

# Cikličko stimuliranje ležišta teške nafte vodenom parom i mogućnost primjene u Hrvatskoj

---

**Banić, Josip**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2022**

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

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:169:903128>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-09-12**



*Repository / Repozitorij:*

[Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering Repository, University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
RUDARSKO-GEOLOŠKO-NAFTNI FAKULTET  
Diplomski studij naftnog rudarstva

**CIKLIČKO STIMULIRANJE LEŽIŠTA TEŠKE NAFTE VODENOM PAROM I  
MOGUĆNOST PRIMJENE U HRVATSKOJ**

Diplomski rad

Josip Banić  
N303

Zagreb, 2022.

CIKLIČKO SITUMULIRANJE LEŽIŠTA TEŠKE NAFTE VODENOM PAROM I  
MOGUĆNOST PRIMJENE U HRVATSKOJ

JOSIP BANIĆ

Završni rad je izrađen: Sveučilište u Zagrebu  
Rudarsko-geološko-naftni fakultet  
Zavod za naftno-plinsko inženjerstvo i energetiku  
Pierottijeva 6, 10 000 Zagreb

Sažetak

Cikličko stimuliranje ležišta vodenom parom, poznatije kao i „huff and puff“ metoda, tercijarna je i termalna metoda pridobivanja ugljikovodika. Najveću primjenu ima u proizvodnji teških ugljikovodika. Metoda cikličkog stimuliranja ležišta vodenom parom sastoji se od tri ciklusa: ciklusa utiskivanja vodene pare, ciklusa mirovanja te ciklusa proizvodnje. Konvencionalna metoda podrazumijeva primjenu u vertikalnim bušotinama, dok nekonvencionalne metode podrazumijevaju utiskivanje vodene pare zajedno s kemijskim aditivima te utiskivanje vodene pare u horizontalne bušotine. Na području Republike Hrvatske postoji mogućnost primjene metode na polju X, a sam projekt primjene je u procesu planiranja.

Ključne riječi: CSS, teška nafta, vodena para, gubici topline, termalna metoda

Diplomski rad sadrži: 47 stranica, 24 slike, 3 tablice, 21 referencu i 2 priloga

Jezik izvornika: hrvatski

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

Mentor: Dr. sc. Vladislav Brkić, izvanredni profesor RGNF-a

Ocjenjivači: Dr. sc. Vladislav Brkić, izvanredni profesor RGNF-a  
Dr. sc. Borivoje Pašić, izvanredni profesor RGNF-a  
Dr. sc. Sonja Koščak Kolin, docentica RGNF-a

Datum obrane: 15.9.2022., Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Sveučilište u Zagrebu

University of Zagreb  
Faculty of Mining, Geology  
and Petroleum Engineering

Master's Thesis

CYCLIC STEAM STIMULATION OF A HEAVY OIL FIELD AND THE POSSIBILITY  
OF ITS APPLICATION IN CROATIA

JOSIP BANIĆ

Thesis completed at: University of Zagreb  
Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering  
Department of Oil and Gas Engineering and Energy,  
Pierottijeva 6, 10 000 Zagreb

Abstract

Cyclic steam stimulation, also known as the “huff and puff“ method, is a tertiary and thermal oil production method. It is mostly used in oil fields containing heavy oil. Cyclic steam stimulation consists of three stages: steam injection, soaking period, and production. The conventional method of cyclic steam stimulation injects steam in vertical wells, while unconventional methods include mixing of the steam with chemical additives and injecting the steam into the horizontal wells. The possibility of using cyclic steam stimulation in Croatia exists in oil field X and the project is in the planning stage.

Key words: CSS, heavy oil, steam, heat losses, thermal method

Thesis contains: 47 pages, 3 tables, 24 figures, 20 references and 2 appendices.

Original in: Croatian

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

Supervisor: Associate Professor Vladislav Brkić, PhD

Reviewers: Associate Professor Vladislav Brkić, PhD  
Associate Professor Borivoje Pašić, PhD  
Assistant Professor Sonja Koščak Kolin, PhD

Date of defense: September 15, 2022, Faculty of Mining, Geology and Petroleum  
Engineering, University of Zagreb

## SADRŽAJ

<b>POPIS SLIKA .....</b>	<b>III</b>
<b>POPIS TABLICA .....</b>	<b>III</b>
<b>POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I PRIPADAJUĆIH SI JEDINICA .....</b>	<b>IV</b>
<b>POPIS KORIŠTENIH KRATICA .....</b>	<b>VI</b>
<b>POPIS PRILOGA .....</b>	<b>VI</b>
<b>1. UVOD .....</b>	<b>1</b>
<b>2. CIKLIČKO STIMULIRANJE VODENOM PAROM .....</b>	<b>3</b>
<b>2.1. Mehanizmi cikličkog stimuliranja vodenom parom .....</b>	<b>4</b>
2.1.1. Gubici topline .....	7
2.1.1.1. Gubici topline u površinskoj opremi .....	7
2.1.1.2. Gubici topline unutar bušotine .....	9
2.1.1.3. Gubici topline u krovinske i podinske stijene .....	11
<b>2.2. Odabir pogodnih ležišta za primjenu cikličkog utiskivanja vodene pare ....</b>	<b>15</b>
<b>3. PRIMJENA METODE CIKLIČKOG STIMULIRANJA VODENOM PAROM .....</b>	<b>16</b>
<b>3.1. Parametri utiskivanja i proizvodnje prilikom primjene CSS-a .....</b>	<b>16</b>
<b>3.2. Nekonvencionalne metode cikličkog stimuliranja ležišta vodenom parom .</b>	<b>20</b>
3.2.1. Cikličko stimuliranje ležišta vodenom parom uz primjenu kemijskih aditiva	20
3.2.2. Cikličko stimuliranje ležišta vodenom parom u horizontalnim bušotinama ...	21
<b>3.3. Oprema za cikličko utiskivanje vodene pare .....</b>	<b>22</b>
3.3.1. Nadzemna oprema .....	22
3.3.2. Podzemna oprema .....	25
<b>4. PRIMJENA CIKLIČKOG STIMULIRANJA LEŽIŠTA VODENOM PAROM U SVIJETU .....</b>	<b>30</b>
<b>4.1. Primjena cikličkog stimuliranja ležišta vodenom parom prilikom razrade ležišta „A“ – istok u južnom Omanu .....</b>	<b>30</b>
<b>4.2. Projekt cikličkog stimuliranja ležišta vodenom parom na polju Samara Tertiary u Meksiku .....</b>	<b>33</b>

<b>5. MOGUĆNOST PRIMJENE METODE CIKLIČKOG STIMULIRANJA LEŽIŠTA VODENOM PAROM U HRVATSKOJ.....</b>	<b>37</b>
<b>5.1. Odabir bušotine za pilot projekt cikličkog stimuliranja ležišta vodenom     parom .....</b>	<b>39</b>
<b>6. ZAKLJUČAK .....</b>	<b>41</b>
<b>7. LITERATURA .....</b>	<b>42</b>
<b>8. PRILOZI .....</b>	<b>44</b>

## POPIS SLIKA

<b>Slika 2-1.</b> Faze kružnog stimuliranja vodenom parom .....	3
<b>Slika 2-2.</b> Shematski prikaz radijalnog protoka u bušotini nakon utiskivanja vodene pare .	4
<b>Slika 3-1.</b> Period utiskivanja vodene pare u CSS praksi .....	16
<b>Slika 3-2.</b> Period mirovanja u CSS praksi .....	17
<b>Slika 3-3.</b> Period proizvodnje u CSS praksi .....	17
<b>Slika 3-4.</b> Količine utisnog CWE po ciklusu u praksi .....	18
<b>Slika 3-5.</b> Tlak utiskivanja vodene pare u ležište u praksi .....	19
<b>Slika 3-6.</b> Broj ciklusa u praksi .....	19
<b>Slika 3-7.</b> Proces generiranja vodene pare .....	24
<b>Slika 3-8.</b> Dijelovi generatora mokre vodene pare.....	24
<b>Slika 3-9.</b> Naprezanja zaštitnih cijevi uslijed promjene temperature.....	26
<b>Slika 3-10.</b> Filter omotan žicom.....	28
<b>Slika 3-11.</b> Prikaz vertikalno prorezane cijevi i šljunčanog zasipa u zacijevljenom i otvorenom kanalu bušotine.....	29
<b>Slika 3-12.</b> Fraktura nakon uspješnog postavljanja šljunčanog zasipa tokom frakturiranja	29
<b>Slika 4-1.</b> Prikaz polja "A" u Južnom Omanu.....	30
<b>Slika 4-2.</b> Presjek polja "A" u Južnom Omanu .....	31
<b>Slika 4-3.</b> Prikaz ležišnog tlaka na polju "A" Istok nakon hladne proizvodnje .....	31
<b>Slika 4-4.</b> Dubinska sisaljka sa sustavom premosnica za vodenu paru.....	32
<b>Slika 4-5.</b> Proizvodnja teške nafte i broj bušotina tijekom sve tri faze projekta Samaria Tertiary .....	33
<b>Slika 4-6.</b> Temperature na glavi bušotine i duljina trajanja ciklusa ovisno o debljini ležišta.....	35
<b>Slika 4-7.</b> Predviđanja proizvodnje tijekom provedbe projekta Samaria Tertiary.....	36
<b>Slika 5-1.</b> Strukturna karta polja X po krovini ležišta Miocen .....	37
<b>Slika 5-2.</b> Ukupna proizvodnja nafte i vode na polju X.....	38
<b>Slika 5-3.</b> Dijagram karotažnih mjerenja i otvorenih intervala na bušotini X-1 .....	40

## POPIS TABLICA

<b>Tablica 2-1.</b> Kriteriji za primjenu cikličkog utiskivanja vodene pare .....	15
<b>Tablica 3-1.</b> Uvjeti kvalitete vode za proizvodnju vodene pare .....	22
<b>Tablica 3-2.</b> Dozvoljen porast temperature prije granice tečenja .....	27

## POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I PRIPADAJUĆIH SI JEDINICA

Simbol	Mjerna jedinica	Opis
$\mu_{oc}$	[Pa·s]	viskoznost nezagrijane nafte
$\mu_{oh}$	[Pa·s]	viskoznost zagrijane nafte
$A_h$	[m <sup>2</sup> ]	površina ležišta zahvaćena zagrijanom frontom
$C_w$	[J/kg K]	toplinski kapacitet vode
$f(t)$	-	prolazna bezdimenzionalna funkcija vremena
$f_s$	-	kvaliteta vodene pare
$h$	[m]	debljina ležišta
$h_c$	[W/m <sup>2</sup> K]	koeficijent prijenosa topline konvekcijom između izolatora i zraka
$h_f$	[W/m <sup>2</sup> K]	koeficijent prijenosa topline između struje fluida i površine tubinga
$h_{nc}$	[W/m <sup>2</sup> K]	koeficijent prijenosa topline konvekcijom unutar prstenastog prostora
$h_r$	[W/m <sup>2</sup> K]	koeficijent prijenosa topline radijacijom unutar prstenastog prostora
$H_s$	[kJ/kg]	sadržaj energije u utisnutoj pari u odnosu na početnu temperaturu
$J_c$	[(m <sup>3</sup> /dan)Pa <sup>-1</sup> ]	indeks proizvodnosti prije utiskivanja vodene pare
$J_h$	[(m <sup>3</sup> /dan)Pa <sup>-1</sup> ]	indeks proizvodnosti nakon utiskivanja vodene pare
$k$	[mD]	propusnost ležišta
$k_d$	[mD]	propusnost pribušotinske zone
$k_{hcas}$	[W/m K]	toplinska vodljivost materijala zaštitnih cijevi
$k_{hcem}$	[W/m K]	toplinska vodljivost cementne obloge
$k_{hf}$	[W/m K]	toplinska vodljivost formacije
$k_{htub}$	[W/m K]	toplinska vodljivost materijala uzlaznih cijevi
$k_i$	[W/m K]	toplinska vodljivost izolacije cijevi
$M_R$	[kJ/m <sup>3</sup> K]	obujamski toplinski kapacitet krovinskih i podinskih naslaga
$m_s$	[kg/h]	količina utisnute vodene pare
$p_e$	[Pa]	tlak na vanjskoj granici napajanja ležišta
$p_w$	[Pa]	tlak na dnu bušotine
$Q_i$	[W/K m]	gubitak topline u izolaciji cijevi
$Q_{in}$	[kJ/s]	količina utisnute energije



$Q_i$	[W/K m]	gubitak topline u ležištu
$Q_{ic}$	[W/K m]	gubitak topline konvekcijom po jediničnoj duljini cijevi
$Q_{loss}$	[kJ/s]	količina izgubljene energije u krovinske i podinske naslage
$Q_{ir}$	[W/K m]	gubitak topline radijacijom po jediničnoj duljini cijevi
$q_{oc}$	[m <sup>3</sup> /d]	protok prije utiskivanja vodene pare
$q_{oh}$	[m <sup>3</sup> /d]	protok nakon utiskivanja vodene pare
$r_1/r_2/r_3$	[m]	radijus izolatora
$r_{ci}$	[m]	unutarnji radijus zaštitnih cijevi
$r_{co}$	[m]	vanjski radijus zaštitnih cijevi
$r_d$	[m]	drenažni radijus
$r_e$	[m]	efektivni radijus
$r_h$	[m]	radijus zagrijane zone
$r_{hd}$	[m]	radijus bušotine
$r_{ti}$	[m]	unutarnji radijus tubinga
$r_{to}$	[m]	vanjski radijus tubinga
$r_w$	[m]	radijus bušotine
$T$	[°C] ili [K]	temperatura
$t$	[h]	vrijeme utiskivanja
$t^*$	[h]	vrijeme potrebno da zagrijana fronta dođe do određene lokacije
$T_1/T_2/T_3$	[K]	temperatura izolatora
$T_a$	[K]	temperatura zraka
$T_e$	[K]	stabilizirana temperatura
$T_g$	[K]	temperatura tla
$T_h$	[K]	temperatura na kontaktu cementnog kamena i formacije
$T_s$	[K]	temperatura vodene pare
$T_{sky}$	[K]	temperatura zraka
$U_{to}$	[W/m <sup>2</sup> K]	ukupni koeficijent prijenosa topline
$\alpha_f$	[m <sup>2</sup> /h]	toplinska difuzija ležišne stijene
$\varepsilon$	-	isijavanje površine
$\lambda_s$	[kJ/kg]	latentna toplina isparavanja vode
$\sigma$	[Wm <sup>-2</sup> K <sup>-4</sup> ]	Stefan-Boltzmannova konstanta

## POPIS KORIŠTENIH KRATICA

API – Američki naftni institut (engl. *American Petroleum Institute*)

CSS – Cikličko stimuliranje ležišta vodenom parom (engl. *Cyclic Steam Stimulation*)

CWE - ekvivalent čiste vode (engl. *Clear water equivalent*)

IEA – Međunarodna energetska agencija (engl. *International Energy Agency*)

LRP – linearno pogonjena dubinska sisaljka (engl. *Linear Rod Pump*)

SOR – omjer proizvedene vodene pare i nafte (engl. *Steam –oil ratio*)

## POPIS PRILOGA

**Prilog 1.** Vrijednosti  $erfc(x)$  za odabrani  $t_D$  ..... 44

**Prilog 2.** Vrijednosti  $G(t_D)$  i  $G_I(t_D)$  u ovisnosti o izabranim vrijednostima  $t_D$ ..... 45

## 1. UVOD

Najveći dio svjetskih rezervi nafte čine teški, viskozni ugljikovodici. Teške nafte se opisuju kao smjesu ugljikovodika koja sadrži mali udio lakih ugljikovodika te veći udio težih ugljikovodičnih spojeva uz visoki udio sumpora. Zbog velikog udjela težih ugljikovodičnih komponenti čija se topljivost i pokretljivost postiže pri visokim temperaturama, dolazi i do lošijih reoloških svojstava teške nafte, a samim time i do teže pokretljivosti teške nafte (Barić, 2006).

Američki naftni institut (engl. *American Petroleum Institute - API*) uvodi 1921. godine skalu za izražavanje specifične gustoće tvari lakših od vode. Danas se API skala gustoće opće prihvaćena u svijetu i naftnoj industriji te se prema njoj nafta može podijeliti na 4 skupine, lake sirove nafte, srednje teške sirove nafte, teške sirove nafte te ekstra teške sirove nafte i bitumene. Lake sirove nafte imaju API vrijednost veću od  $31,1^{\circ}\text{API}$  odnosno specifičnu gustoću manju od 0,87, srednje teške sirove nafte se kreću u rasponu između  $31,1^{\circ}$  i  $22,3^{\circ}\text{API}$  odnosno specifične gustoće između 0,87 i 0,92, teške sirove nafte imaju vrijednost API gustoće od  $22,3^{\circ}\text{API}$  do  $10^{\circ}\text{API}$ , odnosno specifičnu gustoću od 0,92 do 1. Ekstra teške nafte i bitumeni imaju API gustoću manju od  $10^{\circ}\text{API}$  te se razlikuju samo u vrijednostima dinamičke viskoznosti. Ekstra teške sirove nafte imaju vrijednost viskoznosti između 10 i 10 000  $\text{mPa}\cdot\text{s}$ , dok bitumeni imaju dinamičku viskoznost veću od 10 000  $\text{mPa}\cdot\text{s}$  (Sečen, 2002).

Promatrajući tržište naftom, očigledno je da teže nafte postižu manju tržišnu cijenu od lakih nafti. Bez obzira na to, njihova eksploatacija je i dalje isplativa. Prema podacima Međunarodne energetske agencije (engl. *International Energy Agency – IEA*) konvencionalna nafta čini svega 30% svjetskih naftnih rezervi dok ostatak otpada na teške, ekstra teške nafte te naftne pijeske i bitumene (Alboudwarej, 2006). Pošto je nafta i dalje jedan od vodećih svjetskih energenata, eksploatacija teških nafti ima perspektivu. U svijetu najveću zalihu teških nafti imaju Venezuela te Kanada, koja je svjetski predvodnik u proizvodnji iste.

