

# Utjecaj oštećenja pribušotinske zone na učinkovitost utiskivanja otpadne slojne vode u ležište

---

Staneković, Ivan

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:169:736753>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-07-15**



*Repository / Repozitorij:*

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



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

**UTJECAJ OŠTEĆENJA PRIBUŠOTINSKE ZONE NA  
UČINKOVITOST UTISKIVANJA OTPADNE SLOJNE VODE U  
LEŽIŠTE**

Diplomski rad

Ivan Staneković

N 367

Zagreb, 2022.

UTJECAJ OŠTEĆENJA PRIBUŠOTINSKE ZONE NA UČINKOVITOST  
UTISKIVANJA OTPADNE SLOJNE VODE U LEŽIŠTE

IVAN STANEKOVIĆ

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

Sažetak

U diplomskom radu obrađen je utjecaj stupnja oštećenja pribušotinske zone na učinkovitost utiskivanja slojne vode u ležište. U tu svrhu teoretski je opisano oštećenje pribušotinske zone (skin faktor), kao i uzrok njegova nastanka i način uklanjanja. Opisan je način utiskivanja otpadne slojne vode u utisnu bušotinu te ono što je cilj rada, proračun za određivanje količine utiskivanja slojne vode u jedinici vremena s obzirom na različite veličine oštećenja i ograničenja ušća bušotine.

Ključne riječi: oštećenje pribušotinske zone (skin faktor), utisna bušotina, slojna voda, kapacitet utiskivanja, učinkovitost utiskivanja

Diplomski rad sadržava: 43 stranice, 15 slika, 7 tablica i 18 referenci

Jezik izvornika: hrvatski

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

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

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

Datum obrane: 11. veljače 2022., Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Sveučilište u Zagrebu

University of Zagreb

Master's Thesis

Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering

INFLUENCE OF WELLBORE DAMAGE ON THE EFFICIENCY OF BRINE WATER  
INJECTION RATE INTO THE RESERVOIR

IVAN STANEKOVIĆ

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

This master thesis deals with influence of wellbore damage on the efficiency of brine water injection rate into the reservoir. For this purpose, damage to the perforated zone (skin factor) is theoretically described, as well as the cause of its occurrence and the method of removal. The method of injection of brine wastewater into the injection well is described, and the calculation for determining the amount of injection of brine water per unit time with respect to different sizes of damage and limitations of the wellhead has been given.

Keywords: wellbore damage (skin factor), injection well, brine water, injection capacity, injection efficiency

Thesis contains: 43 pages, 15 figures, 7 tables and 18 references

Original in: Croatian

Archived 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

Assistant Professor Sonja Koščak Kolin, PhD

Associate Professor Borivoje Pašić, PhD

Date of defense: February 11th, 2022, at the Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering, University of Zagreb

*Velika hvala dragom mentoru, izv. prof. dr. sc. Vladislavu Brkiću, na pomoći i savjetima tijekom izrade ovoga diplomskog rada.*

*Prije svega, posebno hvala mojim voljenim roditeljima Mirjani i Mladenu i sestri Marijani koji su me kroz cijeli život poticali i hrabрили da uvijek idem naprijed i da nikad ne odustajem od svojih ciljeva. Hvala im što su me svojom ljubavlju i primjerom naučili kako biti častan i pošten čovjek.*

*Hvala cijeloj mojoj obitelji koja mi je bila podrška tijekom cijelog mog obrazovanja.*

*Velika hvala mojim prijateljima i kolegama Borisu, Robertu, Leu, Karlu, Dariju, Divijanu i Zvonimiru koji su mi bili oslonac i podrška tijekom svih životnih izazova.*

*Hvala mojoj djevojci Anamariji na dobroti i strpljivosti koju je pokazala tijekom svih mojih ispitnih rokova i studentskih obveza.*

*Na kraju se zahvaljujem dragom Bogu što nije dopustio da se udaljim od Njega i što mi je svojom nesebičnom ljubavlju podario dar života i vjere.*

*„Pisano je: Ne živi čovjek samo o kruhu, nego o svakoj riječi koja izlazi iz Božjih usta.“*

*Mt,4,4*

## SADRŽAJ

<b>I. POPIS SLIKA .....</b>	<b>I</b>
<b>II. POPIS TABLICA .....</b>	<b>II</b>
<b>III. POPIS KORIŠTENIH OZNAKA S ODGOVARAJUĆIM SI JEDINICAMA ....</b>	<b>III</b>
<b>1. UVOD .....</b>	<b>1</b>
<b>2. OŠTEĆENJE PRIBUŠOTINSKE ZONE .....</b>	<b>2</b>
2.1. Određivanje oštećenja pribušotinske zone.....	3
2.2. Uzroci i vrste oštećenja.....	11
2.3. Načini uklanjanja oštećenja ležišnih stijena .....	15
<b>3. UTISKIVANJE OTPADNE SLOJNE VODE .....</b>	<b>16</b>
3.1. Utisne bušotine .....	16
3.2. Konstrukcija utisne bušotine.....	17
3.3. Oštećenja uzrokovana utiskivanjem slojne vode .....	19
<b>4. ANALIZA OŠTEĆENJA PRIBUŠOTINSKE ZONE OVISNO O UTJECAJU KOLIČINE UTISNUTOG FLUIDA .....</b>	<b>21</b>
4.1. Nodal analiza utisne bušotine .....	21
4.2. Protjecanje utisnog fluida kroz proizvodi niz (tubing) .....	23
4.2.1. Faktor trenja .....	24
4.3. Protjecanje utisnog fluida iz bušotine u ležište.....	26
4.4. Proračun i konstrukcija IPR krivulje .....	28
<b>5. ZAKLJUČAK.....</b>	<b>41</b>
<b>6. POPIS LITERATURE.....</b>	<b>42</b>

## I. POPIS SLIKA

<b>Slika 2-1.</b> Shematski prikaz neograničenog ležišta s bušotinom u središtu.....	4
<b>Slika 2-2.</b> Model protoka fluida kroz perforacije.....	6
<b>Slika 2-3.</b> Nomogram za određivanje skin faktora ovisnog o geometriji perforacija .....	7
<b>Slika 2-4.</b> Krivulja raspodjele tlakova uokolo kanala bušotine za pozitivan skin faktor.....	9
<b>Slika 2-5.</b> Krivulja raspodjele tlakova uokolo kanala bušotine za negativan skin faktor ...	10
<b>Slika 2-6.</b> Prikaz zona oštećenja u perforiranoj jezgri .....	13
<b>Slika 2-7.</b> Mjesta nastanka različitih uzročnika oštećenja ležišnih stijena.....	14
<b>Slika 3-1.</b> Konstrukcija tipske utisne bušotine.....	18
<b>Slika 4-1.</b> Shematski prikaz bušotine za Nodal analizu s prikazom tlakova.....	22
<b>Slika 4-2.</b> Grafički prikaz IPR i $p_{wf}$ krivulje kada je $s = 0$ , $p_{wh} = 45 \times 10^5$ Pa.....	32
<b>Slika 4-3.</b> Grafički prikaz IPR i $p_{wf}$ krivulje za $s = 6,27$ i $s = 0$ kada je $p_{wh} = 45 \times 10^5$ Pa...	34
<b>Slika 4-4.</b> Grafički prikaz $p_{wf}$ krivulje kada je $p_{wh} = 65 \times 10^5$ Pa .....	35
<b>Slika 4-5.</b> Grafički prikaz IPR i $p_{wf}$ krivulje kada je $s = -2$ .....	37
<b>Slika 4-6.</b> Grafički prikaz IPR i $p_{wf}$ krivulje za $s = 8,22$ i $s = -3,07$ .....	38
<b>Slika 4-7.</b> Sumirani grafički prikaz konstruiranih krivulja na temelju rezultata proračuna	39

## II. POPIS TABLICA

<b>Tablica 3-1.</b> Sastav uzorka slojne vode izdvojen dehidracijom s jednog hrvatskog naftnog polja .....	20
<b>Tablica 4-1.</b> Rezultati proračuna pada tlaka i dinamičkog tlaka na dnu kada je $s = 0$ .....	30
<b>Tablica 4-2.</b> Rezultati proračuna brzine protoka slojne vode u tubingu, Reynoldsovog broja i faktora trenja.....	31
<b>Tablica 4-3.</b> Rezultati proračuna dinamičkog tlaka na dnu bušotine kada je $p_{wh} = 45 \times 10^5$ Pa .....	31
<b>Tablica 4-4.</b> Rezultati proračuna dinamičkog tlaka na dnu kada je $s = 6,27$ .....	33
<b>Tablica 4-5.</b> Rezultati proračuna dinamičkog tlaka na dnu bušotine kada je $p_{wh} = 65 \times 10^5$ Pa .....	35
<b>Tablica 4-6.</b> Rezultati proračuna pada tlaka i dinamičkog tlaka na dnu kada je $s = -2$ .....	36



### III. POPIS KORIŠTENIH OZNAKA S ODGOVARAJUĆIM SI JEDINICAMA

$B$	volumni faktor, $m^3/m^3$
$c_t$	ukupna stlačivost fluida i ležišta, $Pa^{-1}$
$d_t$	unutarnji promjer proizvodnog niza, m
$d_{zc}$	unutarnji promjer kolone zaštitnih cijevi, m
$f$	faktor trenja, -
$f_F$	Fanningov faktor trenja, -
$g$	ubrzanje sile teže, $9,80665 m/s^2$
$h$	efektivna debljina ležišta, m
$h_p$	duljina perforiranog intervala, m
$J$	indeks proizvodnosti, $(m^3/s)/Pa$
$k$	apsolutna propusnost ležišne stijene, $m^2$
$k_{dp}$	propusnost ležišta u zbijenoj zoni oko perforacija, $m^2$
$k_H$	horizontalna propusnost ležišta, $m^2$
$k_s$	propusnost ležišne stijene u pribušotinskoj zoni, $m^2$
$k_v$	vertikalna propusnost ležišta, $m^2$
$L_p$	duljina perforacije u ležišnoj stijeni, m
$L_t$	duljina proizvodnog niza, m
$m$	nagib pravocrtnog dijela krivulje testa porasta tlaka, Pa
$N$	ukupan broj perforacija, -
$n$	indeks toka njutnovskih fluida, -
$\bar{p}$	srednji ležišni tlak, Pa
$p_D$	bezdimezionalni tlak, -
$p_i$	početni ležišni tlak, Pa

$p_{utiskivanja}$	tlak utiskivanja fluida u bušotinu, Pa
$p_{wf}$	dinamički tlak na dnu bušotine, Pa
$p_{wf,ideal}$	dinamički tlak na dnu kada je $s = 0$ , Pa
$p_{wf,real}$	dinamički tlak na dnu kada je $s > 0$ , Pa
$p_{ws}$	statički tlak na dnu bušotine, Pa
$q$	protok, $m^3/s$
$q_{inj}$	protok utisnog fluida, $m^3/s$
$Re$	Reynoldsov broj, -
$r_{dp}$	radijus zbijene zone oko perforacije, m
$r_e$	radijus crpljenja bušotine, m
$r_p$	radijus perforacije u ležišnoj stijeni, m
$r_s$	radijus pribušotinske zone promijenjene propusnosti, m
$r_w$	radijus bušotine, m
$s$	ukupni skin faktor, -
$s_{c+\theta}$	skin zbog djelomičnog opremanja i nagiba kanala, -
$s_d$	skin zbog oštećenja, -
$s_{dp}$	skin faktor prouzročen promjenom propusnosti u zbijenoj zoni oko perforacija, -
$s_{p'}$	skin faktor prouzročen geometrijom perforacija, -
$s_p$	skin zbog nepotpune perforacije i ne idealnog protoka fluida oko perforacija, -
$v$	brzina, m/s
$\gamma$	smična brzina, $s^{-1}$
$\varepsilon$	relativna hrapavost cijevi, -
$\eta$	koeficijent otpora tečenja, Pa·s

$\mu$	viskoznost, Pa·s
$\tau$	smično naprezanje, Pa
$\sum s_{ps}$	suma pseudoskinova, -
$\Delta p$	pad tlaka, Pa
$\Delta p_{ležišta}$	pad tlaka uslijed protjecanja fluida iz bušotine u ležište, Pa
$\Delta p_s$	pad tlaka uzrokovan skinom, Pa
$\Delta p_{tubinga}$	pad tlaka uslijed protjecanja fluida u proizvodnom nizu, Pa

## 1. UVOD

Razvojem novih tehnologija i industrije te posebice gospodarskim napretkom nerazvijenih zemalja u svijetu, raste potreba za energijom. Prema istraživanjima EIA (engl. *Energy Information Administration*), pretpostavlja se da će globalna potrošnja za energijom rasti do 2050. godine za 50% u odnosu na 2020. godinu (EIA, 2021). Posljedično takvim podacima, rast će i potreba za veće i brže istraživanje i eksploataciju ugljikovodika. Kako bi se ostvarila veća količina pridobivenog fluida iz ležišta ugljikovodika, potrebno je praćenje svih parametara tijekom izrade bušotine, opremanja i u konačnici same proizvodnje ugljikovodika iz bušotine. S toga je potrebno poznavati poroznost, propusnost, skin faktor, temperaturu, tlakove u bušotini i drugo, te njihove promjene. Kako je sve više proizvodnih polja u zreloj fazi s obzirom na eksploataciju, u ukupnoj proizvodnji kapljevine sve je veći udio slojne vode koju treba na trajan i siguran način zbrinuti. Slojna voda zbog svog kemijsko-fizikalnog sastava ne može se bez obrade ispuštati u okoliš. Sama obrada slojne vode zahtjevana je i skupa te je potrebno dobiti i odgovarajuću dozvolu za njeno odlaganje u okoliš što predstavlja dodatni trošak samoj kompaniji i dodatno opterećuje poslovanje proizvodnih polja. Stoga naftne kompanije slojnu vodu prvenstveno koriste za održavanje slojnog tlaka u tzv. sekundarnim metodama crpljenja ugljikovodika iz ležišta. Ako se ne koriste sekundarne metode crpljenja ležišta ili kod sekundarnih metoda postoji višak slojne vode, onda se ona utiskuje u pogodne geološke formacije i na taj način deponira što je ekološki prihvatljivo. Kada postojeća proizvodna bušotina u iscrpljenom djelu ležišta prestane s radom, ona se može prenamijeniti u utisnu ili mjernu bušotinu. U ovom radu, opisat će se teorija oštećenja pribušotinske zone ležišnih stijena te njen utjecaj na učinkovitost utiskivanja otpadne slojne vode u ležište s obzirom na sve veću potrebu zbrinjavanja većih količina zbog zrele eksploatacijske faze naših proizvodnih polja i veliku zavodnjenost ležišta.

## 2. OŠTEĆENJE PRIBUŠOTINSKE ZONE

Tijekom svih faza izrade i rada bušotine dolazi do oštećenja pribušotinske zone. Uzroci oštećenja pribušotinske zone, odnosno ležišne stijene mogu biti različiti, no svako se oštećenje očituje smanjenjem propusnosti ležišne stijene. Dakle, oštećenja mogu nastati tijekom izrade kanala bušotine, tijekom cementacije kolone zaštitnih cijev, tijekom perforiranja, tijekom opremanja i održavanja bušotine, tijekom stimulacijskih radova te tijekom utiskivanja ili proizvodnje fluida iz ležišta. Najčešće su takva oštećenja, fizička čepjenja pornog prostora stijena u pribušotinskoj zoni, čvrstim česticama koje djelomično blokiraju pore i uzrokuju otpor protoku, čime se smanjuje proizvodnost bušotine (Jahn et al., 2008).

