignuti na potrebnih 35 - 60°C, ovisno o tipu grijanja koji se koristi. Obzirom da dizalica topline za pogon kompresora koristi električnu energiju, što je niža temperaturna razlika između okoliša i temperature distribucije potrošača veća je učinkovitost sustava koja se izražava skraćenicom COP (*engl. coefficient of performance* ili toplinski množitelj). U pravilu dobro projektirani sustavi korištenja plitke geotermalne energije imaju srednji godišnji COP veći od 4, odnosno za uloženi jedan 1 kWh električne energije sustav isporučuje 4 kWh toplinske energije potrošaču.

Korištenje toplinske energije tla ostvaruje se zatvorenom cirkulacijom smjese vode i propilenglikola između sustava cijevi bušotinskog izmjenjivača topline i isparivača/kondenzatora dizalice topline. U bušotine se u pravilu ugrađuju izmjenjivači od polietilenskih cijevi u različitim konfiguracijama; oblik jednostruke U-cijevi, dvostruke U-cijevi ili koaksijalni sustav cijev u cijevi. Promjeri bušotina u koje se polietilenske cijevi instaliraju kreću se obično između 110 do 150mm, a volumen između stjenki bušotine i cijevi uobičajeno se ispunjava cementno-bentonitnom kašom kako bi se osigurala adekvatna izmjena topline.

Modeliranje geotermalnog sustava bušotinskih izmjenjivača topline funkcionalno je zavisno o mnogobrojnim termogeološkim, tehničkim i klimatskim parametrima. Uslijed eksponencijalnog rasta broja instaliranih sustava tijekom zadnjeg desetljeća, razvijen je niz programskih paketa namijenjenih projektiranju bušotinskog polja, a većina je bazirana na principu modela provođenja topline ili kondukcije u homogenom neograničenom mediju. Stoga, što preciznije određivanje koeficijenta toplinske vodljivosti stijena i početne statičke temperature duž bušotine predstavlja osnovni preduvjet učinkovito projektiranog sustava za dugogodišnju sezonsku izmjenu topline.

Često se navedene vrijednosti pretpostavljaju metodom analogije ili se koriste kataloške vrijednosti toplinske vodljivosti i provodljivosti tla, što lako može dovesti do značajnijeg podimensioniranja ili predimensioniranja sustava. Puno su preciznije metode mjerenja svojstava tla in-situ, odnosno na prvoj izrađenoj bušotini u polju, i to nakon određenog perioda temperaturne stabilizacije. Karakterističan propisani postupak ispitivanja toplinske vodljivosti sastoji se u promatranju promjene temperature radnog fluida pri protjecanju unutar bušotinskog izmjenjivača topline uslijed narinute toplinske snage, a metoda se naziva test toplinskog odaziva tla. U literaturi se često koristi kratica s engleskog naziva *Thermal Response Test*, odnosno TRT. Aparatura za izvođenje navedenog testa sastoji se od kompleta električnih grijača koji služe za konstantan narinuti toplinski puls tijekom perioda mjerenja, cirkulacijske pumpe, mjerača protoka, temperaturnih senzora i podatkovnog snimača (slika 1.1).



Slika 1.1. Osnovni elementi testa toplinskog odaziva tla (TRT) na bušotinskim izmjenjivačima topline (vlastita grafika)

Osnovna interpretacija TR testa odvija se na promatranju odaziva temperature u funkciji vremena i konstantno narinute toplinske snage, a što je analogno ispitivanju naftnih i geotermalnih bušotina s aspekta protočnih testova tijekom hidrodinamičkih ispitivanja. Analogija slijedi iz sličnosti Darcyevog i Fourierovog zakona kojima se preko istog principa, diferencijalnom jednadžbom difuzije, opisuje protok nestlačivog fluida u poroznom mediju, odnosno provođenje topline kroz konduktivni medij. Sam postupak izvođenja testa toplinskog

odaziva bušotinskih izmjenjivača topline propisan je smjernicama udruge IGSHPA (*International Ground Source Heat Pump Association*), a podrazumijeva minimalno 48 sati mjerenja. Proučavanjem stručne literature i znanstvenih radova iz ovog polja uočeno je da se pri većini ispitivanja koristi električna javna mreža kao izvor napajanja električnih grijača te da vremena ispitivanja najčešće variraju između 36 i 96 sati. Korištenje javne mreže električne energije gotovo uvijek uzrokuje varijabilno ponašanje napona tijekom perioda povećanog ili smanjenog opterećenja mreže, odnosno tijekom perioda dan i noć ili radnog i neradnog dijela tjedna. U navedenim smjernicama dopušta se fluktuacija toplinske snage tijekom cijelog postupka mjerenja od 5% maksimalne i minimalne amplitude od srednje vrijednosti. Analogno ovom postupku, identičan slučaj odgovarao bi fluktuaciji protoka na naftnoj bušotini tijekom vremena izvođenja protočnog testa za određivanje veličine propusnosti poroznog medija. Ovakvom interpretacijom nesumnjivo nastaje pogreška u interpretaciji.

Što točnije određivanje koeficijenata toplinske vodljivosti u termogeologiji i propusnosti u naftnom inženjerstvu osnovni je zadatak testa toplinskog odaziva tla i hidrodinamičkih mjerenja. Stoga, za razliku od termogeologije i testa toplinskog odaziva tla, u naftnom inženjerstvu češće se izvodi test porasta tlaka za određivanje veličine propusnosti nego protočni test. Test porasta tlaka u naftnom inženjerstvu podrazumijeva da testna bušotina proizvodi fluid određeno vrijeme konstantnim protokom dok se ne stabilizira tlak na dnu bušotine, a zatim se bušotina zatvara te se promatra brzina oporavka tlaka na statičku vrijednost. Na ovaj način pouzdanije se određuje parametar propusnosti poroznog medija ležišta obzirom da se anulira utjecaj varijabilnog faktora proizvodnje i duga vremena čekanja na početak testa obzirom da početni uvjeti zahtijevaju potpunu stabilizaciju tlaka. Također, u naftnom inženjerstvu proizvodi se i niz step testova na plinskim bušotinama s različitim koracima u proizvodnji, a kako bi se ustanovio funkcionalni odnos depresije na dnu bušotine i proizvodnih mogućnosti bušotine pri ustaljenom stanju.

Obzirom na desetljeća iskustva u primjeni ovih metoda u naftnom inženjerstvu kao dokazano učinkovitih za procjenu ležišnih i bušotinskih parametara, prvenstveno propusnosti i oštećenja pribušotinske zone, nastao je osnovni motiv za izradu ovog rada u suradnji s mentorom. Na RGN fakultetu postoje dva nabušena i opremljena koaksijalna izmjenjivača topline ukupne duljine 100 m za potrebe znanstvenih istraživanja i edukativne svrhe u kolegiju *Primijenjena termogeologija*. Ideja o implementaciji metoda iz hidrodinamičkih mjerenja naftnih bušotina i

primjeni novih načina interpretacije na geotermalni sektor realizirana je dugotrajnim testovima toplinskog odaziva tijekom zimskog semestra akademske godine 2016/2017.

Proširenjem postojeće metode testa toplinskog odaziva tla korištenjem teorije hidrodinamičkih mjerenja u naftnom inženjerstvu, postiže se inovativni pristup u smislu razvoja potpuno nove TRT metode i u konačnici preciznijeg određivanja koeficijenta toplinske vodljivosti. Kompletni proračuni priloženi su ovom radu putem linka:

http://rudar.rgn.hr/~tkurevi/Strpic_rektorova_prilog.xlsm

2. Hipoteza i Opći ciljevi rada

Temeljem iznesenih uvodnih razmatranja i osnovne ideje rada u poglavlju Uvod, moguće je postaviti osnovne elemente predloženog znanstvenog rada; hipotezu i opće ciljeve rada.

Hipoteza:

Teorija radijalnog protjecanja fluida u homogenom poroznom mediju opisana Darcyevim zakonom, analogna je teoriji Fourierovog zakona provođenja toplinske energije u homogenom konduktivnom mediju, obzirom da obje teorije imaju ishodište u diferencijalnoj jednačbi difuzije. Stoga, moguće je aplikabilno povezati teoriju interpretacije hidrodinamičkih mjerenja u naftnom inženjerstvu s testom toplinskog odaziva tla u primijenjenoj termogeologiji. Implementacijom naftno inženjerskih metoda u postupak testiranja bušotinskih izmjenjivača topline razvija se inovativna metoda za preciznije određivanje koeficijenta topline vodljivosti tla i determinaciju egzaktnog prinosa bušotinskog izmjenjivača topline pri ustaljenim uvjetima provođenja toplinske energije u funkciji izlazne temperature fluida.

Opći ciljevi rada:

1. Kvantificirati grešku mjerenja koeficijenta toplinske vodljivosti klasičnim testom toplinskog odaziva (protočni test) analiziranjem različitih 12-satnih vremenskih perioda uz varijabilni izvor toplinske energije.
2. Primijeniti metodu testa porasta tlaka iz hidrodinamičkih mjerenja na test toplinskog odaziva tla za četiri različita toplinska uvjeta. Pokazati mjeru ujednačenosti rezultata određivanja koeficijenta toplinske vodljivosti testom toplinskog oporavka (test porasta tlaka) u odnosu na klasični test toplinskog odaziva (protočni test) koji je pod utjecajem varijabilnog toplinskog izvora.

3. Primijeniti tri metode step i izokronalnih testova iz naftnog inženjerstva radi određivanja prinosa bušotinskog izmjenjivača topline pri ustaljenom toplinskom toku; test višestrukih toplinskih uvjeta (step test); izokronalni test i modificirani izokronalni test. Dobivene rezultate prikazati jednadžbom prinosa bušotinskog izmjenjivača topline u funkciji izlazne temperature fluida.
4. Usporediti rezultate devijacije prinosa bušotinskih izmjenjivača pomoću intervalno kraćih i praktičnijih izokronalnih testova u odnosu na dugotrajni step test kao dokazano najpouzdaniji test.

3. Metode i plan rada

U ovom poglavlju bit će prikazane teorijske podloge i interpretacija različitih metoda hidrodinamičkih mjerenja u naftnom inženjerstvu, a za koje se hipotezom pretpostavlja da su primjenjive na testiranje bušotinskih izmjenjivača topline. Analizirat će se teorija interpretacije protočnog testa, testa porasta tlaka i testova s višestrukim protočnim uvjetima, a primjenom na testiranje bušotinskog izmjenjivača topline razvit će se inovativna i poboljšana metoda za procjenu koeficijenta toplinske vodljivosti te determinaciju toplinskog prinosa.

3.1. Jednadžba difuzije i primjena u naftnom inženjerstvu i primijenjenoj termogeologiji

Usljed sličnosti Darcyevog i Fourierovog zakona ista diferencijalna jednadžba difuzije opisuje neustaljeno protjecanje nekompresibilnog fluida u poroznom mediju i provođenje toplinske energije u stijeni (Narasimhan, T.N.,1999). Stoga, moguće je napraviti poveznicu između karakterističnih veličina u naftnom inženjerstvu i hidrogeologiji kao što su volumetrijski protok, gradijent tlaka, mobilnost fluida, hidraulički difuzivitet, i karakterističnih veličina u termogeologiji kao što su toplinski tok, temperaturni gradijent, toplinska vodljivost i toplinski difuzivitet. Prema (Kutasov et.al.,2016.) pregled komplementarnih veličina iz područja hidrodinamičkih mjerenja u naftnom inženjerstvu i razradi plitke geotermalne energije može se sumarno prikazati tablicom 3.1. Također, tehnike i postupci interpretacije hidrodinamičkih mjerenja mogu se uspješno primijeniti i na testiranja prinosa bušotinskih izmjenjivača topline.

Tablica 3.1. Pregled komplementarnih veličina u hidrodinamici i termogeologiji

Ustaljeni protok fluida u poroznom mediju	Provođenje topline
Tlak: p	Temperatura: T
Gradijent tlaka: ∇p	Gradijent temperature: ∇T
Početni ležišni tlak: p_i	Statička temperatura formacije: T_s
Protok fluida (Darcyjev zakon) $q = -k / \mu \nabla p_i$	Širenje topline (Fourierov zakon) $q = -\lambda \nabla T$
Odnos propusnosti i viskoznosti: k / μ	Toplinska vodljivost: λ
Produkt poroznosti i ukupne stlačivosti formacije: ϕc_z	Produkt gustoće i specifične topline formacije: ρc_p
Hidraulička provodljivost (difuzivnost): $\eta = k / \mu \phi c_z$	Toplinska provodljivost (difuzivnost): $\alpha = \lambda / \rho c_p$
Radius bušotine: r_w	Radius bušotine: r_w
Drenažni radius: r_e	Radius toplinskog utjecaja: r_e

Kod jednofaznog protoka tekuće faze koriste se jednadžbe koje uzimaju u obzir protok fluida male i konstantne stlačivosti pri izotermalnim uvjetima. U slučaju male stlačivosti , konstantne i izotropne propusnosti i konstantne poroznosti, za linearni protok vrijedi jednadžba (Matthews et.al., 1967):

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} = \frac{\phi \mu c}{k} \frac{\partial p}{\partial t} \quad (3.1.1.)$$

i primjenjiva je na većinu fluida.

Za radijalni protok vrijedi

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial p}{\partial r} \right) + \frac{1}{k_r} \frac{\partial k_r}{\partial r} \frac{\partial p}{\partial r} + c \left(\frac{\partial p}{\partial r} \right)^2 = \frac{\phi \mu c}{k_r} \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\mu}{k_r} \frac{\partial \phi}{\partial t} \quad (3.1.2.)$$

Za iste naveden uvjete male i konstantne stlačivosti te konstantne poroznosti i propusnosti uz pretpostavku da je kvadrat promjene tlaka po radiusu zanemarivo malen $\left(\frac{\partial^2 p}{\partial r^2} \right)$,gornja

jednadžba se može izraziti kao

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial p}{\partial r} \right) = \frac{\partial^2 p}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial r} = \frac{\phi \mu c}{k} \frac{\partial p}{\partial t} \quad (3.1.3.)$$

Ovo je jedna od najčešće korištenih jednadžbi u naftnom inženjerstvu. Prethodne dvije jednadžbe nazivaju se još i jednadžbe difuzivnosti, a konstanta $\frac{\phi \mu c}{k}$ naziva se hidraulička difuzivnost, η .

Kod opisivanja širenja i ponašanja topline, oblik jednadžbe je

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{c_p \rho} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} \right) \quad (3.1.4.)$$
$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} \right)$$

Vrijednost konstante $\frac{\lambda}{c_p \rho}$ naziva se toplinskom difuzivnosti ili provodljivosti i označava oznakom α (Carslaw et.al.1946).

3.2. Rješenje jednadžbe difuzije za slučaj radijalnog širenja tlaka/topline u homogenom neograničenom mediju

Jednadžbe 3.1.1.i 3.1.2 su linearne i mogu biti analitički riješene za granične uvjete. Zbog svoje primjenjivosti i jednostavnosti u širokoj su primjeni u tehnikama analiziranja ponašanja tlaka. Jednadžba 3.1.2. ima tri moguća rješenja koja za početak zahtijevaju postavljanje određenih pretpostavki.

Pretpostavlja se da se radi o jednolikoj debljini medija i radijalni protok se proteže kroz cijelu debljinu formacije. Porozni medij je homogen i izotropan i poroznosti, a propusnost su konstantne i neovisne o promjenama tlaka. Promatrani fluid je male i konstantne stlačivosti te konstantne viskoznosti, gradijenti tlaka su zanemarivo mali kao i utjecaj gravitacijskih sila. Da bi dobivena rješenja bila konačno primjenjiva u analizi ponašanja tlaka, treba promatrati slučaj protoka u bušotinu uz konstantnu proizvodnju, q . Iz toga proizlaze tri slučaja (Matthews et.al., 1967):

- a) neograničeno ležište
- b) ograničeno cilindrično ležište
- c) ležište s konstantnim tlakom na vanjskoj granici.

Slučaj neograničenog ležišta opisuje ležište kod kojeg se ne osjećaju vanjske granice za vrijeme provođenja testa, sam efekt vanjskih granica obično se pojavljuje nakon nekoliko dana. S obzirom da su periodi provođenja testa relativno kratki, vanjske granice u pravilu ne utječu na rezultate. Iz tog razloga ovaj model ležišta je najprimjenjiviji i za opisivanje provođenja naprednih testova odaziva topline (TRT) na geotermalnim bušotinama. Za potrebe izvođenja

TRT i obrade podataka dobivenih mjerenjem, toplinski tok prema ili iz bušotine se opisuje kao neograničeno dug izvor ili mjesto gubitka topline iz tla sa zanemarivim utjecajem protoka topline uzduž stjenke kanala (Zeng et.al., 2002). U praksi se za područje izvan same bušotine pretpostavlja proces širenja topline ovisi samo o radijalnoj udaljenosti od stjenki kanala bušotine. Proces prijenosa toplinskog toka sa cirkulirajućeg fluida na stjenke bušotine može se opisati bušotinskim otporom koji predstavlja gubitak topline.

Stoga, za slučaj neograničenog ležišta u hidrodinamici:

$P \rightarrow p_i$ dok $r \rightarrow \infty$, za:

$$\left. \frac{\partial p}{\partial r} \right|_{r_w} = \frac{q\mu}{2\pi kh} \frac{1}{r_w} \quad (3.2.1.)$$

Uvjeti pri kojima će doći do konstantnog dotoka (proizvodnje) mogu se izraziti Darcyevim zakonom

$$q = \frac{2\pi kh}{\mu} \left(r \frac{\partial p}{\partial r} \right)_{r_w} \quad (3.2.2.)$$

iz toga, gradijent tlaka u bušotini iznosi:

$$\left(\frac{\partial p}{\partial r} \right)_{r_w} = \frac{q\mu}{2\pi kh} \frac{1}{r_w}$$

S obzirom da nema protoka na vanjskoj granici, kad je $r = r_e$, brzina fluida je nula iz čega slijedi da je i gradijent tlaka nula.

$$\left(\frac{\partial p}{\partial r} \right)_{r_e} = 0$$

U svim slučajevima vrijedi da u početnim uvjetima, $t = 0$, vlada početni tlak u ležištu, p_i . Početni uvjeti se mogu izraziti i kao funkcija polumjera. Matematičko rješenje tlaka kao funkcije polumjera i vremena, za slučaj beskonačnog ležišta, glasi:

$$p(r, t) = p_i - \frac{q\mu}{2\pi kh} \left\{ -\frac{1}{2} Ei \left(-\frac{\phi\mu cr^2}{4kt} \right) \right\}, \quad (3.2.3.)$$

gdje je Ei funkcija pod nazivom eksponencijalni integral i može se izraziti kao :

$$-Ei(-x) = \int_x^\infty \frac{e^{-u}}{u} du \quad (3.2.4.)$$

Za jako male vrijednosti x , npr. $x < 0.01$, eksponencijalni integral se može približno opisati funkcijom prirodnog logaritma

$-Ei(-x) \cong -\ln(\gamma x)$, tj.

$$-Ei(-x) \cong -\ln(e^\gamma x) \cong \ln\left(\frac{1}{x}\right) - 0,5772 \quad (3.2.5.)$$

gdje γ označava Eulerovu konstantu (0,5772). greška u aproksimaciji vrijednosti eksponencionalnog integrala je manja od 0,6 % za $x < 0,02$. (Lee et.al. 1982)

Često se u literaturi zna pojaviti obrazac s već pretvorenim konstantama ($e^\gamma = 1,781$) što zna rezultirati pogrešnim zaključcima o pravoj vrijednosti Eulerove konstante i načina na koji je dobivena, a time i krivim shvaćanjem jednadžbe.

Za $x > 10,9$, $Ei(-x)$ se može izjednačiti s nulom isključivo u slučaju primjene kod hidrodinamičkih mjerenja u bušotini. (Lee et.al.2003)(Stewart,G. 2011).

Iz toga slijedi da za $\frac{4kt}{\phi\mu cr^2} > 100$, tlak u ležištu u funkciji radijusa i vremena jednak

$$p(r,t) = p_i + \frac{q\mu}{4\pi kh} \ln\left(\frac{e^\gamma \mu \phi cr^2}{4kt}\right) \quad (3.2.6.)$$

Po istom principu u termogeologiji, temperatura na udaljenosti r od bušotine, u vremenu t :

$$T(r,t) = T_i - \frac{q'}{4\pi\lambda} \left(Ei\left(-\frac{r^2}{4\alpha t}\right) \right) \quad (3.2.7.)$$

to jest,

$$T(r,t) = T_i + \frac{q'}{4\pi\lambda} \ln\left(\frac{e^\gamma r^2}{4\alpha t}\right) = T_i + \frac{q'}{4\pi\lambda} \left(\ln\frac{\alpha t}{r^2} - 0,80907 \right) \quad (3.2.8.)$$

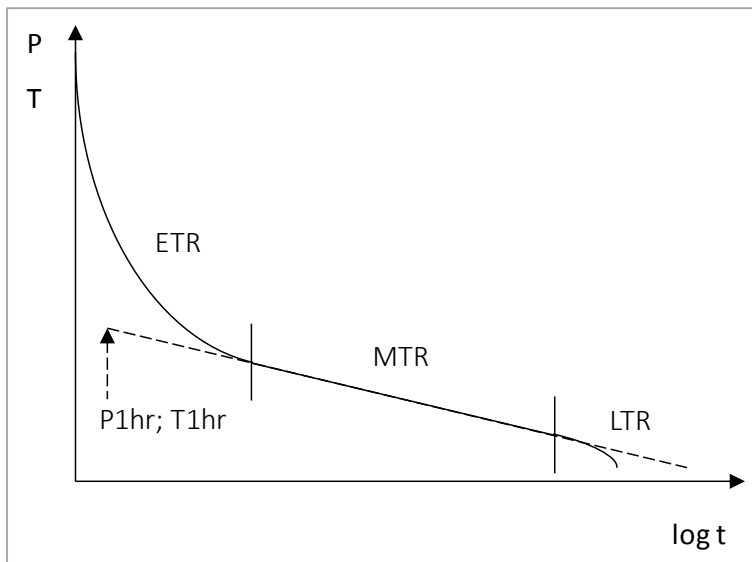
Rješenje za neograničeno ležište je aproksimacija za uvjete kod stvarnih, ograničenih ležišta i temelji se na pretpostavci da je polumjer bušotine zanemariv s obzirom na drenažni polumjer. Upravo zato to je slučaj koji najbolje opisuje metodu ispitivanja. Važno je napomenuti da i pri računanju sa stvarnim praktičnim vrijednostima polumjera i vremena koje uzimaju u obzir i veličinu polumjera bušotine, dobiveni rezultati su gotovo identični.