Diplomski rad će obraditi metodu cikličkog stimuliranja ležišta vodenom parom koja je jedna od metoda pridobivanja ovog tipa nafte te način na koji se ona izvodi. Nakon toga će biti opisana oprema potrebna za provođenje ove metode, a naposljetku će biti analizirano nekoliko primjera iz svjetske prakse te mogućnost primjene metode cikličkog stimuliranja ležišta vodenom parom na području Republike Hrvatske (RH).

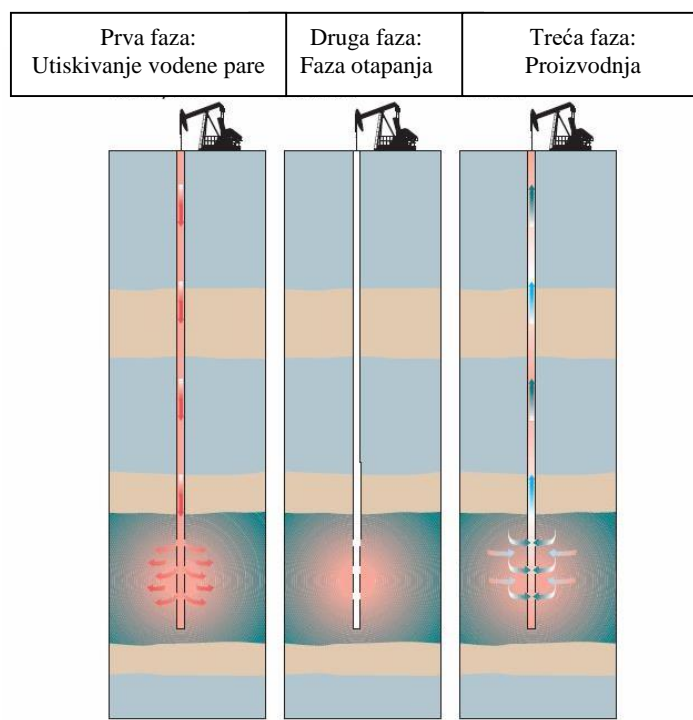
Što se tiče proizvodnje teške nafte na području RH, takva ležišta su otkrivena na području Moslavine, a mogućnost povećanja proizvodnje iz jedne bušotine na polju X bit će prikazan u ovom radu.

## 2. CIKLIČKO STIMULIRANJE VODENOM PAROM

Metoda cikličkog stimuliranja vodenom parom (engl. *Cyclic Steam Stimulation – CSS*), poznata i kao „huff and puff“ metoda, spada u termalne metode povećanja iscrpka ugljikovodika te se primarno koristi u ležištima koja sadrže tešku naftu.

Postupak cikličkog stimuliranja vodenom parom otkriven je havarijom na polju Mene Grande u Venezueli 1959. godine, kada je došlo do prodiranja vodene pare iza zaštitnih cijevi u jednoj utisnoj bušotini. Prije tog incidenta bušotina nikada nije bila u proizvodnji, a nakon prodiranja vodene pare proizvodni kapacitet joj iznosio između 15,9 m<sup>3</sup>/d i 31,8 m<sup>3</sup>/d. (Sečen, 2006)

Sam proces se sastoji od tri ciklusa koje koja su prikazana na slici 2-1. Prva faza je faza utiskivanja vodene pare. Druga faza je faza otapanja, odnosno faza čekanja. Tijekom faze čekanja bušotina se zatvara kako bi se toplina vodene pare prenijela na tešku naftu te tako povećala tlak u ležištu i smanjila viskoznost nafte. Posljednja faza je proizvodnja nafte iz ležišta. Proces cirkulacije se ponavlja nekoliko puta, najčešće 7 do 10 tokom trajanja projekta cikličkog stimuliranja (Sheng, 2013).

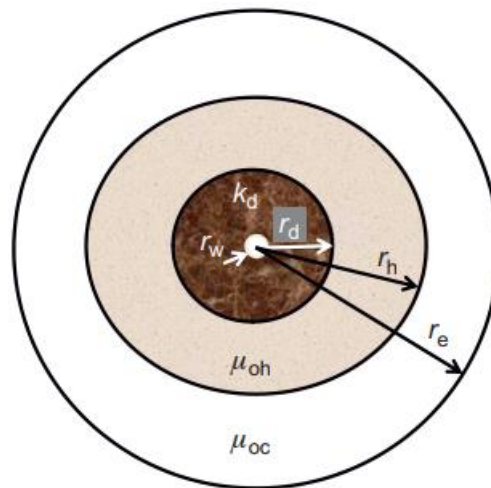


**Slika 2-1.** Faze kružnog stimuliranja vodenom parom ([www.researchgate.com](http://www.researchgate.com), 2013)

## 2.1. Mehanizmi cikličkog stimuliranja vodenom parom

Dva glavna mehanizma po kojima funkcioniра cikličko stimuliranje vodenom parom su smanjenje viskoznosti nafte te smanjenje oštećenja formacije u pribušotinskoj zoni nakon hlađenja.

Prvi mehanizam cikličkog stimuliranja vodene pare je smanjenje viskoznosti nafte izazvano utiskivanjem vodene pare. Samim utiskivanjem vodene pare dolazi do povećanja slojnog tlaka. Na slici 2-2. shematski je prikaz radijalnog protoka u bušotini nakon stimuliranja vodenom parom. Prema Darcyjevoj jednadžbi ustaljenog protoka, dolazi i do veće proizvodnje nafte, što se može vidjeti iz priloženog proračuna.



**Slika 2-2.** Shematski prikaz radijalnog protoka u bušotini nakon utiskivanja vodene pare (Sheng, 2013)

Jednadžba za protok  $q_{oh}$  nakon utiskivanja vodene pare je slijedeća (Sheng, 2013):

$$q_{oh} = \frac{2\pi h(p_e - p_w)}{\frac{\mu_{oc} \ln(r_e/r_h)}{k} + \frac{\mu_{oh} \ln(r_h/r_d)}{k} + \frac{\mu_{oh} \ln(r_d/r_w)}{k_d}}$$

$$q_{oh} = \frac{2\pi k k_d h(p_e - p_w)}{k_d \mu_{oc} \ln(r_e/r_h) + k_d \mu_{oh} \ln(r_h/r_d) + k \mu_{oh} \ln(r_d/r_w)}$$

(2-1.)

Gdje je:

- $q_{oh}$  - protok nakon utiskivanja vodene pare,
- $k$  - propusnost ležišta,
- $k_d$  - propusnost pribušotinske zone,
- $h$  - dubina bušotine,
- $p_e$  - tlak na vanjskoj granici napajanja ležišta,
- $p_w$  - tlak na dnu bušotine,
- $\mu_{oc}$  - viskoznost nezagrijane nafte,
- $\mu_{oh}$  - viskoznost zagrijane nafte,
- $r_e$  - efektivni radijus,
- $r_h$  - radijus zagrijane zone,
- $r_d$  - drenažni radijus,
- $r_w$  - radijus bušotine.

Jednadžba za protok prije utiskivanja  $q_{oc}$  glasi (Sheng, 2013):

$$q_{oc} = \frac{2\pi h(p_e - p_w)}{\frac{\mu_{oc} \ln(r_e/r_d)}{k} + \frac{\mu_{oc} \ln(r_d/r_w)}{k_d}} = \frac{2\pi k k_d h(p_e - p_w)}{k_d \mu_{oc} \ln(r_e/r_d) + k \mu_{oc} \ln(r_d/r_w)} \quad (2-2.)$$

Gdje je:

- $q_{oc}$  - protok prije utiskivanja vodene pare.

Povećanje proizvodnje nakon utiskivanja može se izračunati ako stavimo indekse proizvodnje poslije i prije utiskivanja vodene pare u omjer (Sheng, 2013):

$$\frac{J_h}{J_c} = \frac{(k_d/k) \ln(r_e/r_d) + \ln(r_d/r_w)}{(k_d/k) \ln(r_e/r_h) + (k_d/k) (\mu_{oh}/\mu_{oc}) \ln(r_h/r_d) + (\mu_{oh}/\mu_{oc}) \ln(r_d/r_w)} \quad (2-3.)$$

Gdje je:

- $J_h$  - indeks proizvodnosti bušotine nakon utiskivanja vodene pare,
- $J_c$  - indeks proizvodnosti bušotine prije utiskivanja vodene pare.

Kako bi se dokazalo da stvarno dolazi do povećanja proizvodnosti bušotine pretpostave se slijedeći parametri:  $r_e = 150$  m,  $r_h = 15$  m,  $r_d = 1,5$  m,  $r_w = 0,07$  m,  $k_d = 1$  mD,  $k = 10$  mD,

$\mu_{oh}/\mu_{oc} = 0.01$ . Kada se podaci uvrste u jednadžbu (2-3.) dobiju se slijedeći rezultati (Sheng, 2013):

$$\begin{aligned} \frac{J_h}{J_c} &= \frac{(k_d/k)\ln(r_e/r_d) + \ln(r_d/r_w)}{(k_d/k)\ln(r_e/r_h) + (k_d/k)(\mu_{oh}/\mu_{oc})\ln(r_h/r_d) + (\mu_{oh}/\mu_{oc})\ln(r_d/r_w)} \\ &= \frac{(0,1)\ln(150/1,5) + \ln(1,5/0,07)}{(0,1)\ln(150/15) + (0,1)(0,01)\ln(15/1,5) + (0,01)\ln(1,5/0,07)} = 13,39 \end{aligned} \quad (2-4.)$$

Iz proračuna se može vidjeti kako je proizvodnost bušotine narasla 13,39 puta nakon utiskivanja vodene pare. U ovom proračunu je zanemareno da vodena para smanjuje oštećenje pribušotinske zone. Ako u proračunu uzmemo i tu informaciju u obzir dobit ćemo slijedeće rezultate (propusnost  $k_d$  jednaka je propusnosti  $k$  nakon stimulacije)(Sheng, 2013):

$$\begin{aligned} \frac{J_h}{J_c} &= \frac{\ln(r_e/r_d) + (k/k_d)\ln(r_d/r_w)}{\ln(r_e/r_h) + (\mu_{oh}/\mu_{oc})\ln(r_h/r_d) + (\mu_{oh}/\mu_{oc})\ln(r_d/r_w)} \\ &= \frac{\ln(150/1,5) + (10)\ln(1,5/0,07)}{\ln(150/15) + (0,01)\ln(15/1,5) + (0,01)\ln(1,5/0,07)} = 17,61 \end{aligned} \quad (2-5.)$$

Iz ovog proračuna može se vidjeti kako je došlo do još većeg povećanja proizvodnosti, ali rezultat je relativno približan prvom proračunu iz čega se može zaključiti kako je glavni mehanizam kružnog stimuliranja vodenom parom smanjenje viskoznosti nafte.

Kada bi se uzelo u obzir samo utjecaj smanjenja oštećenja pribušotinske zone na proizvodnost nakon što je došlo do hlađenja sloja dobili bi se slijedeći rezultati (Sheng, 2013):

$$\begin{aligned} \frac{J_h}{J_c} &= \frac{\ln(r_e/r_d)/k + \ln(r_d/r_w)/k_d}{\ln(r_e/r_d)/k + \ln(r_d/r_w)/k} \\ &= \frac{((l/10) + \ln(1,5/0,07))}{((\ln(150/1,5))/10) + ((\ln(1,5/0,07))/10)} = 4,59 \end{aligned} \quad (2-6.)$$

Iz dobivenog rezultata od 4,59 može se vidjeti da iako utiskivanje pare smanjuje oštećenje pribušotinske zone to nije glavni mehanizam CSS-a.



### 2.1.1. Gubici topline

Prilikom utiskivanja vodene pare u ležište idealno bi bilo kada bi se sva toplina prenijela na naftu kako bi se smanjila njena viskoznost, no to nije slučaj. Do gubitaka topline prilikom CCS-a dolazi u nadzemnoj opremi, u samoj bušotini, prijenosom topline na pokrovne stijene u ležištu te pri samoj proizvodnji.

#### 2.1.1.1. Gubici topline u površinskoj opremi

Gubici topline u površinskoj opremi su relativno mali i oni iznose od 1-3% od ukupnih gubitaka topline (Prats, 1989). Kako bi se smanjili gubici na površinskoj opremi, cijevi se izoliraju tako da se oblože slojem kalcijevog silikata koji se zatim prekriva slojem aluminijskim. Za točan izračun količine izgubljene topline u površinskim vodovima uvode se pretpostavke:

- Temperatura cijevi jednaka je temperaturi vodene pare;
- Zanimaju se gubici na samoj cijevi te se računaju samo gubici na izolaciji i prijenosu topline na okolinu.

Gubici topline na površinskim sustavima odvijaju se kroz tri mehanizma, a to su zračenje i konvekcija te prirodna konvekcija topline. Prijenos topline kroz izolaciju računa se pomoću formule (Ameli et al., 2018):

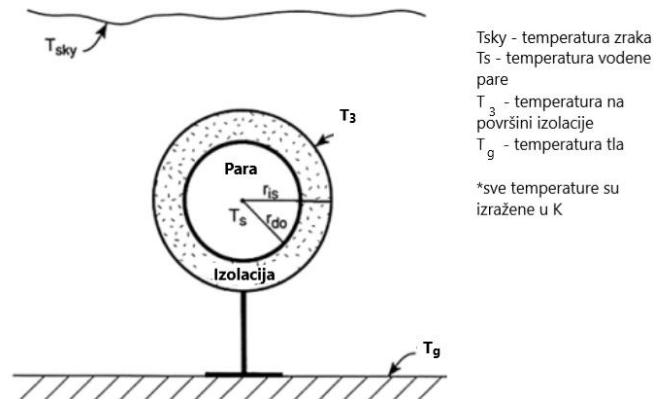
$$Q_i = \frac{2\pi k^i (T_1 - T_2)}{\ln(r_2/r_1)} \quad (2-7.)$$

Gdje je:

$Q_i$  - prijenos topline kroz izolaciju,

$k^i$  - je koeficijent termalne vodljivosti izolacije

Prijenos topline kroz izolaciju i u površinskim vodovima prikazan je na slici 2-3.



**Slika 2-0.** Presjek površinskih vodova vodene pare (Ameli et al., 2018)

Prijenos topline sa izolacije na okolinu računa se kao zbroj gubitaka topline kroz konvekciju i gubitaka topline kroz zračenje. Za izračun gubitaka topline kroz konvekciju koristi se slijedeća formula (Ameli et al., 2018):

$$Q_{lc} = 2\pi r_3 h_c (T_3 - \bar{T}_a) \quad (2-8.)$$

Gdje je:

$Q_{lc}$  - gubici topline kroz konvekciju,

$\bar{T}_a$  - prosječna temperatura zraka,

$h_c$  - koeficijent konvekcijske toplinske vodljivosti temeljen na vanjskom promjeru cijevi.

Koeficijent  $h_c$  računa se preko korelacija koje uzimaju u obzir veliki raspon brzina vjetra.

Za izračun gubitaka topline kroz zračenje koristi se slijedeća formula (Ameli et al., 2018):

$$Q_{lr} = 6.225\mu r_3 \epsilon \sigma \left[ (T_3^4 - T_{sky}^4) + (T_3^4 - \bar{T}_g^4) \right] \quad (2-9.)$$

Gdje je:

$\epsilon$  - emisivnost površine,

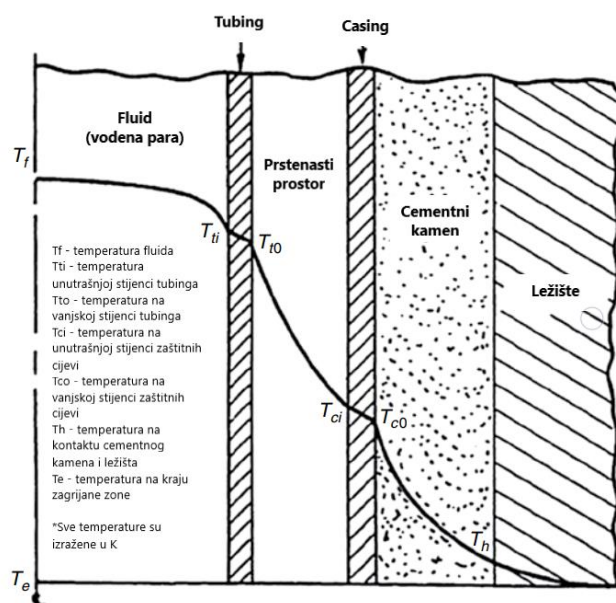
$\sigma$  - Stefan-Boltzmannova konstanta,

$T_{sky}$  - apsolutna temperatura zraka,

$\bar{T}_g$  - temperatura tla ispod cijevi.

### 2.1.1.2. Gubici topline unutar bušotine

Na gubitke u bušotini otpada 10-20% ukupnih gubitaka topline. Gubici unutar bušotine događaju se u nizu uzlaznih cijevi, prstenastom prostoru između niza uzlaznih cijevi i zaštitnih cijevi, zaštitnim cijevima te cementnom kamenu. Procesima kojima se toplina prenosi su zračenje, konvekcija te vodljivost, a na slici 2-4. prikazana je distribucija topline unutar bušotine.



**Slika 2-4.** Distribucija temperature unutar bušotine (Ameli et al., 2018)

Količina topline prenesene unutar bušotine je prolazni proces te se računa pomoću slijedeće jednadžbe (Ameli et al., 2018):

$$Q_l = \frac{[2\pi k_{hf}(T_h - T_e)]}{f(t)} \quad (2-10.)$$

Gdje je:

$k_{hf}$  - toplinska vodljivost formacije,

$T_h$  - temperatura na kontaktu cementnog kamena i formacije,

$T_e$  - iznos stabilizirane temperature,

$f(t)$  - prolazna bezdimenzionalna funkcija vremena.