Skin faktor (engl. *skin factor*) je svako oštećenje pribušotinske zone bez obzira na uzrok i oblik oštećenja. On je matematički bezdimenzionalni parametar koji predstavlja smanjenje propusnosti pribušotinske zone u odnosu na propusnost ležišta. Skin faktor se koristi kako bi se jednadžba protoka u idealnim uvjetima (homogeni i izotropni porozni medij) prilagodila za primjenu u realnim uvjetima. Skin faktor se sastoji od nekoliko komponenti oštećenja koje su navedene u jednadžbi (2-1). Komponenta oštećenja ležišne stijene pribušotinske zone  $s_d$  predstavlja promjenu relativne propusnosti čepljenjem pornog prostora te se ta komponenta može spriječiti ili ukloniti kemijskim obradama ležišnih stijena. Druga komponenta,  $s_{c+\theta}$  predstavlja oštećenje uzrokovano djelomičnim opremanjem i nagibom kanala bušotine čime dolazi do odstupanja od idealnog radijalnog strujanja fluida oko kanal bušotine. Komponenta skina uzrokovana nepotpunim perforiranjem ležišta i neidealnim protokom fluida oko perforacije označava se  $s_p$ . Ona ovisi o mnogo parametara poput kuta perforacije, broja i promjera perforacija, dubini i gustoći perforacija te se utjecaj ove komponente može minimalizirati optimiranjem procesa perforiranja. Komponenta pseudoskina  $\sum s_{ps}$  predstavlja skinove koji nastaj zbog ne-Darcyjevog režima protjecanja i višefaznog turbulentnog protjecanja oko kanala bušotine (Boyun et al., 2017).

$$s = s_d + s_{c+\theta} + s_p + \sum s_{ps} \quad (2-1)$$

- gdje su:

$s$  – ukupni skin faktor, -

$s_d$  – skin zbog oštećenja, -

$s_{c+\theta}$  – skin zbog djelomičnog opremanja i nagiba kanala, -

$s_p$  – skin zbog nepotpune perforacije i neidealnog protoka fluida oko perforacija, -

$\sum s_{ps}$  – suma pseudoskinova, -

## 2.1. Određivanje oštećenja pribušotinske zone

Idealno eruptivno pridobivanje ugljikovodika ostvaruje se razlikom između statičkog i dinamičkog tlaka na dnu bušotine (2-2) koja se naziva depresija.

$$\Delta p' = p_{ws} - p_{wf} \quad (2-2)$$

- gdje su:

$\Delta p'$  – pad tlaka u idealnim uvjetima, Pa

$p_{ws}$  – statički tlak na dnu bušotine, Pa

$p_{wf}$  – dinamički tlak na dnu bušotine, Pa

Kako kod realnih uvjeta pridobivanja ugljikovodika, uslijed oštećenja pribušotinske zone dolazi do pada tlaka, potrebno je osigurati veću depresiju za istu vrijednost proizvodnje ležišnog fluida. Odnosno, potrebno je povećati depresiju za vrijednost pada tlaka uslijed skin faktora, te se tada depresija računa prema jednadžbi:

$$\Delta p = \Delta p' + \Delta p_s \quad (2-3)$$

- gdje su:

$\Delta p$  – pad tlaka u realnim uvjetima, Pa

$\Delta p_s$  – pad tlaka uzrokovan skinom, Pa

Promatrajući pribušotinsku zonu promijenjene propusnosti  $k_s$ , na temelju korelacije za stacionarni protok kroz cilindar omeđen radijusom bušotine  $r_w$  i radijusom dosega skina

$r_s$  (slika 2-1.), može se izračunati dodatni stacionarni pad tlak uzrokovan oštećenjem pribušotinske zone na temelju Van Everdingenove jednadžbe (1953):

$$\Delta p_s = s \frac{qB\mu}{2\pi kh} \quad (2-4)$$

- gdje su:

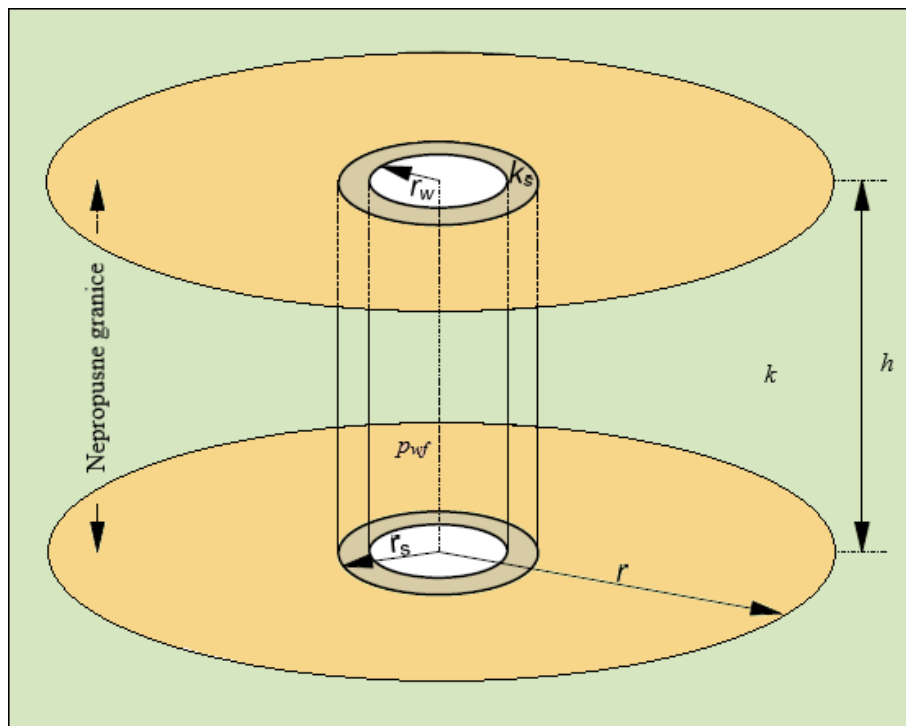
$q$  – protok,  $\text{m}^3/\text{s}$

$B$  – volumni faktor,  $\text{m}^3/\text{m}^3$

$\mu$  – viskoznost,  $\text{Pa}\cdot\text{s}$ ,

$k$  – apsolutna propusnost ležišne stijene,  $\text{m}^2$

$h$  – efektivna debljina ležišta,  $\text{m}$



**Slika 2-1.** Shematski prikaz neograničenog ležišta s bušotinom u središtu (Čikeš, 2015)

Oduzme li se vrijednost realnog (2-5) i idealnog (2-6) dinamičkog tlaka dobije se vrijednost pada tlaka koji nastaje zbog oštećenja pribušotinske zone (2-7).

$$p_{wf,real} = p_s - \frac{qB\mu}{2\pi k_s h} \ln \frac{r_s}{r_w} \quad (2-5)$$

$$p_{wf,ideal} = p_s - \frac{qB\mu}{2\pi kh} \ln \frac{r_s}{r_w} \quad (2-6)$$

$$\Delta p_s = p_{wf,ideal} - p_{wf,real} = \frac{qB\mu}{2\pi h} \ln \frac{r_s}{r_w} \left( \frac{1}{k_s} - \frac{1}{k} \right) = \frac{qB\mu}{2\pi kh} \ln \frac{r_s}{r_w} \left( \frac{k}{k_s} - 1 \right) \quad (2-7)$$

- gdje su:

$p_{wf,real}$  – dinamički tlak na dnu kada je  $s \neq 0$ , Pa

$p_{wf,ideal}$  – dinamički tlak na dnu kada je  $s > 0$ , Pa

$r_s$  – radijus pribušotinske zone promijenjene propusnosti, m

$r_w$  – radijus bušotine, m

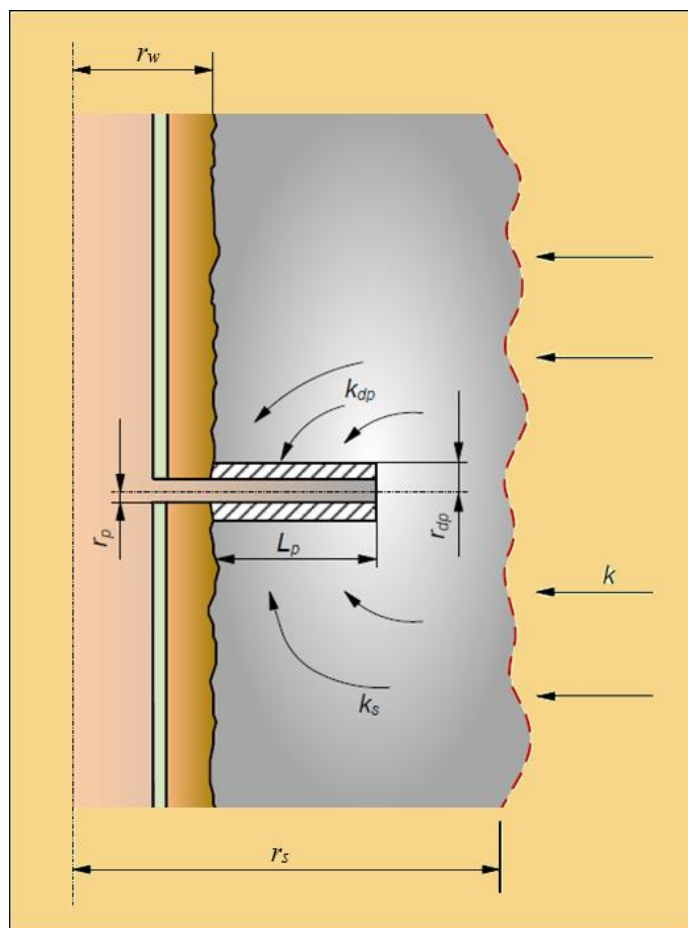
$k_s$  – propusnost ležišne stijene u pribušotinskoj zoni, m<sup>2</sup>

Uvrštavanjem jednadžbe (2-4) u jednadžbu (2-7) dobije se izraz za skin faktor koji glasi:

$$s = \left( \frac{k}{k_s} - 1 \right) \ln \frac{r_s}{r_w} \quad (2-8)$$

Komponenta skin faktora uzrokovana nepotpunim perforacijama i ne idealnim protokom fluida oko perforacije  $s_p$ , može se prikazati kao suma dvije nezavisne komponente skin faktora. Slika 2-2. prikazuje model protoka kroz perforacije pomoću kojega se mogu definirane jednadžbe za skin uzrokovan perforiranjem.





**Slika 2-2.** Model protoka fluida kroz perforacije (Čikeš, 2015)

Kako se perforiranjem mijenja geometrija protoka u odnosu na idealno stanje, dolazi do dodatnog pada tlaka u pribušotinskoj zoni. Budući da oštećenje ovisi o broju i veličini perforacija, kao i o dubini prodora perforacija te njihovom rasporedu i geometriji, komponenta skin faktor se može prikazati slijedećim izrazom:

$$s_{p'} = \left( \frac{h}{h_p} - 1 \right) \left[ \ln \left( \frac{h}{r_w} \sqrt{\frac{k_H}{k_v}} \right) - 2 \right] \quad (2-9)$$

- gdje su:

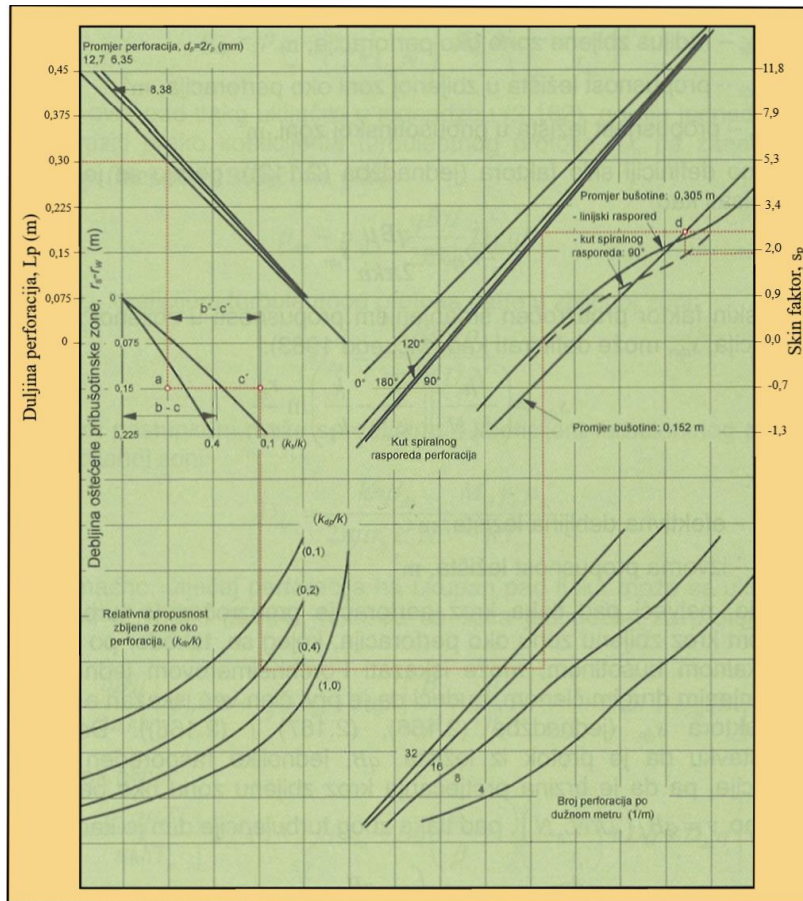
$s_{p'}$  – skin faktor prouzročen geometrijom perforacija, -

$h_p$  – duljina perforiranog intervala, m

$k_H$  – horizontalna propusnost ležišta,  $m^2$

$k_v$  – vertikalna propusnost ležišta,  $m^2$

Ujedno se vrijednost skin faktora uzrokovana geometrijom perforacija, može odrediti korištenjem nomograma. Na temelju funkcija gustoće perforacija, promjera duljine i rasporedu perforacija, relativne propusnosti zbijene zone oko perforacija te promjera bušotine, može se odrediti veličina skin faktora koristeći nomogram,. Na slici 2-3. je prikazan nomogram u kojem je zanemaren utjecaj nepotpunog raskrivanja ležišta, odnosno zanemaren je odnos duljine perforiranog intervala i debljine ležišta, što je opravdano ako je perforirano više od 75% debljine ležišta (Čikeš, 2015).