Osnovne metode provedenog istraživanja zasnivaju se na dva principa. Protočni test i test porasta tlaka koji u hidrodinamičkim mjerenjima služe za procjenu propusnosti formacije ležišta, a u termogeologiji služe za određivanje toplinske vodljivosti, i step testovi kojima je svrha definiranje optimalnih radnih uvjeta izmjenjivača odnosno protočnih kvota u naftnom inženjerstvu.

3.3. Metoda protočnog testa – ekvivalent testa toplinskog odaziva tla (TRT)

Protočni test se u hidrodinamičkim mjerenjima ponašanja tlaka provodi za vrijeme proizvodnje fluida. U idealiziranim uvjetima treba početi s testom za vrijeme početnog statičkog tlaka na dnu bušotine, a protočni uvjeti i tlak se bilježe u funkciji vremena. Iz podataka dobivenih protočnim testom moguće je izračunati propusnost i skin faktor, te protočni volumen samog ležišta. Najbolja primjenjivost protočnog testa je kod novih bušotina ili bušotina koje su bile zatvorene dovoljno dugo da se ležišni tlak stabilizira na početnu vrijednost. Za procjenu propusnosti i oštećenja u pravilu se češće ipak primjenjuje test porasta tlaka od protočnog testa, upravo iz razloga jer je potreban jako dug period da se tlak nakon prethodnog zatvaranja stabilizira na početne vrijednosti. Iz tog razloga protočni test se češće primjenjuje za procjenu volumena ležišta.

Ova metoda iz hidrodinamičkih mjerenja u naftnoj struci je analogna najčešće korištenoj metodi toplinskog odaziva tla (TRT) koja se izvodi u primijenjenoj termogeologiji. Ona se zasniva na osnovnom principu testa protoka fluida iz bušotine i praćenja dinamičkog tlaka na dnu bušotine, odnosno u termogeologiji na principu narinute toplinske snage na bušotinski izmjenjivač i promatranje odaziva temperature radnog fluida u vremenu (slika 3.3.1.). Kod izvođenja TRT-a provodi se pohrana topline u tlo/stijenu korištenjem elektrogrijača u aparaturi.



Slika 3.3.1. Shematski prikaz idealnog odaziva tlaka/temperature pri protočnom testu (vlastita grafika)

Kod realnog protočnog testa moguće je uočiti tri karakteristična perioda; ETR, MTR i LTR period kao što je prikazano na slici 3.3.1. (Lee et.al., 1982), (Matthews et.al.,1967). Rani period, ETR, je pod utjecajem pojave pražnjenja bušotine do koje dolazi jer je količina crpljenja iz bušotine veća od količine fluida koji ulazi iz sloja u bušotinu. Ovaj fenomen je u hidrodinamici povezan sa stlačivosti samog fluida unutar bušotine te otpuštanjem fluida na površini uslijed njegovog pirenja uslijed pada tlaka. Pojava pražnjenja bušotine će trajati sve dok se ne uspostavi ravnoteža i dotad konstantan protok neće biti postignut, što rezultira odstupanjem od ravne linije na polulogaritamskom grafu zavisnosti dinamičkog tlaka o vremenu.

Idealizirani protočni test uz konstantnu proizvodnju u neograničenom ležištu može se opisati pomoću logaritamske aproksimacije rješenja funkcije eksponencijalnog integrala iz jednadžbe difuzije, no u realnim testovima potrebno je uvrstiti i veličinu oštećenja koja se naziva skin faktor. Propusnost u pribušotinskoj zoni često je značajno smanjena kao rezultat bušenja i opremanja bušotine (Witte, H.J.L.,2001). Efekt smanjenja propusnosti opisuje se dodatnim padom tlaka proporcionalnom protočnom uvjetu. U naftnom inženjerstvu kod eksploatacije ugljikovodika, uzroci su u većini slučajeva loše izvedeno perforiranje ili čepljenje perforacija, prodor bušaćih fluida u ležišne formacije ili neodgovarajuće kemijske obrade ležišnih formacija. Skin efekt je prisutan i kod plitkih geotermalnih bušotina u obliku ekvivalentnog toplinskog otpora strujanju topline sa stijene na fluid u cijevima, a označava se najčešće s R_b . Cementno-bentonitna kaša kojom se često popunjava prostor između vanjskih stjenki ugrađenih plastičnih cijevi i stjenki bušotine predstavlja toplinski otpor, uslijed toplinske vodljivosti smjese koja je često niža od toplinske vodljivosti tla (Chiasson et.al.,2016). Iznimku čine termalno aktivne cementne kaše koje su se pokazale isplative u slučaju visoko vodljivog tla ($>2.0 \text{ W/m } ^\circ\text{C}$). Također, toplinskom otporu između fluida i stijene pridonosi i niska vodljivost polietilena kao materijala cijevi kroz koje fluid prolazi. Vrijednost toplinskog otpora može se iskazati i preko razlike u temperaturi radnog fluida i temperature na rubu pribušotinske zone, odnosno stijene. Za razliku od naftnog inženjerstva, vrijednost skin faktora je u termogeologiji u pravilu uvijek pozitivna zbog visokih toplinskih otpora polietilenskih cijevi.

U hidrodinamičkim mjerenjima, pad tlaka se kvantitativno opisuje pomoću skin faktora u zoni zahvaćenoj skin efektom za neki bezdimenzionalni protok kao:

$$\Delta p_{skin} = s \left(\frac{q\mu}{2\pi kh} \right), \quad (3.3.1.)$$

$$\text{a u termogeologiji kao: } \Delta T_{skin} = s \left(\frac{q'}{2\pi\lambda} \right), \quad (3.3.2.)$$

$$\text{odnosno toplinski otpor bušotine se iskazuje kao: } R_b = \frac{\Delta T_{skin}}{q'} \quad (3.3.3.)$$

Ovaj dodatan pad tlaka potrebno je uvrstiti u jednadžbu 3.2.6. koja opisuje kretanje dinamičkog tlaka u bušotini iz čega slijedi:

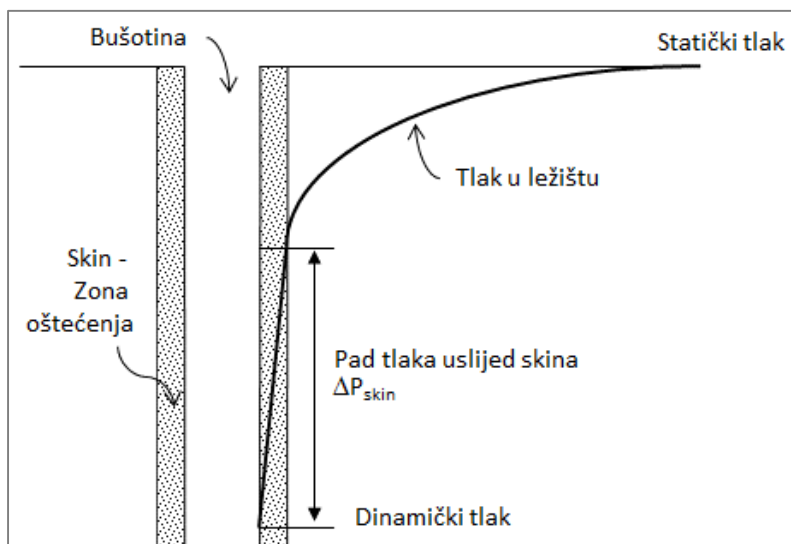
$$p_{wf} = p_i + \frac{q\mu}{4\pi kh} \left[\ln \left(\frac{e^\gamma \phi \mu c r_w^2}{4kt} \right) - 2s \right], \quad (3.3.4.)$$

$$\text{odnosno pri toplinskom odazivu tla: } T = T_i + \frac{q}{4\pi\lambda} \left(\ln \left(\frac{e^\gamma r_w^2}{4\alpha t} \right) - 2s \right) \quad (3.3.5.)$$

Iz ove jednadžbe pri mjerenju toplinskog odaziva može se izraziti skin i toplinski otpor R_b kombiniranjem donje jednadžbe i 3.3.2. i 3.3.3.:

$$s = \frac{1}{2} \ln \left(\frac{e^\gamma r_w^2}{4\alpha t} \right) - \frac{(T - T_i) 2\pi\lambda}{q} \quad (3.3.6.)$$

Na slici 3.3.2. je vizualno prikazan značaj skin efekta u hidrodinamičkim mjerenjima. Za idealiziran slučaj kao na slici, nakon otvaranja bušotine i proizvodnog uvjeta dinamički tlak bi se trebao smanjiti upravo za vrijednost pada tlaka uzrokovanog skin efektom. U praksi se često veličina pada tlaka zbog skin efekta opisuje upravo kao razlika tlaka nakon otvaranja i kratko nakon otvaranja bušotine, što odgovara Hornerovoj metodi interpretacije u testu porasta tlaka.



Slika 3.3.2. Vizualizacija oštećenja pribušotinske zone/skina u hidrodinamici (vlastita grafika)

Alternativni način određivanja skina koji se češće koristi u testu porasta tlaka podrazumijeva analiziranje prijelaznog perioda neposredno nakon otvaranja bušotine, a sukladno Hornerovoj metodi.

Iz jednadžbi 3.2.6. i 3.3.4. kojima je opisano stanje tlaka prije i nakon otvaranja bušotine, slijedi

$$p_{ws} - p_{wf} = \frac{-q\mu}{4\pi kh} \left[\ln \left(\frac{e^{\gamma} \phi \mu c r_w^2 (t + \Delta t)}{4kt(\Delta t)} \right) - 2s \right] \quad (3.3.7.)$$

Za neki period Δt koji je u usporedbi s ukupnim vremenom t beznačajan, $(t + \Delta t)/t$ se može aproksimirati kao 1. Uvrštavanjem u prethodnu jednadžbu intervala Δt u iznosu od 1h, te zamjenom $p_{ws} = p_{1h}$ (slika 3.3.1.), te svođenjem na praktične terenske mjerne jedinice, vrijednost skina se tada može izraziti kao:

$$s = \frac{2,303}{2} \left[\frac{p_{1h} - p_{wf}}{m} - \log \left(\frac{k}{\phi \mu c r_w^2} \right) + 5,10 \right] \text{ odnosno,} \quad (3.3.8.)$$

$$s = \frac{2,303}{2} \left[\frac{T_{1h} - T}{m} - \log \left(\frac{\alpha}{r_w^2} \right) + 5,10 \right] \quad (3.3.9.)$$

Za rješavanje jednadžbe moguće je izabrati i druge vrijednosti vremena osim jednog sata, no u području bušotinskih efekata, odnosno ranog tranzijentnog oblika protjecanja ETR prikazanog na slici 3.3.1. Takav postupak bi jednadžbi promijenio samo vrijednost konstante 5,10, odnosno za primjer od $\Delta t = 2h$ konstanta bi postala $(5,10 - \log_{10}(2))$, odnosno 4,80.

Ovdje m označava promjenu tlaka ili temperature za jedan logaritamski ciklus vremena. Tlak p_{wf} je vrijednost tlaka izmjerena prije otvaranja bušotine, a p_{1h} je odsječak na grafu krivulje pada tlaka jedan sat nakon rada bušotine (slika 3.3.1.). Aproksimirana vrijednost p_{1h} je jedan od najbitnijih podataka i važno je točno očitati vrijednost nakon jednog sata. Ako to nije moguće potrebno je ekstrapolirati krivulju unatrag kao što je prikazano na slici 3.3.1.

Iz razvoda jednadžbi 3.3.7. i skina 3.3.9. vidljivo je prebacivanje izraza iz prirodnog u dekadski logaritam, što proizlazi iz buduće primjene Hornerove metode pomoću koje se može modelirati ponašanje tlaka u bušotini za različite protočne uvjete. Hornerova metoda zahtjeva grafički prikaz odnosa tlaka i logaritmirane vrijednosti $\frac{\Delta t + t}{\Delta t}$. Indeks u jednadžbi skina od 2,303

proizlazi iz pravila:

$$\log_a b = \frac{\log_c b}{\log_c a}, (a > 0, b > 0, c > 0, a \neq 1, c \neq 1) , \text{ iz kojeg slijedi}$$

$$\log_e x = \frac{\log_{10} x}{\log_{10} e}, \text{ tj. } 2,303 \ln(x) = \log(x). \quad (3.3.10.)$$

Konstantni protok kojeg zahtjeva jednadžba 3.3.7. bit će postignut pojavom srednjeg perioda, MTR, u kojem je krivulja na slici 3.3.1. ravna linija u logaritamskom prikazu nagiba:

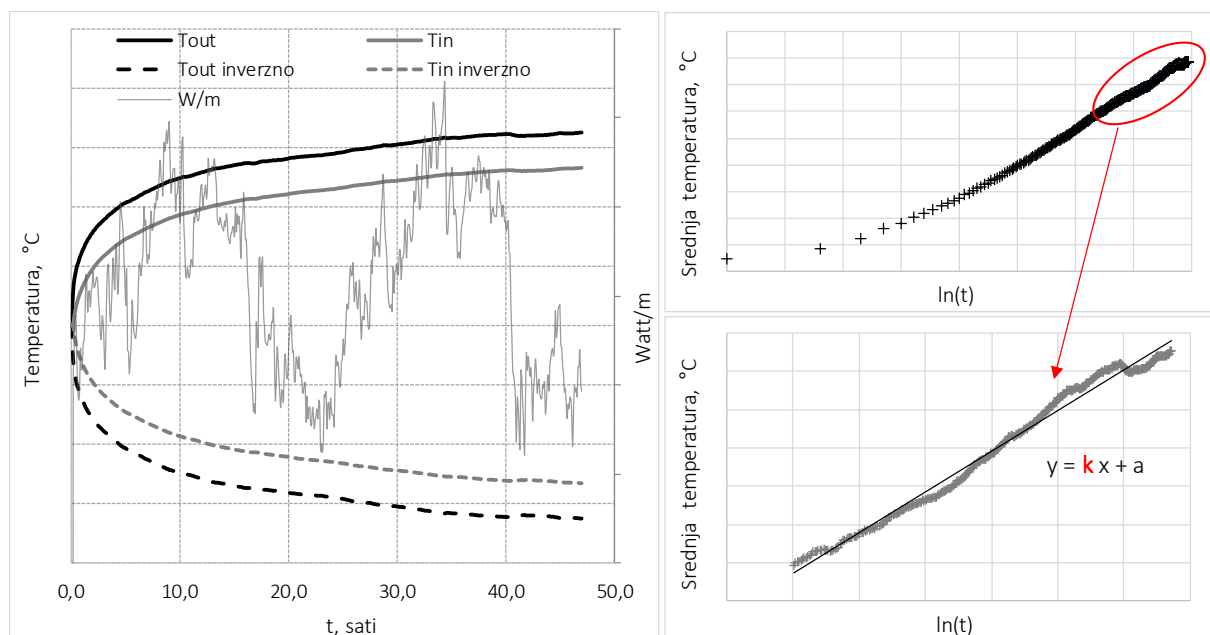
$$m = 2,303 \frac{qB\mu}{4\pi kh}. \quad (3.3.11.)$$

Iz toga slijedi da je propusnost formacije ispitivanog ležišta:

$$k = 2,303 \frac{qB\mu}{4\pi mh} \quad (3.3.12.)$$

Za vrijeme trajanja MTR perioda može se izračunati i vrijednost skin faktora preko rješenja jednadžbe (3.3.8.) za skin u slučaju vremena $t = 1h$ i aproksimiranog tlaka $p_{wf} = p_{1h}$. U hidrodinamičkim mjerenjima LTR kasni period se uočava kada polumjer ispitivanja dosegne granice ležišta ili područje značajne heterogenosti. Na grafu sa slike (3.3.1.) je vidljiv kao odstupanje od ravne linije odnosa dinamičkog tlaka i vremena. Kod analogne metode testa toplinskog odaziva u termogeologiji, kasni period ne postoji, a što proizlazi iz uvjeta neograničenog ležišta.

Na slici 3.3.3 prikazan je tipičan odziv temperature pri izvođenju testa toplinskog odaziva bušotinskog izmjenjivača topline.



Slika 3.3.3. Postupak interpretacije klasičnog testa toplinskog odaziva tla (TRT) (vlastita grafika)

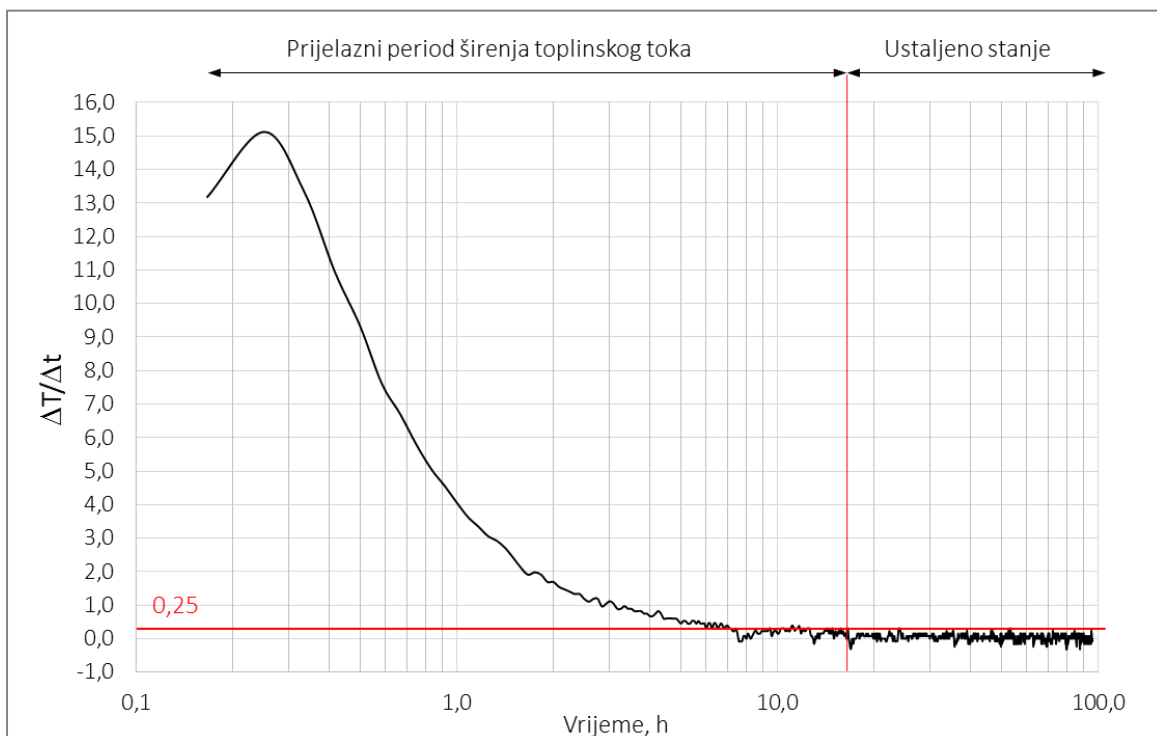
Za određivanje vremena u kojem traje prijelazni/neustaljeni tok topline koji će se zanemariti u nastavku proračuna i do kojeg dolazi zbog utjecaja toplinskih otpora, može se koristiti izraz (Gehlin,S., 2002)(Eskilson, P., 1987):

$$\frac{\alpha t}{r^2} > 5 ,$$

Iz čega je vrijeme trajanja prijelaznog/neustaljenog toka topline odnosno početka poluustaljenog stanja prijelaza toplinske energije:

$$t > \frac{5r^2}{\alpha} \tag{3.3.13.}$$

Izraz (3.3.13.) sa sobom nosi mogućnost pogreške od 10% zbog vrijednosti α koja se određuje iz kataloških vrijednosti za pretpostavljena svojstva naslaga (Gehlin,S.,2002). Točnija metoda za određivanje vremena trajanja neustaljenog toka koja je inovativno primijenjena u sklopu ovog istraživanja stavlja u odnos promjenu prosječne temperature radnog fluida u funkciji vremena i ukupno proteklog vremena, slika (3.3.4.).