Ako je vrijeme utiskivanja dovoljno dugo, odnosno duže od tjedan dana, koristi se prolazna funkcija, te se tada bezdimenzionalna funkcija vremena izražava kao (Ameli et al., 2018):

$$f(t) = \ln \left( 2 \sqrt{\frac{\alpha_f t}{r_w}} \right) - 0.29 \quad (2-11.)$$

Gdje je:

$\alpha_f$  - termalna difuzivnost formacije,

$t$  - vrijeme,

$r_w$  - radijus kanala bušotine.

Termalna difuzivnost formacije se može izraziti kao omjer toplinske vodljivosti formacije i gustoće cementnog kamena.

Ukoliko se pri primjeni ovog modela na kvazistacionarna stanja gleda kao na niz mehanizama stacionarnih stanja formula bi glasila (Ameli et al., 2018):

$$Q_l = 2\pi r_{to} U_{to} (T_s - T_h) \quad (2-12.)$$

Gdje je:

$U_{to}$  - ukupni koeficijent prijenosa topline na području fluid-cement-formacija.

Za izračun ukupnog koeficijenta  $U_{to}$  koristi se slijedeća korelacija koju je predstavio Willehite:

$$U_{to} = \left[ \frac{r_{to}}{r_{ti} h_f} + \frac{r_{to} \ln(r_{to}/r_{ti})}{k_{htub}} + \frac{1}{h_{nc} + h_r} + \frac{r_{to} \ln(r_{co}/r_{ci})}{k_{hcas}} + \frac{r_{to} \ln(r_{hd}/r_{co})}{k_{hcem}} \right]^{-1} \quad (2-13.)$$

Gdje je:

$h_f$  - koeficijent prijenosa topline između fluida i unutrašnjosti cijevi,

$h_{nc}$  - koeficijent prijenosa topline prirodnom konvekcijom unutar prstenastog

prostora,  $h_r$  - koeficijent prijenosa topline zračenjem

$k_{hcas}$  - toplinska vodljivost zaštitnih cijevi obzirom na prosječnu temperaturu zaštitnih cijevi,

$k_{htub}$  - toplinska vodljivost uzlaznih cijevi,

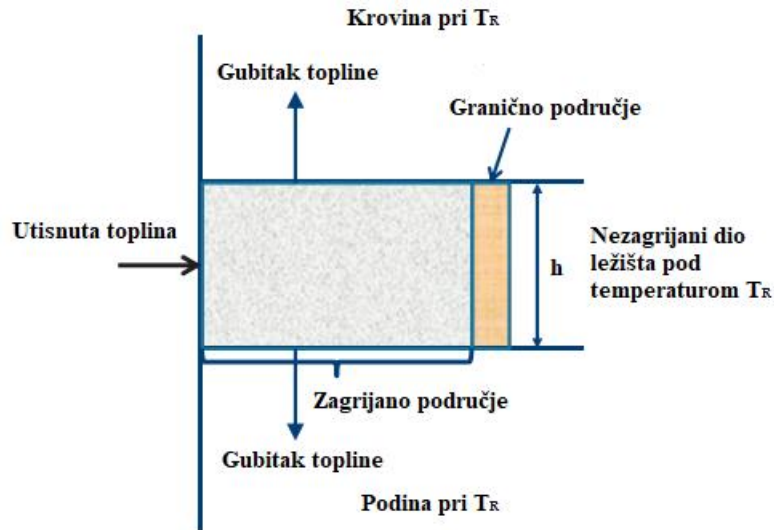
$k_{hcem}$  - toplinska vodljivost cementnog kamena.

Obzirom da su vrijednost  $h_f$ ,  $k_{htub}$  i  $k_{hcas}$  najčešće užasno velike, gornja jednadžba se može svesti na slijedeći izraz (Ameli et al., 2018):

$$U_{to} = \left[ \frac{1}{h_{nc} + h_r} + \frac{r_{to} \ln(r_{hd}/r_{co})}{k_{hcem}} \right]^{-1} \quad (2-14.)$$

### 2.1.1.3. Gubici topline u krovinske i podinske stijene

Gubici topline na pokrovne i podinske stijene su značajniji te se računaju prema Marx-Langenheim modelu koji pretpostavlja da su svojstva ležišnih stijena i fluida konstantni. Također pretpostavlja da je distribucija vodene pare vertikalna što dovodi do konstantne temperature u vertikalnom smjeru, te ne dolazi do odvajanja kondenzata i vodene pare. Zona pare se formira nakon što se u ležište utisne dovoljna količina za povećanje temperature od ležišne do temperature pare, uz njenu kondenzaciju. Toplina se kondenzacijom gubi i u krovinskim i u podinskim naslagama okomito na smjer strujanja fluida (Sečen, 2006). Proces zagrijavanja ležišta i gubitaka topline u krovinske i podinske naslage prikazan je na slici 2.5.



**Slika 2-5.** Shematski prikaz gubitka topline u krovinske i podinske naslage i zagrijavanja ležišta (Ameli et al., 2018)

Prilikom utiskivanja vodene pare u ležište potrebno je izračunati toplinsku jednadžbu ravnoteže, koja se računa pomoću slijedeće formule (Ameli et al., 2018):

$$Q_{in} - Q_{loss} = \frac{dQ_R}{dt} = M_R(T_s - T_R) \frac{hdA_h}{dt} \quad (2-15.)$$

Gdje je:

$Q_{in}$  - količina utisnute energije u ležište,

$Q_{loss}$  - količina energije izgubljena u krovinske i podinske stijene,

$\frac{dQ_R}{dt}$  - stopa promjene energije unutar ležišta,

$M_R$  - prosječni toplinski kapacitet ležišta,

$\frac{dA_h}{dt}$  - stopa povećanja zagrijane površine,

$T_s$  - temperatura vodene pare,

$T_R$  - temperatura ležišta,

$h$  - debljina ležišta.

Prosječni toplinski kapacitet ležišta u obzir uzima toplinski kapacitet ležišne stijene, kao i nafte, vode i vodene pare. Utisnuta energija  $Q_{in}$  računa se preko slijedeće formule (Ameli et al., 2018):

$$Q_{in} = \dot{m}_s [C_w(T_s - T_R) + f_s \lambda_s] \quad (2-16.)$$

Gdje je:

$Q_{in}$  - količina utisnute energije preko vodene pare,

$\dot{m}_s$  - količina utisnute vodene pare (CWE),

$f_s$  - kvaliteta vodene pare,

$\lambda_s$  - latentna toplina isparavanja vode,

$C_w$  - toplinski kapacitet vode.

Što se tiče izračuna količine izgubljene energije, ona se računa pomoću mehanizma toplinske vodljivosti u polubeskonačnom mediju i temperaturom  $T$  određenom pomoću komplementarne funkcije greške. Distribucija temperature u polubeskonačnom mediju izražava se pomoću slijedeće formule (Ameli et al., 2018):

$$\frac{T - T_R}{T_s - T_R} = \operatorname{erfc}\left(\frac{z}{2\sqrt{\alpha t}}\right) \quad (2-17.)$$

$$\operatorname{erfc}(x) = 1 - \operatorname{erf}(x) = 1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^\infty e^{-t^2} dt \quad (2-18.)$$

Vrijednost  $\operatorname{erfc}(x)$  za određene vrijednosti  $x$  dane su u tablici koja se nalazi u prilogu 1.

Vodljivost topline u polubeskonačnom mediju izražava se na slijedeći način (Ameli et al., 2018):

$$q|_{z=0} = -k_h \left(\frac{\partial T}{\partial z}\right)_{z=0} = \frac{k_h(T_s - T_R)}{\sqrt{\pi \alpha t}} \quad (2-19.)$$

$$Q_{loss} = 2 \int_0^{A_h} q(t - t^*) dA_h \quad (2-20.)$$

Gdje je:

$t$  - vrijeme trajanja utiskivanja vodene pare,

$t^*$  - vrijeme potrebno da zagrijana fronta dođe do određene lokacije,

$t - t^*$  - vrijeme izloženosti krovinskih i podinskih naslaga zagrijanoj zoni.

Obična diferencijalna jednačba u uvjetima zagrijane površine  $A_h$  glasi (Ameli et al., 2018):

$$Q_{in} = M_R(T_s - T_R) \frac{hdA_h}{dt} + 2 \int_0^t \frac{k_h(T_s - T_R)}{\sqrt{\pi\alpha(t - t^*)}} \left( \frac{dA_h}{dt^*} \right) t^* dt^* \quad (2-21.)$$

$$t_D = 4 \left( \frac{M}{M_R} \right)^2 \left( \frac{\alpha t}{h^2} \right) \quad (2-22.)$$

Gdje je:

$t_D$  - bezdimenzionalno vrijeme,

$M$  - volumetrijski toplinski kapacitet pokrovnih i podinskih stijena,

$M_R$  - toplinski kapacitet ležišne stijene,

$\alpha$  - toplinska difuzivnost krovinskih i podinskih stijena.

Zagrijana površina kao funkcija vremena se izražava na slijedeći način (Ameli et al., 2018):

$$A_h = \frac{\dot{m}_s H_s M_R h}{4(T_s - T_R) \alpha M^2} G(t_D) \quad (2-23.)$$

$$G(t_D) = \left( e^{t_D} \cdot \operatorname{erfc}(\sqrt{t_D}) + 2 \sqrt{\frac{t_D}{\pi}} - 1 \right) \quad (2-24.)$$

a brzina širenja zagrijane zone glasi (Ameli et al., 2018):

$$\frac{dA_h}{dt} = \left( \frac{\dot{m}_s H_s}{M_R(T_s - T_R) h} \right) G_1(t_D) \quad (2-25.)$$

$$G_1(t_D) = e^{t_D} \operatorname{erfc}(\sqrt{t_D}) \quad (2-26.)$$

Vrijednosti  $G(t_D)$  i  $G_1(t_D)$  nalaze se u tablici u prilogu 2. i iščitavaju se ovisno o odabranom podatku bezdimenzionalnog vremena  $t_D$ .



## 2.2. Odabir pogodnih ležišta za primjenu cikličkog utiskivanja vodene pare

Prije početka realizacije projekta cikličkog utiskivanja vodene pare ležište mora zadovoljavati određene kriterije. Ovdje u prednost dolaze stara naftna ležišta zbog već postojećih podataka, kao i informacija i iskustava prikupljenih tijekom proizvodnog vijeka koji mogu znatno umanjiti geološke i tehnološke nesigurnosti. Kriterije za odabir odgovarajućih bušotina postavio je J.J. Taber (1997) sa svojim suradnicima. U svom radu iznio je kriterije za primjenu utiskivanja vodene pare, no nije odvojio metodu cikličkog utiskivanja od metode zavodnjavanja vodenom parom. Napomenuo je da su kriteriji za primjenu cikličkog utiskivanja blaži od onih zavodnjavanja vodenom parom. Svi kriteriji su navedeni u tablici 2-1.

**Tablica 2-1.** Kriteriji za primjenu cikličkog utiskivanja vodene pare (Taber et al., 1997)

Parametri	Vrijednosti
API gustoća nafte [ $^{\circ}$ API]	8 – 35
Viskoznost nafte u ležištu [mPa·s]	50 – 350 000
Zasićenje ležišta naftom [%]	> 40%
Efektivna debljina ležišta [m]	> 6
Omjer efektivne i stvarne debljine ležišta	> 40%
Poroznost ( $\phi$ ) [%]	> 18%
Propusnost [mD]	> 50
Dubina [m]	< 1525
Plinska kapa	Nije poželjna
Akvifer	Nije poželjan
Frakture	Ne
Prisutnost gline	Ne

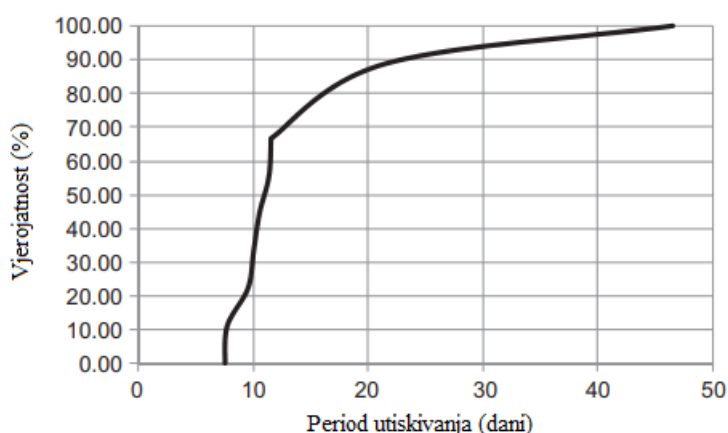
Kao što se vidi iz tablice, za uspješnu primjenu CSS-a potrebna je visoka poroznost ležišne stijene. Iz toga se može zaključiti kako su pješčenjaci idealna ležišna stijena. Također je bitno da omjer efektivne i stvarne debljine ležišta bude veći od 40% kako ne bi došlo do velikih gubitaka topline na pokrovne i podinske stijene. Pošto se radi o utiskivanju vodene pare, prisutnost gline u ležištu je nepoželjna jer dolazi do njezinog bubrenja te samim time i smanjenja propusnosti. U slučaju da ležište funkcionira na režimu plinske kape ili vodonapornom režimu, koji nisu poželjni, potrebno je napraviti detaljne proračune i pozicioniranje bušotina.

### 3. PRIMJENA METODE CIKLIČKOG STIMULIRANJA VODENOM PAROM

Kao što je navedeno u prethodnom odlomku, za uspješno provođenje metode cikličkog stimuliranja vodenom parom potrebno je da ležište zadovoljava navedene kriterije. U praksi se pokazalo kako je za nafte koje imaju viskoznost između 50 i 150 mPa·s najuspješnije prvo provesti metodu zavodnjavanja, a zatim metodu zavodnjavanja vodenom parom. Ako je viskoznost nafte u rasponu od 150 do 10000 mPa·s prvo se provodi zavodnjavanje vodenom parom, a nakon toga metoda CSS-a. U ležištima gdje se viskoznost nafte kreće u rasponu od 10000 do 50000 mPa·s provodi se metoda cikličkog stimuliranja vodenom parom, a u ležištima s viskoznošću većom od 50000 mPa·s potrebno je raditi horizontalne kanale bušotine za primjenu CSS-a uz primjenu kemijske stimulacije. Ako se ležište sastoji od više efektivnih slojeva, potrebno je započeti cikličku stimulaciju na najnižem sloju kako bi viši slojevi bili zagrijani prije njihovog puštanja u proces stimulacije (Ali, 1974).

#### 3.1. Parametri utiskivanja i proizvodnje prilikom primjene CSS-a

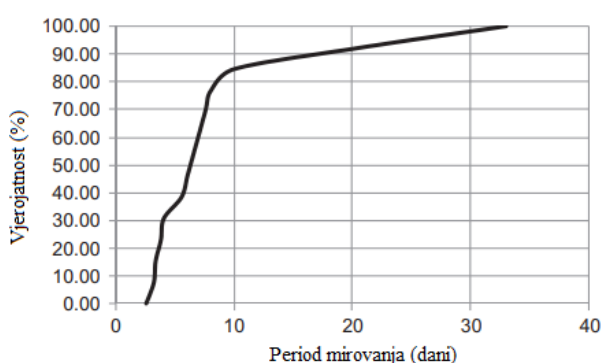
Period utiskivanja vodene pare u cikličkom stimuliranju vodenom parom može trajati od nekoliko dana do nekoliko tjedana. Prema primjerima iz prakse prosječno vrijeme utiskivanja iznosi 11 dana, što se može vidjeti i na grafu prikazanom na slici 3-1.



**Slika 3-1.** Period utiskivanja vodene pare u CSS praksi (Sheng, 2013)

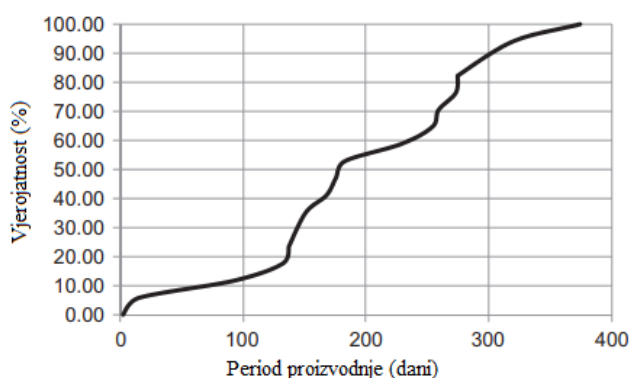
Nakon perioda utiskivanja dolazi period mirovanja u kojem toplina s vodene pare prelazi na tešku naftu u ležištu te joj se smanjuje viskoznost. Ako je vrijeme mirovanja prekratko, većina topline će se akumulirati u blizini same bušotine te će se izgubiti prilikom

puštanja bušotine u proizvodnju. U slučaju da je vrijeme mirovanja predugo doći će do velikih gubitaka topline u krovinske i podinske stijene te će time vrijeme proizvodnje biti duže. U slučaju da ležište ima zadovoljavajući tlak, duži period mirovanja može biti poželjan kako bi se povećala termalna efektivnost samog procesa. Znanstvenici Adams i Khan (1969) su u svom radu došli do zaključka kako optimalan period mirovanja iznosi 9 dana. Ovaj podatak su bazirali na usporedbi kumulativne proizvodnje nafte u razdoblju od 6 mjeseci i perioda mirovanja u tom istom razdoblju. Podaci iz prakse prikazuju kako prosječno vrijeme mirovanja iznosi 6,25 dana, što se može vidjeti na slici 3-2. (Sheng, 2013)



**Slika 3-2.** Period mirovanja u CSS praksi (Sheng, 2013)

Prosječno trajanje ciklusa proizvodnje u praksi iznosi oko 180 dana, nakon čega proizvodnja postaje neekonomična. Podaci o vremenu proizvodnje prikazani su na slici 3-3.