**Slika 2-3.** Nomogram za određivanje skin faktora ovisnog o geometriji perforacija (Čikeš, 2015)

Također se oštećenje prouzročeno smanjenjem propusnosti u zbijenoj zoni oko perforacija prema McLeodnu (1983) može odredit u funkciji propusnosti i radijusa zone oko perforacija:

$$S_{dp} = \left( \frac{h_p}{L_p N} \right) \left( \frac{k}{k_{dp}} - \frac{k}{k_s} \right) \ln \left( \frac{r_{dp}}{r_p} \right) \quad (2-10)$$

- gdje su:

$s_{dp}$  – skin faktor prouzročen promjenom propusnosti u zbijenoj zoni oko perforacija, -

$N$  – ukupan broj perforacija, -

$L_p$  – duljina perforacije u ležišnoj stijeni, m

$r_p$  – radijus perforacije u ležišnoj stijeni, m

$r_{dp}$  – radijus zbijene zone oko perforacije, m

$k_{dp}$  – propusnost ležišta u zbijenoj zoni oko perforacija,  $m^2$

Zbroje li se jednačbe (2-9) i (2-10), dobije se izraz za komponentu skina uzrokovanu nepotpunim perforacijama koji je:

$$s_p = s_{p'} + s_{dp} \quad (2-11)$$

Pad tlaka uzrokovan skin efektom se također može izračunati uz pomoć testa porasta tlaka. Test porasta tlaka (engl. *pressure buildup test*) je metoda ispitivanja bušotine koja zahtijeva zatvaranje proizvodne bušotine nakon što je bušotina dovoljno dugo proizvodila konstantnim protokom te je došlo do stabilizacije tlaka u njoj. Neprekidno se mjeri tlak u zatvorenoj bušotini te se završetkom mjerenja, rezultati prikazuju kao grafička krivulja testa porasta tlaka. Uz pomoć krivulje se mogu odrediti parametri poput propusnosti, skina i radijusa crpljena bušotine. Određivanjem skina te nagiba pravocrtnog dijela krivulje testa porasta tlaka, može se izračunati pad tlak uzrokovan skin efektom preko izraza:

$$\Delta p_s = 0,87 \times m \times s \quad (2-12)$$

- gdje je:

$m$  – nagib pravocrtnog dijela krivulje testa porasta tlaka (Pa), koji se računa preko izraza koji glasi:

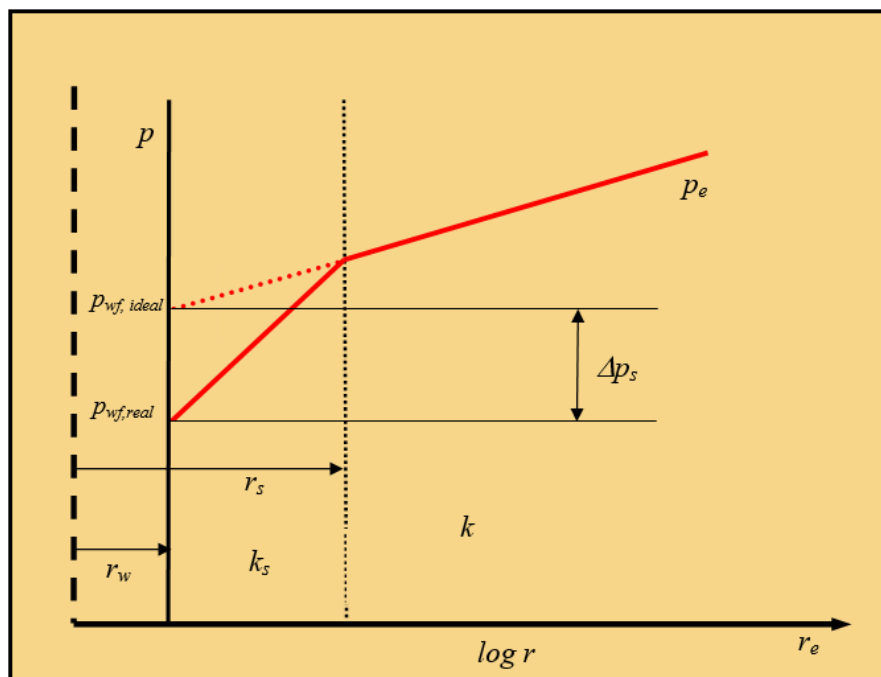
$$m = 1,151 \frac{q\mu B}{kh} \quad (2-13)$$

Skin faktor može biti pozitivan ili negativan. Ukoliko je skin faktor pozitivan, znači da je došlo do oštećenja ležišne stijene i smanjenja propusnosti te je kontakt između bušotine

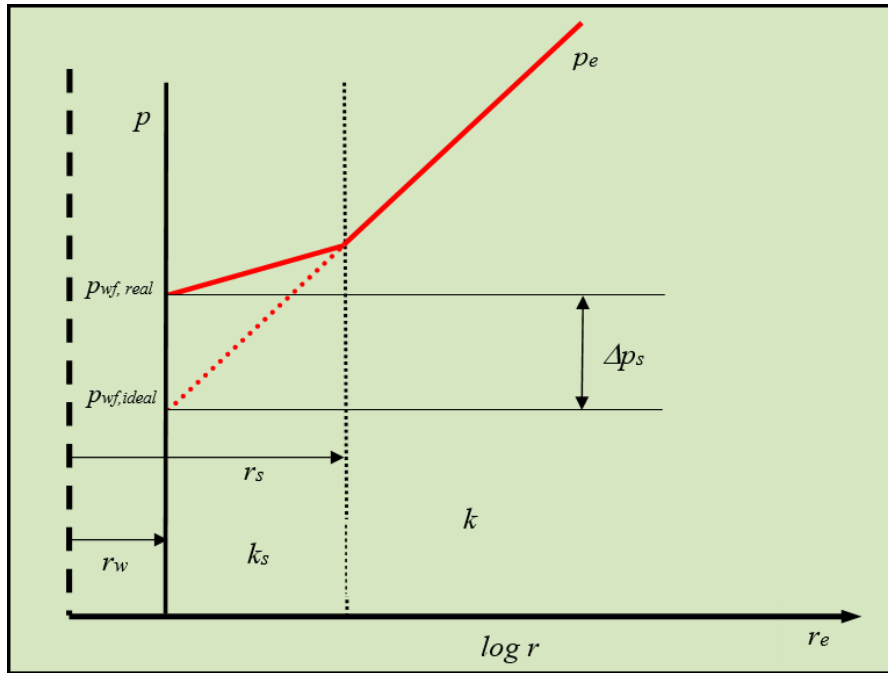
i ležišta slab. Negativan predznak skin faktora ukazuje da je došlo do stimulacije ležišta stijene, odnosno do povećanja kontaktne površine između bušotine i ležišta. Veličine vrijednosti skin faktora mogu se podijeliti prema skali vrijednosti (Brkić, 2020b):

- $s > 0$  – oštećena bušotina
- $s \approx 1-2$  – umjereno oštećenje
- $s \approx 5$  – značajno oštećenje
- $s > 10$  – ukazuje na mehanički problem
- $s < 0$  – stimulirana bušotina
- $s \approx -3$  – ograničena vrijednost kemijske obrade
- $s \approx -4$  – vrijednost dobro obavljenog frakturiranja
- $s \approx -5,5$  – najniža moguća vrijednost

Slike 2-4. i 2-5. prikazuju krivulju raspodjele tlakova u području oštećenih i neoštećenih stijena uokolo kanala bušotine. Oznaka  $p_{wf,ideal}$  prikazuje dinamički tlak na dnu bušotine bez skina, a  $p_{wf,real}$  kada postoji skin. Slika 2-4. odnosi se na raspodjelu tlakova u stijenama kod kojih je došlo do pozitivnog skina, dok je na slici 2-5. prikazan odnos tlakova i radijusa kod stimuliranih stijena s negativnim skin efektom.



**Slika 2-4.** Krivulja raspodjele tlakova uokolo kanala bušotine za pozitivan skin faktor (Brkić, 2020a)



**Slika 2-5.** Krivulja raspodjele tlakova uokolo kanala bušotine za negativan skin faktor (Brkić, 2020a)

Poznavanje oštećenja ležišnih stijena važno je i kod određivanja trenutčne proizvodnje naftne bušotine (2-14) jer se pomoću nje može izračunati indeks proizvodnosti.

$$q = \frac{2\pi kh(p_i - p_{wf})}{B\mu(p_D + s)} \quad (2-14)$$

- gdje je:

$p_D$  – bezdimenzionalni tlak, -

Budući da je indeks proizvodnosti definiran kao odnos trenutčne proizvodnje bušotine i razlike između ležišnog tlaka (početni, srednji ili tlak na vanjskoj granici ležišta) i dinamičkog tlaka u bušotini, računa se prema jednadžbi (Čikeš, 2015):

$$J = \frac{q}{p_i - p_{wf}} = \frac{2\pi kh}{B\mu(p_D + s)} \quad (2-15)$$

- gdje je:

$J$  – indeks proizvodnosti, (m<sup>3</sup>/s)/Pa

No ako se uzme da je protok u funkciji srednjeg ležišnog tlaka tada se sređivanjem jednadžbi može pisati:

$$J = \frac{q}{\bar{p} - p_{wf}} = \frac{2\pi kh}{B\mu \left( \ln \frac{0,472r_e}{r_w} + s \right)} \quad (2-16)$$

- gdje je:

$\bar{p}$  – srednji ležišni tlak, Pa

Korištenjem Standingove jednadžbe (1970) može se odrediti djelotvornost protoka (engl. *flow efficiency* - FE) prema jednadžbi 2-17. Ona predstavlja odnos realnog i idealnog indeksa proizvodnosti. Što je njihov odnos manji, skin faktor je veći, a proizvodnost bušotine manja.

$$FE = \frac{J_{realni}}{J_{idealni}} = \frac{\Delta p_{idealni}}{\Delta p_{realni}} = \frac{\bar{p}_r - p_{wf} - \Delta p_s}{\bar{p}_r - p_{wf}} \quad (2-17)$$

## 2.2. Uzroci i vrste oštećenja

Kako je već spomenuto, oštećenja ležišnih stijena pribušotinske zone mogu nastati tijekom raznih procesa u kanalu bušotine.

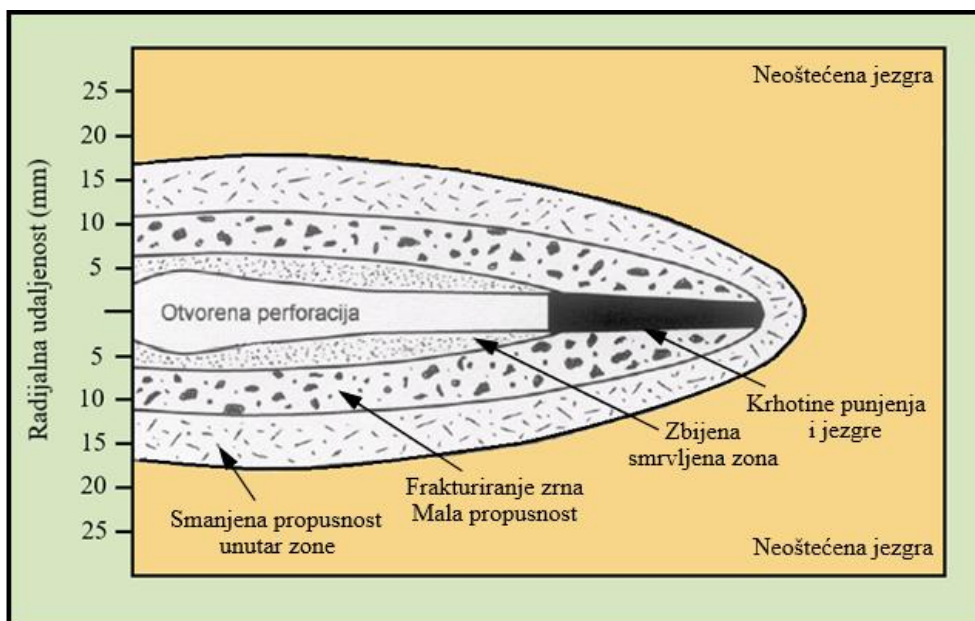
Tijekom bušenja postoji najveća mogućnost oštećenja ležišnih stijena jer je proces bušenja jedan od duljih radnih zahvata u kanalu bušotine. Kontakt isplake i ležišnih stijena pod djelovanjem diferencijalnog tlaka može izazvati prodor čvrstih čestica i filtrata isplake u pribušotinsku zonu. Kako se isplaka najčešće sastoji od glina, oteživača i krhotina stijena, njihovo utiskivanje i prodiranje u proizvodnu zonu začepљуje porni prostor ležišne stijene te smanjuje propusnost oko kanala bušotine. Ukoliko u ležišnim stijenama postoje pore velikog promjera ili su prisutne prirodne pukotine u stijenama, doći će do boljeg prodora čestica isplake. Također, velike brzine protjecanja isplake u prstenastom prostoru dovest će do erozije i odnošenja isplačnog obloga kao i mala brzina bušenja koja će povećati gubljenje isplake i u konačnici potaknuti prodor čvrstih čestica u ležišnu stijenu. Međutim, ni velika brzina bušenja nije dobra jer se time povećava količina prodora filtrata isplake te on može

ostvariti duboka oštećenja koja prodiru i preko 0,5 metara u stijenu (Gaurina-Međimurec, 2004).

Ovisno o osjetljivosti stijena na filtrat isplake, ovisit će i veličina oštećenja pribušotinske zone. Slabo propusne stijene, stijene koje sadrže gline koje mogu bubriti ili dispergirati te ležišne stijene iz kojih se proizvodi nafta s visokim udjelom parafina ili asfaltena, osjetljivije su na prodor filtrata isplake, te će uz prisutnost velikog nadtlaka i visoke propusnosti isplačnog obloga doći do povećanog prodora filtrata isplake.

Tijekom cementacije kolone zaštitnih cijevi također može doći do oštećenja stijene, naročito kada se ono radi pri visokom tlaku. Ispirači i razdjeljivači koji se koriste u procesu cementacije mogu također utjecati na oštećenje stijene jer ako ne posjeduju odgovarajuća filtracijska svojstva, naslage stijena će biti manje zaštićene od prodora filtrata. Ujedno prodor tih fluida može izazvati migraciju i dispregiju glina u glinovitim ležištima. Cementna kaša će utjecati na smanjenje propusnosti ležišnih stijena ako filtrat cementne kaše dođe u kontakt sa slojnom vodom bogatom kalcijevim ionima jer će doći do taloženja kalcijeva karbonata, vapna ili kalcij-silikat hidrata (Gaurina-Međimurec, 2004). U slučaju da se koristi predispergirana cementna kaša dolazi do taloženja čvrstih čestica i izdvajanja vode te može doći do stvaranja vodene blokade koja uzrokuje povećanje zasićenja vode u pribušotinskoj zoni i smanjenje relativne propusnosti.

Perforiranje je proces probijanja otvora kroz zaštitne cijevi i cementni kamen uz zadovoljavajuću dubinu prodiranja perforacije u ležišnu stijenu (Matanović i Moslavac, 2011). Tijekom perforiranja doći će do potiskivanja čestica stijena i eksploziva korištenog u perforiranju u stijenku perforacije čime se smanjuje propusnost oko zone perforacija. Ujedno, nedovoljna dubina perforacija i nepravilan izbor geometrije perforacija s obzirom na tip stijene, može izazvati promjenu propusnosti ležišta i uzrokovati skin faktor. Na slici 2-6. prikazana su oštećenja u stijeni uzrokovana perforiranjem.



**Slika 2-6.** Prikaz zona oštećenja u perforiranoj jezgri (Brkić, 2020b)

Fluidi koji se koriste tijekom opremanja i održavanja bušotina mogu također izazvati oštećenja stijene, a neka od njih mogu biti taloženje kamenca ili bubrenje i disperzija glina uslijed prodora filtrata kao i stvaranje emulzijske blokade.