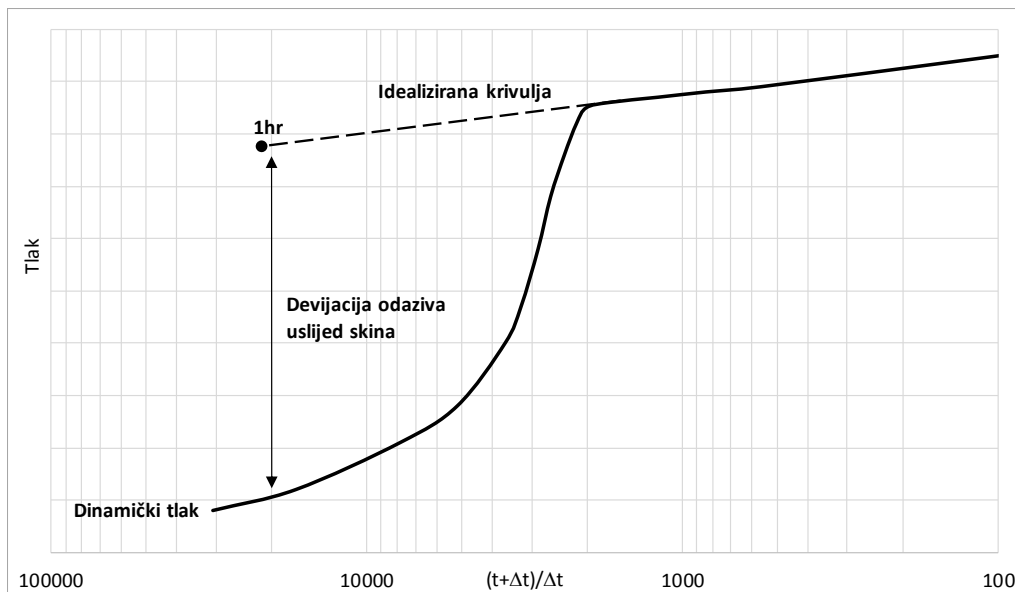
Slika 3.3.4. Derivacijska krivulja za određivanje početka ustaljenog stanja širenja toplinskog toka u 10-min intervalu praćenja promjene temperature (vlastita grafika)

Cilj je odrediti vrijeme u kojem promjena temperature u jedinici vremena (najčešće perioda od 1 sata) postaje vrlo male vrijednosti, odnosno porast temperature je linearan u funkciji prirodnog logaritma vremena. Prilikom niza mjerenja testa toplinskog odaziva na RGN fakultetu i iskustvenih spoznaja odabrana je granica promjene temperature po satu od 0,25°C. Nakon te točke moguće je interpretirati podatke za određivanje toplinske vodljivosti prema slici 3.3.3. i jednadžbom nagiba pravca κ :

$$\lambda = \frac{q'}{4\pi\kappa} \quad (3.3.13.)$$

3.4. Metoda testa porasta tlaka - Test toplinskog oporavka bušotinskog izmjenjivača

Test porasta tlaka je najčešće izvođena metoda ispitivanja ponašanja tlaka u bušotini. Prije samog mjerenja nužno je osigurati jednoliku proizvodnju prije zatvaranja bušotine te polu-ustaljeno stanje protjecanja. Zatvaranje bušotine, koje se najčešće ostvaruje sa površine, uzrokuje porast tlaka u bušotini koji se mjeri dubinskim manometrom i bilježi u funkciji vremena. Iz dobivenih podataka moguće je procijeniti propusnost formacije, trenutni tlak u drenažnom području, opisati svojstva oštećenja u pribušotinskoj zoni ako postoje, te heterogenost ležišta i vanjske granice ležišta. Sama metoda provođenja testa se temelji na koracima u razvoju Hornerove metode (Matthews et.al.,1967). Iako su rezultati dobiveni tom metodom najtočniji za slučaj neograničenog ležišta, dobra interpretacija koraka u razvoju metode može dati točne pretpostavke i za slučaj ograničenih ležišta (Lee et.al.2003).



Slika 3.4.1. Shematski prikaz idealiziranog odaziva tlaka pri testu porasta tlaka (vlastita grafika)

Kao i u protočnom testu, jednadžba 3.3.4. je primjenjiva isključivo na dio krivulje koji je linearno zavisao o logaritmu proteklog vremena. Krivulja najčešće odstupa od ravne linije u ranijim vremenima zbog određenog dotoka u bušotinu iako je bušotina na površini zatvorena, tj. prisutni su bušotinski efekti, što teorija ne uzima u obzir. Zato se radi kompenziranja tog efekta punjenja bušotine ekstrapolira dio idealne ravne linije na ranija vremena.

Idealni test porasta tlaka pretpostavlja neograničeno, homogeno i izotropno ležište sa jednofaznim fluidom male stlačivosti i konstantnih svojstava. Moguća oštećenja ili provedene simulacije uzimaju se u obzir u skin zoni oko bušotine. U trenutku zatvaranja bušotine sa površine trenutno prestaje i utok fluida u bušotinu. Stvarni test porasta tlaka u realnim uvjetima ne modelira se za navedene uvjete, ali analiza metode za idealizirane uvjete pokazuje se korisna za prepoznavanje odstupanja kod stvarnih uvjeta.

Iz navedenih pretpostavki za idealan test porasta tlaka slijedi da je funkcija Ei primjenjiva, kao i njena logaritamska aproksimacija, jer podrazumijeva fluid konstantnih svojstava. Pretpostavlja se da je vrijeme trajanja posljednjeg protočnog uvjeta takvo da je primjenjiva Hornerova metoda pseudoproduktivnog vremena. Analogno, primjena ove hidrodinamičke metode na testiranje bušotinskih izmjenjivača topline obavlja se nakon odrađenog klasičnog testa toplinskog odaziva tla (TRT) narinutom toplinskom energijom na bušotinu. Nakon određenog vremena prekida se opskrba električne energije grijača te se promatra oporavak temperature

bušotinskog fluida u proteklom vremenu (Javed, S.,2011). Iz snimljene krivulje oporavka temperature može se izračunati skin i koeficijent toplinske vodljivosti analogno načinu u hidrodinamici.

Dakle, ako je bušotina proizvodila u vremenu t_p protočnim uvjetom q prije zatvaranja i ako vrijeme od trenutka zatvaranja označimo sa Δt , primjenom načela superpozicije slijedi u hidrodinamici (metoda superpozicije bit će detaljnije objašnjena u poglavlju 3.5.):

$$p_i - p_{ws} = -\frac{qB\mu}{4\pi kh} \left[\ln \left(\frac{\gamma\phi c_t r^2}{k(t_p + \Delta t)} \right) - 2s \right] - \frac{(-q)B\mu}{4\pi kh} \left[\ln \left(\frac{\gamma\phi\mu c_t r^2}{k\Delta t} \right) - 2s \right], \quad (3.4.1.)$$

odnosno

$$p_{ws} = p_i - \frac{qB\mu}{4\pi kh} \ln \left[(t_p + \Delta t) / \Delta t \right],$$

ili prebacivanjem u dekadski logaritam što zahtjeva Hornerova metoda, prema pravilu prikazanom jednačbom 3.3.10. u prijašnjem poglavlju.

$$p_{ws} = p_i - 2,303 \frac{q\mu B}{4\pi kh} \log \left(\frac{t + \Delta t}{\Delta t} \right), \quad (3.4.2.)$$

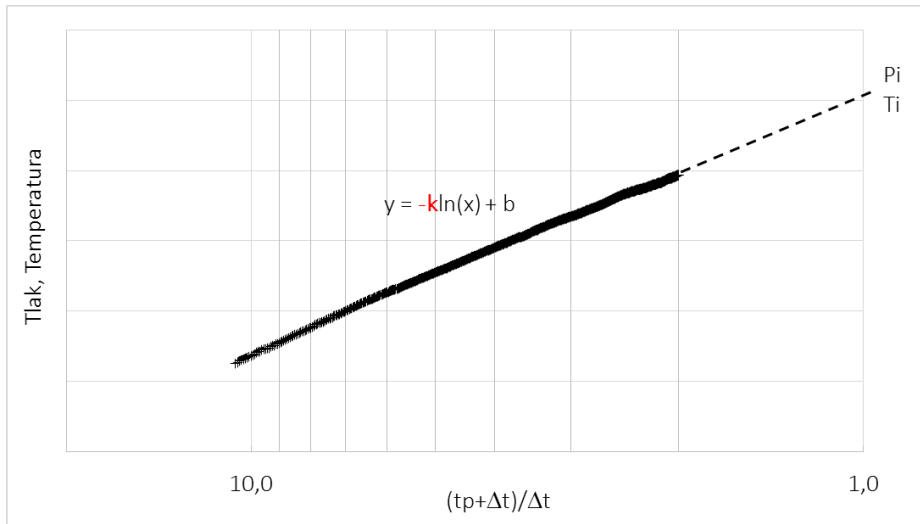
odnosno u termogeologiji:

$$T = T_i - 2,303 \frac{q'}{4\pi\lambda} \log \left(\frac{t + \Delta t}{\Delta t} \right) \quad (3.4.3.)$$

Prebacivanje vrijednosti prirodnog logaritma iz izraza u dekadski potrebno je da bi se omogućila primjena Hornerove aproksimacije i prikaz zavisnosti tlaka i vremena na polulogaritmickom grafu. Iz oblika jednačbe,vidljivo je da tlak ili temperatura pri zatvaranju bušotine, za vrijeme testa porasta tlaka daje ravnu liniju na grafičkom prikazu u odnosu sa $\log \left[(t_p + \Delta t) / \Delta t \right]$ (Matthews et.al., 1967).Iz toga slijeda je nagib linije jednak :

$$m = -2,303 \frac{q\mu}{4\pi kh} \text{ ili } m = -2,303 \frac{q'}{4\pi\lambda} \quad (3.4.4.)$$

Uvijek se u obzir uzima apsolutna vrijednost faktora m , prema tome radi se uvijek o pozitivnom broju. Propusnost formacije, k , ili koeficijent toplinske vodljivosti, λ , može se izračunati pomoću testa porasta tlaka pomoću nagiba m . Također, ako ekstrapoliramo liniju do beskonačno dugog vremena u kojem je bušotina bila zatvorena, Δt , vrijednost vremena t_p postaje zanemariva u izrazu $(\Delta t + t_p) / \Delta t$ i vrijednost tlaka ili temperature u takvom uvjetu će biti jednaka originalnom početnom tlaku ležišta ili početnoj temperaturi formacije



Slika 3.4.2. Određivanje početnih uvjeta tlaka ili temperature iz testa porasta tlaka (vlastita grafika)

U struci naftnog inženjerstva uobičajeno je da skala na polulogaritamskom grafu (slika 3.4.2.) pada sa desne na lijevu stranu (Lee et.al.,1982).

Za određivanje skin faktora s iz podataka dobivenih testom porasta tlaka, potrebno je razmotriti tlak u bušotini u samom trenutku zatvaranja, koji iznosi:

$$p_{wf} = p_i + \frac{qB\mu}{4\pi kh} \left[\ln \left(\frac{\phi\mu c_t r_w^2}{kt_p} \right) - 2s \right], \text{ odnosno}$$

$$p_{wf} = p_i + 2,303 \frac{qB\mu}{4\pi kh} \left[\log \left(\frac{\phi\mu c_t r_w^2}{kt_p} \right) - 0,869s \right] \text{ tj.}$$

$$p_{wf} = p_i + m \left[\log \left(\frac{\phi\mu c_t r_w^2}{kt_p} \right) - 0,869s \right] \text{ odnosno u termogeologiji,} \quad (3.4.5.)$$

$$T = T_i + m \left[\log \left(\frac{r_w^2}{\alpha t_p} \right) - 0,869s \right] \quad (3.4.6.)$$

U vremenu dok je bušotina zatvorena, test porasta tlaka pokazuje:

$$p_{ws} = p_i - m \log \left[(t_p + \Delta t) / \Delta t \right] \text{ odnosno,} \quad (3.4.7.)$$

$$T = T_i - m \log \left[(t_p + \Delta t) / \Delta t \right] \quad (3.4.8.)$$

Kombiniranjem ovih jednačbi da bi se dobila vrijednost skin faktora s , dobivamo

$$s = \frac{2,303}{2} \left(\frac{p_{ws} - p_{wf}}{m} \right) + \frac{2,303}{2} \log \left(\frac{\phi\mu c_t r_w^2}{k\Delta t} \right) + \frac{2,303}{2} \log \left(\frac{t_p + \Delta t}{t_p} \right) \quad (3.4.9.)$$

Odabirom vremena od zatvaranja bušotine $\Delta t = 1h$, kao što je opisano u Hornerovom metodom, i pripadnog tlaka u bušotini za to vrijeme p_{1h} , možemo pretpostaviti da je vrijednost $\log(t_p + \Delta t) / t_p$ zanemarivo mala. Iz tih pojednostavljenih pretpostavki slijedi da je

$$s = 1,151 \left[\frac{(p_{1h} - p_{wf})}{m} - \log \left(\frac{k}{\phi \mu c_t r_w^2} \right) + 5,1 \right], \text{ odnosno} \quad (3.4.10.)$$

$$s = 1,151 \left[\frac{(T_{1h} - T_{wf})}{m} - \log \left(\frac{\alpha}{r_w^2} \right) + 5,1 \right] \quad (3.4.11.)$$

gdje je potrebno uzeti u obzir i pretpostavku da je vrijednost nagiba m uvijek pozitivna.

Zaključno, sama aproksimacija testa porasta tlaka se temelji na intuitivnim zaključcima koji proizlaze iz dva kriterija:

1) s obzirom da se koristi jedan određeni protočni uvjet, najbolji izbor je onaj posljednji pod uvjetom da je trajao neki značajan period jer taj protok daje rješenje za ponašanje tlaka u pribušotinskoj zoni. Aproksimacijom možemo dobiti rješenja i izvan radijusa na kojem s takvim uvjetom postizemo pad tlaka.

2) Primjenom jednog protočnog uvjeta nužno je odabrati i vrijeme proizvodnje takvo da umnožak protoka i vremena daje vrijednost ukupne proizvodnje. Na taj način moguće je precizno održavati materijalni balans.

Primjena Hornerove aproksimacije umjesto načela superpozicije uvjetovana je trajanjem posljednjeg protočnog uvjeta. Ako se radi o kratkom periodu, ostali uvjeti će imati značajniju ulogu u ponašanju tlaka za odabrano ležište. U slučaju nove bušotine kod koje dolazi do brzih promjena u protoku, potrebno je osigurati da posljednji protočni uvjet traje barem dvostruko dulje od prethodnih da bi Hornerova aproksimacija dala valjane rezultate.

U svakom slučaju nesigurnosti u ostvarenost navedenih uvjeta, preporučeno je koristiti načelo superpozicije za modeliranje povijesti proizvodnje bušotine i pripadnog ponašanja tlaka.

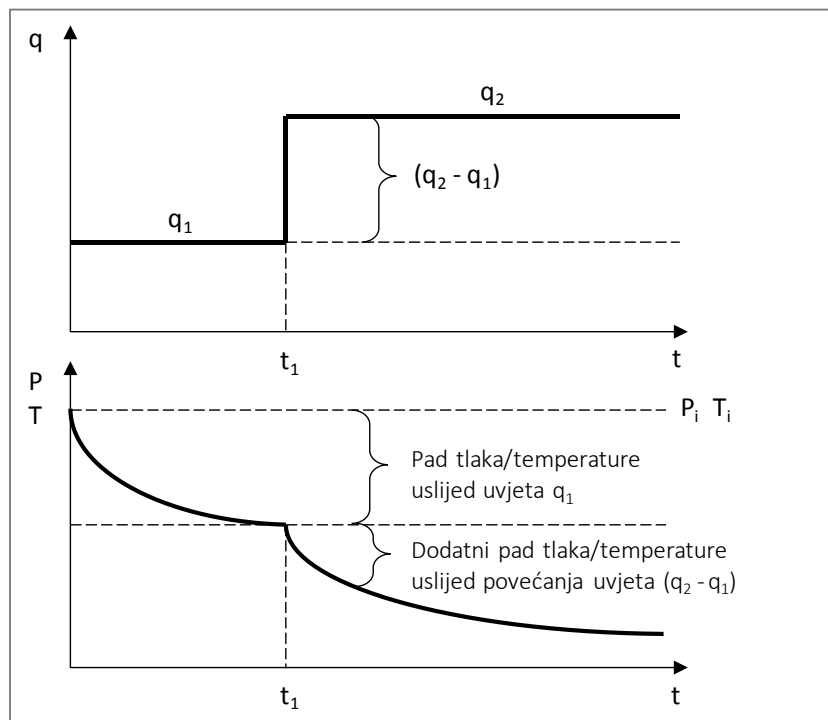
3.5. Step testovi s promjenjivim protočnim/toplinskim uvjetima i načelo superpozicije

Navedena rješenja uzimaju u obzir konstantan volumetrijski protok za dinamičke uvjete na dnu bušotine, odnosno pretpostavlja se da se radi o neograničenom ležištu iz kojeg se proizvodi iz jedne bušotine. U realnim uvjetima, bušotina neće proizvoditi uvijek konstantnom proizvodnjom. Također, za neke analize ponašanja tlaka potrebno je uzeti u obzir različite protočne uvjete i u takvim situacijama se koristi načelo superpozicije. Na taj način moguće je primijeniti rješenja za ponašanje tlaka pri konstantnoj proizvodnji na slučajeve proizvoljne proizvodnje.

Princip je opisan na primjer bušotine koja proizvodi pri dva volumetrijski različita protoka. Na primjer, bušotina proizvodi protokom q_1 u vremenu t_1 i nakon toga je protočni uvjet promijenjen na q_2 . Za vrijeme prvog perioda, pad tlaka se može opisati kao:

$$\Delta p(t) = p_i - p_{wf} = \frac{q_1 \mu}{2\pi kh} \Delta p_D(t) , \quad (3.5.1.1.)$$

gdje je Δp_D bezdimenzionalni pad tlaka u bušotini za primijenjenu vanjsku granicu ležišta. Nakon vremena t_1 proizvodnja je povećana za količinu $(q_2 - q_1)$ i taj porast proizvodnje uzrokuje pripadajući pad tlaka kako je pokazano na slici 3.5.1.



Slika 3.5.1. Prikaz načela superpozicije pri dva različita protočna uvjeta i odaziv tlaka (vlastita grafika)

Ponašanje tlaka od vremena t_1 može se izračunati dodavanjem pada tlaka uzrokovanog proizvodnjom $(q_2 - q_1)$ nakon vremena t_1 na kojeg je uzrokovala proizvodnja q_1 . Odnosno rješenjima za vrijeme prije t_1 dodajemo prema načelu superpozicije rješenje za proizvodnju $(q_2 - q_1)$ nakon vremena t_1 .

Matematički izraženo za hidrodinamiku i termogeologiju (Gehlin, S., 2002):

$0 \leq t \leq t_1$:

$$\Delta p(t) = \frac{q_1 \mu}{2\pi kh} \Delta p_D(t) \quad \text{odnosno} \quad (3.5.1.2.)$$

$$\Delta T(t) = \frac{q_1'}{2\pi \lambda} \Delta T_D(t) \quad (3.5.1.3.)$$

$t_1 \leq t$:

$$\Delta p(t) = \frac{q_1 \mu}{2\pi kh} \Delta p_D(t) + \frac{(q_2 - q_1) \mu}{2\pi kh} \Delta(t - t_1), \quad \text{odnosno} \quad (3.5.1.4.)$$

$$\Delta T(t) = \frac{q_1'}{2\pi \lambda} \Delta T_D(t) + \frac{(q_2' - q_1')}{2\pi \lambda} \Delta(t - t_1) \quad (3.5.1.5.)$$

Prvi čimbenik u jednadžbi 3.5.1.5. opisuje pad tlaka pri prvom uvjetu proizvodnje, a drugi opisuje povećanje pada tlaka uzrokovano povećanjem proizvodnje za $(q_2 - q_1)$. Izraz vrijedi bez obzira je li q_2 veći ili manji od q_1 .

Čimbenik Δp_D se može definirati kao:

$$\Delta p_D = \frac{p_i - p_{wf}}{q\mu/2\pi kh} = -\frac{1}{2} Ei \left(-\frac{\phi \mu c r_w^2}{4kt} \right), \quad \text{odnosno} \quad (3.5.1.6.)$$

$$\Delta T_D = \frac{T_i - T}{q'/2\pi \lambda} = -\frac{1}{2} Ei \left(-\frac{r_w^2}{4\alpha t} \right) \quad (3.5.1.7.)$$

što slijedi iz jednadžbe 3.2.7.