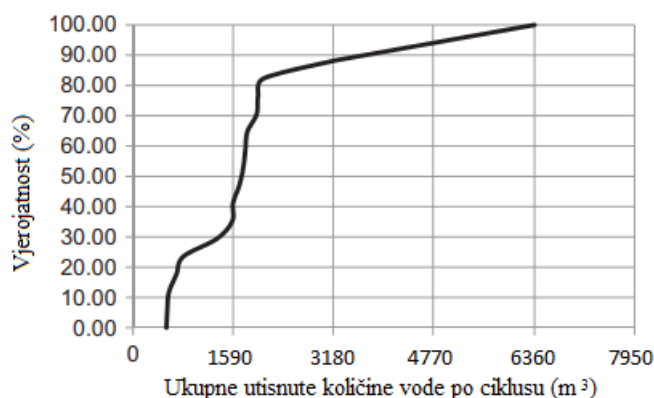


**Slika 3-3.** Period proizvodnje u CSS praksi (Sheng, 2013)

Za označavanje količine utisnute vodene pare koristi se ekvivalent čiste vode (engl. *Clear water equivalent* – *CWE*), odnosno količina vode koja je pretvorena u vodenu paru.

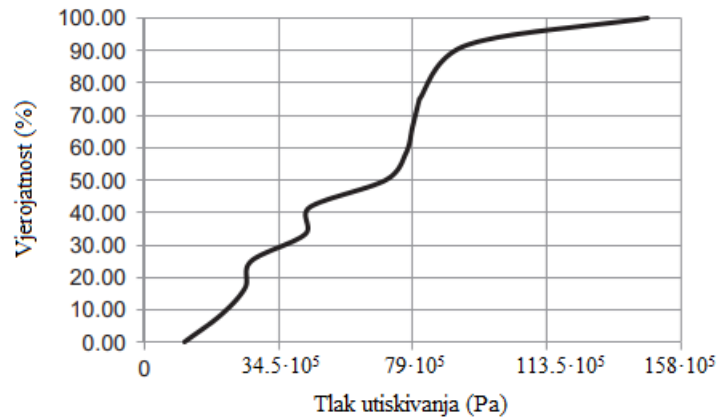
Također je bitno održavati kvalitetu vodene pare, odnosno postotni udio vodene pare u smjesi koja se utiskuje u bušotinu. Za uspješno provođenje ciklusa potrebno je održavati kvalitetu vodene pare veću od 75% na izlazu iz kotla te iznad 40% na ulasku u ležište (Sheng, 2013).

Prema podacima dobivenim iz prakse, prosječna količina utisnute vodene pare po ciklusu iznosi 1717 m<sup>3</sup> CWE (Sheng, 2013), što se može vidjeti iz grafa prikazanog na slici 3-4. Jedan od mehanizama kojim cikličko utiskivanje vodene pare povećava proizvodnost bušotine je smanjenje oštećenja pribušotinske zone. To se događa prilikom puštanja bušotine u proizvodnju nakon perioda mirovanja, kada vodena para i voda prilikom pritjecanja u bušotinu ispiru sitne krhotine iz pribušotinske zone. Zbog tog mehanizma poželjno je da količina vodene pare utisnuta u prvom ciklusu ne bude prevelika kako ne bi došlo do migracije krhotina dublje u ležišnu stijenu i samim time pogoršanja oštećenja pribušotinske zone. U praksi se pokazalo učinkovitim povećanje količine utisnute vodene pare od 10 do 15% po ciklusu (Sheng, 2013).



**Slika 3-4.** Količine utisnog CWE po ciklusu u praksi (Sheng, 2013)

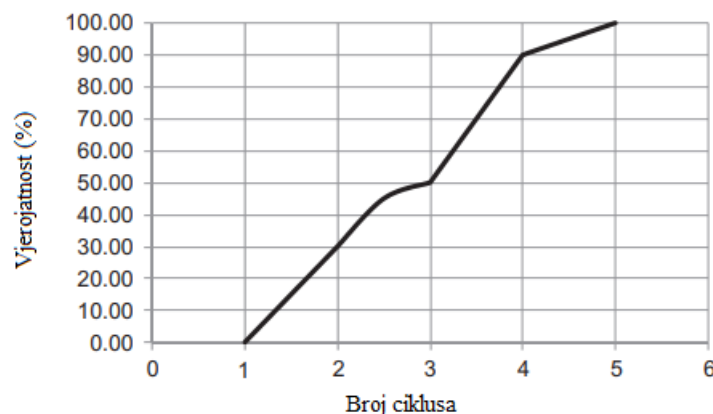
Tlak utiskivanja vodene pare u ležište ovisi o tlaku frakturiranja ležišne stijene, a prosječna vrijednost tlaka utiskivanja u stvarnim situacijama iznosi oko  $62 \cdot 10^5$  Pa (Sheng, 2013), što se može vidjeti na grafu prikazanom na slici 3-5.



**Slika 3-5.** Tlak utiskivanja vodene pare u ležište u praksi (Sheng, 2013)

Broj ciklusa primijenjenih na jednoj bušotini kako bi cijeli proces ostao ekonomski isplativ trebao bi iznositi između 6 i 7, a u pojedinim slučajevima 10 (Sheng, 2013). U praksi se pokazalo kako do najveće proizvodnje nafte dolazi u drugom i trećem ciklusu nakon čega dolazi do naglog pada proizvodnje između četvrtog i šestog ciklusa. Nakon sedmog ciklusa pad proizvodnje je puno blaži. U prosjeku, najčešće se odrađuje 3 ciklusa po bušotini, kao se može vidjeti na grafu prikazanom na slici 3-6 (Sheng, 2013).

Kada proizvodnja padne na jednu trećinu početne proizvodnje, potrebno je započeti sa novim ciklusom. Iz toga se može doći do zaključka kako je potrebno započeti novi ciklus kada su tlak i proizvodnja na visokoj razini. U suprotnom može doći do smanjenja vrijednosti tlaka i proizvodnje u narednim ciklusima.



**Slika 3-6.** Broj ciklusa u praksi (Sheng, 2013)

### 3.2. Nekonvencionalne metode cikličkog stimuliranja ležišta vodenom parom

Konvencionalna metoda cikličkog stimuliranja ležišta vodenom parom daje najbolje rezultate u prvih nekoliko ciklusa. Faktor iscrpka nafte kreće se između 10% i 40%, a u prosjeku je manji od 20% (Alvarez i Han, 2013). Ta brojka može se uvećati i za dva puta primjenom nekonvencionalnih metoda kao što su paralelno utiskivanje vodene pare i kemijskih aditiva, usmjerenim i horizontalnim bušenjem te hidrauličkim frakturiranjem.

#### 3.2.1. Cikličko stimuliranje ležišta vodenom parom uz primjenu kemijskih aditiva

Primjena kemijskih aditiva u „huff and puff“ metodi započela je ubrzo nakon samog otkrića metode 1960-ih godina. Kemijski aditivi koji se utiskuju uz vodenu paru povećavaju proizvodnju tako da povećavaju mobilnost teške nafte u ležištu te omogućuju vodi kondenziranoj u ležištu bolju mogućnost iznošenja nafte. Aditivi koji su najčešće u primjeni su otapala, surfaktanti i razni mješivi i nemješivi plinovi (Alvarez i Han, 2013).

Ideja o dodavanju otapala u vodenu paru u svrhu smanjenja viskoznosti teške nafte javila se 1970-ih. Laboratorijska istraživanja i primjena metode na terenu pokazali su pozitivne rezultate. Princip na kojem funkcionira ova metoda je slijedeći: otapalo se u plinovitom stanju utiskuje zajedno s vodenom parom te dolazi do njegove kondenzacije i miješanja s teškom naftom u hladnijem dijelu ležišta. Time dolazi do stvaranja prijelazne zone niže viskoznosti između vodene pare i teške nafte, što omogućuje veću mobilnost, a samim time i veću proizvodnju (Shu i Hartman, 1988). Otapala se dijele na laka otapala, u koja spadaju ugljikov dioksid (CO<sub>2</sub>), etan, propan, butan i drugi plinovi, srednja hlapljiva otapala u koja spada kondenzat te teška otapala u koja spadaju ugljikovodici između C<sub>16</sub> i C<sub>20</sub>. Najuspješnija se pokazala primjena kondenzata u količini manjoj od 10% ukupne količine vodene pare (Shu i Hartman, 1988).

Iako se primjena otapala pokazala uspješnom, zbog velikih količina koje je potrebno utisnuti kako bi se smanjila viskoznost, smanjena je ekonomska isplativost samog procesa. Stoga se krenulo u istraživanje primjene surfaktanata uz vodenu paru kako bi se smanjila površinska napetost između nafte i vode te promijenila moćivost ležišnih stijena. Najčešća površinski aktivna tvar u primjeni je TFSA (engl. *Thin Film Spreading Agent*) koja sprječava stvaranje emulzije i smanjuje površinsku napetost na kontaktima vode i nafte te nafte i ležišne stijene (Alvarez i Han, 2013). Njenom primjenom dolazi do stvaranja tankog sloja tvari na stijeni koja postaje vodomogućiva te samim time poboljšava mobilnost nafte.

Uspješnost primjene simultanog utiskivanja surfaktanata i vodene pare ovisi o koncentraciji surfaktanta u smjesi, kvaliteti vodene pare te prisutnosti nekondenzirajućih plinova. U praksi se najbolje pokazala koncentracija TFSA u iznosu od 1% do 1,3% u odnosu na ukupnu količinu vodene pare. Laboratorijska istraživanja pokazala su da se dodavanjem malih količina dušika smanjuje pjenjenje površinski aktivnih tvari što omogućuje njihovu bolju reakciju s ugljikovodikom i stijenom te samim time i veću proizvodnost (Alvarez i Han, 2013).

### 3.2.2. Cikličko stimuliranje ležišta vodenom parom u horizontalnim bušotinama

Primjena cikličkog stimuliranja vodenom parom u horizontalnim bušotinama omogućuje bolji obuhvat ležišta prilikom istiskivanja teške nafte, povećanje pridobivih rezervi, bolju sposobnost utiskivanja vodene pare te manji broj potrebnih bušotina prilikom razrade bušotina. Iako se u većini slučajeva primjena horizontalnih bušotina pokazala uspješnom, ciklička stimulacija vodenom parom u horizontalnim bušotinama davala je negativne rezultate prije 2000-ih. Razlog tome su bili veliki operativni troškovi, koji su dosegali i razinu dvostruko veću od vertikalnih bušotina. Osim troškova, velike probleme su zadavali i proizvodnja pijeska, nejednaka distribucija vodene pare te geološke karakteristike ležišta (Alvarez i Han, 2013).

Razvojem tehnologije došlo je do smanjenja troškova u iznosu od 45% te je nekolicina projekata s početka 2000-ih pokazala povećanje proizvodnje iz horizontalnih bušotina u rasponu od 20% do 50% u odnosu na vertikalne bušotine. Iako su se troškovi izrade horizontalnih bušotina smanjili, troškovi generiranja vodene pare i dalje su visoki zbog velikog gubitka topline u horizontalnoj bušotini (Alvarez i Han, 2013).

### 3.3. Oprema za cikličko utiskivanje vodene pare

Opremu za cikličko utiskivanje vodene pare može se podijeliti na nadzemnu opremu i podzemnu opremu. U nadzemnu opremu spadaju sustav za pročišćivanje vode, površinski vodovi te generator vodene pare odnosno kotao, dok u podzemnu opremu spadaju niz zaštitnih cijevi, niz proizvodnih cijevi te pakeri otporni na visoke temperature.

#### 3.3.1. Nadzemna oprema

Nadzemna oprema koja se koristi u cikličkom utiskivanju vodene pare sastoji se od sustava za pročišćavanje vode, površinskih vodova te generatora vodene pare.

##### 3.3.1.1. Sustav za pročišćavanje vode

Za stvaranje vodene pare potrebne za provedbu CSS-a potrebne su velike količine čiste vode. Voda koja se koristi za dobivanje vodene pare može doći iz površinskih izvora (rijeke, jezera) ili podzemnih izvora (najčešće kao nusprodukt prilikom proizvodnje ugljikovodika). Kako bi proces proizvodnje vodene pare bio najjeftiniji, bilo bi idealno da se koristi destilirana voda, no pošto je to teško izvedivo, pročišćuju se vode koje su raspoložive u blizini. Voda koja se koristi za generaciju vodene pare ne smije u sebi sadržavati otopljene ili suspendirane tvari koje mogu naštetiti cijevima unutar generatora pare. Kako bi se dobila kvaliteta vodene pare od 70 do 80% potrebno je pročistiti vodu na slijedeću razinu, prikazanu u tablici 3-1.:

**Tablica 3-1.** Uvjeti kvalitete vode za proizvodnju vodene pare (Al-Ajmi et al., 2018)

Ukupna tvrdoća vode	< 0,01 mg/L
Sadržaj ugljikovodika	< 0,5 mg/L
Ukupna količina otopljene krute tvari	< 0,5 mg/L
Ukupna količina željeza	< 0,5 mg/L
Količina otopljenog kisika	< 0,02 mg/L
Koncentracija silicijevog dioksida	< 200 mg/L

Za dovođenje kvalitete vode na gore spomenutu razinu potrebno je provođenje nekoliko procesa, a oni su najčešće uporaba baktericida, filtriranje krutih čestica, uklanjanje



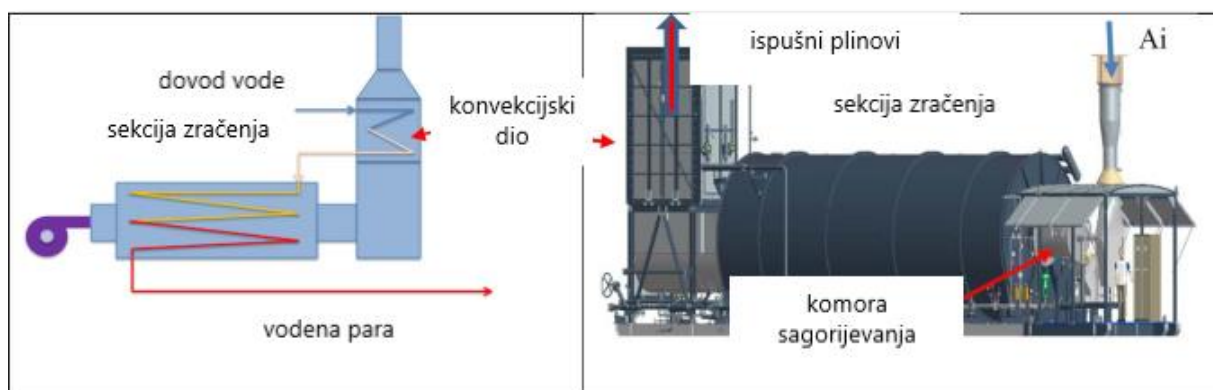
otopljenog kisika uporabom kataliziranog natrijevog sulfata, uklanjanje iona metala koji bi mogli izazvati stvaranje kamenca (kalcij, magnezij, željezo) pomoću ionskih izmjenjivača, uklanjanje ugljikovodika uporabom dehidratora i flotatora te održavanjem vrijednosti pH između 7 i 12 (Al-Ajmi et al., 2018).

### 3.3.1.2. *Generatori vodene pare*

Razvojem tehnologije došlo je do više vrsta generatora vodene pare raspoloživih na tržištu. Najčešći u uporabi je konvencionalni generator vodene pare, koji kao gorivo koristi goriva na bazi ugljikovodika. Drugi način proizvodnje vodene pare dolazi iz kogeneracije vodene pare iz termoelektrana. Problem kod ovakvog načina proizvodnje je to što lokacija na kojoj bi se primjenjivalo utiskivanje vodene pare mora biti u blizini termoelektrane, što je rijedak slučaj. Treći način proizvodnje vodene pare je pomoću solarnih generatora vodene pare. Solarni generatori za stvaranje vodene pare koriste metodu koncentriranja sunčeve energije. Ova metoda je ekološki najprihvatljivija, ali iziskuje velika kapitalna ulaganja i klimu s puno sunčanih dana (Al-Ajmi et al., 2018).

Generatori vodene pare koji se koriste u naftnoj industriji drugačiji su od konvencionalnih generatora vodene pare koji se koriste u proizvodnji električne energije. Pošto u naftnoj industriji nije potrebno zagrijavanje do super kritične temperature vodene pare, kao ni odvajanje tekuće i plinovite faze, koriste se jednoprolazni generatori, odnosno generatori mokre vodene pare (engl. *Wet steam generator*). Ovi generatori vodene pare napravljeni su specifično za primjenu u naftnoj industriji i razlikuju se od klasičnih generatora u tome što nemaju bubanj za odvajanje vodene pare i tekuće faze te kod njih nije potrebno raditi cirkulaciju ili ispuštanje zaostale vode. Zbog nedostatka bubnja teško mogu dostići kvalitetu vodene pare veću od 85%, no za proces cikličkog utiskivanja vodene pare to je više nego dovoljno (Prats, 1989).

Generatori mokre vodene pare sastoje se od ulaza vode u generator, pogonskog motora, predgrijača, izmjenjivača topline i izlaza vodene pare, što je prikazano na slici 3-7. Voda ulazi u generator te prolazi kroz predgrijač, odnosno kovekcijski dio generatora. U konvekcijskom dijelu plinovi nastali izgaranjem goriva podgrijavaju vodu prije nego ona uđe u izmjenjivač topline. Nakon konvekcijskog dijela voda prolazi kroz izmjenjivač topline u kojem dolazi do izgaranja goriva koje zagrijava vodu u cijevima te je pretvara u vodenu paru. Iz izmjenjivača topline vodena para izlazi iz generatora i cijevima se odvodi do bušotine u koju se utiskuje. Cijeli proces stvaranja vode prikazan je na slici 3-8.