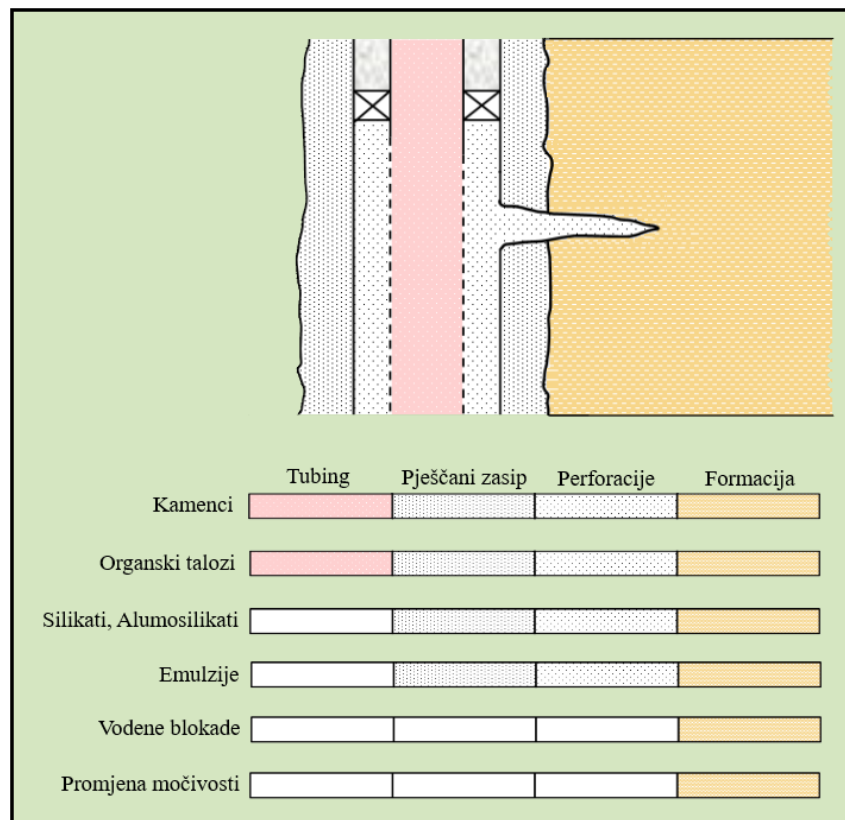
Prirodna oštećenja stijena nastaju prvenstveno kao posljedica proizvodnje ležišnog fluida. Za vrijeme proizvodnje pri velikim depresijama ili protocima može doći do trajnog oštećenja jer se mogu pokrenuti prirodni siltovi i gline koje se nalaze na stijenama pora te ovisno o veličini mogu izazvati čepljenje pornih kanalića. Također tijekom proizvodnje zbog manjih temperatura i tlakova može doći do odlaganja kamenca u bušotini.

Tijekom stimulacijskih radova u kanalu bušotine, potrebno je obratiti pažnju kod utiskivanja fluida za čišćenje kanala bušotine radi uklanjanja produkta korozije ili taloga, jer se pojedini spojevi poput parafina mogu otopiti u radnom fluidu te se nataložiti u ležište i izazvati trajno oštećenje. Uglavnom obrade ležišnih stijena kiselinom služe za povećanje njene propusnosti, no ponekad sama kemijska obrada može izazvati oštećenja. To se može dogoditi u slučaju neodgovarajućeg dizajna kiselinske obrade, pri čemu dolazi do taloženja parafina kada se utiskuje veća količina kiseline ili taloženjem produkta reakcije kiseline i asfaltena.

Kada se radi o vrstama oštećenja, one mogu biti različite. Kamenac se kao talog minerala u bušotini može javiti u više varijanti poput karbonatnog kamenca, kloridnog



kamenaca, sulfatnih kamenaca ili silicij-kamenca. Oni mogu nastati u samoj stijeni ili perforacijama, no i u proizvodnom nizu te pješčanom zasipu kao posljedica miješanja nekompatibilnih fluida (slika 2-7.). Kada tijekom proizvodnje dođe do smanjenja tlaka, može doći do stvaranja organskih taloga asfaltena, odnosno parafina u slučaju smanjenja temperature, te će se takvi talozi također odlagati u ležišnim stijenama. Vrste oštećenja koja se još javljaju u formaciji mogu biti stvaranje vodene blokade, promjena močivosti pornog sustava te stvaranje emulzija.



**Slika 2-7.** Mjesta nastanka različitih uzročnika oštećenja ležišnih stijena (Brkić, 2020b)

### 2.3. Načini uklanjanja oštećenja ležišnih stijena

Ležišne stijene pribušotinske zone mogu se obraditi primjenom raznih otapala u svrhu smanjenja oštećenja, odnosno smanjenja skin faktora. Kemijske obrade su u stvari stimulacijske metode u kojima dolazi do uklanjanja oštećenja djelovanjem kiselina na nakupljene čestice. Kiseline će djelovati na otapanje mineralnog skeleta i na čestice radnog fluida koje su dospjele u porni prostor. Kiseline koje se koriste moraju biti pristupačne, jeftine, ali i sigurne za rukovanje. Također ne smiju reagirati s čelikom, a u reakciji s tvarima u bušotini moraju davati topive produkte. Takve kiseline su klorovodična, octena i mravlja kiselina, koje se koriste za obradu karbonatnih stijena, dok se za obradu pješčenjačkih stijena uz ove navedene kiseline, koristi još i fluorovodična kiselina. Kako ne bi došlo do oslobađanja finih čestica koje čepe pore, stvaranja taloga ili emulzije, u kiselinu se mogu dodati razni aditivi poput surfaktanata, stabilizatora glina, inhibitora korozije, alkohola i drugih.

Na temelju laboratorijskih ispitivanja i određivanja oštećenja stijene kao i mineraloškog sastava ležišta, odabire se metoda obrade stijena s obzirom na uzrok, vrstu i intenzitet oštećenja pribušotinske zone.

Kiselinsko pranje perforacija se koristi za uklanjanje topivih taloga sa stijenci kanala bušotine ili perforacija. Ta se operacija koristi u svrhu uklanjanja kamenca ili isplačnog obloga. Kod ove metode kiselina se ne utiskuje u ležište, već se mala količina kiseline postavi u bušotinu na kratko vrijeme, nakon čega se istisne iz nje.

Kada se kiselina utiskuje u porni prostor pod tlakom koji neće izazvati lom formacije, govori se o kiselinskoj obradi skeleta stijene. Cilj takve obrade je uklanjanje uzročnika smanjenja oštećenja te povećanje propusnosti pornog prostora otapanjem nataloženih čestica u njemu.

Ukoliko se u ležište utiskuje kiselina pri tlaku jednakim ili većim od tlaka loma formacije (tlaka frakturiranja), tada se radi o hidrauličkom frakturiranju kiselinom. Dolazi do frakturiranja ležišta i pod djelovanjem kiseline do stvaranja neravnina koje predstavljaju protočne kanaliće za dotok slojnog fluida te nakon prestanka utiskivanja i pada tlaka, neće doći do zatvaranja frakture. Takvo djelovanje će omogućiti visoku vodljivost pukotine što rezultirati boljom proizvodnošću bušotine.

### 3. UTISKIVANJE OTPADNE SLOJNE VODE

Kada nakon dugogodišnjeg rada neke proizvodne bušotine ili polja, dođe do velikog smanjenja proizvodnje, velikog udjela vode u kapljevini ili smanjenja tlaka ležišta, tada se postojeće bušotine mogu opremiti za drugu namjenu. Ukoliko je moguće i ekonomski isplativo pridobivanje ugljikovodika iz ležišta uz podržavanje ležišnog tlaka, tada se one prenamjenjuju u utisne bušotine. One se koriste za sekundarne metoda pridobivanja ugljikovodika, ali i tercijarne poput utiskivanja CO<sub>2</sub>. Omogućavaju podržavanje ležišnog tlaka radi povećanja iscrpka utiskivanjem plina, vode ili njihove kombinacije. Nakon što više nije ekonomski isplativo ili je ležište iscrpljeno, pojedine utisne bušotine mogu se prenamijeniti i koristi za deponiranje vode i utiskivanje otpada iz naftnog rudarstva.

#### 3.1. Utisne bušotine

Za vrijeme procesa izrade kanala bušotine te njenog puštanja u rad i pridobivanja ugljikovodika, dolazi do stvaranja velike količine otpada. Tijekom bušenja stvara se velika količina otpadne isplaka i krhotina razrušenih stijena koje je potrebno zbrinuti, dok se tijekom pridobivanja ugljikovodika, uz naftu i plin javlja i pridobivena slojna voda. Sve te, ali i druge otpadne tvari potrebno je zbrinuti na ekonomski ekološki prihvatljiv način. U tom smislu, utiskivanje otpada iz naftnog rudarstva u duboka geološka ležišta jedna je od najprihvatljivijih metoda zbrinjavanja otpada. Prednosti poput manje mogućnosti zagađenja okolišnog tla i podzemnih voda kao i manja potreba za transport otpada, čine ju najekonomičnijom metodom zbrinjavanja otpada (Gaurina-Međimurec et al., 2020).

Prije početka utiskivanja otpada potrebno je poznavati geološke uvjete lokacije koje uključuju analizu vrsta stijena i tla. Također je potrebno provesti istraživanje kako bi se procijenili tokovi podzemnih voda u susjednim slojevima kao i odredio sastav podzemne vode i mogućnost njegove promjene tijekom vremena. Sve te procijene kao i mnoge druge dane su i opisane u zakonima, pravilnicima i regulativama svake države.

Uvjet koji je potrebno ostvariti da bi se uopće moglo krenuti u planiranje utiskivanja, jest geološko lociranje bušotine koja će zadovoljiti propise i kriterije. Potrebno je zadovoljiti uvjete da je utisna zona dovoljne debljine, da mora imati dovoljnu lateralnu duljinu, da mora biti prekrivena jednim ili više slojeva relativno nepropusnih stijena kako bi se spriječilo

kretanje utisnutih fluida vertikalno prema najdubljem izvoru pitke vode. Također, utisna zona mora biti dovoljno porozna i propusna kako bi utisnuti fluid mogao ući u nju bez prekomjernog povećanja tlaka i mogućnosti istiskivanja utisnutih fluida izvan utisne zone. Bušotina mora biti zacjevljena i cementirana kako bi se spriječilo kretanje fluida prema vodonosniku, te opremljena s odgovarajućim proizvodnim nizom i pakerom za utiskivanje otpadnih fluida (Gaurina-Međimurec, 2021).

Agencija za zaštitu okoliša Sjedinjenih američkih država (engl. *environmental protection agency* – EPA) zadala je propise i kriterije za utisne bušotine, te je utisne bušotine podijelila na klase. Kada se govori o bušotinama za utiskivanje slojne vode (engl. *brine*), govori se o utisnim bušotinama klase II. One među ostalim služe za utiskivanje slojne vode pridobivene na površinu tijekom pridobivanja nafte i plina (EPA, 2022). Prva primjena utiskivanja slojne vode bila je 1920. godine, dok je 30-ih godina prošlog stoljeća došlo do komercijalne uporabe utisnih bušotina.

Tijekom utiskivanja slojne vode vrlo važan inženjerski zadatak jest osigurati trajno zadržavanje utisnutog fluida te sprječavanje bilo kakvog kretanja otpada prema površini ili u podzemnim izvorima pitke vode. Cilj svake operacije utiskivanja slojne vode je utisnuti slojnu vodu u ležište bez smanjenja propusnosti i čepjenja ležišne stijene česticama, kamencima, bubrenjem gline i slično (Ivšinović, 2017).

### 3.2. Konstrukcija utisne bušotine

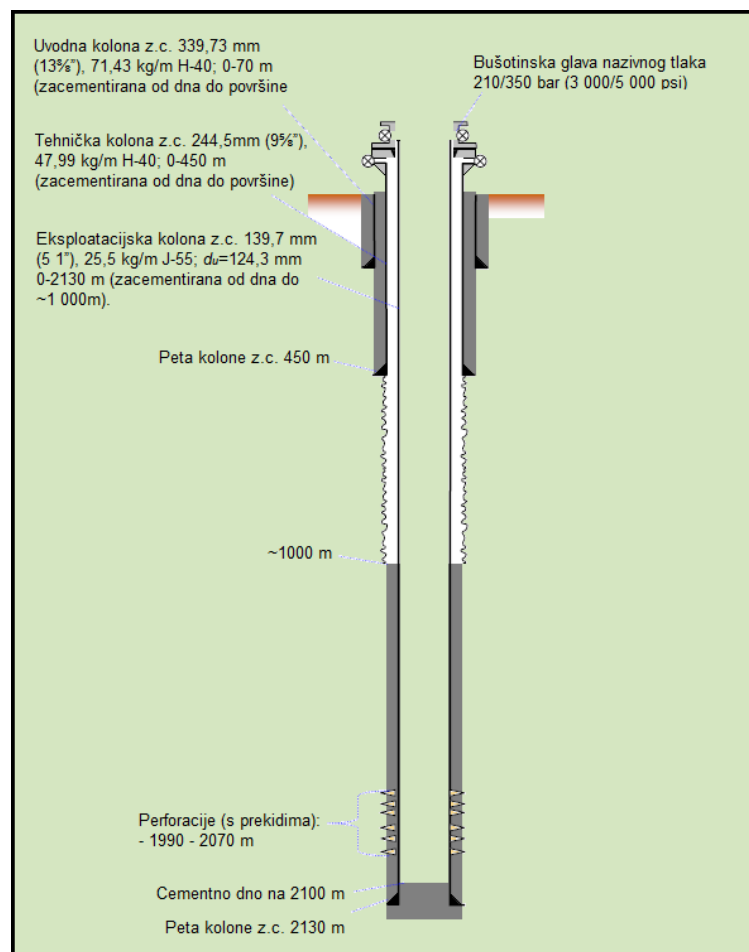
Kod konstrukcije utisne bušotine najvažniji elementi su uvodna kolona, jedna ili više tehničkih kolona, proizvodni niz, paker te opremljena utisna zona. Također je kod konstrukcije važan kvalitetan cementni oblog iza kolone zaštitnih cijevi i hermetičnost kolone koju je potrebno periodično mjeriti. Ujedno utisna bušotina može biti opremljena i bez tubinga kao što je to prikazano na slici 3-1. ili može biti opremljena sa samo nekoliko komada tubinga bez pakera, ukoliko je ležišni tlak manji od hidrostatskog tlaka u bušotini.

Uvodna kolona mora se protezati od površine pa do najdublje zone izvora pitke vode. Tehnička kolona se također proteže od površine pa do utisne zone ili čak prolazi kroz utisnu zonu kako bi spriječilo zagađenje, te ona mora biti cementirana. Kod odabira i dizajniranja kolone potrebno je uzeti u razmatranje svojstva formacije kao i fizikalna i kemijska svojstva otpadnog i slojnog fluida.

Proizvodni niz se nalazi unutar tehničke kolone zaštitnih cijevi i dovodi otpad do utisne formacije. Mora biti izrađen od materijala otpornog na koroziju. Najčešće su to premazani ili presvučeni čelici i legure s velikom količinom nikla, no ponekad se koristi tubing izrađen od kompozitnih materijala (npr. fiberglasa).

Paker koji se ugrađuje iznad zone utiskivanja, mora osigurati brtvljenje i hermetičnost prstenastog prostora između proizvodnog niza i kolone zaštitnih cijevi. Prstenasti prostor je ispunjen paker fluidom pa paker održava konstantni tlak u prstenastom prostoru. Mjerenjem tlaka na ušću prstenastog prostora potvrđuje se hermetičnost bušotine.

Periodično je utisnu bušotinu potrebno ispitati testom integriteta. Primjenom testa mehaničkog integriteta (engl. *Mechanical Integrity Test* - MIT) ispituje se hermetičnost te potvrđuje mehanički integritet utisne bušotine. Njime se može odrediti je li došlo do propuštanja u koloni zaštitnih cijevi, proizvodnom nizu ili na pakeru. Na taj se način može detektirati kretanje fluida prema ušću bušotine, kroz vertikalne kanaliće uz kanal bušotine u slučaju da dođe do mehaničkog oštećenja cijevi ili korozivnog djelovanja na nju.