U ovom slučaju je $\Delta p_D(t)$ za $t \leq 1$

$$\Delta p(t) = -\frac{q_1 \mu}{4\pi kh} Ei \left(-\frac{\phi \mu c r_w^2}{4kt} \right) - \frac{(q_2 - q_1) \mu}{4\pi kh} Ei \left(-\frac{\phi \mu c r_w^2}{4k(t - t_1)} \right), \quad \text{odnosno} \quad (3.5.1.8.)$$

$$\Delta T(t) = -\frac{q_1'}{4\pi \lambda} Ei \left(-\frac{r_w^2}{4\alpha t} \right) - \frac{(q_2' - q_1')}{4\pi \lambda} Ei \left(-\frac{r_w^2}{4\alpha(t - t_1)} \right) \quad (3.5.1.9.)$$

U slučaju složenije povijesti proizvodnje s više od dva uvjeta za koju se želi izraziti promjena tlaka, također se koristi načelom superpozicije. Ponašanje tlaka kod proizvoljnih protočnih uvjeta je suma dotadašnjih promjena tlaka za povećane protoke, gdje se u svakom proizvodnom ciklusu mora dostići ustaljeni dinamički tlak, odnosno u termogeologiji ustaljeno stanje prijelaza toplinske energije. Radi se samo o primjeni principa koji je već objašnjen za slučaj dva protočna uvjeta proizvodnje na svaku od promjena protoka. Dakle za početne uvjete vrijedi isto:

$$t \leq t_1 : \Delta p(t) = \frac{q_1 \mu}{2\pi kh} \Delta p_D(t) \text{ odnosno } \Delta T(t) = \frac{q_1'}{2\pi \lambda} \Delta T_D(t) \quad (3.5.1.10.)$$

Također za idući protočni uvjet vrijedi

$$t_1 \leq t \leq t_2 : \Delta p(t) = \frac{q_1 \mu}{2\pi kh} \Delta p_D(t) + \frac{(q_2 - q_1) \mu}{2\pi kh} \Delta p_D(t - t_1) \text{ odnosno} \quad (3.5.1.11.)$$

$$\Delta T(t) = \frac{q_1'}{2\pi \lambda} \Delta T_D(t) + \frac{(q_2' - q_1')}{2\pi \lambda} \Delta T_D(t - t_1) \quad (3.5.1.12.)$$

U vremenu t_2 protočni uvjet se promjeni sa q_2 na q_3 , pa je potrebno rješenju za drugi protok dodati dodatan pad tlaka uzrokovan sljedećom promjenom proizvodnje ($q_3 - q_2$). Dodatni pad tlaka izražen je s:

$$\frac{(q_3 - q_2) \mu}{2\pi kh} \Delta p_D(t - t_2) \text{ odnosno } \frac{(q_3' - q_2')}{2\pi \lambda} \Delta T_D(t - t_2) \quad (3.5.1.13.)$$

Stoga za vrijeme trajanja trećeg perioda vrijedi

$$t_2 \leq t \leq t_3 : \Delta p(t) = \frac{q_1 \mu}{2\pi kh} \Delta p_D(t) + \frac{(q_2 - q_1) \mu}{2\pi kh} \Delta p_D(t - t_1) + \frac{(q_3 - q_2) \mu}{2\pi kh} \Delta p_D(t - t_2), \text{odnosno} \quad (3.5.1.14.)$$

$$\Delta T(t) = \frac{q_1'}{2\pi \lambda} \Delta T_D(t) + \frac{(q_2' - q_1') \mu}{2\pi \lambda} \Delta T_D(t - t_1) + \frac{(q_3' - q_2')}{2\pi \lambda} \Delta T_D(t - t_2) \quad (3.5.1.15.)$$

Za svaku promjenu protočnog uvjeta princip je uvijek isti: nastaviti sa prethodnim rješenjem kroz vrijeme i dodati mu pad tlaka uzrokovan zadnjom promjenom protoka. Iz toga, za n protočnih uvjeta u hidrodinamici i termogeologiji vrijedi:

$$\Delta p(t) = \frac{q_1 \mu}{2\pi kh} \Delta p_D(t) + \frac{(q_2 - q_1) \mu}{2\pi kh} \Delta p_D(t - t_1) + \frac{(q_3 - q_2) \mu}{2\pi kh} \Delta p_D(t - t_2) + \dots + \frac{(q_n - q_{n-1}) \mu}{2\pi kh} \Delta p_D(t - t_{n-1}) \quad (3.5.1.16.)$$

$$\Delta p(t) = \frac{q_1'}{2\pi \lambda} \Delta T_D(t) + \frac{(q_2' - q_1')}{2\pi \lambda} \Delta T_D(t - t_1) + \frac{(q_3' - q_2')}{2\pi \lambda} \Delta T_D(t - t_2) + \dots + \frac{(q_n' - q_{n-1}')}{2\pi \lambda} \Delta T_D(t - t_{n-1})$$

(3.5.1.17.)

ili skraćeno:

$$\Delta p(t) = \frac{q_1 \mu}{2\pi kh} \left[\Delta p_D(t) + \sum_{i=2}^n \frac{q_i - q_{i-1}}{q_1} \Delta p_D(t - t_{i-1}) \right] \text{ odnosno,} \quad (3.5.1.18.)$$

$$\Delta T(t) = \frac{q_1'}{2\pi \lambda} \left[\Delta T_D(t) + \sum_{i=2}^n \frac{q_i' - q_{i-1}'}{q_1'} \Delta T_D(t - t_{i-1}) \right] \quad (3.5.1.19.)$$

Jednadžba 3.5.1.19. je generalni oblik načela superpozicije za slučaj promjene ponašanja tlaka i temperature za postupene promjene protočnih ili toplinskih uvjeta. Iako je u ovom slučaju načelo primijenjeno na jednoliko i pravilno povećanje slijeda, također je primjenjivo i na proizvoljne varijacije protoka ili toplinskih uvjeta. Jednadžba vrijedi i ako je jedna ili više protoka ili toplinskih uvjeta jednak nuli (zatvorena bušotina), tada bi izraz za ponašanje tlaka ili temperature iznosio:

$$\Delta p(t) = \frac{q_1 \mu}{2\pi kh} \left[\Delta p_D(t_{n-1} + \Delta t) + \sum_{i=2}^n \frac{q_i - q_{i-1}}{q_1} \Delta p_D(t_{n-1} - t_{i-1} + \Delta t) \right] - \frac{q_{n-1} \mu}{2\pi kh} \Delta p_D(\Delta t) \quad (3.5.1.20.)$$

$$\Delta T(t) = \frac{q_1'}{2\pi \lambda} \left[\Delta T_D(t_{n-1} + \Delta t) + \sum_{i=2}^n \frac{q_i' - q_{i-1}'}{q_1'} \Delta T_D(t_{n-1} - t_{i-1} + \Delta t) \right] - \frac{q_{n-1}'}{2\pi \lambda} \Delta T_D(\Delta t) \quad (3.5.1.21.)$$

gdje je t_{n-1} ukupno proteklo vrijeme prije zatvaranja bušotine, a Δt je vrijeme u kojem je bušotina zatvorena i koje se mjeri od trenutka zatvaranja. Jednadžba opisuje ponašanje tlaka ili temperature u zatvorenoj bušotini koja je prije zatvaranja proizvodila promjenjivim protočnim ili toplinskim uvjetima.

Načelo superpozicije može biti izraženo i u kontinuiranom obliku za razliku od već pokazanog postepenog oblika. Ako kod jednadžbe 3.5.1.20. i 3.5.1.21. pretpostavimo da je su promjene kod protočnih ili toplinskih uvjeta i vremenske komponente beskonačno malene, njihov zbroj se može izraziti u obliku integrala

$$\frac{1}{q_1} \int_0^t \frac{dq(\tau)}{d\tau} \Delta p_D(t - \tau) d\tau, \text{ odnosno } \frac{1}{q_1'} \int_0^t \frac{dq'(\tau)}{d\tau} \Delta T_D(t - \tau) d\tau \quad (3.5.1.22.)$$

gdje je τ integracijska varijabla koja odgovara t_{i-1} iz prijašnjih rješenja.

Jednadžbe 3.5.1.20. i 3.5.1.21. postaju:

$$\Delta p_t = \frac{q_1 \mu}{2\pi kh} \left[\Delta p_D(t) + \frac{1}{q_1} \int_0^t \frac{dq(\tau)}{d\tau} \Delta p_D(t - \tau) d\tau \right] \text{ odnosno,} \quad (3.5.1.23.)$$

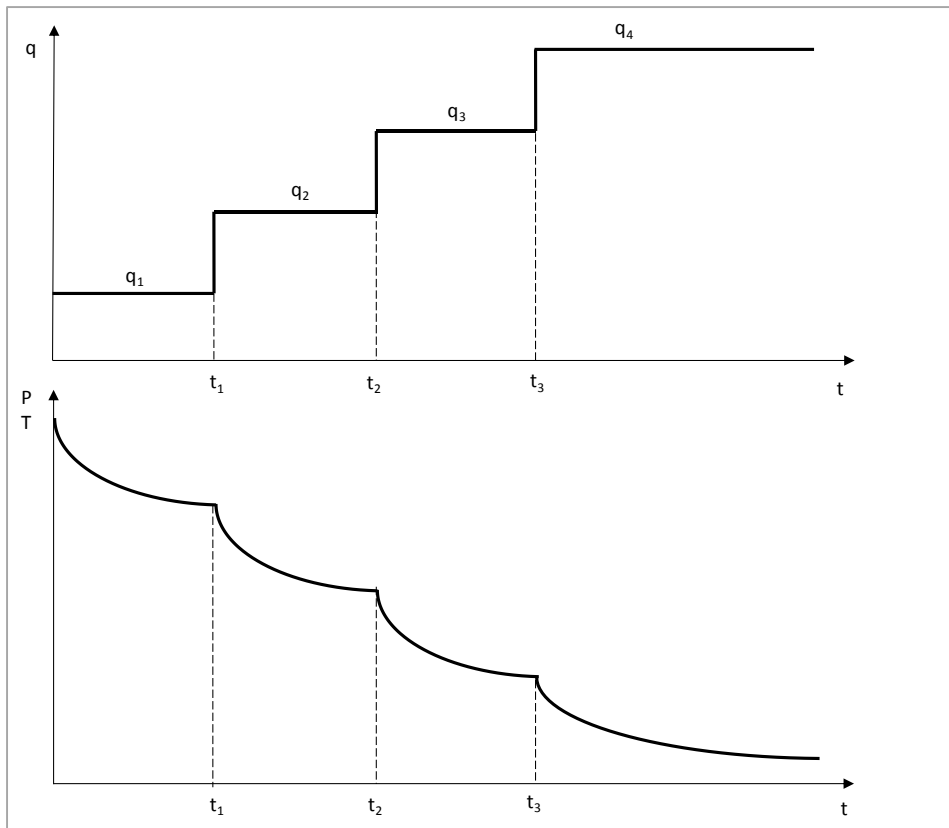
$$\Delta T_t = \frac{q_1'}{2\pi\lambda} \left[\Delta T_D(t) + \frac{1}{q_1'} \int_0^t \frac{dq'(\tau)}{d\tau} \Delta T_D(t-\tau) d\tau \right] \quad (3.5.1.24.)$$

Općenito, tehnika načela superpozicije može biti primijenjena na rješenjima linearnih diferencijalnih jednadžbi dobivenih iz konstantnih graničnih uvjeta i modificirana za rješenja kod graničnih uvjeta promjenjivih u vremenu. Za većinu hidrodinamičkih i TR testova jednadžba yz daje dobre rezultate uz efekte koje izazivaju promjenjivi protoci.

3.6. Test s višestrukim toplinskim uvjetima

U ovoj vrsti testa ostvaruje se proizvodnja pri konstantnom protoku za najmanji protočni uvjet dok se ne dosegne stabilizacija tlaka, takozvano pseudoustaljeno stanje. Nakon stabilizacije protoka i tlaka, mijenja se protok dok se opet ne postigne pseudoustaljeno stanje tlaka. Postupak se ponavlja tri do četiri puta uz preporuku da najveći protočni uvjet bude četiri puta veći od najmanjeg, dok najmanji protočni uvjet mora biti dovoljan za iznošenje fluida sa dna bušotine. Prilikom analiziranja podataka dobivenih testom, prema Leeu (1982) mogu se koristiti dvije metode, empirijska i teoretska. U ovom radu bit će prikazana samo empirijska metoda obzirom da je primjenjivija na test toplinskog odaziva.

Empirijska metoda uzima u obzir da se na log-log dijagramu zavisnosti o protočnom uvjetu, q , krivulja dijagrama može aproksimirati ravnom linijom ako je u svakom protočnom uvjetu postignuto pseudoustaljeno stanje. U hidrodinamici, originalni naziv ovog test je protok za protokom, a svrha je određivanje maksimalne teoretske dobave pri maksimalnoj depresiji na sloj. Na ovaj način moguće je za svaku veličinu depresije tlaka prikazati pripadajući protok na bušotini. Sukladno hidrodinamici, navedeni test služi za egzaktno određivanje prinosa bušotinskog izmjenjivača topline u W/m za zadanu izlaznu temperaturu iz izmjenjivača (EST). Primjena ovakvog inovativnog testa u termogeologiji može dati doprinos razumijevanju ponašanja bušotinskog fluida u sustavima s promjenjivom toplinskom snagom (kao kod dizalica topline inverter tipa), ili ukazati na minimalnu temperaturu bušotinskog fluida koja je se pojavljuje u vršnim periodima toplinskih opterećenja za vrijeme najhladnijih dana u siječnju.

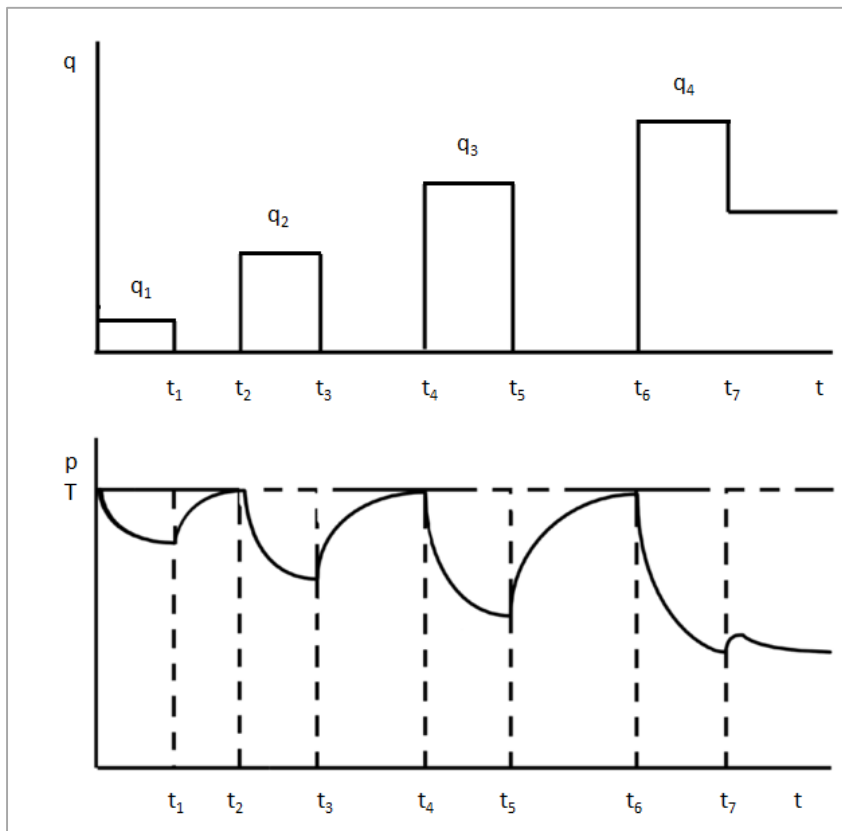


Slika. 3.6.1. Princip izvođenja testa s višestrukim protočnim/toplinskim uvjetima i odziv tlaka i temperature (vlastita grafika).

3.7. Izokronalni test

Kod izokronalnog testa je također cilj određivanje proizvodnih karakteristika bušotina i najčešće se ovakva vrsta testa primjenjuje na plinskim bušotinama. Za razliku od testa protoka za protokom, za pridobivanje podataka nije potrebno pri svakom protočnom uvjetu postići stabiliziran protok, tj. dosezanja granica ležišta (slika 3.7.1.). Test je posebno pogodan za ležišta male propusnosti u kojima je dosezanje granica ležišta nemoguće ili zahtjeva jako dug period mjerenja. Provodi se ostvarivanjem konstantnog protoka i zatvaranjem bušotine dok tlak ne poraste na neku stabilnu ili približno stabilnu vrijednost. Nakon toga se ostvaruje drugi protočni uvjet veći od prvog, ali u istom vremenskom trajanju. Bušotina se zatim opet zatvara do postizanja stabilizirane vrijednosti. Kod zadnjeg perioda ispitivanja trebalo bi nakon zatvaranja bušotini pustiti tlak da postigne ustaljeno stanje ako je to moguće. Ako nije i dalje se može predvidjeti proizvodna karakteristika bušotine, ali sa povećanom mogućnosti pogreške. Za

izokronalni test nužno je imati podatke o dinamičkom tlaku u bušotine prikazane u funkciji vremena za svaki protočni uvjet.



Slika 3.7.1. Princip izvođenja izokronalnog testa s odazivom tlaka/temperature (vlastita grafika)

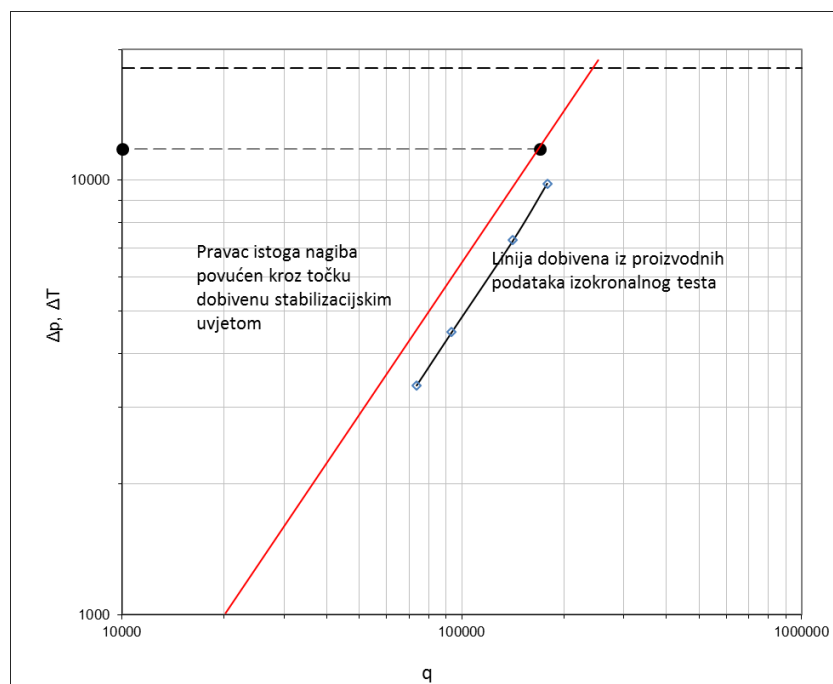
Na slici 3.7.2. vidljive su točke potrebne za interpretaciju podataka dobivenih izokronalnim testom i iz njih proizlazi da:

- protočni uvjeti moraju se odvijati u jednakim vremenskim intervalima, osim posljednjeg intervala koji je dulji radi postizanja stabilizacije tlaka,
- periodi zatvaranja ne moraju biti jednake duljine, nego moraju biti dovoljno dugi da tlak postigne vrijednost jednaku ili približno jednaku stabiliziranom tlaku ,
- za vrijeme posljednjeg perioda poželjno je postići pseudoustaljeno stanje, ali nije nužno za interpretaciju.

Kao i kod testa protoka za protokom, odnosno testa s višestrukim toplinskim uvjetima, za dobivanje vrijednosti maksimalnog teoretskog protoka i proizvodne karakteristike pri bilo kojem dinamičkom tlaku, rješenja je moguće dobiti empirijskom i teoretskom metodom.

Relativno točni podaci mogu se dobiti iz empirijske metode koja će biti primjenjena na test toplinskog odaziva bušotinskog izmjenjivača, i to sljedećim postupkom:

potrebno je povući ravnu liniju kroz točke na logaritamskom grafu zavisnosti tlaka i protočnog uvjeta, za zadanu vrijednost vremena i različite protočne uvjete korištene na testu. Odredi se nagib povučene linije i linija istog nagiba se povlači kroz stabilizacijsku točku na grafu dobivenu iz vrijednosti zadnjeg protočnog uvjeta, prikazano na slici 3.7.2. Dobivena linija predstavlja stabiliziranu proizvodnu karakteristiku.



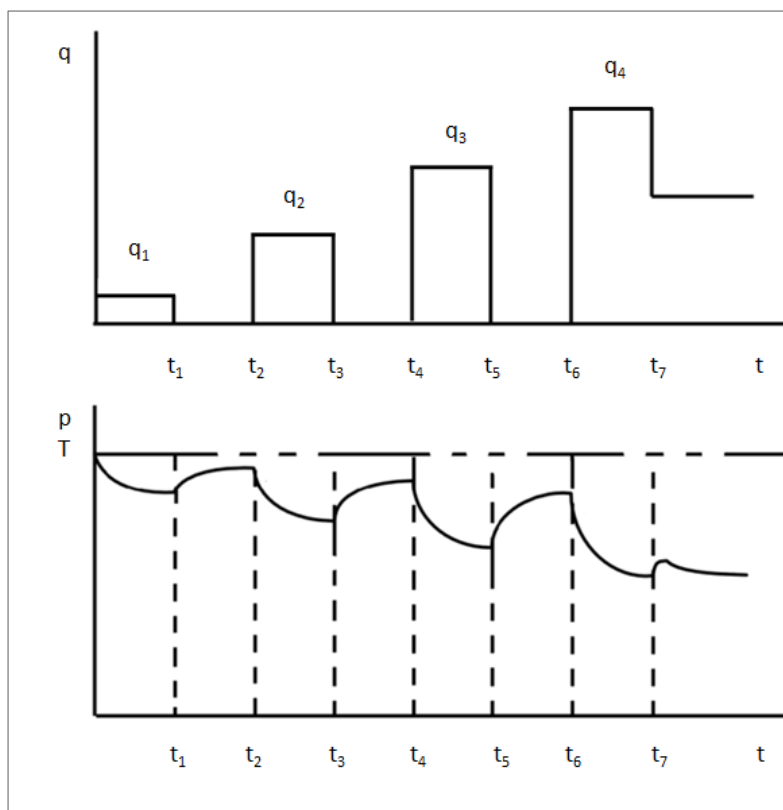
Slika 3.7.2. Princip dobivanja stabilizirane proizvodne karakteristike za izokronalni test (vlastita grafika)

Identičan postupak iz hidrodinamike može se primijeniti i na višestruke toplinske uvjete ispitivanja u termogeologiji. Posljednji, stabilizacijski uvjet treba trajati dovoljno dugo da se postigne ustaljeno stanje širenja toplinskog toka. Dobivene karakteristika različitih toplinskih uvjeta prikazane točkama u logaritamskom mjerilu i povezane linearnom korelacijom dat će vrijednost nagiba uz koji će se povući pravac kroz točku stabilizacijskog uvjeta. Dobiveni pravac predstavlja stabiliziranu karakteristiku pridobivanja/pohrane toplinske snage u tlo.

3.8. Modificirani izokronalni test

Cilj modificiranog izokronalnog testa je isti kao i kod običnog izokronalnog testa. Razlika je u izbjegavanju dugotrajnih perioda u kojima je bušotina zatvorena radi stabilizacije tlaka prije novih protočnih uvjeta. Vremenski periodi u kojima je bušotina zatvorena i oni u kojima se ostvaruju protočni uvjeti su jednakog vremenskog trajanja. Modificirani test je vrsta aproksimacije izokronalnog testa jer uzima da je razlika statičkog i dinamičkog tlaka u svakom n-protočnom uvjetu, jednaka stvarnoj razlici.

Iako je modificirani test tek aproksimacija pravog izokronalnog, njegova primjena je vrlo česta zbog ostvarene uštede vremena i troškova. Interpretacija rezultata se obavlja na isti način kao i kod izokronalnog testa. Izgled zavisnosti razlike tlakova o protočnim uvjetima vidljiv je na slici 3.8.1. Postupak određivanja proizvodne karakteristike identičan je kao kod izokronalnog testa uz empirijsku metodu prikazanu na slici 3.7.2.



Slika 3.8.1. Princip izvođenja modificiranog izokronalnog testa s odazivom tlaka/temperature (vlastita grafika).