**Slika 3-7.** Proces generiranja vodene pare (Al-Ajmi et al., 2018)



**Slika 3-8.** Dijelovi generatora mokre vodene pare ([www.enhanced-oil-recovery.com](http://www.enhanced-oil-recovery.com), 2022)

Generatori mokre vodene pare dimenzioniraju se prema dva parametra, koja je potrebno zadovoljiti. Prvi parametar je tlak vodene pare potreban za utiskivanje u bušotinu, a drugi je količina vodene pare potrebna za stimulaciju. Tlak vodene pare koji generatori mogu proizvesti iznosi od  $65 \cdot 10^5$  Pa sve do  $250 \cdot 10^5$  Pa. Što se količine vodene pare tiče, najmanji generatori vodene pare proizvode 12 tona po satu vodene pare dok oni najveći proizvode i do preko 60 tona vodene pare (Al-Ajmi et al., 2018).

Obzirom na pokretljivost, generatori vodene pare mogu se podijeliti na fiksne i mobilne. Fiksni generatori vodene pare najčešće se postavljaju kada se cikličko stimuliranje parom primjenjuje na velikom broju bušotina. Njegovi nedostaci su veliko kapitalno ulaganje te potreba izgradnje sustava vodova za opskrbljivanje bušotina vodenom parom.

Mobilni generatori vodene pare su pogodni za mali broj bušotina ili pojedinačne bušotine, a njihova najveća mana je što ne mogu opskrbiti veliki broj bušotina.

Efikasnost generatora vodene pare računa se preko entalpije proizvedene vodene pare u odnosu na ukupnu energiju utrošenu na stvaranje vodene pare. Parametri koji utječu na entalpiju vodene pare su tlak vodene pare i njena kvaliteta, koju je relativno teško precizno odrediti (Prats, 1989). Teoretski, entalpiju bi najjednostavnije bilo izmjeriti pomoću kondenzirajućeg kalorimetra, tako da se cijeli tok vodene pare preusmjeri na kalorimetar. U stvarnosti, taj postupak je teško izvediv zbog potrebe za izgradnjom posebne jedinice s kalorimetrom, koja otežano radi pod uvjetima u kojima se nalazi vodena para. Najčešće se kvaliteta vodene pare mjeri pomoću mjernog pretvornika masenog protoka. Kvaliteta vodene pare se računa tako da se kvadrira omjer izmjerene masenog protoka vodene pare sa ukupnim masenim protokom ulazne vode u generator. Taj podatak nije najtočniji jer se uzima u obzir da kroz mjerni pretvornik prolazi čista vodena para, dok je u stvarnosti riječ o dvofaznom protoku vodene pare i vode.

#### 3.3.1.3. *Površinski vodovi*

Za dovod vodene pare od generatora vodene pare do ušća bušotine koriste se čelične cijevi dimenzionirane tako da podnesu temperature i tlakove vodene pare. Za grananje vodova koriste se T razdjelnici postavljeni horizontalno kako bi se omogućila ravnomjerna raspodjela dvofaznog protoka. Poželjno je da se u cijelom sustavu nalazi što manje razdjelnika kako bi se smanjio pad tlak i pad kvalitete vodene pare. Cijevi mogu biti postavljene pod zemljom, na zemlji i iznad zemlje. U praksi se pokazalo kako je najisplativije postavljanje cijevi iznad tla u primjerenu izolaciju cijevi kako bi se smanjio gubitak topline (Prats, 1989).

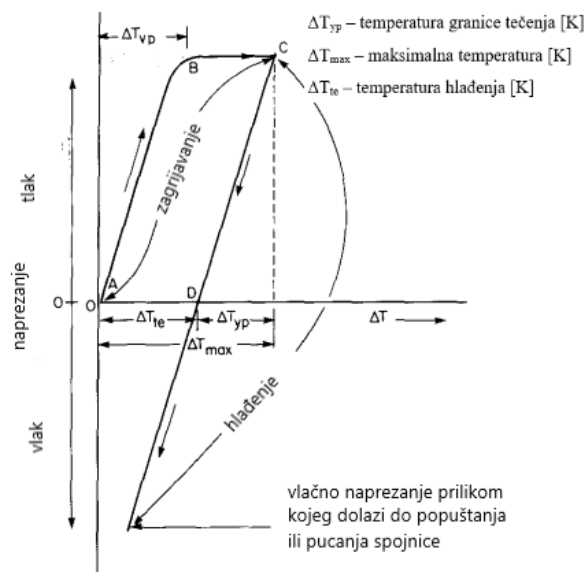
#### 3.3.2. Podzemna oprema

Podzemna oprema koja se koristi prilikom cikličkog stimuliranja ležišta vodenom parom je zapravo identična onoj kod proizvodnih i utisnih bušotina te se sastoji od niza zaštitnih cijevi, niza uzlaznih cijevi, pakera te proizvodne opreme ovisno koja metoda mehaničkog podizanja ugljikovodika se koristi. U ovom dijelu rada fokus će biti na pravilan odabir opreme obzirom na promjene temperature koje se događaju tijekom cikličkog stimuliranja.

### 3.3.2.1. Odabir niza zaštitnih cijevi

Prilikom cikličkog stimuliranja vodenom parom niz zaštitnih cijevi prolazi kroz velike promjene u temperaturi. Prilikom faze utiskivanja vodene pare dolazi do produljenja niza zaštitnih cijevi i tlačnih naprezanja, dok u fazi mirovanja dolazi do hlađenja cijevi te se one nalaze pod vlačnim napreznjima. Ako je niz zaštitnih cijevi cementiran samo u donjem dijelu, u gornjem, slobodnom dijelu gotovo sigurno će doći do izvijanja niza, osim ako je nizu zaštitnih cijevi omogućen pomak na razini bušotinske glave (Prats, 1989). Također, u svim slučajevima može se očekivati povećana napreznja na spojnicu zaštitnih cijevi koja može uzrokovati izvijanje.

Napreznja koja se javljaju prilikom hlađenja zaštitnih cijevi prikazana su u grafu na slici 3-9. Dokle god tlačno napreznje ne prelazi granicu tečenja materijala zaštitnih cijevi ili niz zaštitnih cijevi ne ostane u izduženom stanju, hlađenje neće stvarati velike probleme na sam niz. Tlačna napreznja zaštitnih cijevi prate krivulju AB ukoliko ne prelaze granicu tečenja materijala. Ukoliko dođe do napreznja većeg od granice tečenja, napreznja će pratiti krivulju CD tokom hlađenja. Krivulja hlađenja CD je paralelna sa krivuljom AB te je izmaknuta za razliku maksimalne temperature  $\Delta T_{\max}$  i temperature pri kojoj je došlo do izvijanja  $\Delta T_{yp}$ . Ako dođe do pada temperature ispod te vrijednosti ( $\Delta T_{te}$ ), niz zaštitnih cijevi i spojnice zaštitnih cijevi će se naći pod vlačnim napreznjem, uslijed čega dolazi do mogućnosti popuštanja i pucanja spojnice (Willhite i Dietrich, 1967).



**Slika 3-9.** Napreznja zaštitnih cijevi uslijed promjene temperature (Willhite i Dietrich, 1967)

Dođe li do izvijanja cijevi, značajno se smanjuje temperatura prilikom koje dolazi do granice tečenja materijala. U tablici 3-2. prikazane su dozvoljene temperature prije granice tečenja za tri različite kvalitete zaštitnih cijevi te se može zaključiti kako je razlika velika.

**Tablica 3-2.** Dozvoljen porast temperature prije dosezanja granice tečenja (Prats, 1989)

Kvaliteta materijala	Granica tečenja [MPa]	Dozvoljen porast temperature [°C]	
		Uz izvijanje	Bez izvijanja
J	379,2	113,8	135
N	551,6	175,6	204,4
S	655	210	246,1

Pošto do izvijanja najčešće dolazi u necementiranim dionicama kanalia bušotine, potrebno je dobro procijeniti u kakvom stanju je postojeća bušotina. Ukoliko je došlo da pada kvalitete cementnog kamena, često su provođena ispiranja bušotine, ležišne stijene su sklone bubrenju ili je prilikom izrade bušotine došlo do devijacija kanala, postoji mogućnost da je isplativije izraditi novi kanal bušotine. Prilikom izrade novog kanala bušotine mogu se ugraditi zaštitne cijevi veće kvalitete te se može primijeniti cement otporan na visoke temperature (Prats, 1989).

Za uspješnu cementaciju bušotina koje će se koristiti za cikličko stimuliranje ležišta vodenom parom potrebno je izraditi cementnu kašu koja će imati relativno nisku temperaturnu vodljivost. Za izradu takve cementne kaše najčešće se koristi cement klase G sa udjelom silikatnog brašna od 30% do 60% na masu cementa, 0,028 m<sup>3</sup> do 0,085 m<sup>3</sup> perlita, 2% bentonitnog gela te oko 10% natrijeva klorida na masu vode (Prats, 1989). Perlit smanjuje gustoću cementne kaše te smanjuje toplinsku vodljivost cementnog kamena, dok se bentonitni gel koristi za bolje miješanje perlita u cementnu kašu. Natrijev klorid smanjuje viskoznost cementne kaše, poboljšava vezivanje cementnog kamena za stijene šejla i bentonitnog pijeska i sprječava bubrenje glinenih naslaga uz kanal bušotine. Također uzrokuje širenje cementnog kamena što omogućuje dobro vezivanje cementnog kamena za niz zaštitnih cijevi i stjenke kanala bušotine (Prats, 1989).

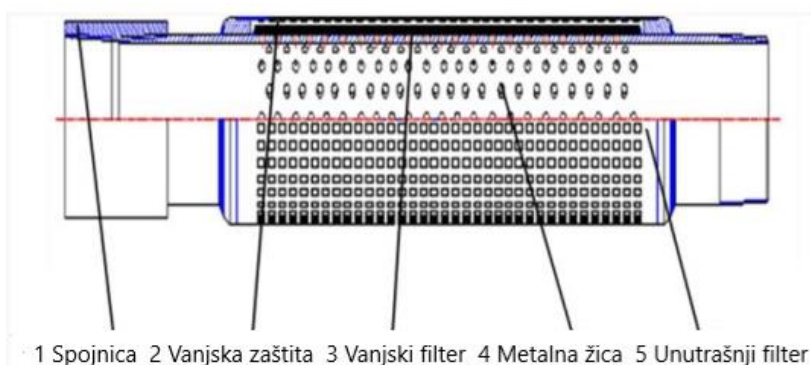
### 3.3.2.2. Niz uzlaznih cijevi

Kako bi se smanjilo naprezanje niza zaštitnih cijevi usred zagrijavanja i hlađenja, čest je slučaj ugradnje niza uzlaznih cijevi (engl. *tubing*). Niz uzlaznih cijevi tada služi za utiskivanje vodene pare u ležište, dok se kroz prstenasti prostor između tubinga i zaštitnih cijevi protiskuje inertni plin radi sprječavanja gubitka topline. Tubing koji se ugrađuje u bušotine u kojima se odvija cikličko stimuliranje vodene pare najčešće je napravljen od materijala koji mogu podnijeti veća naprezanja te se učvršćuje u bušotinu pomoću pakera otpornog na velike temperature.

### 3.3.2.3. Kontrola dotoka pijeska

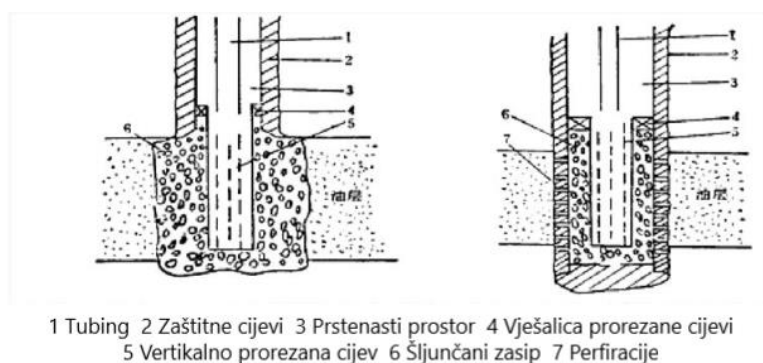
Većina ležišta na kojima se provodi cikličko stimuliranje vodenom parom su pješčenjaci ili nekonsolidirani pijesci te stoga dolazi i do protjecanja pijeska. Dotok pijeska prilikom proizvodnje može uzrokovati velike probleme, kao što su smanjenje proizvodnosti bušotine, oštećenje proizvodne i površinske opreme, a u najgorim slučajevima urušavanje kanala bušotine. Kako bi se spriječio dotok pijeska prilikom cikličkog stimuliranja koristi se nekoliko metoda kontrole dotoka pijeska.

Najjednostavniji model kontrole dotoka pijeska je uporaba žicom omotanih filtera, prikazan na slici 3-8. Primjena takvih filtera je jednostavna i jeftina, ali najčešće se primjenjuje u plitkim bušotinama gdje se ne postižu velike temperature vodene pare (Du et al., 2018).



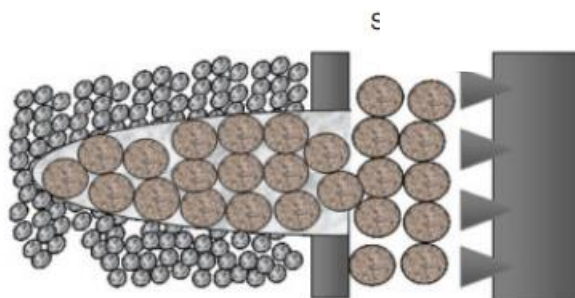
**Slika 3-10.** Filter omotan žicom (Du et al., 2018)

Najčešće je u primjeni naizmjenice vertikalno prorezana cijev uz postavljanje šljunčanog zasipa između cijevi i niza zaštitnih cijevi, prikazana na slici 3-11. Primjena ove metode kontrole dotoka pijeska je relativno jeftina uz kratak period postavljanja. (Du et al., 2018) Prorezi na cijevi su najčešće pravokutnog ili trapezoidnog oblika.



**Slika 3-11.** Prikaz vertikalno prorezane cijevi i šljunčanog zasipa u zacijevljenom i otvorenom kanalu bušotine (Du et al., 2018)

Najbolja metoda kontrole dotoka pijeska, koja ujedno i povećava propusnost u pribušotinskoj zoni je metoda frakturiranja i postavljanja šljunčanog zasipa. U ovoj metodi prvo se ugrađuje naizmjenice vertikalno prorezana cijev na područje perforacija te se kroz nju provodi frakturiranje. Nakon frakturiranja, utiskuje se nekoliko čepova željenog šljunčanog zasipa koji ispunjuju nastale frakture te područje između niza zaštitnih cijevi i vertikalno prorezane cijevi. Ova metoda je relativno skupa, ali u ležištima koja su ciklički stimulirana vodenom parom pokazuje velike uspjehe zbog poboljšanog utiskivanja vodene pare u ležište te samim time i bolju proizvodnju (Du et al., 2018). Na slici 3-12. prikazana je fraktura nakon uspješne metode postavljanja šljunčanog zasipa tokom frakturiranja.



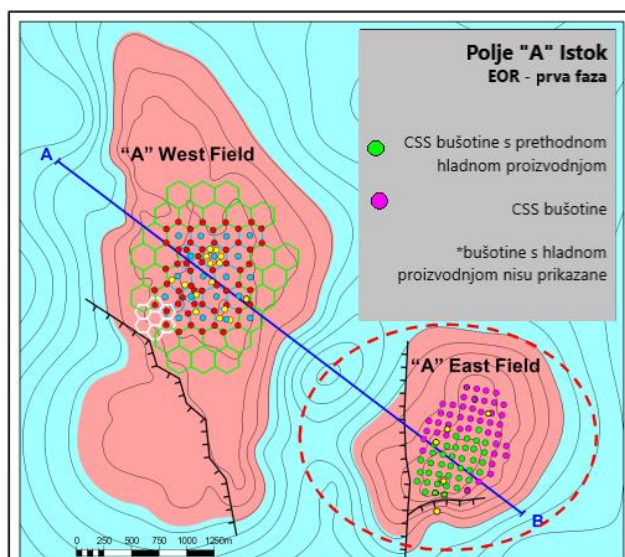
**Slika 3-12.** Fraktura nakon uspješnog postavljanja šljunčanog zasipa tokom frakturiranja (Du et al, 2018)

## 4. PRIMJENA CIKLIČKOG STIMULIRANJA LEŽIŠTA VODENOM PAROM U SVIJETU

Metoda cikličkog stimuliranja ležišta vodenom parom svoju prvu primjenu je imala davne 1959. godine na ležištu nafte Cold Lake u Kanadi. Od tada se našla u čestoj uporabi u proizvodnji teške i viskozne nafte, bilo kao zasebna metoda ili kao metoda koja je prethodila zavodnjavanju ležišta vodenom parom. U nastavku će biti razrađena dva primjera primjene metode CSS-a u praksi.

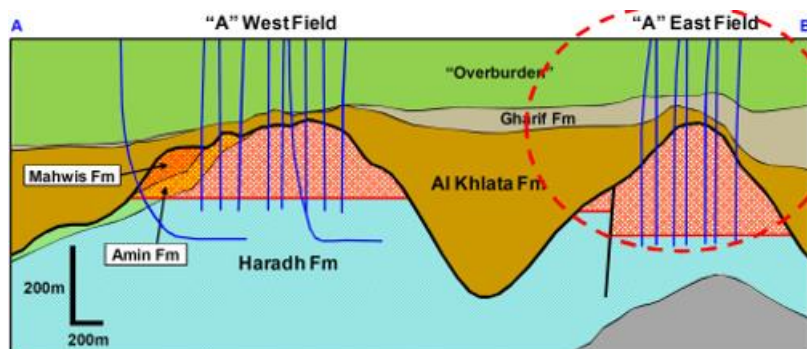
### 4.1. Primjena cikličkog stimuliranja ležišta vodenom parom prilikom razrade ležišta „A“ – istok u južnom Omanu

Naftno polje „A“ – istok nalazi se u južnom Omanu te je otkriveno 1976. godine. Ležište se nalazi u Haradh formaciji te njegova poroznost iznosi između 15% i 29%, a propusnost se kreće između 300 mD i 1200 mD. Viskoznost nafte u ležištu se kreće od 400 mPa·s pri vrhu ležišta sve do 400 000 mPa·s pri kontaktu nafta-voda. Početni ležišni tlak iznosio je  $115 \cdot 10^5$  Pa (Al-Manhali et al., 2014). Početkom 1990-ih godina proveden je pilot projekt cikličkog stimuliranja ležišta vodenom parom na tri bušotine te je donesen zaključak kako će se u prvoj fazi razvoja polja bušiti 81 bušotina u pravilnoj rešetki 92 m x 92 m koji će se u drugoj fazi razrade pretvoriti u model zavodnjavanja ležišta vodenom parom. Bušotine bi se bušile do dubine od oko 1000 metara, što je prikazano u slikama 4-1. i 4-2 (Al-Manhali et al., 2014).