**Slika 3-1.** Konstrukcija tipske utisne bušotine (Brkić, 2020b)

### 3.3. Oštećenja uzrokovana utiskivanjem slojne vode

Uz već spomenuta oštećenja ležišnih stijena i smanjenja propusnosti prouzročeni prodorom anorganskih krutih čestica u stijenu te bubrenja i disperzija glina uz prisustvo neobrađene slojne vode, u vodoutisnim bušotinama, susrećemo još jednu vrstu smanjenja propusnosti stijena. To smanjenje propusnosti uzrokovano je čepljenjem pornog prostora organskim talozima poput taloga algi i bakterija. Kombinaciju takvih organskim i anorganskih oštećenja nije moguće u potpunosti ukloniti. Kako je anorganski talog prekriven organskim talogom koji nije topiv u kiselini doći će samo do djelomičnog otapanja anorganskog taloga. S toga je uklanjanje oštećenja potrebno obaviti u dva stupnja. Prvi koji će otopiti organski, i drugi stupanj koji će pod djelovanjem kiselina otopiti anorganski talog.

Organski talozi se općenito mogu otopiti u svim oksidirajućim sredstvima, no u praksi se najdjelotvorniji pokazao natrijev hipoklorit stabiliziran u natrijevu hidroksidu. On se utiskuje postepeno kako bi se mogao zagrijati na slojnu temperaturu jer se pokazalo da mu je učinkovitost veća na povišenoj temperaturi (Čikeš, 2010).

Nakon otapanja organskih taloga algi i bakterija, slijedi kiselinska obrada. Prvo kiselina otapa anorganski talog koji više nije prekriven organskim, te onda neutralizira lužnatu otopinu koja se koristila u prvom stupnju kako bi se izbjeglo taloženja kalcijevih soli koje su prisutne u slojnoj vodi.

Ukoliko je vodoutisna bušotina nastala prenamjenom eksploatacijske naftne bušotine, može se znatno reducirati relativna propusnost za vodu. Do takvog oštećenja može doći zbog zaostalog zasićenja pornog prostora naftom ili naftnih taloga u okolišu bušotine. Budući da ti talozi nisu topivi ni u kiselinama ni u oksidirajućim sredstvima, nužna je njihova obrada aromatskim otapalom. To otapalo ima ulogu otopiti krute ugljikovodike i potisnuti zaostalu naftu.

U tablici 3-1. prikazan je sastav slojne vode, tj. pojedini parametri koji uzrokuju oštećenja pribušotinske zone (smanjenje propusnosti) poput otopljenih soli, organskih taloga iz loše dehidracije nafte te uzročnici korozije poput klorida, ugljikovog dioksida (CO<sub>2</sub>) i sumporovodika (H<sub>2</sub>S).

**Tablica 3-1.** Sastav uzorka slojne vode izdvojen dehidracijom s jednog hrvatskog naftnog polja (Brkić, 2020b)

Parametar: Slojna voda	B-1	B-2	B-3	B-4	B-5
Temperatura, °C	20	28	16	29	20
pH vrijednost	7,25	7,5	7,44	7,45	7,51
Električna vodljivost, mS/m	1647	1649	1661	1512	1646
Ukupni sadržaj otopljenih sol, mg/dm <sup>3</sup>	10043	9958	9959	10161	9999
Kalcijeva tvrdoća, mg CaCO <sub>3</sub> /dm <sup>3</sup>	258	238	244	244	229
Alkalitet, mg CaCO <sub>3</sub> /dm <sup>3</sup>	705	720	708	680	717
Salinitet, g NaCl/dm <sup>3</sup>	8871	8743	8959	8988	8754
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , mg/dm <sup>3</sup>	1,45	1,15	1,05	0,59	0,95
Cl <sup>-</sup> , mg/dm <sup>3</sup>	5381	5303	5434	5452	5310
HCO <sub>3</sub> <sup>3-</sup> , mg/dm <sup>3</sup>	861	880	864	-	876
CO <sub>2</sub> , mg/dm <sup>3</sup>	157	170	128	161	154
H <sub>2</sub> S, mg/dm <sup>3</sup>	0,53	0,68	0,39	0,52	0,41
O <sub>2</sub> otopljeni, mg/dm <sup>3</sup>	0,6	0,7	2,8	0,9	< 0,30
Fe <sub>ukupno</sub> , mg/dm <sup>3</sup>	0,31	0,31	0,39	1,18	0,34

#### 4. ANALIZA OŠTEĆENJA PRIBUŠOTISNKE ZONE OVISNO O UTJECAJU KOLIČINE UTISNUTOG FLUIDA

U ovom će poglavlju biti prikazane jednačbe s obzirom na različite režime protjecanja od kojih će se neke koristiti u proračunu te će se usporediti djelotvornost utiskivanja slojne vode u ležište u donosu na različite skin faktore, odnosno oštećenja pribušotinske zone.

Protjecanje fluida kroz ležište, perforacije zacijevljenog kanala bušotine i kroz proizvodni niz (tubing) ugrađen u bušotinu, matematički se temelji na trima fizikalnim zakonitostima: zakon o očuvanju mase, jednačbi stanja te Darcyjevom zakonu (Čikeš, 2015). Važno je znati da se tijekom utiskivanja fluida u ležište javljaju padovi tlakova te to zahtjeva analizu hidrodinamičkog kretanja fluida u različitim područjima protoka, no potrebno je cjelokupni proizvodni sustav analizirati kao jednu povezanu cjelinu.

##### 4.1. Nodal analiza utisne bušotine

Za analizu cjelokupnog sustava koristi se koncept analize sustava koji se često naziva Nodal analiza. On se sastoji od odabranog razdjelnog čvorišta (engl. *node*) u utisnom sustavu i dijeli sustav na dva područja. U prvom području dolazi do pada tlaka uslijed protjecanja utisnog fluida kroz proizvodni niz u bušotinu, a u drugom uslijed protjecanja iz bušotine u ležište.

Na slici 4-1. vidi se raspodjela tlakova utisne bušotine, te se točka „N“ uzima kao čvorište za nodal analizu pa se tada tlakovi mogu promatrati na slijedeći način:

- Utok u čvorište:

$$p_{wf} = p_{utiskivanja} + \Delta p_{tubinga} \quad (4-1)$$

- Istok iz čvorišta:

$$p_{wf} = p_r + \Delta p_{ležišta} \quad (4-2)$$

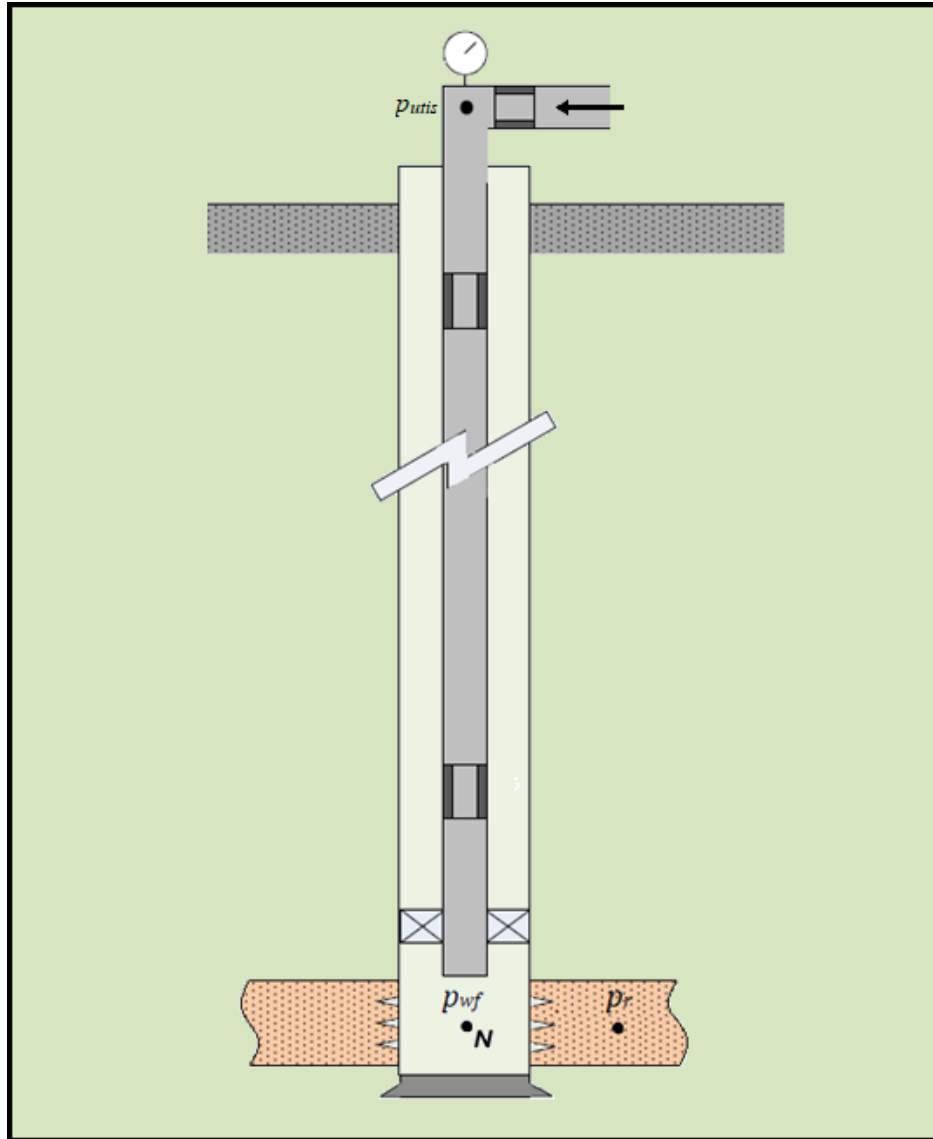
- gdje su:

$p_{utiskivanja}$  – tlak utiskivanja fluida u bušotinu, Pa



$\Delta p_{tubinga}$  – pad tlaka uslijed protjecanja fluida u proizvodnom nizu, Pa

$\Delta p_{ležišta}$  – pad tlaka uslijed protjecanja fluida iz bušotine u ležište, Pa



**Slika 4-1.** Shematski prikaz bušotine za Nodal analizu s prikazom tlakova (Brkić, 2020a)

Na temelju primjene Nodal analize može se odrediti dostatan tlak koji je potreban za utiskivanje fluida u ležište kako bi se savladali svi potrebni otpori koji uzrokuju pad tlaka tijekom protjecanja. Također se koristi i za dimenzioniranje površinske opreme kao i mogućnost vrjednovanja stimulacijskih radova u bušotini u svrhu uklanjanja oštećenja.

#### 4.2. Protjecanje utisnog fluida kroz proizvodi niz (tubing)

Promatra li se sustav bušotina-ležišta kao jedinstveni hidrodinamički i termodinamički sustav, za protjecanje fluida u proizvodnom nizu može se primijeniti opća energetska jednažba za strujanje, koja glasi:

$$\frac{dp}{\rho} + v dv + gdH + dL_w + dW = 0 \quad (4-3)$$

- gdje su:

$dp/\rho$  – promjena potencijalne energije uslijed tlaka, J/kg

$v dv$  – promjena kinetičke energije, J/kg;

$gdH$  – promjena potencijalne energije položaja, J/kg

$dL_w$  – promjena energije uslijed trenja, J/kg

$dW$  – promjena rada, J/kg

Ako se promjena energije uslijed trenja izrazi preko Darcy-Weisbachove jednažbe za linijske gubitke, tada ona glasi:

$$dL_w = f \frac{dL_t}{d_t} \times \frac{v^2}{2g} \quad (4-4)$$

- gdje su:

$f$  – Darcy-Weisbachov faktor trenja, -

$L_t$  – duljina proizvodnog niza, m

$d_t$  – unutarnji promjer proizvodnog niza, m

$v$  – brzina protoka fluida, m/s

$g$  – ubrzanje sile teže, m/s<sup>2</sup>

Zanemari li se promjena kinetičke energije i promjena rada uz pretpostavku da sustav ne obavlja rad na okolinu ni okolina na sustav, te uzme li se da je promjena položaja ( $dH$ ) jednaka duljini proizvodnog niza ( $dL_t$ ) tada kombinacijom prethodnih jednažbi slijedi:

$$\frac{p_{wf} - p_{wh}}{\rho} + gL_t + f \frac{L_t}{d_t} \times \frac{gv^2}{2g} = 0 \quad (4-5)$$

Analogno se iz izraza može izlučiti jednačba za dinamički tlak na dnu bušotine:

$$p_{wf} = p_{wh} + \rho g L_t + f \frac{L_t}{d_t} \times \frac{\rho v^2}{2} \quad (4-6)$$

Sukladno prethodnoj jednačbi, izraz za dinamički tlak na dnu bušotine tijekom utiskivanja slojne vode bit će:

$$p_{wf} = p_{wh} + \rho g L_t - f \frac{L_t}{d_t} \times \frac{\rho v^2}{2} \quad (4-7)$$

#### 4.2.1. Faktor trenja

Faktor trenja koji utječe na proračun, fizikalna je veličina koja opisuje odnos između sile trenja i sile koja djeluje okomito na dodirnu površinu. On ovisi o Reynoldsovu broju i relativnoj hrapavosti površine. Kako fluidi koji se utiskuju u ležište mogu biti različitih reoloških svojstava, treba definirati faktor trenja za njutnovske i nenjutnovske fluide.

##### a) Faktor trenja za njutnovske fluide

Njutnovski fluidi su fluidi kod kojih je odnos smičnog naprežanja i smične brzine jednak konstantnoj viskoznosti fluida. Oni počinju teći tek kada se primjeni tlak na njega, a viskoznost mu ostaje konstantna pri određenim uvjetima tlaka i temperature te prati Newtonov zakon viskoznosti:

$$\tau = \mu \times \gamma \quad (4-8)$$

- gdje su:

$\tau$  – smično naprežanje, Pa

$\gamma$  – smična brzina, s<sup>-1</sup>

Vrste protjecanja fluida u cijevi su okarakterizirane Reynoldsovim brojem (Re), te je on bezdimenzionalni parametar koji se određuje :

$$Re = \frac{vd_t\rho}{\mu} \quad (4-9)$$

Kada je Reynoldsov broj manji od 2300, protjecanje fluida u glatkim cijevima biti će laminarno. Protjecanje u prijelaznom području se javlja kada je Reynoldsov broj između 2300 i 3000, dok se turbulentno protjecanje javlja pri Reynoldovu broju većem od 3000. S obzirom na različite vrste protoka, faktor trenja se može izraziti:

- za laminarni protok:

$$f = \frac{64}{Re} \quad (4-10)$$

- za protjecanje u čitavom prijaznom području od hidraulički glatkog do potpuno hrapavog režima, preko Colebrookove korelacije:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 1,74 - 2 \log \left( \frac{2\varepsilon}{d_t} + \frac{18,7}{Re\sqrt{f}} \right) \quad (4-11)$$

- gdje je :

$\varepsilon$  – relativna hrapavost cijevi, -

- za turbulentno protjecanje u području hidrauličkih glatkih cijevi kada je  $3000 < Re < 100\,000$  korištenjem Blasiusove jednadžbe:

$$f = \frac{0,3164}{Re^{0,25}} \quad (4-12)$$

Faktor trenja se također može odrediti pomoću Moodyjeva dijagrama na kojem je on prikazan u funkciji Reynoldsova broja za relativnu hrapavost cijevi u rasponu od hidraulički glatkih do potpuno hrapavih cijevi, te je relativna hrapavost definirana odnosom apsolutne hrapavosti cijevi i apsolutne viskoznosti fluida.