4. Rezultati istraživanja

Ispitivanja su provedena na bušotini RGN-1 koja se sastoji od dva koso usmjerena kanala sa otklonom 45°, od kojih je svaki duljine 50 m s ugrađenim koaksijalnim sustavom cijevi bušotinskog izmjenjivača topline. Promjer svakog od kanala iznosi 0,055 m, a kataloški procijenjena toplinska provodljivost tla koje u svom sastavu sadrži pretežno šljunak iznosi $0,04992 \text{ m}^2$, odnosno $0,00208 \text{ m}^2/\text{h}$. Mjerenja su se izvodila u periodu od studenog 2016. do veljače 2017. godine. Platforma korištena za prikaz podataka dobivenih mjerenjima je *MS Excel*



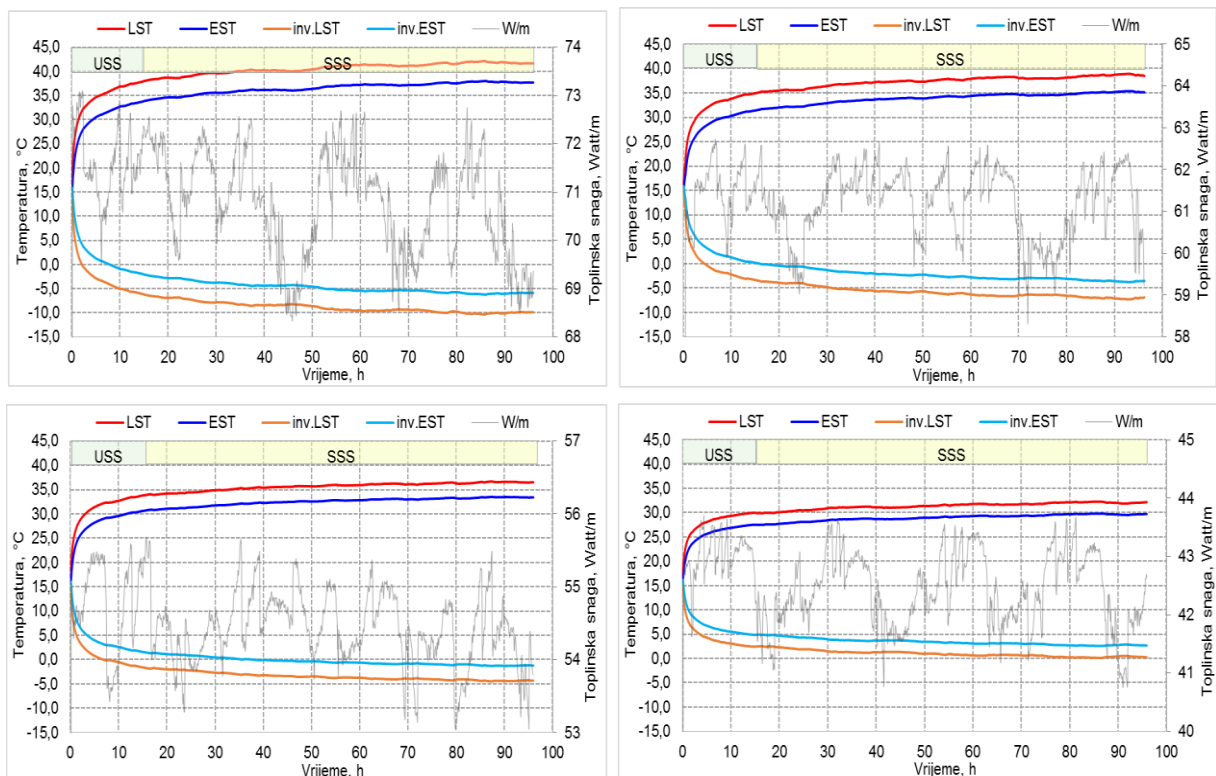
Slika 4.1. Namjenska bušača garnitura pri izradi dvije plitke bušotine od 50m i ugradnja koaksijalnog HDPE izmjenjivača topline (RGN, srpanj 2014.) na kojima je izvršeno mjerenje toplinskog odaziva tla te TRT aparatura u Laboratoriju (vlastite fotografije T.Kurevija i K.Strpić)

4.1. Test odaziva topline (protočni test)

Klasičnom TRT metodom prema postupku opisanom u poglavlju 3.3. dobivena je zavisnost temperature o vremenu za petominutne intervale mjerenja sonde, za svaki od četiri toplinska uvjeta :

- a) 7,1 kW
- b) 6,1 kW
- c) 5,4 kW
- d) 4,2 kW

Navedene snage grijača su prosječne vrijednosti do čijih varijacija je došlo zbog promjena u naponu, ovisno jesu li mjerenja provedena u dnevnim ili noćnim satima. Podaci dobiveni TRT-om smatraju se u praksi kvalitetnima za obradu ako je test trajao barem 36h do 48h (Zervantonakis et.al., 2006). U ovim mjerenjima taj uvjet je ispunjen obzirom da se normiralo ispitno vrijeme za sve opcije u trajanju od 96hr.



Slika 4.1.1. Izmjerene temperature radnog fluida u funkciji vremena za različite narinute toplinske uvjete pri protočnom testu

Testom odaziva topline provodi se pohrana topline u tlo, a krivulja na glavnom grafu zavisnosti temperature radnog fluida s kojeg se prenosi toplinski tok na okolinu i vremena kod svih metoda ispitivanja je prikazana i u inverznom obliku. Tim načinom su prikazani uvjeri stvarnog rada dubinskih izmjenjivača topline koji pridobivaju toplinu iz tla, tj. pothlađuju ga.

Početna temperatura tla vidljiva je iz podataka dobivenih u početnom periodu mjerenja kad je ostvarena cirkulacija pumpe u trajanju od 15 min bez upaljenih grijača. Kod prikazanih ispitivanja ta temperatura iznosi približno 16 °C uz male oscilacije prilikom promjene toplinskih uvjeta čemu su uzrok atmosferski čimbenici.

Varijacije napona strujne mreže uzrokovale su odstupanje od navedenih srednjih vrijednosti toplinske snage grijača pri maksimalnim amplitudama iznose:

Tablica 4.1.1. Utjecaj varijacije napona na prosječnu vrijednost narinute toplinske snage

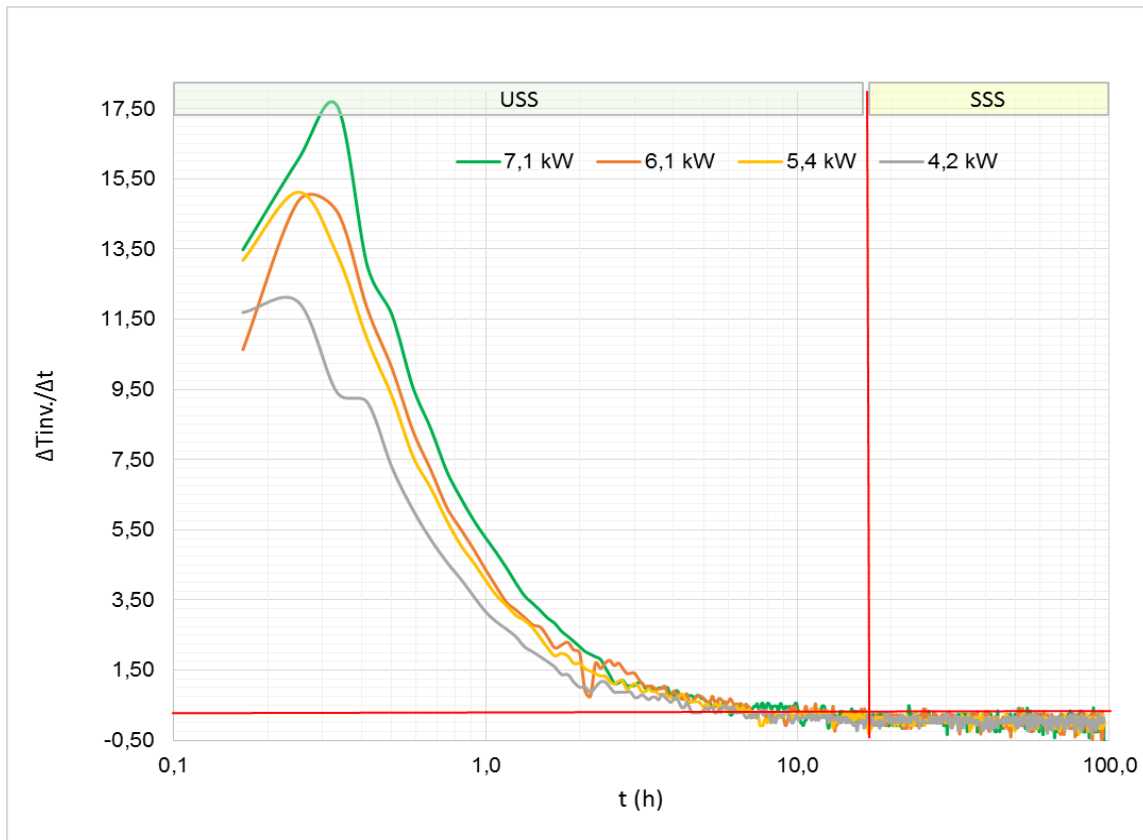
Toplinski uvjet	7,1 kW		6,1 kW		5,4 kW		4,2 kW	
Trajanje mjerenja (h)	96		96,3		96,1		96	
Odstupanje napona	max	min	max	min	max	min	max	min
	+3,8%	-3%	+2,2%	-5%	+2,2%	-2,6%	+2,6%	-4,3%

TRT se smatra uspješno provedenim za daljnju procjenu podataka o svojstvima tla ukoliko se toplinski uvjet održava na barem 95% vrijednosti narinute toplinske snage iz čega slijedi da su provedena mjerenja vjerodostojna za daljnje proračune.

4.1.1. Određivanje vremena početka poluustaljenog stanja

Za određivanje toplinske vodljivosti ključno je najprije odrediti trajanje perioda nakon kojeg će početi poluustaljeno stanje širenja toplinskog toka (*engl. semi-steady state*), tj trajanje prijelaznog (*engl. unsteady state*) perioda. Uobičajena metoda je pomoću formule 3.3.13. koja u nazivniku sadrži vrijednost toplinske provodljivosti, α , koja je određena prema sastavu tla iz podataka o bušenju. S obzirom da se ne radi o egzaktnoj vrijednosti, ova metoda određivanja trajanja prijelaznog perioda uzrokuje grešku i do 20%. Mnogo preciznija metoda je upotreba derivacijske krivulje koja se često koristi u naftnoj struci. Metoda je inovativno primijenjena u

ovom radu i za slučaj promijene temperature u vremenu u odnosu na proteklo vrijeme za svaki od toplinskih uvjeta, s približnom vrijednosti od 15h nakon kojih promjena temperature u vremenu postaje linearna (slika 4.1.2.) , tj nakon približno 15h sati je promjena temperature zanemarivih vrijednosti (odabrano 0,25°C/10min kao relevantan podatak) i može se zaključiti da je uspostavljen period poluustaljenog širenja toplinskog toka.

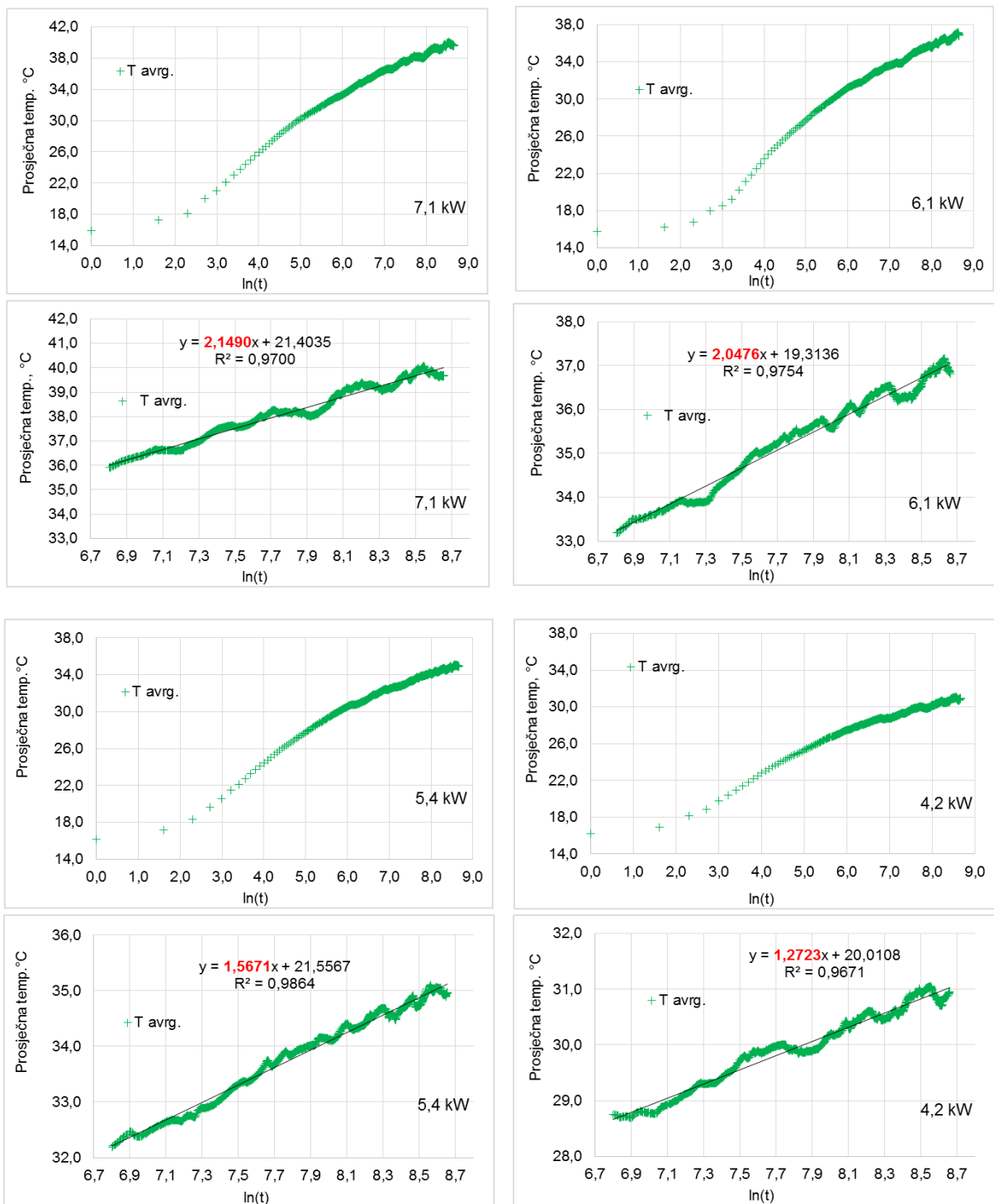


Slika 4.1.2. Derivacijska krivulja za određivanje poluustaljenog perioda kod protočnog testa

Vrijednost funkcije prirodnog logaritma za dobivenih 15h iz metode derivacijske krivulje

$$15h = 900\text{min} \quad \ln(900) = 6,8 \text{ .}$$

Dio mjerenja u neustaljenom stanju se zanemaruje i u obzir uzima ponašanje temperature fluida u poluustaljenom stanju iz kojeg se određuje vrijednost toplinskih vodljivosti za svaki od četiri toplinska uvjeta. U odabranom području je pomoću *MS Excel* funkcije *Trendline* određena linearna korelacija među točkama. Dobiven je pravac čiji se nagib, κ , koji na slici (4.1.2.) označen crvenom bojom, uvrštava u jednadžbu 3.3.13.



Slika 4.1.3. Zavisnost prosječne temperature o vremenu u funkciji prirodnog logaritma za cijeli period mjerenja i za određeni poluustaljeni period

Tablica 4.1.2. Toplinska vodljivost izračunata za svaki od četiri toplinska uvjeta

Toplinski uvjet	7,1 kW	6,1 kW	5,4 kW	4,2 kW
Nagib trendlinea, κ	2,1490	2,0476	1,5671	1,2723
λ (W/m°C)	2,62	2,38	2,72	2,65

Kako bi se prikazala devijacija u proračunskom dijelu određivanja toplinskih vodljivosti provedena je dodatna analiza na manjim intervalima s razmakom od 12h za vrijeme trajanja poluustaljenog stanja, prethodno navedenim postupkom za svaki toplinski uvjet. Rezultati dobivenih toplinskih vodljivosti prikazani su u tablici 4.1.3.

Tablica 4.1.3. Izračunate vrijednosti toplinskih vrijednosti za 12-satne intervale u poluustaljenom stanju širenja toplinskog toka

	Vremenski interval	W avrg.	Nagib trendline	λ (W/m°C)
7,1 kW	15-36 h	7136	2,3725	2,391
	36-48 h	7090	2,0649	2,732
	48-60 h	7099	2,2122	2,554
	60-72h	7087	2,1851	2,581
	72-84h	7086	2,1928	2,572
	84-96h	7073	2,1476	2,621
6,1 kW	15-36 h	6109	2,2609	2,150
	36-48 h	6133	2,3635	2,065
	48-60 h	6126	2,2058	2,210
	60-72h	6130	2,1958	2,222
	72-84h	6114	2,0352	2,391
	84-96h	6119	2,0476	2,378
5,4 kW	15-36 h	5442	1,6480	2,628
	36-48 h	5457	1,7584	2,469
	48-60 h	5452	1,6927	2,563
	60-72h	5452	1,6498	2,630
	72-84h	5445	1,5860	2,732
	84-96h	5358	1,5671	2,721

4,2kW	15-36 h	4243	1,6414	2,057
	36-48 h	4230	1,3077	2,574
	48-60 h	4241	1,3132	2,570
	60-72h	4239	1,2790	2,637
	72-84h	4246	1,3974	2,585
	84-96h	4240	1,2723	2,652

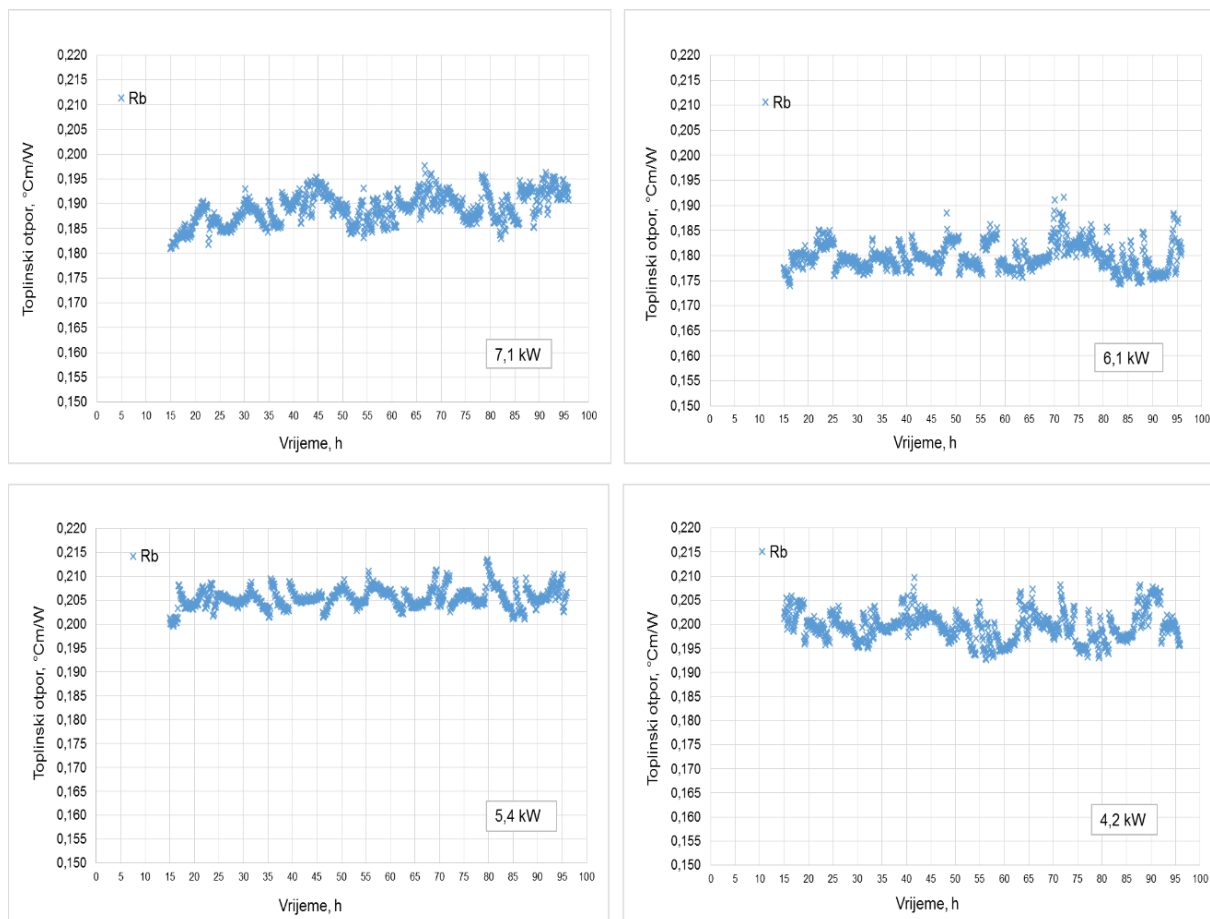
Iz prikazanih rezultata vidljiv je trend porasta vrijednosti toplinske vodljivosti s duljim intervalima zagrijavanja tla. Varijacije u vrijednostima kod različitih toplinskih uvjeta nisu zanemarive, također vidi se jasan utjecaj fluktuacija toplinske snage na dobivene vrijednosti, ovisno o tome jesu li mjerenja provedena u dnevnim ili noćnim satima (Javed, S., 2011).