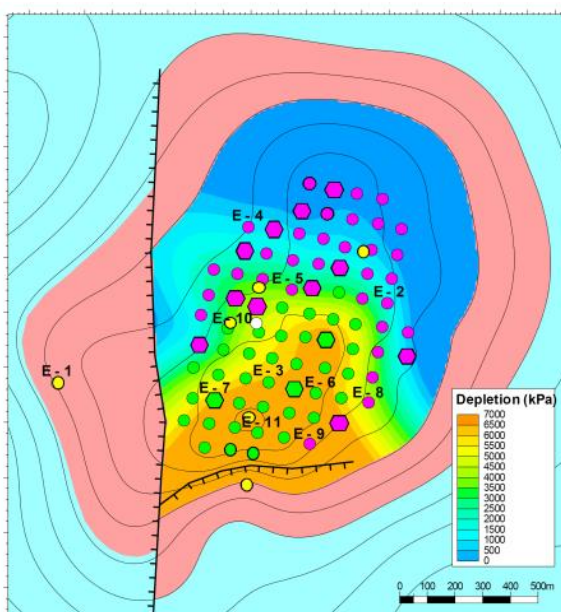
Slika 4-1. Prikaz polja "A" u Južnom Omanu (Al-Manhali et al., 2014).





**Slika 4-2.** Presjek polja "A" u Južnom Omanu (Al-Manhali et al., 2014).

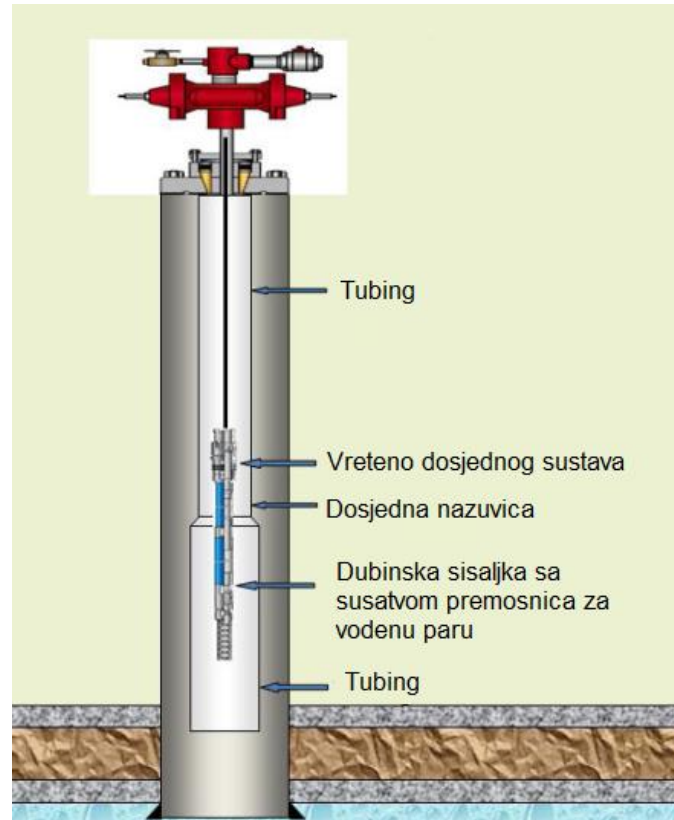
Prilikom jezgrovanja bušotine „E-6“, prve bušotine u razradi polja, otkriveno je da je viskoznost nafte u plićim dijelovima ležišta puno niža od očekivane te se dio bušotina prebacuje na tzv. hladnu proizvodnju, odnosno proizvodnju pomoću vijčanih sisaljki. U ožujku 2013. godine u proizvodnju je pušteno 32 bušotine opremljene vijčanim sisaljka ma te su u prvih godinu dana premašile očekivanu proizvodnju početnih 81 bušotina koje bi proizvodile pomoću cikličkog stimuliranja ležišta vodenom parom (Al-Manhali et al., 2014). Osim što je primjena vijčanih sisaljki smanjila potrošnju goriva za generaciju vodene pare, dovela je do smanjenja ležišnog tlaka. Od početnog ležišnog tlaka koji je iznosio  $115 \cdot 10^5$  Pa, došlo je do pada tlaka na razinu od  $40 \cdot 10^5$  Pa na vrhu ležišta te  $60 \cdot 10^5$  Pa do  $105 \cdot 10^5$  Pa na rubovima ležišta, što je se može vidjeti na slici 4-3. (Al-Manhali et al., 2014). To je omogućilo bolje utiskivanje vodene pare u nastavku razrade polja.



**Slika 4-3.** Prikaz ležišnog tlaka na polju "A" Istok nakon hladne proizvodnje (Al-Manhali et al., 2014).

Početak ožujka 2014. godine počelo je cikličko stimuliranje ležišta vodenom parom na preostalim 49 bušotina uz pomoć dva jednoprolazna generatora vodene pare. Bušotine koje su se nalazile na rubu ležišta imale su manju injektivnost od bušotina koje su zahvaćale vršni dio ležišta, što je bilo i očekivano obzirom na pad tlaka koji se dogodio usred hladne proizvodnje. Strategija utiskivanja vodene pare je bila takva da su bušotine bile podijeljene u 6 skupina od 13 ili 14 bušotina te dok se u jednu skupinu bušotina utiskivala vodena para, susjedne bušotine su bile u fazi mirovanja ili proizvodnje. Takav princip povećao je injektivnost vodene pare na utisnim bušotinama dok je na proizvodnima povećao tlak proizvodnje (Al-Manhali et al., 2014).

Nakon prelaska svih bušotina na cikličko stimuliranje ležišta sve bušotine su opremljene dubinskim sisaljka uz ugradnju sustava preosnica za vodenu paru. Ovaj sustav prikazan na slici 4.4. omogućuje jednostavan prelazak bušotine iz proizvodne bušotine u utisnu bušotinu i obrnuto. Sustav radi na principu da se pumpa zadigne iz dosjedne nazuvice, što omogućuje nesmetani protok vodene pare bez oštećivanja ventila u sisaljci. Kada se bušotina prebacuje na proizvodni način rada, sisaljka se spušta nazad u dosjednu nazuvicu te se nakon uspješnog tlačnog testa kreće u proizvodnju (Al-Manhali et al., 2014).

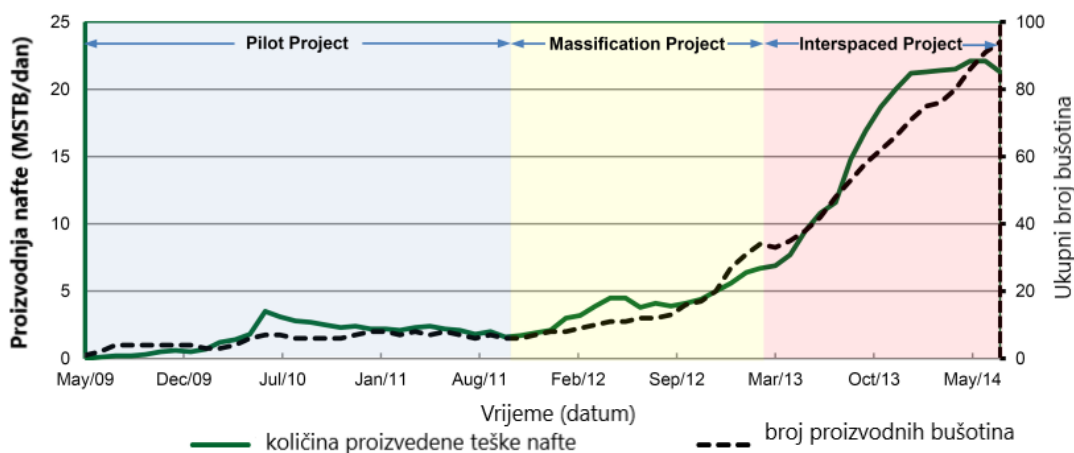


**Slika 4-4.** Dubinska sisaljka sa sustavom preosnica za vodenu paru (Al-Manhali et al., 2014).

## 4.2. Projekt cikličkog stimuliranja ležišta vodenom parom na polju Samara Tertiary u Meksiku

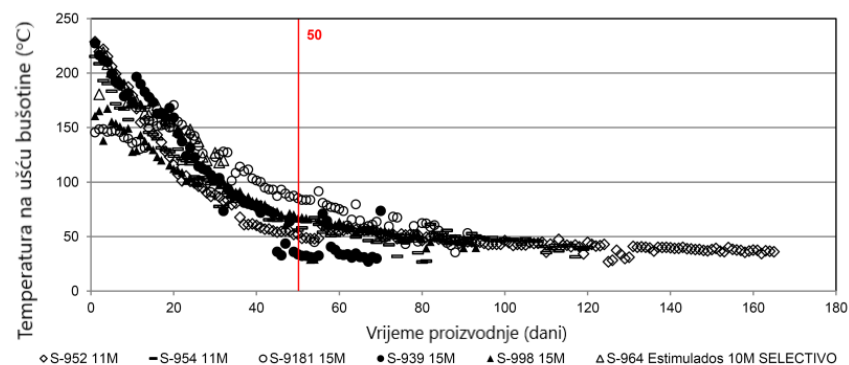
U Meksiku se nalazi mnogo ležišta ekstra teške nafte, a jedno od takvih se nalazi i na polju Samara Tertiary. Prvi radovi na polju su započeti 1961. godine kada je na bušotini SA-2 na dubini od 800 m otkrivena teška nafta. Ležište je fluvijalnog porijekla te su potvrđena četiri sloja nekonsolidiranih pijesaka A-0, A-1, A-4 i A-6 na dubinama od 600 do 1200 metara. Unutar ležišta nalazi se nafta API gustoće između  $6^\circ$  i  $10^\circ$  API, a viskoznost nafte se kreće između vrijednosti od 4220 mPa·s i 76986 mPa·s. Početni ležišni tlak iznosio je  $92,2 \cdot 10^5$  Pa na dubini od 700 metara, a temperatura ležišta iznosila je  $48^\circ\text{C}$ . Količina ukupnih rezervi procijenjena je na  $80,77 \cdot 10^6$  m<sup>3</sup>, dok su pridobive rezerve procijenjene na  $12,58 \cdot 10^6$  m<sup>3</sup> (Aguilar et al., 2014).

Odluka o provođenju pilot projektu cikličkog stimuliranja ležišta vodenom parom donesena je 2006. godine te je projekt krenuo u realizaciju 2009. godine, sa 8 izbušenih bušotina. Rezultati pilot projekta pokazali su se uspješni s hladnom proizvodnjom od 14 m<sup>3</sup>/dan i termalnom proizvodnjom od 158,3 m<sup>3</sup>/dan. Godine 2011. odlučeno je krenuti u tzv. „Massification project“, gdje je izbušena dodatna 51 bušotina, što je omogućilo dnevnu proizvodnju od 1113 m<sup>3</sup>/dan. Zadnja faza razrade polja započela je 2014. godine kada je izbušeno još 130 bušotina. Provedbom zadnje faze dostignuta je razina proizvodnje od 3513,6 m<sup>3</sup>/dan (Aguilar et al., 2014), a ukupno povećanje proizvodnje može se vidjeti na slici 4.5. gdje je prikazana dnevna proizvodnja u odnosu na broj bušotina u razdoblju provedbe projekta razrade polja.

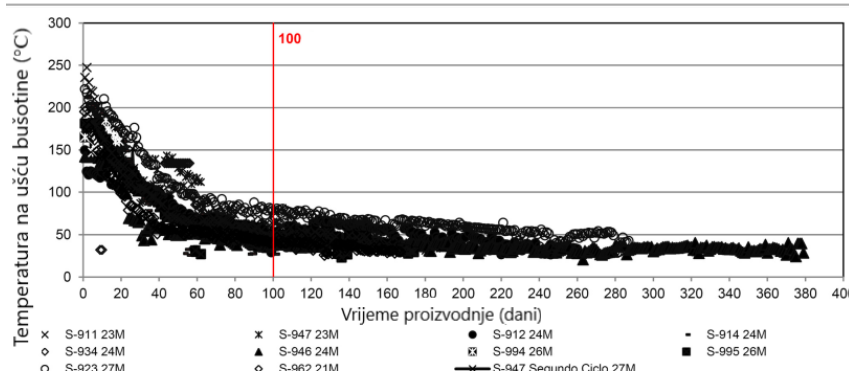


**Slika 4-5.** Proizvodnja teške nafte i broj bušotina tijekom sve tri faze projekta Samaria Tertiary (Aguilar et al., 2014)

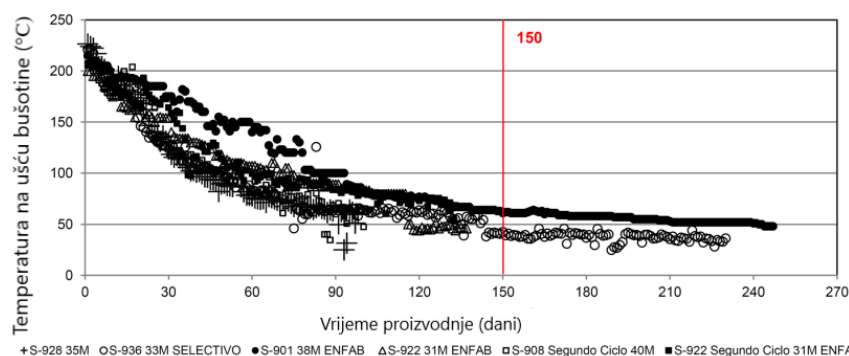
Tijekom provedbe cikličkog stimuliranja ležišta vodenom parom pratili su se razni parametri, kako na ušću, tako i unutar same bušotine. U početku provedbe cikličkog stimuliranja u bušotinu se utiskivalo oko  $240 \text{ m}^3$  CWE vodene pare dnevno, kvalitete 80% pri tlaku od  $151,7 \cdot 10^5 \text{ Pa}$  i temperature  $340 \text{ }^\circ\text{C}$  (Aguilar et al., 2014). Pošto na samu proizvodnju teške nafte najviše utječe viskoznost same nafte, najznačajniji parametar koji se pratio je bila temperatura. Mjerenjima temperature došlo se do zaključka kako je najbolja metoda proizvodnje uporaba plinskog lifta, sve dok temperatura bušotine ne padne ispod  $80 \text{ }^\circ\text{C}$ . Nakon što temperatura padne ispod  $80 \text{ }^\circ\text{C}$  preporuča se uporaba dubinskih sisaljki s klipnim šipkama (Aguilar et al., 2014). Mjerenja su pokazala da kod tanjih slojeva dolazi do bržeg gubljenja topline u krovinske i podinske naslage te da se gubi i do 40% energije u slojevima debljine manjima od 9 metara (Aguilar et al., 2014). Kako bi se smanjio gubitak topline povećana je količina utisnute vodene pare na  $400 \text{ m}^3$  CWE vodene pare, no proizvodnja iz tako tankih slojeva imala je preveliki SOR (engl. *Steam-oil ratio* – omjer proizvedene vodene pare i nafte) te je odlučeno da se prestane sa stimuliranjem tih slojeva (Aguilar et al., 2014). Mjerenjima na ostalim bušotinama došlo se do zaključka koliko dugo treba trajati jedan ciklus ovisno o debljini slojeva u koje se utiskuje. U slučajevima gdje su slojevi debljine od 10 do 15 metara ciklus traje 50 dana, u slojevima debljine 16 do 20 metara trajanje ciklusa je 60 dana, 100 dana je trajanje ciklusa u slojevima debljine od 21 do 30 metara, 150 dana u slojevima debljine od 31 do 40 metara, a u slojevima debljine veće od 40 metara ciklus traje 200 dana (Aguilar et al., 2014), što se sve može vidjeti na grafovima prikazanim na slici 4.6.