### b) Faktor trenja za nenjutnovske fluide

Nenjutnovski fluidi su fluidi koji ne slijede Newtonov zakon viskoznosti. Njihova viskoznost se mijenja s promjenom smične brzine.

Izračun Reynoldsova broja nenjutnovskog fluida složeniji je nego kod njutnovskog, no može se odrediti korištenjem Metzner-Reedove (1955) korelacije:

$$Re = \frac{d^n v^{2-n} \rho}{\eta} \quad (4-13)$$

- gdje su:

$n$  – indeks toka njutnovskog fluida (obično se uzima  $n = 1,15 - 2,50$ ), -

$\eta$  – koeficijent otpora tečenja, Pa·s

Za nenjutnovske fluide faktor trenja se izražava:

- za laminarni protok:

$$f = \frac{64}{Re} \quad (4-14)$$

- za turbulentni protok:

$$\frac{1}{\sqrt{f_F}} = \frac{4,0}{n^{0,75}} \log \left[ Re_{MR} \times f_F^{(1-n/2)} \right] - \frac{0,4}{n^{1,2}} \quad (4-15)$$

gdje je:

$f_F$  - Fanningov faktor trenja koji je četiri puta veći od Darcyjevog faktora trenja ( $f = 4 f_F$ )

### 4.3. Protjecanje utisnog fluida iz bušotine u ležište

Analogno protjecanju fluida iz ležišta u bušotinu, može se razmatrati i protjecanje fluida iz bušotine u ležište. Kod takvog razmatranja, potrebno je obuhvatiti fiziku protoka fluida kroz perforacije, te kroz pribušotinsku zonu, odnosno kroz ležište računajući sva

moguća oštećenja pribušotinske zone (Zelić, 2001). Preoblikovanjem jednadžbe za protok fluida kod proizvodnje, dobije se izraz za protjecanje fluida pri utiskivanju fluida u ležište.

$$q_{inj} = \frac{2\pi kh(p_{wf} - p_r)}{\mu B [\ln(0,472r_e/r_w) + s]} \quad (4-16)$$

- gdje je:

$q_{inj}$  – protok utisnog fluida, m<sup>3</sup>/s

Oštećenja pribušotinske zone mogu se izračunati na temelju krivulje testa porasta tlaka u bušotini koristeći jednadžbu (4-17), no ako nisu dani podaci mjerenja testa porasta tlaka, skin faktor se može izračunati zbrajanjem komponenti skin faktora korištenjem jednadžbi (2-1), odnosno (2-11).

$$s = 1,151 \left[ \frac{p_i - p_{wf}(t=1)}{m} - \log \left( \frac{k}{\Phi \mu c_t r_w^2} \right) - 3,91 \right] \quad (4-17)$$

- gdje su:

$\Phi$  – šupljikavost ležišta, -

$p_i$  – početni ležišni tlak, Pa

$c_t$  – ukupna stlačivost fluida i ležišta, Pa<sup>-1</sup>

#### 4.4. Proračun i konstrukcija IPR krivulje

Na temelju opisanog teorijskog dijela u prethodnim poglavljima i danim jednadžbama, u ovom poglavlju će se prikazati proračun i konstrukcija indikatorske krivulje dinamičkog tlaka na dnu bušotine (engl. *Inflow Performance Relationship* - IPR) tijekom utiskivanja slojne vode, s obzirom na veličinu oštećenja pribušotinske zone, koristeći metodologiju opisanu u radu akademika Zelića iz 2001. godine.

### PRORAČUN

Poznati podaci o bušotini i slojnoj vodi koja se utiskuje:

- duljina proizvodnog niza:  $L_t = 1390$  m
- efektivna debljina ležišta:  $h = 148$  m
- srednji ležišni tlak:  $p_r = 142 \times 10^5$  Pa
- dinamički tlak na ušću bušotine:  $p_{wh} = 45 \times 10^5$  Pa
- tlak loma formacije:  $p_f = 230 \times 10^5$  Pa
- radijus bušotine:  $r_w = 0,116$  m
- radijus crpljenja ležišta:  $r_e = 587$  m
- unutarnji promjer kolone zaštitnih cijevi:  $d_{zc} = 0,2135$  m
- unutarnji promjer proizvodnog niza:  $d_t = 0,0546$  m
- propusnosti neoštećenog ležišta:  $k = 3 \times 10^{-13}$  m<sup>2</sup>
- propusnosti ležišne stijene u pribušotinskoj zoni:  $k_s = 6,7 \times 10^{-14}$  m<sup>2</sup>
- propusnost ležišta u zbijenoj zoni oko perforacija:  $k_{dp} = 2 \times 10^{-14}$  m<sup>2</sup>
- volumni faktor slojne vode:  $B = 1,025$  m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>
- apsolutna viskoznost slojne vode:  $\mu = 0,02$  Pa·s,
- duljina perforiranog intervala,  $h_p = 60$  m
- duljina perforacija u ležišnoj stijeni:  $L_p = 0,31$  m
- ukupan broj perforacija:  $N = 780$
- radijus pribušotinske zone promijenjene propusnosti:  $r_s = 0,43$  m
- radijus perforacija u ležišnoj stijeni  $r_p = 0,013$  m
- radijus zbijene zone oko perforacije:  $r_{dp} = r_p + 0,012 = 0,025$  m
- gustoća utisnute slojne vode:  $\rho = 1090$  kg/m<sup>3</sup>

Tijekom utiskivanja fluida potrebno je pratiti tlak na ušću bušotine jer je on ograničen dozvoljenim radnim tlakom bušotinske glave i erupcijskog uređaja (na našim poljima je to 138 bar, 207 bar, 345 bar i 690 bar). Također prilikom utiskivanja slojne vode potrebno je paziti da tlak utiskivanja, ukoliko to dopušta ugrađeno ušće s obzirom na dozvoljeni radni tlak, ne bude veći od tlaka loma formacije kako bi se izbjeglo stvaranje fraktura.

Ako se pretpostavi idealni slučaj kada nema skin faktora ( $s = 0$ ), izlučivanjem iz jednadžbe (4-16), dobije se izraz za pad tlaka koji predstavlja razliku dinamičkog tlaka na dnu bušotine i ležišnog tlaka, tada slijedi:

$$\Delta p = p_{wf} - p_r = \frac{\mu B \left( \ln \frac{0,472 r_e + s}{r_w} \right)}{2\pi k h} \times q_{inj} \quad (4-18)$$

uvrštavanjem poznatih vrijednosti u izraz, dobije se:

$$\Delta p = \frac{0,02 \times 1,025 \left( \ln \frac{0,472 \times 587}{0,116} + 0 \right)}{2\pi \times 3 \times 10^{-13} \times 148} \times q_{inj} = 571586621,9 \times q_{inj}$$

Za proračun je potrebno pretpostavi različite vrijednosti protoka utiskivanja fluida. U ovom proračunu, koristit će se deset različitih vrijednosti u rasponu od 100 do 1000 m<sup>3</sup>/dan (približno 70-700 l/min).

Korištenjem jednadžbe (4-18) odredit će se vrijednost pada tlaka za svaki protok, te pomoću njega, dinamički tlakovi na dnu bušotine kako slijedi:

$$p_{wf} = p_r + \Delta p \quad (4-19)$$

Rezultati proračuna prikazani su u tablici 4-1.



**Tablica 4-1.** Rezultati proračuna pada tlaka i dinamičkog tlaka na dnu kada je  $s = 0$

$q_{inj}$ [ $m^3/dan$ ]	$\Delta p$ [ $10^5 Pa$ ]	$p_{wf}$ [ $10^5 Pa$ ]
100	6,62	148,62
200	13,23	155,23
300	19,85	161,85
400	26,46	168,46
500	33,08	175,08
600	39,69	181,69
700	46,31	188,31
800	52,92	194,92
900	59,54	201,54
1000	66,16	208,16

Slijedeći korak u proračunu je računanje dinamičkog tlaka na dnu bušotine s obzirom na hidrauličke otpore koji se javljaju u proizvodnom nizu.

Za računanje brzine protoka slojne vode u proizvodnom nizu koristi se izraz:

$$v = \frac{4q_{inj}}{d_t^2 \pi} \quad (4-20)$$

Analogno prema jednadžbama (4-9) i (4-10) računaju se Reynoldsov broj i faktor trenja te su rezultati prikazani u tablici 4-2.

U konačnici je potrebno izračunati dinamički tlak na dnu bušotine, korištenjem jednadžbe (4-7) za vrijednost dinamičkog tlaka na ušću od  $45 \times 10^5 Pa$ , te su izračunati dinamički tlakovi na dnu bušotine sa različitim protocima utiskivanja slojne vode prikazani u tablici 4-3.

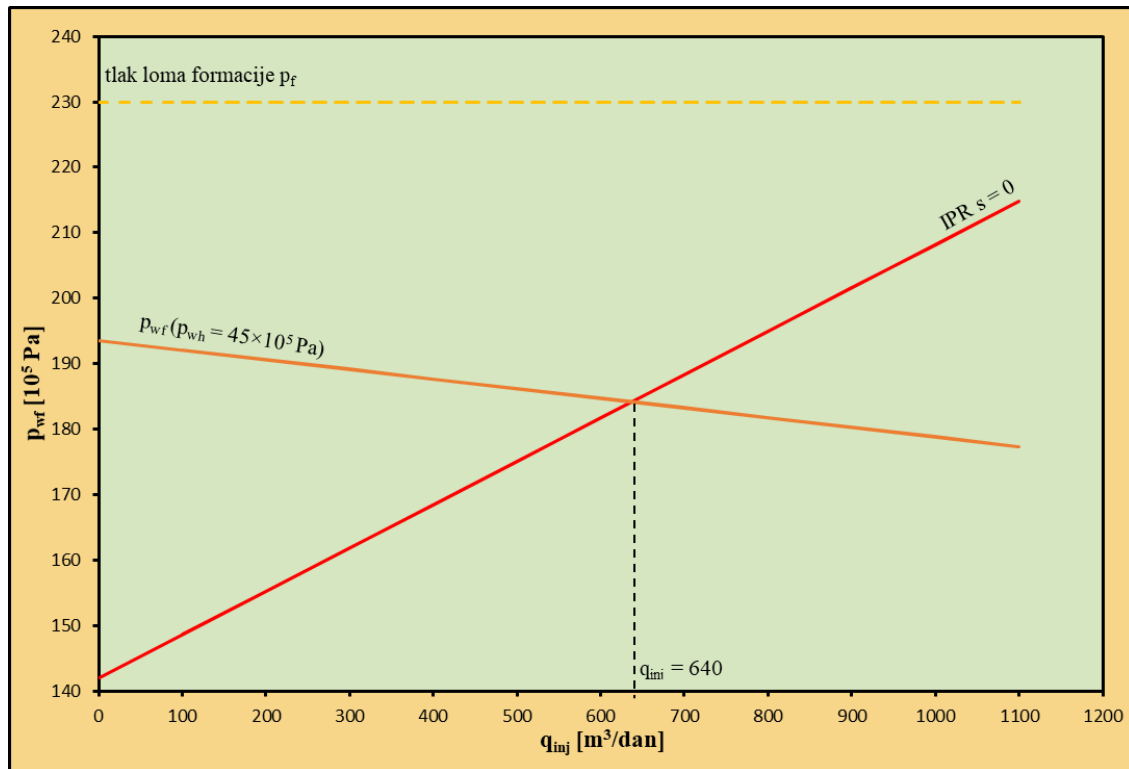
**Tablica 4-2.** Rezultati proračuna brzine protoka slojne vode u tubing-u, Reynoldsovog broja i faktora trenja

$q_{inj}$ [m <sup>3</sup> /dan]	$v$ [m/s]	Re	$f$
100	0,494	1471,0	0,0435
200	0,989	2941,9	0,0218
300	1,483	4412,9	0,0145
400	1,977	5883,8	0,0109
500	2,472	7354,8	0,0087
600	2,966	8825,7	0,0073
700	3,460	10296,7	0,0062
800	3,955	11767,7	0,0054
900	4,449	13238,6	0,0048
1000	4,943	14709,6	0,0044

**Tablica 4-3.** Rezultati proračuna dinamičkog tlaka na dnu bušotine kada je  $p_{wh} = 45 \times 10^5$  Pa

$q_{inj}$ [m <sup>3</sup> /dan]	$p_{wf}$ [10 <sup>5</sup> Pa]
100	192,11
200	190,63
300	189,16
400	187,68
500	186,21
600	184,73
700	183,25
800	181,78
900	180,30
1000	178,83

Uz pomoć izračunatih podataka određuje se moguća količina utiskivanja slojne vode. Na temelju podataka iz tablice 4-1. konstruira se IPR krivulja dok se za  $p_{wf}$  krivulju koriste podaci iz tablice 4-2. Sjecište IPR krivulje i  $p_{wf}$  krivulje dati će maksimalnu količinu utiskivanja slojne vode pri zadanim uvjetima, što u ovom slučaju iznosi  $640 \text{ m}^3/\text{dan}$  slojne vode, što se vidi na slici 4-2.



**Slika 4-2.** Grafički prikaz IPR i  $p_{wf}$  krivulje kada je  $s = 0$ ,  $p_{wh} = 45 \times 10^5 \text{ Pa}$

Kako bi se usporedio protok stvarnih i idealnih uvijete, potrebno je konstruirati IPR krivulju za stvarne realne uvijete. Prvenstveno je potrebno izračunati ukupni skin koji se dobije zbrajanjem skin faktora oštećenja pribušotinske zone i skin faktora prouzročenog zbog perforacija.