4.1.2. Toplinski otpori

Toplinski otpor izračunat je kombiniranjem izraza 3.3.3. i 3.3.6. te se može rastaviti na komponentu materijala cijevi u koaksijalnom sustavu koji je izolator između prijenosa topline radnog fluida i tla, te komponentu materijala korištenog za popunjavanje zazora između cijevi i stjenki. Mjerenjem dobivene vrijednosti pokazuju značajan toplinski otpor čemu je glavni uzrok popunjavanje bušotine sa smjesom bentonita koji ima slabu toplinsku vodljivost, približno $1\text{W/m}^\circ\text{C}$.

Tablica 4.1.4. Prosječne vrijednosti toplinskih otpora za svaki od toplinskih uvjeta

Toplinski uvjet	7,1 kW	6,1 kW	5,4 kW	4,2 kW
Rb avrg. ($^\circ\text{Cm/W}$)	0,189	0,180	0,206	0,200



Slika 4.1.4. Toplinski otpori sustava za svaki od provedenih toplinskih uvjeta

Skin faktor u obliku bušotinskog toplinskog otpora, izračunat je prema izrazu 3.3.6., a manifestira se kao razlika temperature fluida u cijevima i temperature tla. Ta razlika temperatura prikazana je u tablici 4.1.4. za svaki od provedenih toplinskih uvjeta.

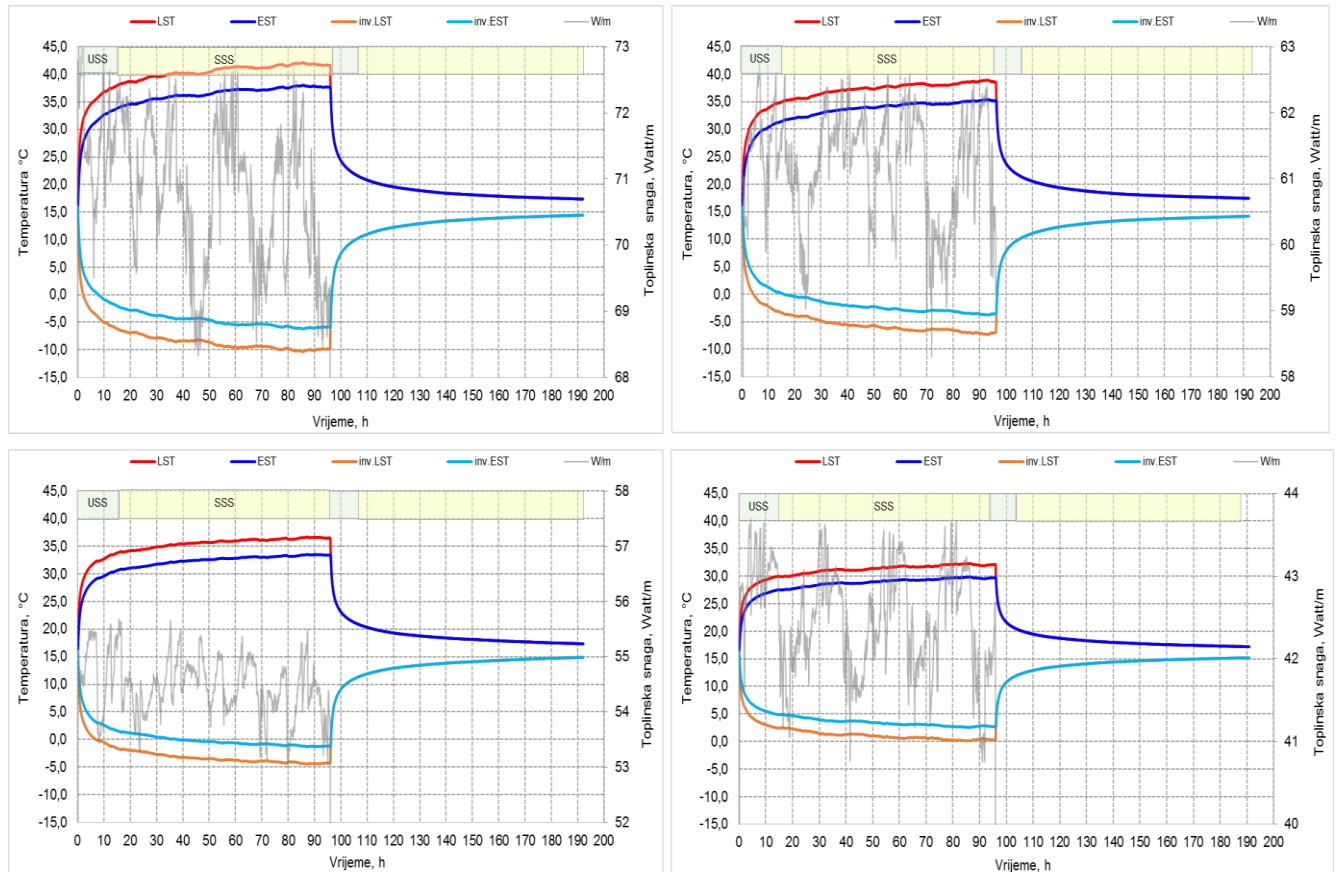
Tablica 4.1.5. Vrijednosti skin faktora za svaki od toplinskih uvjeta

Toplinski uvjet	7,1 kW	6,1 kW	5,4 kW	4,2 kW
Skin faktor	3,060	2,742	3,453	3,307
$\Delta T_{\text{skin}} = Rq * q'$	13,166°C	11,004°C	11,002°C	8,448°C

Iz tablice 4.1.5. je vidljiv gotovo ujednačen rast skin faktora kao mjerilo temperaturnog oštećenja pribušotinske zone. Rast ΔT_{skin} uz porast snage toplinskog uvjeta odgovara ponašanju pada tlaka za čije su ponašanje formule primarno namijenjene, a koji raste s povećanjem protočnih količina.

4.2. Rezultati testa oporavka temperature (analogno testu porasta tlaka)

Nakon svakog toplinskog uvjeta proveden je test oporavka temperature, tj. prestanak zagrijavanja tla uz mjerenje vremena povrata temperature prema početnim vrijednostima, takozvani test oporavka temperature opisan u poglavlju 3.4. Izgled dobivenih krivulja odnosa temperature i vremena prikazan je na slici 4.2.1.



Slika 4.2.1. Izmjerene temperature radnog fluida u funkciji vremena za različite narinute toplinske uvjete pri protočnom testu i testu oporavka temperature

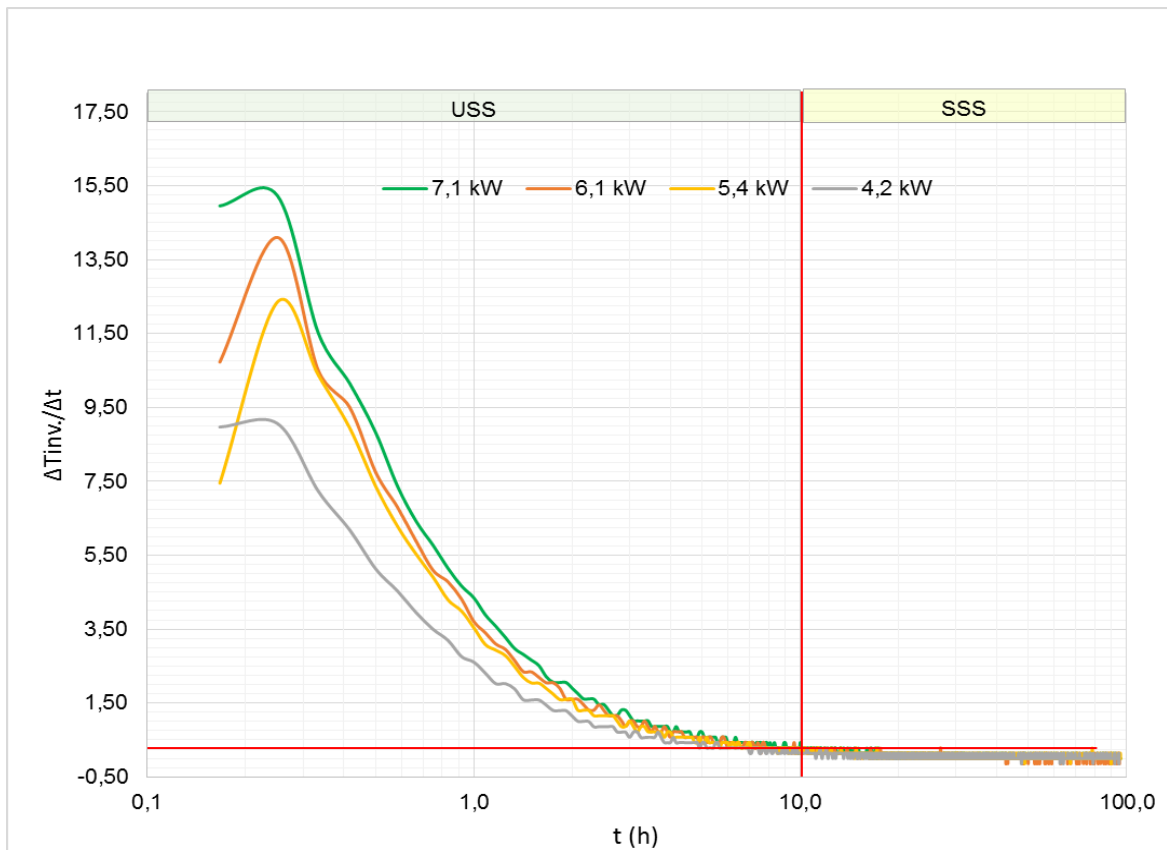
Test se provodio u intervalu koji je trajao približno koliko i mjerenje u TRT-u. Vrijednosti ustaljene temperature pri završetku mjerenja prikazane su u tablici 4.2.1.

Tablica 4.2.1. Ponašanje temperature za vrijeme testa oporavka

Toplinski uvjet	7,1 kW	6,1 kW	5,4 kW	4,2 kW
Trajanje mjerenja (h)	94,8	96,0	95,6	96,0
Završna temperatura toplinskog uvjeta	37,7°C	35,08°C	33,42°C	29,74°C
Završna temperatura oporavka	17,2 °C	17,32 °C	17,44°C	17,39°C

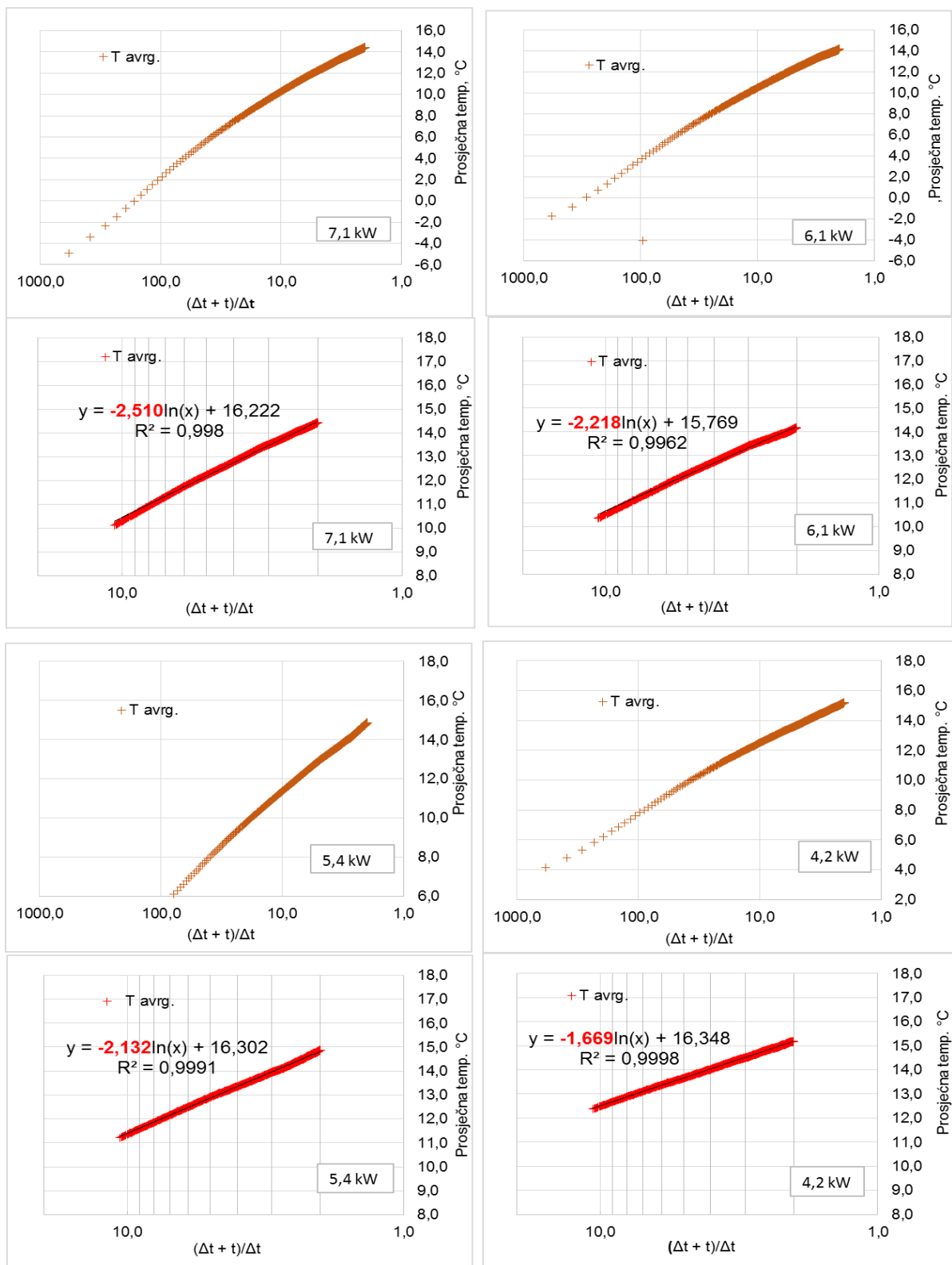
4.2.1. Rezultati primijenjene Hornerove metode

Proveden je postupak opisan u poglavlju 3.4., a koji slijedi korake u razvoju Hornerove metode. Dobiveni su rezultati toplinske vodljivosti i skin faktora. Ovaj put su za proračun korištene vrijednosti inverzne krivulje tijekom testa oporavka temperature. Navedena krivulja u ovom slučaju bolje odgovara za primjenu Hornerove metode, jer opisuje porast temperature u vremenu analogno originalnom korištenju metode za opisivanje porasta tlaka u vremenu. Prvo je određena derivacijska krivulja za provedeno mjerenje temperature projicirano u inverzne vrijednosti, prikazano slikom 4.2.2. Vidljivo je da su u ovom slučaju devijacije snimljenih podataka puno manje nego kod slike 4.1.2. jer su grijači ugašeni i odvija se samo cirkulacija fluida, tako da nema utjecaja fluktuacija napona strujne mreže (Javed, S., 2011).



Slika 4.2.2. Derivacijska krivulja za određivanje poluustaljenog perioda kod testa oporavka

Vidljivo je da već nakon 10h temperatura prelazi u poluustaljeno stanje kod svih provedenih toplinskih uvjeta, a odabrana je vrijednost od $0,25^{\circ}\text{C}/10\text{min}$ kao relevantan podatak. Taj podatak nužan je kao i kod protočnog testa za određivanje nagiba iz linearne korelacije točaka i izračun toplinske vodljivosti preko Hornerove metode.



Slika 4.2.3. Snimljeni podaci odnosa promjene temperature u vremenu u funkciji prirodnog logaritma za poluustaljeno stanje pri testu oporavka temperature

Dobiveni nagibi pravca dobivenog iz linearne korelacije među točkama označeni su crvenom bojom na slici 4.2.3., a rezultati proračuna toplinske vodljivosti, λ , iz dobivenih vrijednosti preko izraza 3.3.13. prikazani su u tablici 4.2.2. Potrebno je primijetiti da su na slici logaritamska mjerila padajuća s lijeve na desnu stranu, a prema pravilu iz Hornerove metode poglavlja 3.4. Dobiveni nagibi krivulja uvijek se uzimaju kao apsolutna vrijednost u nastavku proračuna, tj. uvijek su pozitivni.

Tablica 4.2.2. Vrijednosti toplinske vodljivosti iz primijenjene Hornerove metode za inverznu krivulju testa oporavka temperature

Toplinski uvjet	7,1, kW	6,1 kW	5,4 kW	4,2 kW
Nagib Trendlinea, κ	2,510	2,218	2,132	1,669
λ (W/m°C)	2,250	2,200	2,034	2,027

Skin faktor izračunat preko izraza 3.4.11., koji slijedi iz razvoja Hornerove metode, također uzima u obzir pozitivnu vrijednost nagiba dobivenih iz linearne korelacije točaka. Razlika temperature radnog fluida i tla koja proizlazi iz skin zone uzrokovane toplinskim otporom materijala cijevi i materijala kojim je bušotina zapunjena, navedena je u tablici 4.2.3.

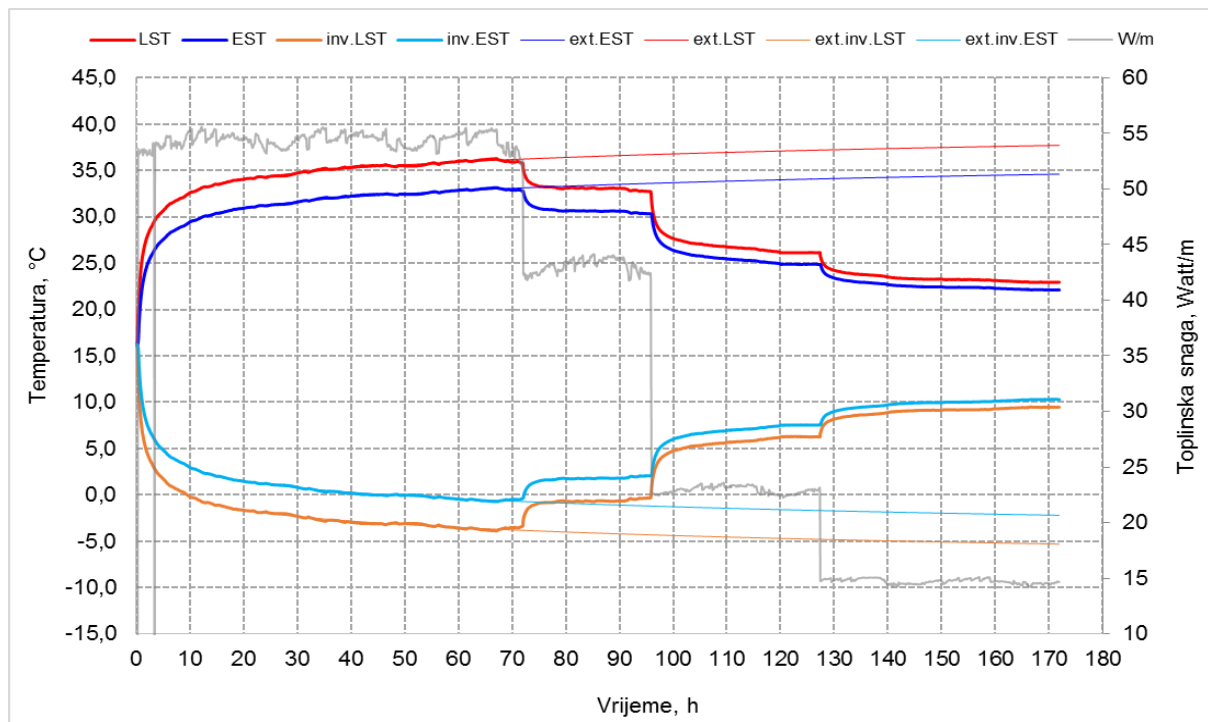
Tablica 4.2.3. Vrijednosti skin faktora za svaki od toplinskih uvjeta dobivene Hornerovom metodom

Toplinski uvjet	7,1, kW	6,1 kW	5,4 kW	4,2 kW
Skin faktor	2,36	2,33	2,07	2,06
$\Delta T_{\text{skin}} = Rb \cdot q$	11,9°C	10,3°C	8,8°C	6,9°C

U usporedbi s rezultatima skina faktora dobivenima iz klasičnog TRT-a, uz primjenu Hornerove metode, postoji pravilniji trend rasta skin faktora s većom snagom toplinskih uvjeta, a zbog izbjegavanja utjecaja fluktuacija napona strujne mreže i varijabilnih vrijednosti toplinske vodljivosti tla.