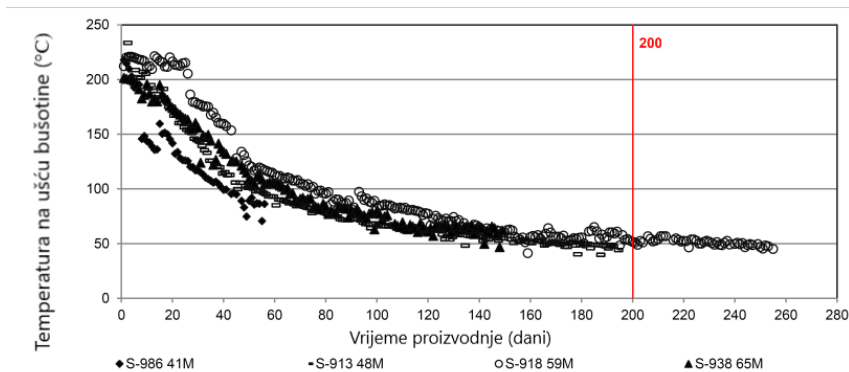
Temperatura na ušću bušotine kod ležišta debljine 10 m do 15 m



Temperatura na ušću bušotine kod ležišta debljine 21 m do 30 m



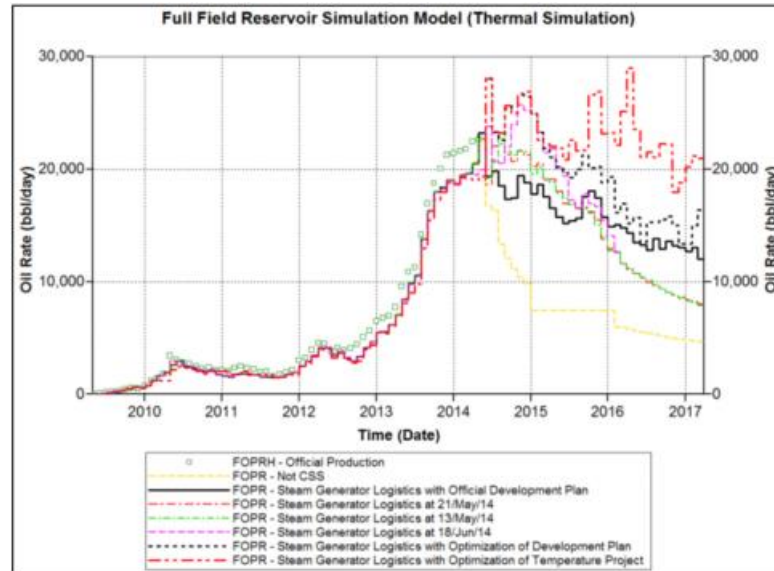
Temperatura na ušću bušotine kod ležišta debljine 31 m do 40 m



Temperatura na ušću bušotine kod ležišta debljine 41 m do 80 m

Slika 4-6. Temperature na glavi bušotine i duljina trajanja ciklusa ovisno o debljini ležišta (Aguilar et al., 2014)

Trenutni koeficijent iscrpka nafte na polju Samara iznosi 2,3%, a daljnjom realizacijom projekta cilj je postići koeficijent iscrpka nafte od 8,8% uz SOR od 1,05 (Aguilar et al., 2014), što je prikazano na grafu na slici 4.7.

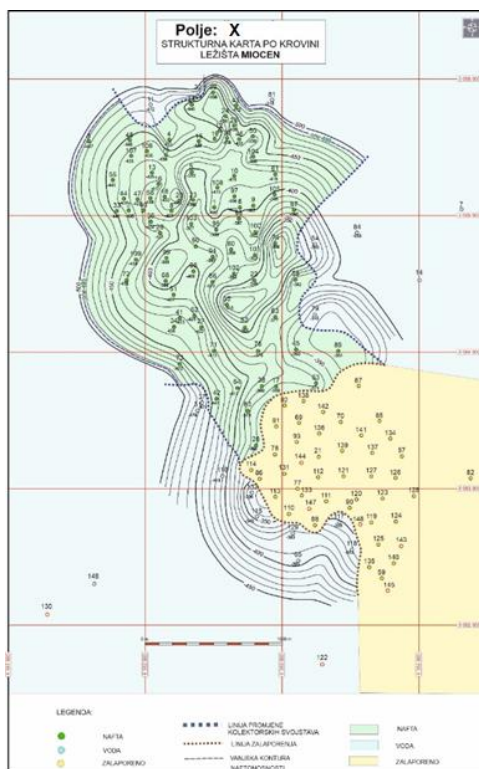


**Slika 4-7.** Predviđanja proizvodnje tijekom provedbe projekta Samaria Tertiary (Aguilar et al., 2014)

## 5. MOGUĆNOST PRIMJENE METODE CIKLIČKOG STIMULIRANJA LEŽIŠTA VODENOM PAROM U HRVATSKOJ

Naftna ležišta u Republici Hrvatskoj pretežito sadrže naftu API gustoće u rasponu između 25 °API i 40 °API. Najveća odskakanja u gustoći nafte možemo vidjeti u Savskoj depresiji gdje API gustoća varira od 16,9 °API sve do 60,6 °API (Barić, 2006). Na polju X, koje sadrži naftu velike gustoće, hrvatska nacionalna kompanija INA d.d. planira provođenje pilot projekta cikličkog stimuliranja ležišta vodenom parom na jednoj bušotini.

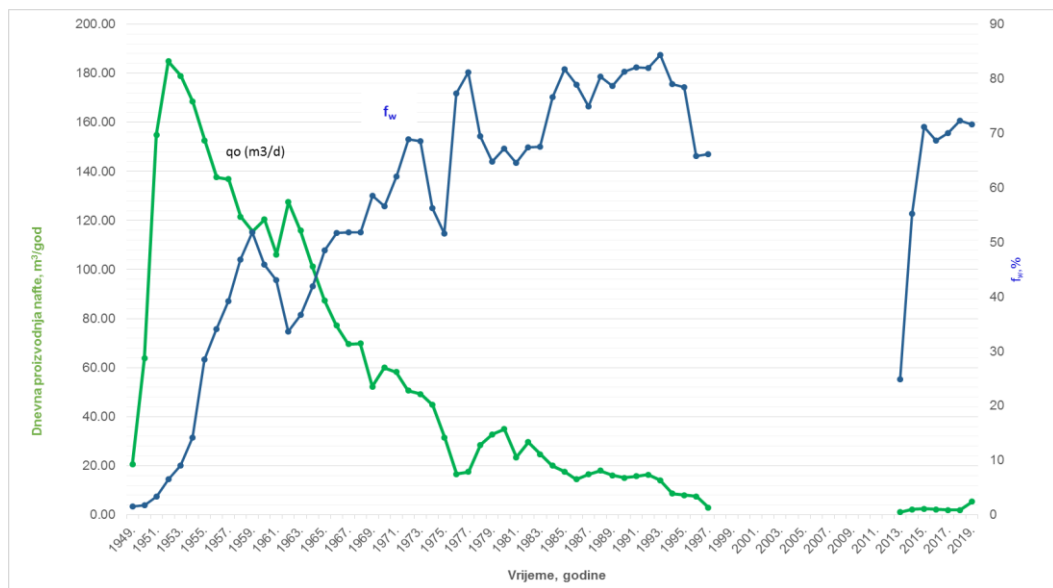
Samo polje nalazi se na sjeveroistoku Savske depresije, a prvo otkriće nafte datira u 1949. godinu, nakon čega je u razdoblju od 1949. do 1997. godine ukupno izbušeno 148 kanala bušotina. Dužina samog polja je 5 km, dok je njegova širina 2 km. Normalni stratigrafski slijed naslaga na polju je pleozoik-miocen-pliocen, dok se ležišta nalaze u sve tri naslage. U paleozoičkim naslagama, takozvanom „temeljnomo gorju“ ležišta se sastoje od gnajsa i granitnih stijena, u miocenskim naslagama ležišta se nalaze u sitno do krupnozrnatim pješčenjacima i konglomeratima s proslojcima lapora, a u pliocenskim naslagama ležišta se nalaze u bijelim laporima s tankim proslojcima silitnih pješčenjaka i konglomerata. Ukupne rezerve nafte na polju procijenjene su na 4 388 952 m<sup>3</sup>. Na slici 5.1. moguće je vidjeti strukturnu kartu po krovini ležišta Miocen.



Slika 5-1. Strukturna karta polja X po krovini ležišta Miocen (INA d.d., 2017)



Ležište je radilo na principu kombiniranog režima otopljenog plina i vodonapornog režima, dok se za proizvodnju koristio sustav dubinskih sisaljki s klipnim šipkama. Proizvodnja iz ležišta je prekinuta 1997. godine zbog velikog udjela vode u proizvedenom fluidu. Proizvodnja je ponovno pokrenuta na šest bušotina 2012. godine uz primjenu dubinskih sisaljki s klipnim šipkama i LRP-om. Do 31. prosinca 2019. godine na polju je ukupno proizvedeno 1 120 219 m<sup>3</sup> nafte, što čini ukupan koeficijent iscrpka od 25,92%. Na grafu na slici 5.2. prikazana je povijest proizvodnje nafte i vode na polju te se može primijetiti veliki udio vode u proizvedenom fluidu.



**Slika 5-2.** Ukupna proizvodnja nafte i vode na polju X (INA d.d., 2020)

Veliki problem u revitalizaciji polja predstavljaju oskudna i nepotpuna tehnička dokumentacija kao i nedostatak provedenih seizmičkih istraživanja na samom polju. Tijekom remontnih radova na odabranim bušotinama odrađena su karotažna mjerenja kvalitete cementne veze. Pošto je kvaliteta cementne veze uglavnom bila jako slaba do djelomična, ponekad nije bilo moguće obaviti radove u potpunosti. Osim problema s cementnom vezom, stanje niza zaštitnih cijevi je u jako lošem stanju te je nekolicina bušotina zbog nehermetičnosti predviđena za likvidaciju.

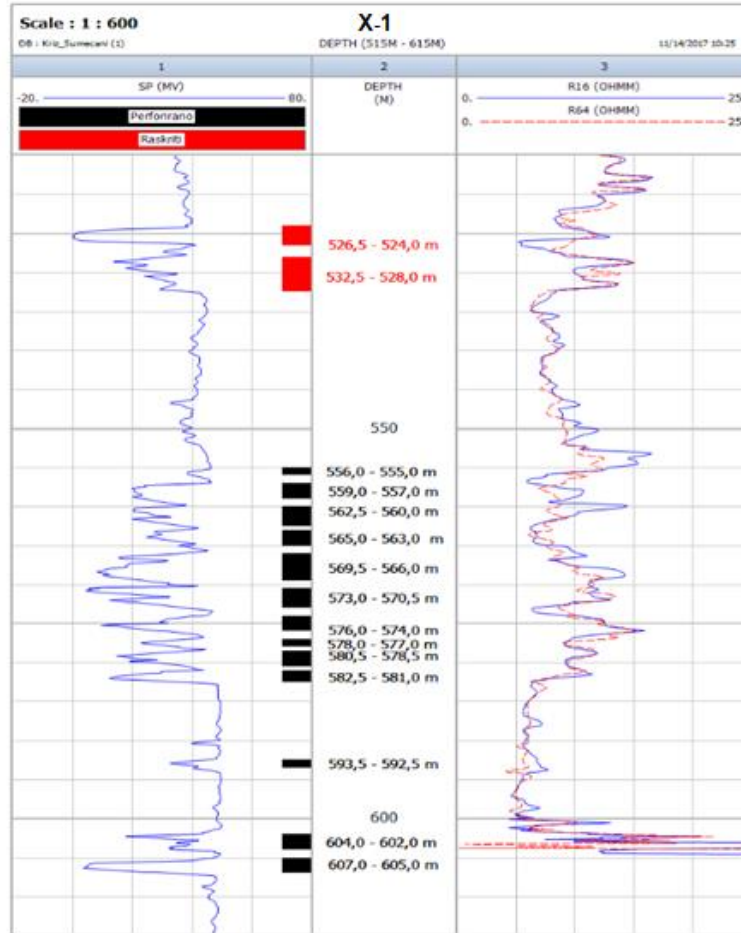


## 5.1. Odabir bušotine za pilot projekt cikličkog stimuliranja ležišta vodenom parom

Ideja cikličkog stimuliranja ležišta vodenom parom na polju X javila se 2002. godine, te su kroz naredne godine napravljene ekonomske analize koje su pokazale kako bi pilot projekt na jednoj bušotini trebao biti isplativ nakon 3 i pol provedena ciklusa. U samu realizaciju pilot projekta se nikad nije krenulo te je on i dalje u fazi planiranja.

Prilikom odabira bušotine koja bi bila pogodna za primjenu CSS-a važno je da podaci zadovoljavaju Taberove kriterije za primjenu cikličkog stimuliranja. Iako je na samom polju velika zavodnjenost ležišta, bušotina X-1 zadovoljava sve kriterije. Sama bušotina nalazi se na dijelu polja koje ne crpe druge bušotine, a povezana je sa sabirnom stanicom naftovodom dugim 277 metara. Dubina bušotine iznosi 659.4 metra dok se intervali pogodni za provedbu cikličkog stimuliranja vodenom parom nalaze na dubini od 524 do 532,5 metara, što se može vidjeti na dijagramu provedene karotaže na slici 5.3. Ležišne naslage čine krupnozrnati pješčenjak i konglomerat, porozitet ležišne stijene iznosi 21,1%, propusnost iznosi 118,3 mD. Ležište se nalazi pod tlakom od  $51 \cdot 10^5$  Pa, temperatura ležišta iznosi 49,4°C, a zasićenost ležišta vodom procjenjuje se na 25%. Što se tiče nafte u ležištu, ona ima API gustoću od 17,45°API, dok joj viskoznost iznosi 168,9 mPa·s.

Na dijagramu karotaže se može iščitati da se na mjestima otklona krivulje nalaze propusne stijene, dok se pomoću dijagrama karotaže prividne otpornosti  $R_{16}$  i  $R_{64}$  može primijetiti mogućnost postojanja ugljikovodika u intervalu između 524 i 532,5 metra.



**Slika 5-3.** Dijagram karotažnih mjerenja i otvorenih intervala na bušotini X-1 (INA d.d., 2017)

Osim bušotine X-1, u razmatranju se nalazi i još nekoliko kanala bušotine, no pošto se radi o starom polju i manjku dokumentacije, potrebno je provesti dodatna mjerenja. Dosad provedena mjerenja na 5 bušotina pokazala su kako se iz ležišta Miocen ne očekuje značajan dotok ugljikovodika. Raskrivanje ležišta bijelih lapora se pokazalo neizvjesnim, pošto je u jednoj bušotini ostvaren dobar dotok ugljikovodika, dok je u preostale tri bušotine ostvaren relativno mali dotok vode i plina.

## 6. ZAKLJUČAK

U današnje vrijeme metoda cikličkog stimuliranja ležišta (zasićenih teškom naftom) vodenom parom pretežno se koristi kao metoda koja prethodi metodi zavodnjavanja ležišta. Razvojem tehnologije cikličkog stimuliranja vodenom parom došlo je do kombiniranog utiskivanja vodene pare i drugih fluida kao što su kombiniranje vodene pare i dušika, vodene pare i ugljičnog dioksida te vodene pare i ispušnih plinova. Samim napretkom tehnologije došlo je do povećanja faktora iscrpka pomoću CSS-a s početnih 10% na čak 30 do 40%.

Najveći problem u primjeni CSS-a nalazi se u velikim gubicima topline što smanjuje efikasnost samog procesa te utječe na površinu zahvaćanja ležišta zagrijanom vodenom parom. S ciljem poboljšavanja zahvaćanja ležišta uvedene su nekonvencionalne metode koje pospješuju prodiranje vodene pare u ležište te mijenjaju moćivost stijene što rezultira povećanjem proizvodnje.

Trenutnim rastom cijene barela nafte isplativo je ulaganje u termalne metode pridobivanja teške nafte. Na primjeru polja u Hrvatskoj može se doći do zaključka kako je prije samog početka provedbe pilot projekta cikličkog stimuliranja ležišta potrebno obaviti dodatna seizmička istraživanja kako bi se dobio detaljniji uvid u stanje razmatranog polja. Na jezgrama dobivenim tokom bušenja uočena je velika proslojenost ležišnih stijena što može uvelike otežati samu proizvodnju. Najveći problem je što se unutar ležišnih naslaga nalaze proslojci gline koji mogu destabilizirati kanal bušotine te uzrokovati dodatne probleme, kako sa sigurnosne, tako i sa financijske strane.

Uzevši u obzir sve navede činjenice, provedba metode cikličkog stimuliranja ležišta vodenom parom na manjim i izoliranim poljima u kojima se nalazi teška nafta je moguća. Što se tiče provedbe pilot projekta na polju u Hrvatskoj, konačna odluka se može donijeti nakon provedbe dodatnih istraživanja. U slučaju pozitivnih rezultata, izrada novog kanala bušotine bi bila poželjna zbog lošeg stanja podzemne opreme u postojećim bušotinama, čiji bi servis iziskivao velike troškove.

## 7. LITERATURA

1. ADAMS, R.H., KHAN, A.M., 1969. Cyclic steam injection project performance analysis and some results of a continuous steam displacement pilot. *Journal of Petroleum Technology*, 21(01), pp.95-100.
2. AL-AJMI, G., ABULKAIR, S., MEJBEL, B., ALRASHEEDI, M., AL-AWADI, A., WAHBA, E., OSMAN, M., ABDULAZIZ, R., 2018, December. Once through Steam Generator Integrity OTSG. *In SPE International Heavy Oil Conference and Exhibition. OnePetro.*
3. AL-MANHALI, M., AL-RAWAHI, M., AL-HINAI, S., ALWAZEER, A., AL-SHAQSI, K., BRISSENDEN, S.J., 2014, December. Application of CSS to Develop a Thick Heavy Oil Field in South Oman. *In SPE International Heavy Oil Conference and Exhibition. OnePetro.*
4. ALBOUDWAREJ, H., 2006. Highlighting heavy oil. *Oilfield review*, pp.34-53.
5. ALI, S.M., 1974. Current status of steam injection as a heavy oil recovery method. *Journal of Canadian Petroleum Technology*, 13(01).
6. AGUILAR, M.G., ROBLES, E.M., CABRA GARDUZA, C.M., PERALTA, O.O., 2014, September. CSS performance in sands of samaria tertiary field, Mexico. *In SPE Heavy and Extra Heavy Oil Conference: Latin America. OnePetro.*
7. AMELI, F., ALASHKAR, A., HEMMATI-SARAPARDEH, A., 2018. Thermal Recovery Processes. *Fundamentals of Enhanced Oil and Gas Recovery from Conventional and Unconventional Reservoirs.*
8. ALVAREZ, J., HAN, S., 2013. Current overview of cyclic steam injection process. *Journal of Petroleum Science Research*, 2(3).
9. BARIĆ, G., 2006. Naftna geokemija. *INA–Industrija nafte dd Zagreb, Zagreb.*
10. DU, X., ZHENG, H., WANG, X., HUA, X., GUAN, W., ZHAO, F., XU, J., 2019, October. Case Study: Sand Control Technology During CSS in Liaohe and Xinjiang Heavy Oil Reservoirs. *In SPE Kuwait Oil & Gas Show and Conference. OnePetro.*
11. PRATS, M., 1989. Operational aspects of steam injection processes. *In Developments in Petroleum Science (Vol. 17, pp. 351-400). Elsevier.*
12. SHENG, J. ed., 2013. Enhanced oil recovery field case studies. *Gulf Professional Publishing.*
13. SHU, W.R., HARTMAN, K.J., 1988. Effect of solvent on steam recovery of heavy oil. *SPE reservoir Engineering*, 3(02), pp.457-465.