Uvrštavanjem poznatih podataka u jednadžbu (2-8), računa se skin faktor oštećene pribušotinske zone:

$$s_d = \left( \frac{3 \times 10^{-13}}{6,7 \times 10^{-14}} - 1 \right) \times \ln \frac{0,43}{0,116} = 4,56$$

Proračun skin faktora prouzročen zbog perforacija određuje se pomoću jednadžbe (2-10):

$$s_{dp} = \left( \frac{60}{0,31 \times 780} \right) \times \left( \frac{3 \times 10^{-13}}{2 \times 10^{-14}} - \frac{3 \times 10^{-13}}{6,7 \times 10^{-14}} \right) \times \ln \left( \frac{0,025}{0,013} \right) = 1,71$$

Ukupna veličina skin faktor jednaka je zbroju skina uzrokovanog smanjenjem propusnosti te skina prouzročenog perforacijama i on je u konačnici jednak:

$$s = s_d + s_{dp} = 4,56 + 1,71 = 6,27$$

Nakon što se izračuna oštećenje pribušotinske zone ležišne stijene, računa se pad tlaka pri utiskivanju fluida u realnim uvjetima korištenjem izraza (4-18) i uvrštavanjem u jednadžbu slijedi:

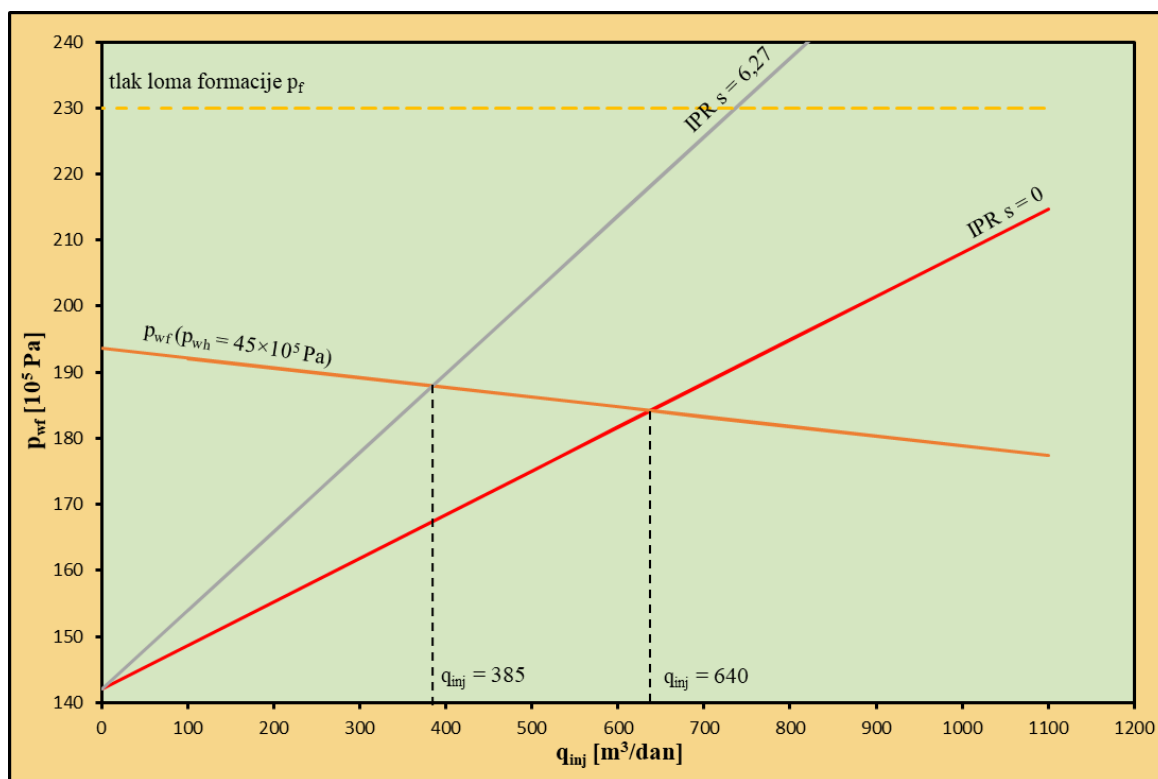
$$\Delta p = \frac{0,02 \times 1,025 \left( \ln \frac{0,472 \times 587}{0,116} + 6,27 \right)}{2\pi \times 3 \times 10^{-13} \times 148} \times q_{inj} = 1032329428 \times q_{inj}$$

Na temelju dobivene jednadžbe računaju se padovi tlaka za različite vrijednosti protoka utiskivanja i u konačnici dinamički tlakovi na dnu bušotine, uključujući u obzir oštećenje pribušotinske zone ležišne stijene, koristeći jednadžbu (4-19). Dobiveni rezultati prikazani su u tablici 4-4.

**Tablica 4-4.** Rezultati proračuna dinamičkog tlaka na dnu kada je  $s = 6,27$

$q_{inj}$ [m <sup>3</sup> /dan]	$\Delta p$ [10 <sup>5</sup> Pa]	$p_{wf}$ [10 <sup>5</sup> Pa]
100	11,94	153,94
200	23,89	165,89
300	35,83	177,83
400	47,77	189,77
500	59,71	201,71
600	71,66	213,66
700	83,60	225,60
800	95,54	237,54
900	107,49	249,49
1000	119,43	261,43

Koristeći rezultate prikazane u tablici 4-4. konstruirana se IPR krivulja sa oštećenjem stijene  $s = 6,27$  te sjecište sa  $p_{wf}$  krivuljom pokazuje stvarnu moguću količinu utiskivanja slojne vode u ležište, koja iznosi  $385 \text{ m}^3/\text{dan}$  (slika 4-3.).



**Slika 4-3.** Grafički prikaz IPR i  $p_{wf}$  krivulje za  $s = 6,27$  i  $s = 0$  kada je  $p_{wh} = 45 \times 10^5 \text{ Pa}$

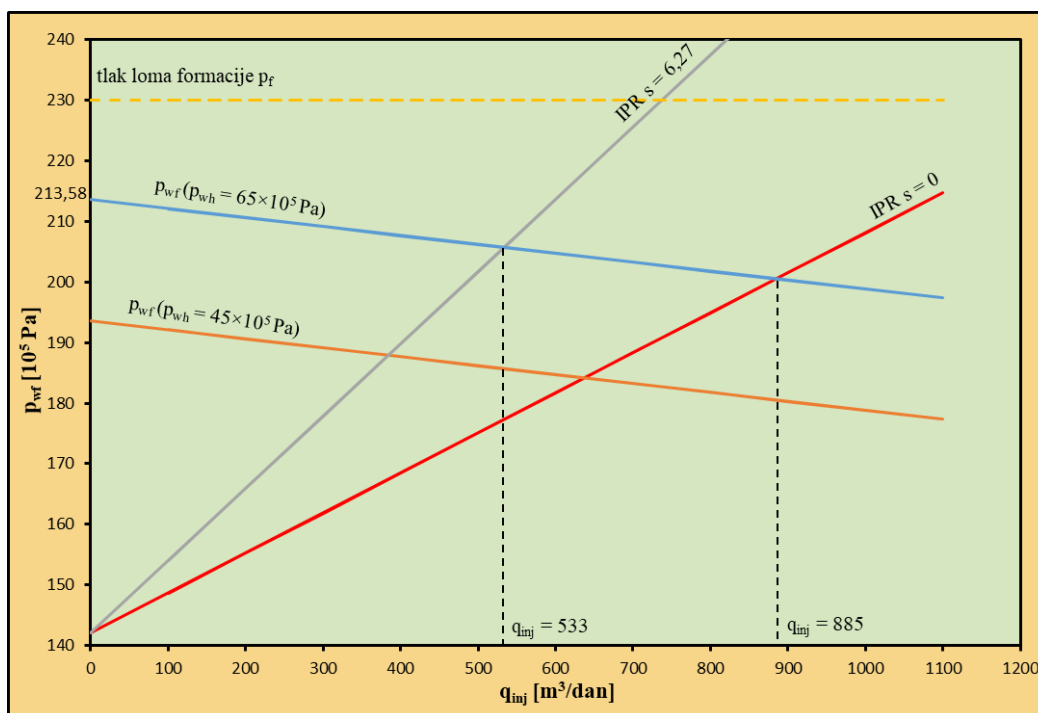
Simulacijom s različitim pretpostavkama može se bolje analizirati odnos utjecaja oštećenja pribušotinske zone i protoka utiskivanja slojne vode u ležište. Tako, ukoliko se želi održati ista količina utiskivanja slojne vode kod povećanog skina, potrebno je povećati dinamički tlak na ušću bušotine.

Ako se poveća dinamički tlak na ušću bušotine ( $p_{wh}$ ), povećat će se i utisnuta količina slojne vode za isti skin, tj povećat će se dinamički tlak na dnu. Povećanje dinamičkog tlak na ušću bušotine sa  $p_{wh} = 45 \times 10^5 \text{ Pa}$ , na  $p_{wh} = 65 \times 10^5 \text{ Pa}$ , zahtjeva ponovno računanje dinamičkog tlaka na dnu bušotine korištenjem jednadžbe (4-7), te su rezultati proračuna prikazani u tablici 4-5.

**Tablica 4-5.** Rezultati proračuna dinamičkog tlaka na dnu bušotine kada je  $p_{wh} = 65 \times 10^5$  Pa

$q_{inj}$ [m <sup>3</sup> /dan]	$p_{wf}$ [10 <sup>5</sup> Pa]
100	212,11
200	210,63
300	209,16
400	207,68
500	206,21
600	204,73
700	203,25
800	201,78
900	200,30
1000	198,83

S obzirom na prikazane rezultata, konstruira se nova  $p_{wf}$  krivulja (slika 4-4.) iz koje se može zaključiti da bi dinamički tlak na dnu porastao na  $213,58 \times 10^5$  Pa, dok bi se količina utiskivanja povećala na  $885$  m<sup>3</sup>/dan kod idealnog modela bez skina ( $s = 0$ ), odnosno na  $533$  m<sup>3</sup>/dan kod stvarnog ležišta sa skin faktorom ( $s = 6,27$ ).



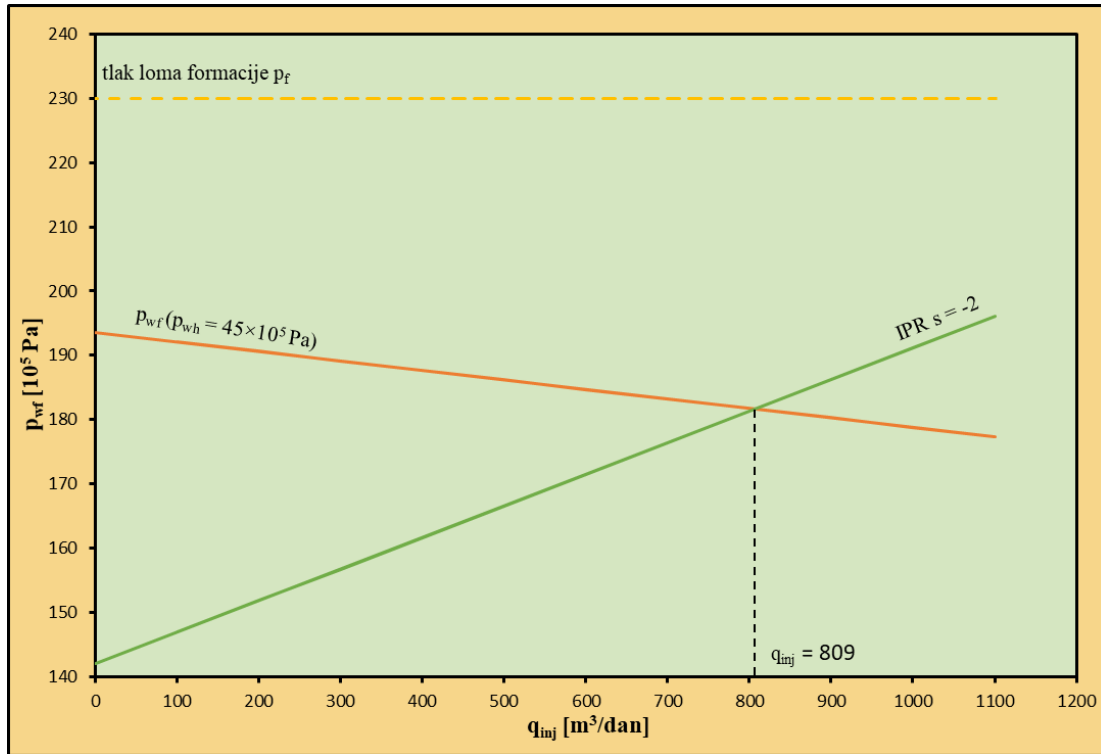
**Slika 4-4.** Grafički prikaz  $p_{wf}$  krivulje kada je  $p_{wh} = 65 \times 10^5$  Pa

Pretpostavi li se da je nakon kemijske obrade, došlo do smanjenja oštećenja pribušotinske zone i da je  $s = -2$ , tada se računaju padovi tlakova preko jednadžbe (4-18), a dinamički tlak na dno preko izraza (4-19), te su rezultati prikazani u tablici 4-6.

**Tablica 4-6.** Rezultati proračuna pada tlaka i dinamičkog tlaka na dnu kada je  $s = -2$

$q_{inj}$ [m <sup>3</sup> /dan]	$\Delta p$ [10 <sup>5</sup> Pa]	$p_{wf}$ [10 <sup>5</sup> Pa]
100	4,91	146,91
200	9,83	151,83
300	14,74	156,74
400	19,66	161,66
500	24,57	166,57
600	29,49	171,49
700	34,40	176,40
800	39,32	181,32
900	44,23	186,23
1000	49,15	191,15

Na temelju prikazanih rezultata, na slici 4-5. konstruirana je IPR krivulje za  $s = -2$ . Na njoj se vidi da se može postići protok utiskivanja slojne vode od 809 m<sup>3</sup>/dan kada je  $p_{wh} = 45 \times 10^5$  Pa.



Slika 4-5. Grafički prikaz IPR i  $p_{wf}$  krivulje kada je  $s = -2$

Za vrijeme utiskivanja slojne vode, moguće je pratiti veličinu skin faktora preko ovisnosti pada tlaka kroz perforacije i ležište. Promjena skina će uzrokovati pad tlaka i ujedno dovesti do promjene dinamičkog tlaka na ušću.

Preuređenjem jednadžbe za pad tlaka (4-18) izravno se može izračunati vrijednost skin faktora preko izraza:

$$s = \frac{2\pi kh\Delta p}{\mu B \times q_{inj}} - \left( \ln \frac{0,472 r_e}{r_w} \right) \quad (4-21)$$

Pretpostavi li se da je pri protoku utiskivanja od  $600 \text{ m}^3/\text{dan}$ , došlo do povećanja pada tlaka za  $10 \times 10^5 \text{ Pa}$ , tada će pad tlaka biti  $81,66 \times 10^5 \text{ Pa}$  (vrijednost iz tablice 4-4. uvećana za dodatni pad tlaka), a skin faktor će biti:

$$s = \frac{2\pi \times 3 \times 10^{-13} \times 148 \times 81,66 \times 10^5}{0,02 \times 1,025 \times \frac{600}{86400}} - \left( \ln \frac{0,472 \times 587}{0,116} \right) = 8,22$$



Dinamički tlak na dnu bušotine će onda pri utisnom protoku od 600 m<sup>3</sup>/dan, biti jednak:

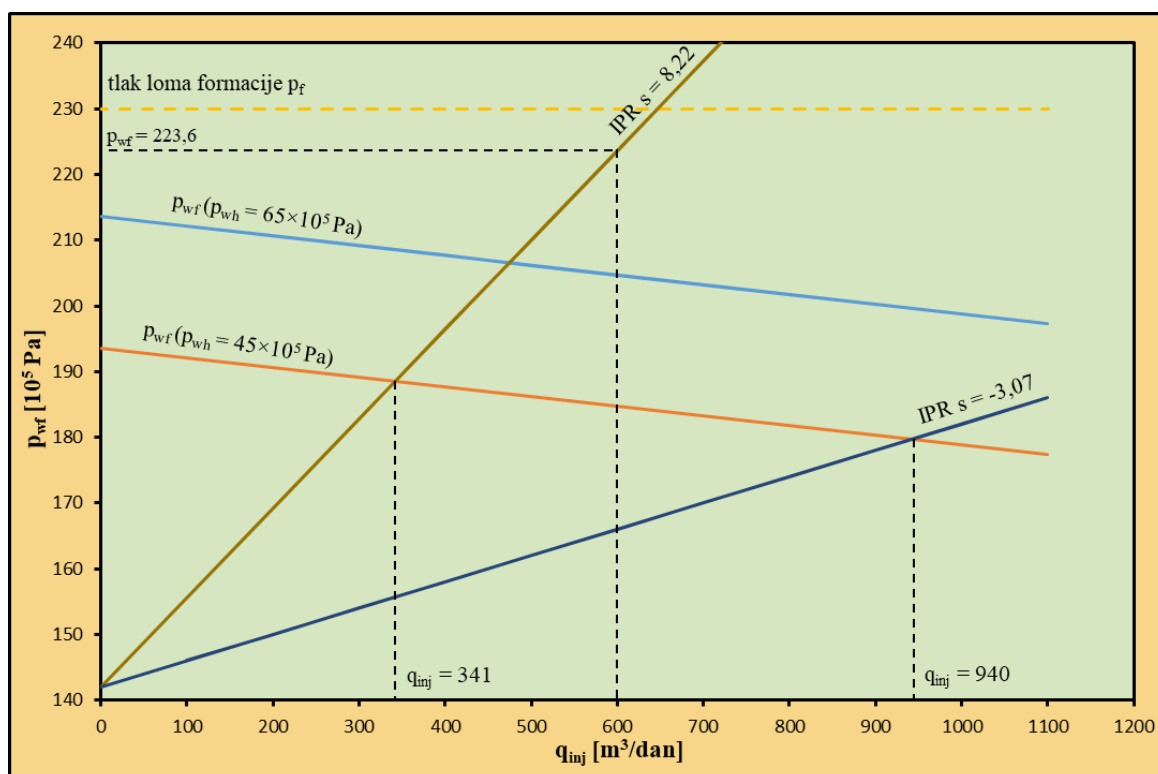
$$p_{wf} = p_r + \Delta p = 142 \times 10^5 + 81,66 \times 10^5 = 223,66 \times 10^5 \text{ Pa}$$

Međutim, na slici 4-6. vidi se da je pri dinamičkim tlakom na ušću od 45×10<sup>5</sup> Pa i skin faktorom od 8,22 moguće utiskivati protokom od 341 m<sup>3</sup>/dan.