4.3. Test s višestrukim toplinskim uvjetima (step test)

Prvi provedeni uvjet u trajanju od 72h uz toplinski uvjet 5,4 kW, identičan je modelu klasičnog testa odaziva topline i iz njega može biti određena toplinska vodljivost. Jednadžbom krivulje iz funkcije *Trendline* uvjet je proširen (*engl. extended*) do vremenske vrijednosti od 172h, prikazano na slici 4.3.1



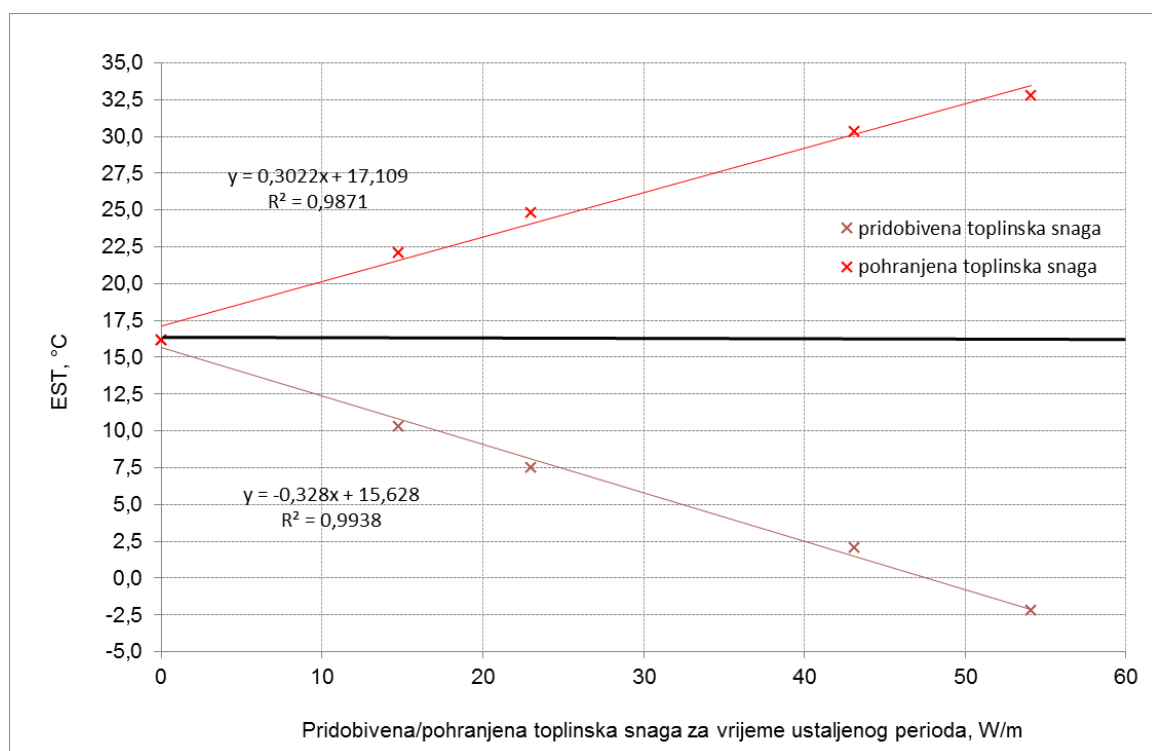
Slika 4.3.1. Odnos temperature radnog fluida i vremena za različite toplinske uvjete testa s višestrukim toplinskim uvjetima

Na slici 4.3.1. su prikazana i ostala tri uvjeta, od kojih je svaki idući proveden uz manju narintu toplinsku snagu i ima ulogu i testa oporavka temperature. Svaki od uvjeta je trajao dovoljno dugo da se postigne ustaljeno stanje ponašanja temperature potrebno za konačno određivanje optimalnih radnih uvjeta izmjenjivača topline, a karakteristike svakog od uvjeta prikazane su u tablici 4.3.1. Mogućnosti pridobivanja ili pohrane topline za ustaljeno stanje širenje topline mogu se odrediti stavljanjem u odnos EST i pridobivene/pohranjene topline za svaki od uvjeta (slika 4.3.2.). Na dijagramu prikazanom na slici dodan je uvjet inicijalnog cirkuliranja pumpe bez upaljenih grijača iz kojeg je izmjerena početna temperatura tla.

Tablica 4.3.1. Karakteristike provedenih toplinskih uvjeta za test s višestrukim toplinskim uvjetima

Toplinski uvjet	1.	1.*	2.	3.	4.
Trajanje intervala	72 h	172 h	23,8 h	31,4 h	45,7 h
Toplinski uvjet , W avrg.	5407	5407	4310	2296	1473
Toplinski uvjet po jedinici duljine, W/m	54,1	54,1	43,1	32,0	14,7
Predana toplinska snaga kWh	390,0	929,6	140,8	72,3	65,7

*produljeni prvi uvjet

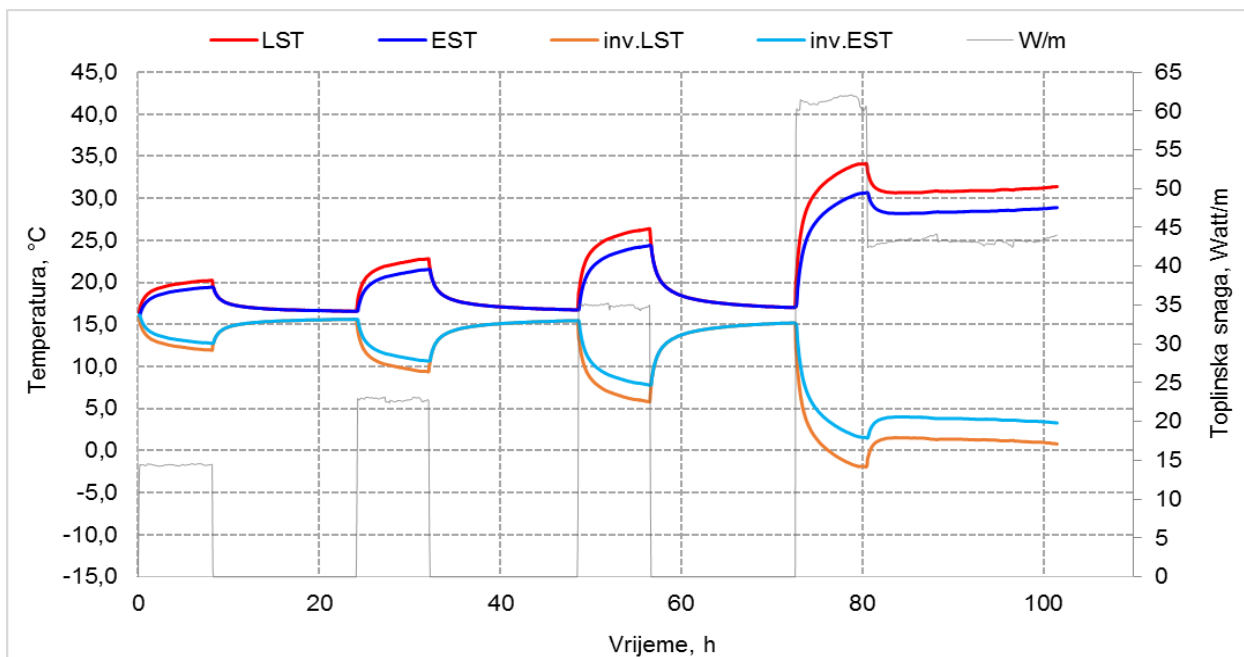


Slika 4.3.2. Mogućnosti pridobivanja i pohrane topline u tlo za vrijeme ustaljenog perioda širenja topline

Iz dijagrama na slici 4.3.2. moguće je dimenzionirati sustav izmjenjivača topline s optimalnim radnim uvjetima. Na primjer, za EST radnog fluida 0°C, što je temperatura za koju se provode standardni testovi dizalica topline pri normi EN14511, moguće je u ustaljenom periodu širenja topline pridobivati otprilike 47 W/m toplinske snage iz tla, no bez daljnjeg pothlađivanja tla u funkciji vremena. Također, sustav je moguće dimenzionirati i na radne uvjete pri EST nižoj od 0°C, ali uz dodavanje adekvatne količine glikola u otopinu radnog fluida radi snižavanja točke ledišta (ASHRAE Handbook, 2007).

4.4. Izokronalni test

U skladu s metodom opisanom u poglavlju 3.7. proveden je izokronalni test sa četiri toplinska uvjeta od kojih je svaki trajao po 8h, uz stabilizacijski uvjet koji je trajao minimalno 24h, dok je ukupno trajanje provedenog testa 104,6h. Između svakog od toplinskih uvjeta, proveden je test oporavka i temperatura se oporavljala prema približno stabilnim vrijednostima bliskim početnoj temperaturi 16,2 °C.



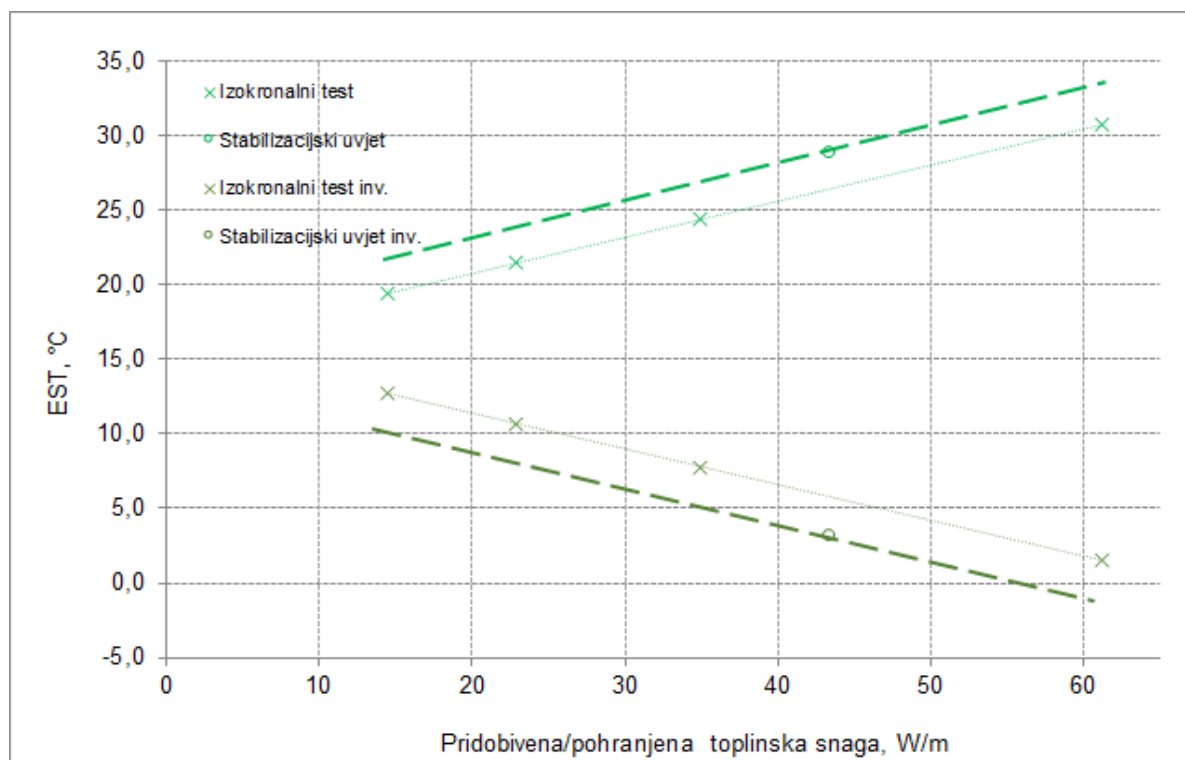
Slika 4.4.1. Odnos temperature radnog fluida i vremena za različite toplinske uvjete kod izokronalnog testa

Posljednji korak mjerenja u kojem bi radi točnijeg proračuna, temperatura trebala postići poluustaljeno stanje, proveden je pod toplinskim uvjetom manje snage od prethodnog. U slučaju da je zadnji mjeren s ugašenim grijačima i oporavkom temperature prema statičkim vrijednostima, to bi zahtijevalo puno dulje mjerenje. Ovim načinom i dalje je moguće provesti postupak određivanja mogućnosti pohrane i pridobivanja toplinske snage iz tla (slika 4.4.2). Karakteristike svakog toplinskih uvjeta prikazane su u tablici 4.4.1.

Tablica 4.4.1. Karakteristike provedenih toplinskih uvjeta za izokronalni test

Toplinski uvjet	1.	2.	3.	4.	5.*
Trajanje intervala	8h	8h	8h	8h	24h
Toplinski uvjet, W avrg.	1441	2284	3490	6118	4330
Toplinski uvjet po jedini duljine, W/m	14,4	22,8	34,9	61,2	43,3
Predana toplinska snaga, kWh	11,7	18,3	18,1	27,6	48,4

* stabilizacijski toplinski uvjet



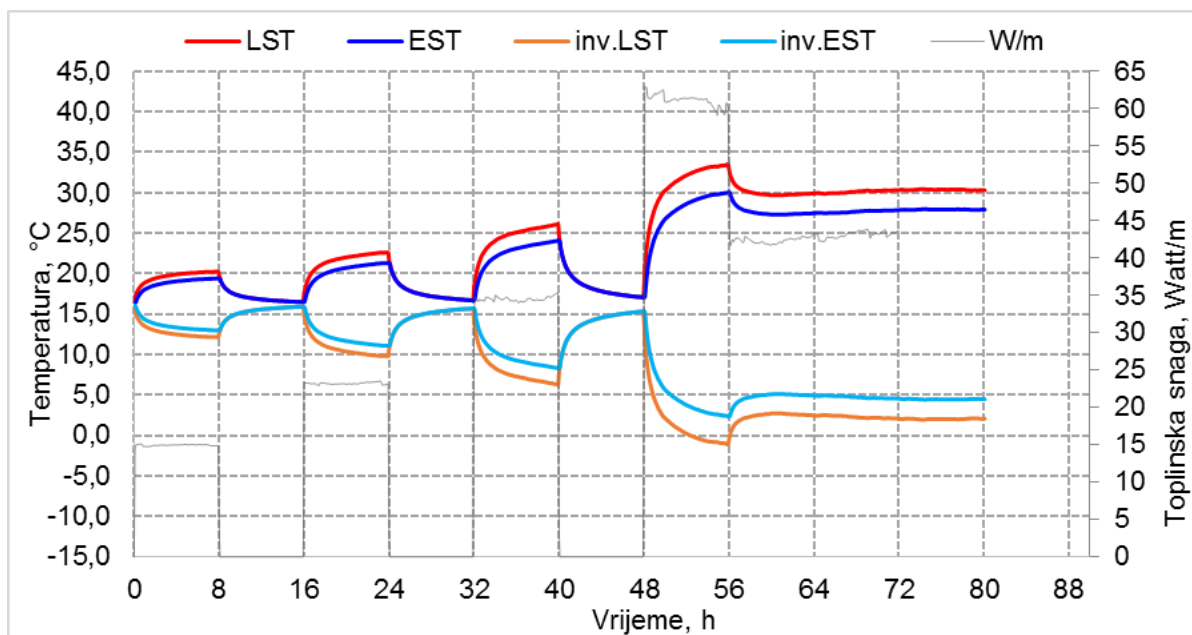
Slika 4.4.2. Mogućnosti pridobivanja i pohrane topline u tlo dobivene izokronalnim testom

Na dijagramu prikazanom na slici 4.4.2. prikazan je odnos toplinske snage svakog od toplinskih uvjeta i odgovarajuće prosječne EST za vrijeme trajanja toplinskog uvjeta. Kratica *inv.* u legendi dijagrama označava vrijednosti dobivene inverznom krivuljom sa slike 4.4.1. i na dijagramu te oznake opisuju područje mogućeg pridobivanja topline iz tla. Primijenjena je funkcija *Trendline*, čiji rezultat je pravac. Iz formule pravca vidljivo je kako on idealno pogađa točke dobivene iz step uvjeta provedenog izokronalnog testa. S obzirom da je prema metodi opisanoj u poglavlju 3.7., ustaljeno stanje širenja topline postignuto samo u posljednjem, stabilizacijskom uvjetu,

moguće je kroz točku odnosa toplinske snage i prosječne EST za taj uvjet povući liniju čiji je nagib jednak nagibu trenda pravca. Dobivena linija predstavlja EST, koji odgovara pridobivanju ili pohrani topline u tlo pri uvjetima poluustaljenog širenja topline. Ovim načinom moguće je odrediti optimalne uvjete rada izmjenjivača topline bez nepotrebnog pothlađivanja tla (Martin et.al, 2002). Također ono što čini metodu praktičnom je smanjenje potrebnog vremena provođenja testa što je prednost i iz ekonomskog pogleda, no to nosi i veće rizike od pogreške.

4.5. Modificirani izokronalni test

Modificirani izokronalni step-test je aproksimacija klasičnog izokronalnog testa u kojoj su djelovanja toplinskih step-uvjeta i perioda oporavka jednake duljine. Konkretno u ovom istraživanju svaki od perioda je trajao 8h, uz stabilizacijski uvjet od 24,5h i ukupno trajanje provedenog testa je 80,5h (slika 4.5.1.). Metoda interpretacije podataka dobivenih mjerenjem opisana je u poglavlju 3.8.



Slika 4.5.1. Odnos temperature radnog fluida i vremena za različite toplinske uvjete kod modificiranog izokronalnog testa

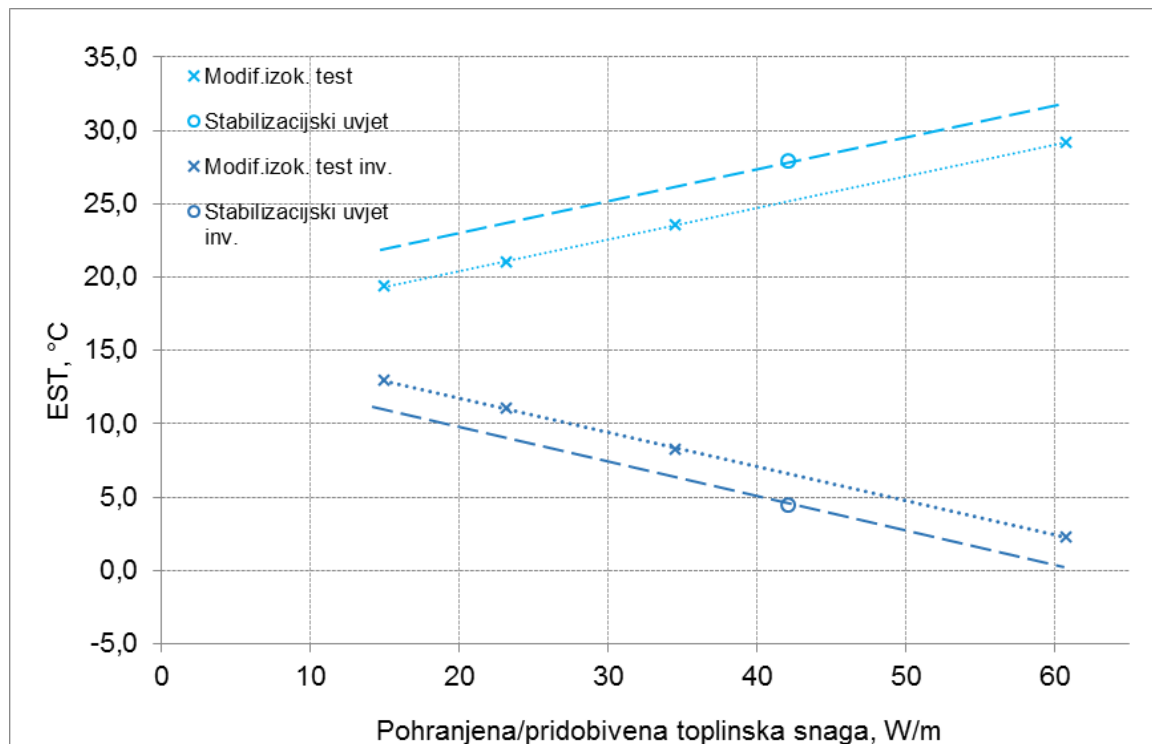
Provedeni toplinski uvjeti navedeni su u tablici 4.5.1. i uz manja odstupanja odgovaraju toplinskim uvjetima provedenim kod izokronalnog testa što će omogućiti kvalitetniju usporedbu dobivenih podataka.

Tablica 4.5.1. Karakteristike provedenih toplinskih uvjeta za modificirani izokronalni test

Toplinski uvjet	1.	2.	3.	4.	5.*
Trajanje intervala	8h	8h	8h	8h	24,5h
Toplinski uvjet, W avrg.	1495	2322	3449	6080	4234
Toplinska snaga po jedinici duljine, W/m	14,9	23,2	34,5	60,8	42,8
Pohranjena toplinska energija, kWh	11,8	18,6	18,6	27,6	48,6

* stabilizacijski toplinski uvjet

Stavljanjem u odnos prosječne EST postignute za vrijeme svakog od toplinskih uvjeta određen je dijagram sa slike 4.5.2., a postupak interpretacije dobivenih podataka isti je kao kod izokronalnog testa.

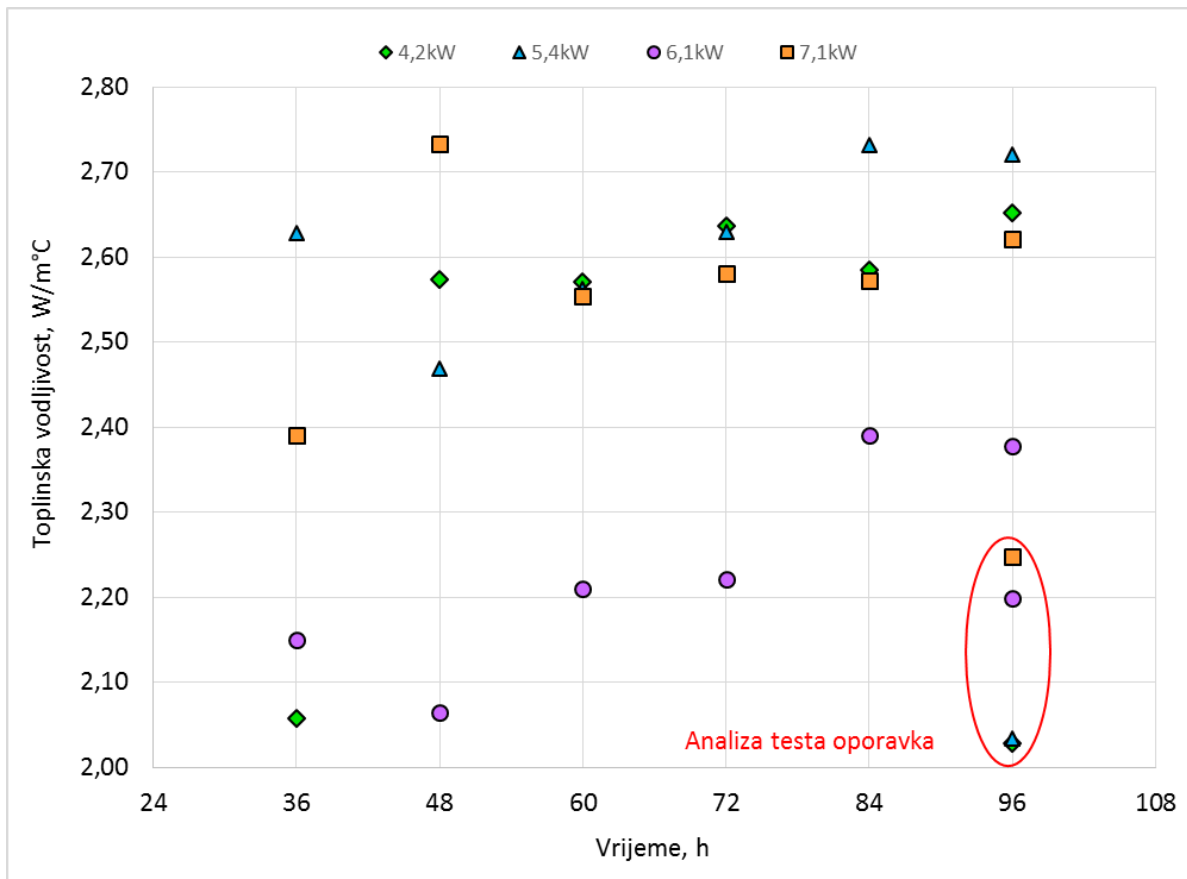


Slika 4.5.2. Mogućnosti pohrane/ pridobivanja toplinske snage u tlo dobivene iz modificiranog izokronalnog testa

Kao i kod dijagrama na kojem su mogućnosti pridobivanja/pohrane toplinske snage iz izokronalnog testa i ovdje linearna korelacija točaka prolazi gotovo idealno kroz dobivene točke odnosa EST i toplinskih uvjeta. Za vrijeme gašenja grijača nije postignuto približno stabilno stanje temperature. Skraćeno vrijeme provedbe testa veoma je pogodno za terensku upotrebu i može poslužiti kao početna aproksimacija za određivanje prinosa toplinske snage iz bušotinskih izmjenjivača.