14. SEČEN, J., 2006. Metode povećanja iscrpka nafte. *INA Industrija nafte dd, Zagreb, Hrvatska.*
15. SEČEN, J., 2002. Razrada ležišta ugljikovodika. *INA-Industrija nafte dd, Naftaplin.*
16. TABER, J.J., MARTIN, F.D., SERIGHT, R.S., 1997. EOR screening criteria revisited—Part 1: Introduction to screening criteria and enhanced recovery field projects. *SPE reservoir engineering, 12(03), pp.189-198.*
17. TEHNIČKA DOKUMENTACIJA INA d.d., 2017., Full field optimization FFO X.
18. TEHNIČKA DOKUMENTACIJA INA d.d., 2020., Production system optimization event, X.
19. WILLHITE, G.P., DIETRICH, W.K., 1967. Design criteria for completion of steam injection wells. *Journal of Petroleum Technology, 19(01), pp.15-21.*

Internet izvori:

20. OSGOUEI Y.T., 2013. Faze cikličkog stimuliranja vodenom parom , [https://www.researchgate.net/figure/Cyclic-Steam-stimulation-process-CSS-4\\_fig4\\_335925009](https://www.researchgate.net/figure/Cyclic-Steam-stimulation-process-CSS-4_fig4_335925009) [20.04.2022.]
21. Dijelovi generatora mokre vodene pare, 2021.: <https://www.enhanced-oil-recovery.com/wp-content/uploads/2021/02/oilfield-steam-boiler-structure.jpg> [05.05.2022.]

## 8. PRILOZI

**Prilog 1.** Vrijednosti  $erfc(x)$  za odabrani  $t_D$  (Sečen, 2006)

$t_D$	$erfc(t_D)$	$t_D$	$erfc(t_D)$	$t_D$	$erfc(t_D)$
0	100.000	0,62	0,38059	1,6	0,02365
0,02	0,97744	0,64	0,36541	1,65	0,01962
0,04	0,95489	0,66	0,35062	1,7	0,01621
0,06	0,93238	0,68	0,33622	1,75	0,01333
0,08	0,90992	0,7	0,3222	1,8	0,01091
0,1	0,88754	0,72	0,30857	1,85	0,00889
0,12	0,86524	0,74	0,29532	1,9	0,00721
0,14	0,84305	0,76	0,28246	1,95	0,00582
0,16	0,82099	0,78	0,26999	2	0,00468
0,18	0,79906	0,8	0,2579	2,05	0,00374
0,2	0,7773	0,82	0,24619	2,1	0,00298
0,22	0,7557	0,84	0,23486	2,15	0,00236
0,24	0,7343	0,86	0,2239	2,2	0,00186
0,26	0,7131	0,88	0,21331	2,25	0,00146
0,28	0,69212	0,9	0,20309	2,3	0,00114
0,3	0,67137	0,92	0,19323	2,35	0,00089
0,32	0,65087	0,94	0,18373	2,4	0,00069
0,34	0,63064	0,96	0,17458	2,45	0,00053
0,36	0,61067	0,98	0,16577	2,5	0,00041
0,38	0,59099	1	0,1573	2,55	0,00031
0,4	0,57161	1,05	0,13756	2,6	0,00024
0,42	0,55253	1,1	0,11979	2,65	0,00018
0,44	0,53377	1,15	0,10388	2,7	0,00013
0,46	0,51534	1,2	0,08969	2,75	0,0001
0,48	0,49725	1,25	0,0771	2,8	0,00008
0,5	0,4795	1,3	0,06599	2,85	0,00006
0,52	0,4621	1,35	0,05624	2,9	0,00004
0,54	0,44506	1,4	0,04771	2,95	0,00003
0,56	0,42838	1,45	0,0403	3	0,00002
0,58	0,41208	1,5	0,03389	3,1	0,00001
0,6	0,39614	1,55	0,02838	3,2	0,00001

**Prilog 2.** Vrijednosti  $G(t_D)$  i  $G_1(t_D)$  u ovisnosti o izabranim vrijednostima  $t_D$  (Sečen, 2006)

$t_D$	$G(t_D)$	$E_n(t_D)$	$G_1(t_D)$	$t_D$	$G(t_D)$	$E_n(t_D)$	$G_1(t_D)$
0,0001	0,0001	0,99145	0,98882	0,0051	0,00484	0,94869	0,92426
0,0002	0,0002	0,98905	0,98424	0,0052	0,00493	0,94821	0,92356
0,0003	0,0003	0,98605	0,98075	0,0053	0,00502	0,94773	0,92288
0,0004	0,00039	0,98463	0,97783	0,0054	0,00512	0,94727	0,9222
0,0005	0,00049	0,98314	0,97526	0,0055	0,00521	0,94682	0,92152
0,0006	0,00059	0,98161	0,97295	0,0056	0,0053	0,94634	0,92086
0,0007	0,00069	0,98016	0,97083	0,0057	0,00539	0,94591	0,9202
0,0008	0,00078	0,97898	0,96887	0,0058	0,00548	0,94547	0,91955
0,0009	0,00088	0,97789	0,96703	0,0059	0,00558	0,94502	0,9189
0,001	0,00098	0,97646	0,96529	0,006	0,00567	0,94457	0,91826
0,0011	0,00107	0,97536	0,96365	0,0061	0,00576	0,94412	0,91763
0,0012	0,00117	0,97446	0,96208	0,0062	0,00585	0,94369	0,917
0,0013	0,00127	0,97347	0,96058	0,0063	0,00594	0,94329	0,91638
0,0014	0,00136	0,97235	0,95914	0,0064	0,00603	0,94284	0,91576
0,0015	0,00146	0,97148	0,95776	0,0065	0,00613	0,94244	0,91515
0,0016	0,00155	0,97063	0,95642	0,0066	0,00622	0,942	0,91455
0,0017	0,00165	0,96971	0,95512	0,0067	0,00631	0,94162	0,91395
0,0018	0,00174	0,96889	0,95387	0,0068	0,0064	0,94118	0,91335
0,0019	0,00184	0,96804	0,95265	0,0069	0,00649	0,94079	0,91276
0,002	0,00193	0,96719	0,95147	0,007	0,00658	0,94037	0,91218
0,0021	0,00203	0,96649	0,95032	0,0071	0,00667	0,93997	0,91159
0,0022	0,00212	0,96577	0,9492	0,0072	0,00677	0,93959	0,91102
0,0023	0,00222	0,96498	0,9481	0,0073	0,00686	0,93917	0,91045
0,0024	0,00231	0,96428	0,94704	0,0074	0,00695	0,9388	0,90988
0,0025	0,00241	0,96349	0,94599	0,0075	0,00704	0,93841	0,90932
0,0026	0,0025	0,96288	0,94497	0,0076	0,00713	0,93802	0,90876
0,0027	0,0026	0,96217	0,94397	0,0077	0,00722	0,93762	0,9082
0,0028	0,00269	0,9615	0,94298	0,0078	0,00731	0,93723	0,90765
0,0029	0,00279	0,96089	0,94202	0,0079	0,0074	0,93687	0,90711
0,003	0,00288	0,96016	0,94108	0,008	0,00749	0,9365	0,90657
0,0031	0,00297	0,95952	0,94015	0,0081	0,00758	0,93611	0,90603
0,0032	0,00307	0,95897	0,93924	0,0082	0,00767	0,93574	0,90549
0,0033	0,00316	0,95833	0,93834	0,0083	0,00776	0,93539	0,90496
0,0034	0,00326	0,95774	0,93746	0,0084	0,00785	0,93502	0,90444
0,0035	0,00335	0,95711	0,93659	0,0085	0,00794	0,93466	0,90391
0,0036	0,00344	0,95658	0,93574	0,0086	0,00803	0,93429	0,90339
0,0037	0,00354	0,95597	0,9349	0,0087	0,00813	0,93394	0,90288
0,0038	0,00363	0,95543	0,93407	0,0088	0,00822	0,93359	0,90236
0,0039	0,00372	0,95485	0,93326	0,0089	0,00831	0,93323	0,90185
0,004	0,00382	0,95429	0,93245	0,009	0,0084	0,93288	0,90135
0,0041	0,00391	0,95375	0,93166	0,0091	0,00849	0,93252	0,90085
0,0042	0,004	0,95324	0,93088	0,0092	0,00858	0,93217	0,90035
0,0043	0,0041	0,9527	0,9301	0,0093	0,00867	0,93183	0,89985
0,0044	0,00419	0,9522	0,92934	0,0094	0,00876	0,93149	0,89936
0,0045	0,00428	0,95168	0,92859	0,0095	0,00885	0,93116	0,89887
0,0046	0,00438	0,95118	0,92785	0,0096	0,00894	0,93082	0,89838
0,0047	0,00447	0,95066	0,92711	0,0097	0,00903	0,93047	0,89789
0,0048	0,00456	0,95016	0,92638	0,0098	0,00912	0,93014	0,89741
0,0049	0,00465	0,94967	0,92567	0,0099	0,00921	0,9298	0,89693
0,005	0,00475	0,9492	0,92496	0,01	0,00929	0,92949	0,89646

$t_D$	$G(t_D)$	$E_h(t_D)$	$G_1(t_D)$	$t_D$	$G(t_D)$	$E_h(t_D)$	$G_1(t_D)$
0,02	0,01806	0,90283	0,85848	1,05	0,57717	0,54969	0,42093
0,04	0,0347	0,86738	0,80902	1,1	0,59806	0,54369	0,41461
0,06	0,05051	0,84184	0,77412	1,15	0,61864	0,53795	0,40859
0,08	0,06571	0,82135	0,74655	1,2	0,63892	0,53244	0,40285
0,1	0,0804	0,80403	0,72358	1,25	0,65893	0,52714	0,39736
0,12	0,09467	0,78894	0,70379	1,3	0,67866	0,52205	0,39211
0,14	0,10857	0,7755	0,68637	1,35	0,69814	0,51714	0,38709
0,16	0,12214	0,76337	0,67079	1,4	0,71738	0,51241	0,38226
0,18	0,13541	0,75229	0,65668	1,45	0,73637	0,50784	0,37762
0,2	0,14841	0,74207	0,64379	1,5	0,75514	0,50343	0,37317
0,22	0,16117	0,73259	0,63191	1,55	0,77369	0,49916	0,36887
0,24	0,1737	0,72374	0,62091	1,6	0,79203	0,49502	0,36473
0,26	0,18601	0,71543	0,61065	1,65	0,81017	0,49101	0,36074
0,28	0,19813	0,7076	0,60105	1,7	0,82811	0,48712	0,35688
0,3	0,21006	0,70019	0,59202	1,75	0,84586	0,48335	0,35315
0,32	0,22181	0,69316	0,5835	1,8	0,86342	0,47968	0,34955
0,34	0,2334	0,68647	0,57545	1,85	0,88081	0,47612	0,34605
0,36	0,24483	0,68009	0,5678	1,9	0,89803	0,47265	0,34267
0,38	0,25611	0,67399	0,56054	1,95	0,91508	0,46927	0,33939
0,4	0,26726	0,66814	0,55361	2	0,93197	0,46599	0,3362
0,42	0,27826	0,66253	0,54699	2,05	0,9487	0,46278	0,33311
0,44	0,28914	0,65713	0,54066	2,1	0,96528	0,45966	0,33011
0,46	0,29989	0,65193	0,53459	2,15	0,98172	0,45661	0,32719
0,48	0,31052	0,64692	0,52876	2,2	0,998	0,45364	0,32435
0,5	0,32104	0,64208	0,52316	2,25	101.415	0,45073	0,32158
0,52	0,33145	0,6374	0,51776	2,3	103.016	0,4479	0,31889
0,54	0,34175	0,63288	0,51257	2,35	104.604	0,44512	0,31627
0,56	0,35195	0,62849	0,50755	2,4	106.179	0,44241	0,31372
0,58	0,36206	0,62423	0,50271	2,45	107.741	0,43976	0,31122
0,6	0,37206	0,62011	0,49802	2,5	109.292	0,43717	0,30879
0,62	0,38198	0,61609	0,49349	2,55	11.083	0,43463	0,30642
0,64	0,3918	0,61219	0,4891	2,6	112.356	0,43214	0,3041
0,66	0,40154	0,6084	0,48484	2,65	113.871	0,4297	0,30184
0,68	0,4112	0,6047	0,48071	2,7	115.374	0,42731	0,29963
0,7	0,42077	0,6011	0,4767	2,75	116.867	0,42497	0,29747
0,72	0,43027	0,59759	0,47281	2,8	118.349	0,42268	0,29535
0,74	0,43969	0,59417	0,46902	2,85	119.821	0,42042	0,29329
0,76	0,44903	0,59083	0,46533	2,9	121.282	0,41821	0,29126
0,78	0,4583	0,58756	0,46174	2,95	122.733	0,41605	0,28928
0,8	0,4675	0,58437	0,45825	3	124.175	0,41392	0,28734
0,82	0,47663	0,58126	0,45484	3,1	12.703	0,40977	0,28358
0,84	0,48569	0,57821	0,45152	3,2	129.847	0,40577	0,27997
0,86	0,49469	0,57522	0,44828	3,3	132.629	0,40191	0,27649
0,88	0,50362	0,5723	0,44511	3,4	135.377	0,39817	0,27315
0,9	0,5125	0,56944	0,44202	3,5	138.093	0,39455	0,26993
0,92	0,52131	0,56664	0,439	3,6	140.776	0,39105	0,26682
0,94	0,53006	0,56389	0,43605	3,7	14.343	0,38765	0,26382
0,96	0,53875	0,5612	0,43317	3,8	146.053	0,38435	0,26092
0,98	0,54738	0,55855	0,43035	3,9	148.648	0,38115	0,25812
1	0,55596	0,55596	0,42758	4	151.216	0,37804	0,2554



$t_D$	$G(t_D)$	$E_h(t_D)$	$G_1(t_D)$
4,1	153.757	0,37502	0,25278
4,2	156.272	0,37208	0,25023
4,3	158.762	0,36921	0,24776
4,4	161.227	0,36643	0,24537
4,5	163.669	0,36371	0,24304
4,6	166.088	0,36106	0,24078
4,7	168.485	0,35848	0,23858
4,8	17.086	0,35596	0,23645
4,9	173.214	0,3535	0,23437
5	175.548	0,3511	0,23235
5,5	186.925	0,33986	0,22297
6	197.862	0,32977	0,21466
6,5	208.405	0,32062	0,20723
7	218.595	0,31228	0,20054
7,5	228.465	0,30462	0,19446
8	238.045	0,29756	0,18891
8,5	247.358	0,29101	0,18382
9	256.425	0,28492	0,17912
9,5	265.267	0,27923	0,17477
10	273.898	0,2739	0,17073
11	290.584	0,26417	0,16343
12	306.583	0,25549	0,15702
13	321.974	0,24767	0,15131
14	33.682	0,24059	0,1462
15	351.177	0,23412	0,14158
16	36.509	0,22818	0,13738
17	378.597	0,2227	0,13355
18	391.733	0,21763	0,13002
19	404.526	0,21291	0,12677
20	417.002	0,2085	0,12376
21	429.184	0,20437	0,12096
22	441.091	0,2005	0,11835
23	452.741	0,19684	0,1159
24	464.151	0,1934	0,11361
25	475.334	0,19013	0,11145
26	486.304	0,18704	0,10942
27	497.072	0,1841	0,10749
28	507.649	0,1813	0,10567
29	518.045	0,17864	0,10395
30	528.269	0,17609	0,1023
35	577.075	0,16488	0,09517
40	62.259	0,15565	0,0894
45	665.402	0,14787	0,08462
50	705.941	0,14119	0,08057
55	744.537	0,13537	0,07709
60	781.443	0,13024	0,07405
65	816.864	0,12567	0,07136
70	850.966	0,12157	0,06897
75	883.887	0,11785	0,06682
80	91.574	0,11447	0,06488

## IZJAVA

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



---

Josip Banić



KLASA: 602-01/22-01/134  
URBROJ: 251-70-12-22-2  
U Zagrebu, 05.09.2022.

**Josip Banić, student**

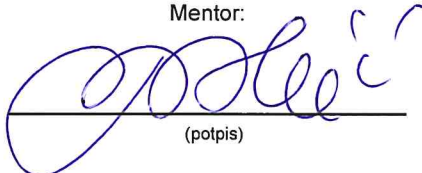
## RJEŠENJE O ODOBRENJU TEME

Na temelju vašeg zahtjeva primljenog pod KLASOM 602-01/22-01/134, URBROJ: 251-70-12-22-1 od 19.05.2022. priopćujemo vam temu diplomskog rada koja glasi:

### CIKLIČKO STIMULIRANJE LEŽIŠTA TEŠKE NAFTE VODENOM PAROM I MOGUĆNOST PRIMJENE U HRVATSKOJ

Za mentora ovog diplomskog rada imenuje se u smislu Pravilnika o izradi i obrani diplomskog rada Izv.prof.dr.sc. Vladislav Brkić nastavnik Rudarsko-geološko-naftnog-fakulteta Sveučilišta u Zagrebu.

Mentor:



(potpis)

Izv.prof.dr.sc. Vladislav Brkić

(titula, ime i prezime)

Predsjednik povjerenstva za  
završne i diplomske ispite:



(potpis)

Izv.prof.dr.sc. Luka Perković

(titula, ime i prezime)



Prodekan za nastavu i studente:



(potpis)

Izv.prof.dr.sc. Borivoje  
Pašić

(titula, ime i prezime)