Ukoliko se pretpostavi da je pri utiskivanju slojne vode od 500 m<sup>3</sup>/dan, pad tlaka kroz perforacije i ležište iznosio 20×10<sup>5</sup> Pa, tada se uvrštavanjem u jednadžbu (4-19) dobije vrijednost skin faktora:

$$s = \frac{2\pi \times 3 \times 10^{-13} \times 148 \times 20 \times 10^5}{0,02 \times 1,025 \times \frac{500}{86400}} - \left( \ln \frac{0,472 \times 587}{0,116} \right) = -3,07$$

Stimulacijom ležišta, povećat će se propusnost ležišta i bit će moguće utisnuti veću količinu slojne vode, što se vid na slici 4-6. gdje protok utiskivanja slojne vode za stimuliranu bušotinu sa s = -3,07 iznosi 940 m<sup>3</sup>/dan.

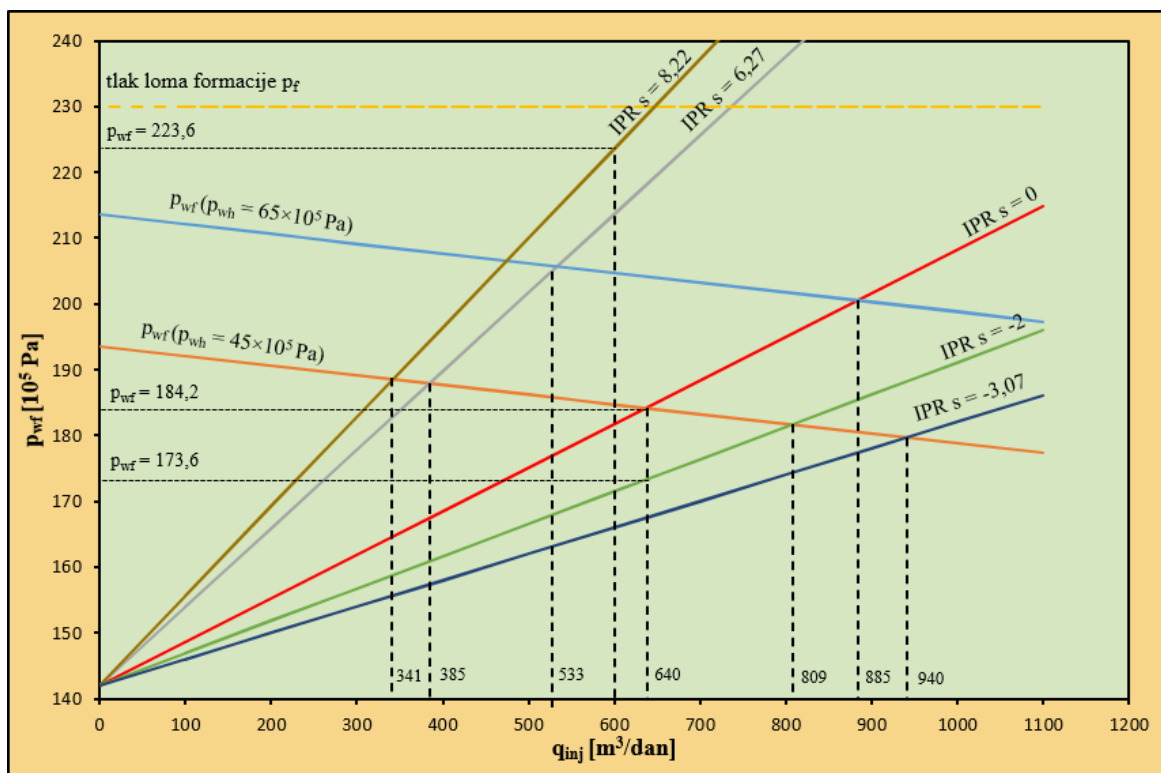


Slika 4-6. Grafički prikaz IPR i pwf krivulje za s = 8,22 i s = -3,07

Ako se pobliže promotri slika 4-7. koja prikazuje objedinjene krivulje prethodnih proračuna, može se zaključiti kako se s povećanjem skina od idealnog modela gdje je  $s = 0$  pa prema stvarnom modelu gdje je  $s = 6,27$  i sve do oštećenja  $s = 8,2$  smanjuje količina utisnutog fluida u vremenu. Odnosno, protok se smanjuje od  $640 \text{ m}^3/\text{dan}$  na  $533 \text{ m}^3/\text{dan}$  i na kraju završava sa  $385 \text{ m}^3/\text{dan}$ .

Kako sa povećanjem skina protok pada, tako sa smanjenjem skina protok raste. Na dijagramu se također vidi rast količine utisnute slojne vode u jedinici vremena od  $809 \text{ m}^3/\text{dan}$  kada je  $s = -2$  do  $940 \text{ m}^3/\text{dan}$  kada je  $s = -3,07$ .

Također je za istu količinu utiskivanja slojne vode kod većeg oštećenja pribušotinske zone, potrebno povećati dinamički tlak na ušću. Vidi se da je kod uvjeta  $s = 0$  za protok od  $640 \text{ m}^3/\text{dan}$ , potrebno ostvariti dinamički tlak na dnu od  $184,2 \times 10^5 \text{ Pa}$ , i dinamički tlak na ušću od  $45 \times 10^5 \text{ Pa}$ . Kod stimulirane bušotine kod koje je  $s = -2$  potrebno je ostvariti dinamički tlak na dno od  $173,6 \times 10^5 \text{ Pa}$ , odnosno na ušću od  $34,4 \times 10^5 \text{ Pa}$  (dobiveno uvrštavanjem u jednadžbu (4-6)), za istu količinu utiskivanja. Iz toga se vidi da je kod bušotine sa  $s = -2$ , za isti protok utiskivanja potrebno ostvariti tlak na ušću manji za  $10,6 \times 10^5 \text{ Pa}$ . Ujedno ta razlika tlaka čini i uštedu energetske vrijednosti te se stoga može reći da skin faktor utječe i na energetska učinkovitost tijekom utiskivanja slojne vode u ležište.



Slika 4-7. Sumirani grafički prikaz konstruiranih krivulja na temelju rezultata proračuna

Na temelju izvedenih proračuna zaključuje se da je veličina oštećenja pribušotinske zone ležišne stijene, bitan faktor s obzirom na učinkovitost utiskivanja slojne vode u ležište. Kako se on mijenja tijekom procesa utiskivanja i utječe na pad tlaka utiskivanja, korisno je praćenje pada tlaka kako bi se na taj način pratila i sama vrijednost skin faktora. Poželjno je njegovo praćenje tijekom cjelokupnog utiskivanja slojne vode u ležište kako bi se u slučaju oštećenje pravovremeno mogli poduzeti zahvati za njegovo otklanjanje.

## 5. ZAKLJUČAK

Danjim razvojem gospodarstva u svijetu, rasti će potreba za energijom što će dovesti do nužno veće potražnje za ugljikovodicima. Posljedično tome povećavat će se i količina proizvedene otpadne slojne vode koju treba na trajan i siguran način zbrinuti. Slojna voda deponira se u pogodne geološke formacije utiskivanjem, što se trenutno smatra prihvatljivim načinom zbrinjavanja. S obzirom na oštećenja ležišnih stijena samim utiskivanjem slojne vode, koja uzrokuju smanjenje propusnosti ležišta, ovisi moguća količina vode koja se utiskuje u jedinici vremena. Skin faktor kao bezdimenzionalna veličina pokazatelj je smanjenja propusnosti ležišta i nastaje tijekom različitih aktivnosti u bušotini te ga je potrebno kontrolirati i pratiti. On može nastati tijekom bušenja, zacjevljenja i opremanja kanala bušotine, tijekom proizvodnje kao i utiskivanja slojne vode u bušotinu što je razmatrano u ovom diplomskom radu. Pozitivan skin faktor ukazivat će na smanjenje propusnosti ležišne stijene od originalne vrijednosti te ujedno i smanjenje kapaciteta utiskivanja. Negativan skin faktor ukazivat će na poboljšanu propusnosti od početne, što se može potaknuti obradama ležišnih stijena kiselinama ili hidrauličkim frakturiranjem. Praćenjem promjene tlaka na ušću i na dnu bušotine može se pratiti i promjena vrijednosti skin faktora kako bi se na vrijeme krenulo u razmatranje njegova uklanjanja i povećanja mogućnosti protoka. Kako je prikazano proračunom, kod povećanja skin faktora jedinični protok pada, dok kod njegova smanjenja on raste te ga je potrebno što više ukloniti spomenutim rudarskim zahvatima u ležištu. Kontroliranjem dinamičkog tlaka na ušću bušotine, može se regulirati količina utiskivanja slojne vode u ležište. Ukoliko se poveća tlak na ušću, doći će do povećanja protoka utiskivanja za istu vrijednost skin faktora. Ujedno, ako se želi utiskivati nepromijenjenim protokom, kod različitih vrijednosti skina, također će bit potrebno osigurati povećanje dinamičkog tlaka na ušću. Odnosno, ako se ležište stimulira ili se smanji njeno oštećenje, za istu vrijednost protoka trebat će primijeniti manji tlak na ušću nego prije uklanjanja oštećenja, što će dati uštedu energije s obzirom na manje potreban tlak koji se mora ostvariti. Radi održavanja sigurnosti procesa, važno je konstantno pratiti tlak utiskivanja i tlak na ušću bušotine koji ne smije prijeći dozvoljeno ograničenje radnog tlaka s obzirom na konstrukciju bušotinske glave, kao i dinamički tlak na dnu kako ne bi došlo do nepoželjnog loma geološke formacije i izakolonske komunikacije.

## 6. POPIS LITERATURE

1. BOYUN, G., XINGHUI, L., XEUHAO, T., 2017. *Petroleum Production Engineering* (Second Edition), Gulf Professional Publishing.
2. BRKIĆ, V., 2020a. Nastavni materijali na Merlinu iz kolegija Proizvodnja nafte i plina 2., u ak. god. 2019./2020. Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb.
3. BRKIĆ, V., 2020b. Nastavni materijali na Merlinu iz kolegija Obrada stijena u bušotinama, u ak. god. 2019./2020. Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb.
4. ČIKEŠ, M., 2010. *Teorija obrade ležišnih stijena kiselinama i analiza ostvarenih rezultata*, interna skripta, Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Zagreb.
5. ČIKEŠ, M., 2015. *Proizvodno inženjerstvo nafte i plina*, Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb.
6. GAURINA-MEĐIMUREC, N., 2004. *Kemijske obrade ležišnih stijena*, interna skripta, Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb.
7. GAURINA-MEĐIMUREC, N., 2021. Nastavni materijali na Merlinu iz kolegija Utiskivanje otpada iz naftnog rudarstva u ak. god. 2020./2021., Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb.
8. GAURINA-MEĐIMUREC, N., PAŠIĆ, B., MIJIĆ, P., MEDVED, I., 2020. Deep Underground Injection of Waste from Drilling Activities—An Overview., *Minerals*, 2020, 10(4).
9. IVŠINOVIĆ, J., 2017. The analysis of water injection systems in sandstone hydrocarbon reservoirs, case study from the western part of the Sava Depression, *The Mining-Geology-Petroleum Engineering Bulletin*.
10. JAHN, F., COOK, M., GRAHAM, M., 2008. *Hydrocarbon exploration and production* 2nd edition, Falcon House, Aberdeen, United Kingdom.
11. MATANOVIĆ, D., MOSLAVAC, B. 2011. *Opremanje i održavanje bušotina*, Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb.
12. MCLEOD, H.O. Jr., 1983. The effect of Perforating Conditions on Well Performance, *J. Pet Tech* (Januar 1983).
13. METZNER, A. B., REED, J. C., 1955. Delaware Flow of Non-Newtonian Fluids—Correlation of the Laminar, Transition, and Turbulent-flow Regions, *A.I.Ch.E. Journal*, University of Delaware, Newark.

14. STANDING, M. B. 1970. Inflow Performance Relationship for Damaged Wells Producing by Solution-Gas Drive. J. Pet Tech (November 1970) 1399-1400.
15. VAN EVERDINGEN, A.F., 1953. The skin effect and its influence on the productive capacity of a well, Shell oil co., Houston, Texas, Society of Petroleum Engineers.
16. ZELIĆ, M., 2001. Utjecaj stupnja oštećenja pribušotinske zone na djelotvornost utiskivanja fluida u duboka geološki pogodna ležišta, U: Međunarodni znanstveno-stručni skup o naftnom rudarstvu, Zadar, Hrvatska, 2-5.10.2001., *Nafta i plin*, izv.broj 4, 2001., str. 451-464.

Web izvori:

17. EPA – United States Environmental Protection Agency, Underground Injection Control Well Classes, URL :<https://www.epa.gov/uic/class-ii-oil-and-gas-related-injection-wells> (1.1.2022).
18. EIA – United States Energy Information Administration, International energy outlook 2021, URL: <https://www.eia.gov/outlooks/ieo/consumption/sub-topic-03.php> (1.1.2022).

## IZJAVA

*Izjavljujem da sam ovaj diplomski rad pod naslovom „Utjecaj oštećenja pribušotinske zone na učinkovitost utiskivanja otpadne slojne vode u ležište“ izradio samostalno na temelju znanja stečenih na Rudarsko-geološko-naftnom fakultetu, Sveučilišta u Zagrebu, služeći se navedenom literaturom.*

*Ivan Staneković*

---

*Ivan Staneković*



KLASA: 602-01/22-01/15  
URBROJ: 251-70-12-22-2  
U Zagrebu, 04.02.2022.

Ivan Staneković, student

## RJEŠENJE O ODOBRENJU TEME

Na temelju vašeg zahtjeva primljenog pod KLASOM 602-01/22-01/15, URBROJ: 251-70-12-22-1 od 26.01.2022. priopćujemo vam temu diplomskog rada koja glasi:

### UTJECAJ OŠTEĆENJA PRIBUŠOTINSKE ZONE NA UČINKOVITOST UTISKIVANJA OTPADNE SLOJNE VODE U LEŽIŠTE

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)