5. Zaključna razmatranja rezultata i diskusija

Mogućnosti prikazane nove metode testa odaziva topline pokazuju da on nije nužno primjenjiv samo za određivanje toplinskih svojstava tla. Podaci dobiveni iz mjerenja mogu pomoći u optimalnom dizajniranju rada bušotinskog izmjenjivača topline. Nerijetko su takvi sustavi nepotrebno predimenzionirani kao faktor sigurnosti ili poddimenzionirani te prinos iz sustava neće zadovoljavati planirane kapacitete. U oba slučaja to se negativno održava na ekonomsku isplativost samog projekta. Iz tog pogleda, dugotrajna i napredna mjerenja na lokacijama se isplate s obzirom da će osigurati dugotrajnost sustava i planirane pridobivene količine toplinske snage za vrijeme trajanja hladnijeg perioda u godini, ili kapacitete za njeno pohranjivanje za vrijeme ljetnih mjeseci. Na slici 5.1. prikazan je dijagram sa dobivenim vrijednostima toplinske vodljivosti za svaki od provedenih toplinskih uvjeta klasičnim testom odaziva topline tla te vrijednosti dobivene testom oporavka temperature uz primjenu Hornerove metode. U testu oporavka nema utjecaja fluktuacija naponske mreže na širenje topline i dobivena toplinska vodljivost ovisi isključivo o svojstvima tla. Vrijednosti dobivene iz testa oporavka obuhvaćene su crvenim okvirom na dijagramu. Iz vrijednosti dobivenih klasičnim TRT-om vidljiv je utjecaj većih toplinskih snaga grijača na porast dobivenih vrijednosti toplinske vodljivosti. Vrijednosti toplinske vodljivosti dobivene iz testa oporavka Hornerovom metodom za najdulji period, a time i najtočniji period mjerenja, od 96 h kod primijenjenih toplinskih uvjeta variraju između 2,03 i 2,25 W/m°C. Za isti period mjerenja, vrijednosti dobivene iz klasičnog testa odaziva topline variraju u puno većem spektru, od 2,38 do 2,72 W/m°C. Vrijednosti toplinske vodljivosti dobivene iz testa odaziva topline ovise o brojnim parametrima poput fluktuacija napona u strujnoj mreži, narinutoj toplinskoj snazi i varijabilnom utjecaju skin efekta. Izbjegavanje utjecaja tih parametara upotrebom Hornerove metode omogućuje preciznija mjerenja, a time i dimenzioniranja samog sustava bušotinskih izmjenjivača topline.

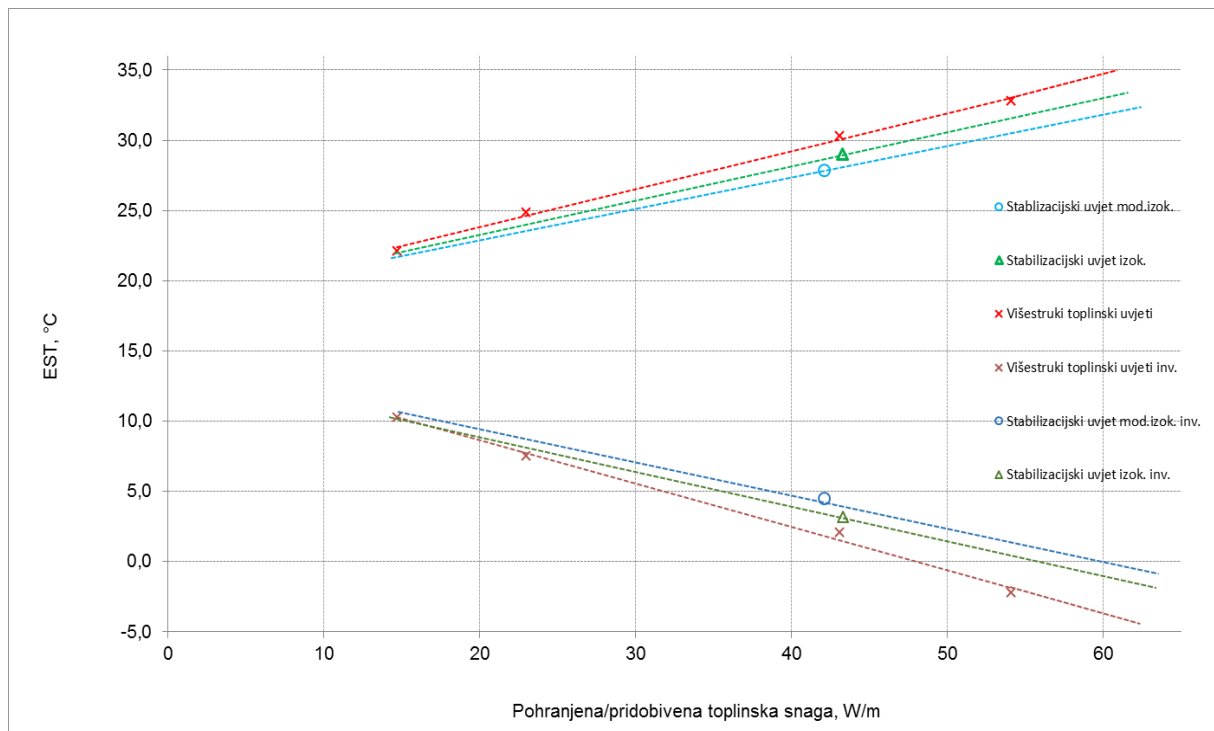


Slika 5.1. Pregled vrijednosti toplinske vodljivosti dobivenih iz testa odaziva topline i testa oporavka

Pregled svih testova s višestrukim toplinskim uvjetima, opisanima u poglavljima 4.3. 4.4. i 4.5. i odgovarajuće mogućnosti pridobivanja i pohrane toplinske snage u tlo, prikazan je na slici 5.2. Temeljem hipoteze opisane u poglavlju 2. pomoću ovih testova može se utvrditi EST za predviđene prinose toplinske snage iz tla ili pohranu u tlo. Iz prikazanog pregleda vidljivo je da:

- test višestrukih toplinskih uvjeta daje najtočnije podatke o kapacitetu ispitivane lokacije zbog duljine provođenja testa i postizanja ustaljenog stanja širenja toplinskog toka za vrijeme perioda oporavka;
- izokronalni test, praktičan za primjenu zbog kraćeg potrebnog vremena izvođenja, pokazuje odstupanja od testa višestrukih toplinskih uvjeta koja se povećavaju kod većih prinosa;
- putanja mogućih prinosa toplinske snage za modificirani izokronalni test slijedi putanju izokronalnog testa uz nešto veća odstupanja od testa višestrukih toplinskih uvjeta. Iako je modificirani izokronalni test najpraktičniji za terensku upotrebu zbog najkraćeg potrebnog

vremena izvođenja, pri većim prinosima daje pogrešku od 15% s obzirom na vrijednosti moguće pohrane/pridobivanja topline dobivene testom s višestrukim toplinskim uvjetima.



Slika 5.2. Pregled mogućnosti pridobivanja/pohrane topline za provedene step-testove

Uvođenjem inovativnog principa proširenih step testova toplinskog odaziva tla u praktičnu primjenu može omogućiti projektantima geotermalnih sustava precizniji uvod u ponašanje bušotinskog fluida pri vršnim opterećenjima pridobivanja ili pohranjivanja toplinske energije iz tla ili u tlo. Također, prikupljanje podataka budućih mjerenja step testova na tipskim bušotinskim izmjenjivačima topline na nizu lokacija u Republici Hrvatskoj može povezati toplinske prinose u funkciji različitih tipova tla. Na ovaj način, moguće bi bilo napraviti bazu podataka koja s visokom pouzdanošću može investitorima omogućiti inicijalne informacije o realnom prinosu bušotinskog geotermalnog polja nužne za razvoj tehnokonomskih parametara određenog projekta.

Reference

1. Carslaw, H. S., & Jaeger, J. C., Conduction of heat in solids. Oxford, UK:Claremore Press, 1946
2. Lee, J., Well Testing, Society of Petroleum Engineers of AIME, SPE, 1982
3. Lee, J., Rollins, J., Spivey, J. Pressure Transient Testing, SPE vol9, 2003
4. Gehlin, S., Thermal Response test: method development and evaluation, Luleå University of Technology [Ph.D dissertation], 2002.
5. Matthews, C.S., Russell D.G, Pressure Buildup and Flow Tests in Wells, Society of Petroleum Engineers of AIME, SPE, 1967
6. Stewart G., Well Test Design & Analysis, PennWell Corporation, Tulsa, Oklahoma, 2011
7. Narasimhan, T.N., Fourier's heat conduction equation: history, influence and connections, Geophysics, 37, pp. 151-172, 1999
8. Kutasov, I.M., Epplebaum, L.V., Pressure and Temperature Well Testing, CRC Press by Taylor and Francis Group, 2016
9. Eskilson, P., Thermal Analysis of Heat Extraction Boreholes, [Ph.D dissertation], Department of Technical Physics, University of Lund, Sweden, 1987
10. Witte, H.J.L., Geothermal Response Test with heat-extraction and heat-injection application in research and design of Geothermal Ground Heat Exchangers, Europaischer Workshop über Geothermische response test, EPFL Lausanne, 2001
11. Zeng, H.V., Diao, N.R., Fang Z.H., A finite line-source model for boreholes in geothermal heat exchangers, Heat Transfer – Asian research, 31, pp 558-567, 2002
12. Zervantonakis, I., Reuss, M., Quality requirements of thermal response test, Bavarian Center for Applied Energy Research, 2006
13. ASHRAE Handbook – HVAC Applications. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and AirConditioning Engineers, Inc. 2007
14. Martin, C.A., Kavanaugh S.P., Ground thermal conductivity testing - Controlled site analysis. ASHRAE Transactions, 108(1): pp 945-952., 2002
15. Javed, S., Spitler, J., Fahlén, P., An experimental investigation of the accuracy of thermal response tests used to measure ground thermal properties. ASHRAE Transactions, vol. 117(1), pp. 13-21.,2011
16. Javed, S., Claesson, J., Beier, R., Recovery times after thermal response tests on vertical borehole heat exchangers, 23rd IIR International Congress of Refrigeration (ICR2011), Prague, Czech Republic, 2011
17. Chiasson, A. D., Geothermal Heat Pump and Engine Systems, ASME Press and John Wiley & Sons, 2016

Popis tablica

Tablica 3.1. Pregled komplementarnih veličina u hidrodinamici i termogeologiji	7
Tablica 4.1.1. Utjecaj varijacije napona na prosječnu vrijednost narinute toplinske snage	33
Tablica 4.1.3. Izračunate vrijednosti toplinskih vrijednosti za 12-satne intervale u poluustaljenom stanju širenja toplinskog toka	36
Tablica 4.1.4. Prosječne vrijednosti toplinskih otpora za svaki od toplinskih uvjeta	37
Tablica 4.1.5. Vrijednosti skin faktora za svaki od toplinskih uvjeta	38
Tablica 4.2.1. Ponašanje temperature za vrijeme testa oporavka	40
Tablica 4.2.2. Vrijednosti toplinske vodljivosti iz primijenjene Hornerove metode za inverznu krivulju testa oporavka temperature	43
Tablica 4.2.3. Vrijednosti skin faktora za svaki od toplinskih uvjeta dobivene Hornerovom metodom	43
Tablica 4.3.1. Karakteristike provedenih toplinskih uvjeta za test s višestrukim toplinskim uvjetima	45
Tablica 4.4.1. Karakteristike provedenih toplinskih uvjeta za izokronalni test	47
Tablica 4.5.1. Karakteristike provedenih toplinskih uvjeta za modificirani izokronalni test	49

Popis slika

Slika 1.1. Osnovni elementi testa toplinskog odaziva tla (TRT) na bušotinskim izmjenjivačima topline	2
Slika 3.3.1. Shematski prikaz idealnog odaziva tlaka/temperature pri protočnom testu	11
Slika 3.3.2. Vizualizacija oštećenja pribušotinske zone/skina u hidrodinamici	13
Slika 3.3.3. Postupak interpretacije klasičnog testa toplinskog odaziva tla (TRT)	15
Slika 3.3.4. Derivacijska krivulja za određivanje početka ustaljenog stanja širenja toplinskog toka u 10-min intervalu praćenja promjene temperature	16
Slika 3.4.1. Shematski prikaz idealiziranog odaziva tlaka pri testu porasta tlaka	18
Slika 3.4.2. Određivanje početnih uvjeta tlaka ili temperature iz testa porasta tlaka	20
Slika 3.5.1. Prikaz načela superpozicije pri dva različita protočna uvjeta i odaziv tlaka	23
Slika 3.6.1. Princip izvođenja testa s višestrukim protočnim/toplinskim uvjetima i odaziv tlaka i temperature..	27
Slika 3.7.1. Princip izvođenja izokronalnog testa s odazivom tlaka/temperature	28
Slika 3.7.2. Princip dobivanja stabilizirane proizvodne karakteristike za izokronalni test	29
Slika 3.8.1. Princip izvođenja modificiranog izokronalnog testa s odazivom tlaka/temperature	30
Slika 4.1. Namjenska bušača garnitura pri izradi dvije plitke bušotine od 50m i ugradnja koaksijalnog HDPE izmjenjivača topline (RGN, srpanj 2014.) na kojima je izvršeno mjerenje toplinskog odaziva tla te TRT aparatura u Laboratoriju.....	31
Slika 4.1.1. Izmjerene temperature radnog fluida u funkciji vremena za različite narinute toplinske uvjete pri protočnom testu	32
Slika 4.1.2. Derivacijska krivulja za određivanje poluustaljenog perioda kod protočnog testa	34
Slika 4.1.3. Zavisnost prosječne temperature o vremenu u funkciji prirodnog logaritma za cijeli period mjerenja i za određeni poluustaljeni period	35
Slika 4.1.4. Toplinski otpori sustava za svaki od provedenih toplinskih uvjeta	38
Slika 4.2.1. Izmjerene temperature radnog fluida u funkciji vremena za različite narinute toplinske uvjete pri protočnom testu i testu oporavka temperature	39
Slika 4.2.2. Derivacijska krivulja za određivanje poluustaljenog perioda kod testa oporavka.....	41
Slika 4.2.3. Snimljeni podaci odnosa promjene temperature u vremenu u funkciji prirodnog logaritma za poluustaljeno stanje pri testu oporavka temperature	42
Slika 4.3.1. Odnos temperature radnog fluida i vremena za različite toplinske uvjete testa s višestrukim toplinskim uvjetima.....	44
Slika 4.3.2. Mogućnosti pridobivanja i pohrane topline u tlo za vrijeme ustaljenog perioda širenja topline	45
Slika 4.4.1. Odnos temperature radnog fluida i vremena za različite toplinske uvjete kod izokronalnog testa	46
Slika 4.4.2. Mogućnosti pridobivanja i pohrane topline u tlo dobivene izokronalnim testom	47
Slika 4.5.1. Odnos temperature radnog fluida i vremena za različite toplinske uvjete kod modificiranog izokronalnog testa	48
Slika 4.5.2. Mogućnosti pohrane/ pridobivanja toplinske snage u tlo dobivene iz modificiranog izokronalnog testa	49
Slika 5.1. Pregled vrijednosti toplinske vodljivosti dobivenih iz testa odaziva topline i testa oporavka	52
Slika 5.2. Pregled mogućnosti pridobivanja/pohrane topline za provedene step-testove.....	53

RAZVOJ NOVE METODE IZVOĐENJA I INTERPRETACIJE TESTA TOPLINSKOG ODAZIVA TLA PRIMJENOM MODELA HIDRODINAMIČKIH ISPITIVANJA U NAFTNOM INŽENJERSTVU

Kristina Strpić

Ključne riječi: plitka geotermalna energija, test toplinskog odaziva, hidrodinamička mjerenja

Pri iskorištavanju plitke geotermalne energije pomoću dizalica topline modeliranje bušotinskog polja zasniva se na proračunima radijalnog širenja toplinske energije u konduktivnoj sredini, a poznavanje termogeoloških podataka tla nužnost je za optimalno razrađen projekt. Obzirom na heterogenost tla u prvih 100m dubine za različite lokacije u Republici Hrvatskoj, osnovne termogeološke varijable kao što su toplinska vodljivost, toplinski difuzivitet, obujamska specifična toplina i statička temperatura tla mogu značajnije varirati. Korištenjem samo kataloških podataka o tipu tla može dovesti do značajnije predimenzioniranog ili poddimenzioniranog projekta. Uobičajena metoda terenskog ispitivanja termogeoloških parametara tla je test toplinskog odaziva (TRT) kojim se određuje primarno toplinska vodljivost tla i početna efektivna temperatura duž bušotinskog izmjenjivača topline. Obzirom da se za napajanje aparature učestalo koristi električna energija iz javne mreže uobičajene su devijacije u naponu tijekom samih mjerenja, prvenstveno na bazi dan-noć. Ovakve devijacije u toplinskoj snazi narinutoj na bušotinski izmjenjivač mogu uzrokovati značajnija odstupanja prilikom determinacije koeficijenta toplinske vodljivosti u funkciji vremena ispitivanja. Obzirom na sličnost hidrodinamičkih mjerenja u naftnom inženjerstvu i mjerenjima u primijenjenoj termogeologiji, u ovom radu predstavlja se inovativna metoda preciznijeg određivanja koeficijenta toplinske vodljivosti provođenjem ispitivanja principom dugotrajnog temperaturnog oporavka nakon klasično izvedenog testa toplinskog odaziva tla. Rezultati prezentirani ovim radom ukazuju na mnogo manja odstupanja toplinske vodljivosti za različite narinute toplinske uvjete, nego što je to slučaj s klasičnim testom toplinskog odaziva. Također, metode testiranja plinskih bušotina iz struke naftnog inženjerstva takozvanim step i izokronalnim testovima kojima se dokazuje proizvodnost implementirane su u primijenjenu termogeologiju za testiranje bušotinskih izmjenjivača topline. Narinutim višestrukim toplinskim uvjetima s tri različita testa osmišljena je nova metoda testa toplinskog odaziva tla kojom je moguće utvrditi prinos izmjenjivača u vršnim uvjetima i pri ustaljenom stanju prijelaza toplinske energije, a u funkciji bušotinske temperature. Na ovaj način osigurava se sigurnost u projektiranju geotermalnog sustava, obzirom na poznavanje kretanja temperature bušotinskog fluida u funkciji narinute toplinske snage primjenom rezultata ovog rada.

Summary

DEVELOPMENT OF A NEW METHOD FOR INTERPRETATION OF THERMAL RESPONSE TEST BY APPLYING WELL TESTING MODELS FROM PETROLEUM ENGINEERING

Kristina Strpić

Keywords: shallow geothermal energy, thermal response test, well testing

When utilizing shallow geothermal energy using heat pump, the modeling of the borehole grid is based on calculations of radial flow of thermal energy in the conductive environment. The knowledge about thermogeological soil data is a necessity for an optimally elaborated project. Given the heterogeneity of the soil at the first 100m depth for different locations in the Republic of Croatia, basic thermogeological variables such as thermal conductivity, thermal diffusion, volume specific heat and static soil temperature may vary considerably. Using only catalogue datasets of soil type can lead to a significantly over-dimensioned or sub-dimensioned project. The common method of field testing of thermogeological soil parameters is the thermal response test (TRT), which determines the primary thermal conductivity of the soil and the initial effective temperature along the borehole heat exchanger. Since the apparatus usually uses electricity from the public grid, there are common deviations in the voltage during the measurements, primarily on a day-to-night basis. Such deviations in the thermal power rejected to borehole exchanger can cause significant deviations when determining the thermal conductivity coefficient as a function of the test time. Given the similarity of well testing in petroleum engineering and measurements in applied thermogeology, this paper presents an innovative method for more precise thermal conductivity coefficient determination by conducting a long-term temperature recovery test after a classically engineered soil thermal response test. The results presented with this work indicate a much lesser degree of thermal conductivity deviation for different heat conditions than is the case with the classic thermal response test. Also, the methods of testing gas wells from the field of petroleum engineering with the so-called step and the isochronal tests to prove the productivity index, are implemented in the applied thermogeology for the testing of the heat exchanger heat exchangers. Multiple thermal steps were conducted for three different tests in laboratory measurement, developing a new method of step thermal response of the soil. Results from this new method allow determination of the power yield for the exchanger in the peak conditions due to steady state of heat transfer, and in the function of the borehole temperature. In this way, precision is assured in the design of the geothermal system, considering the knowledge of the borehole fluid temperature evolution in the function of the generated thermal power.