

Kontrola dotoka pijeska u kanal bušotine

Jerković, Mate - Grgo

Master's thesis / Diplomski rad

2024

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://um.nsk.hr/um:nbn:hr:169:685706>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-28**



Repository / Repozitorij:

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



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

KONTROLA DOTOKA PIJESKA U KANAL BUŠOTINE

Diplomski rad

Mate – Grgo Jerković

N4355

Zagreb, 2024

KONTROLA DOTOKA PIJESKA U KANAL BUŠOTINE

Mate – Grgo Jerković

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

Sažetak

Diplomski rad analizira metode za kontrolu dotoka slojnog pijeska u naftnim bušotinama te njihove učinke. Mehaničke metode poput pješčanog zasipa, filtri i prorezanih lajnera pružaju stabilnost zaštiti od migracija pijeska, dok kemijska konsolidacija smolama učvršćuje pijesak unutar formacija. Pravilnim planiranjem metoda kontrola pijeska povećava se proizvodnost i ekonomska isplativost bušotina. Razne kompanije kreiraju priručnike kako bi se lakše donosile odluke, koje se najčešće temelje na iskustvu. Na kraju, pravilnom primjenom navedenih metoda može se značajno produžiti proizvodni vijek trajanja bušotina.

Ključne riječi: kontrola pijeska, pješčani zasip, mehaničke metode, kemijska konsolidacija, smole, filtri, lajneri

Diplomski rad sadrži: 43 stranice, 1 tablicu, 22 slike, i 13 referenci.

Jezik izvornika: Hrvatski

Pohrana rada: Knjižnica Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta, Pierottijeva 6, Zagreb

Mentor: izv. prof. dr. sc. Vladislav Brkić, RGNF

Ocjenjivači: izv. prof. dr. sc. Vladislav Brkić, RGNF
izv. prof. dr. sc. Sonja Koščak Kolin, RGNF
izv. prof. dr. sc. Borivoje Pašić, RGNF

SAND INFLUX CONTROL IN THE WELLBORE

Mate-Grgo Jerković

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

Abstract

The thesis analyzes methods for controlling the influx of formation sand in oil wells and their effects. Mechanical methods such as gravel packing, screens, and slotted liners provide stability in protecting against sand migration, while chemical consolidation with resins strengthens the sand within the formations. Proper planning of sand control methods increases well productivity and economic efficiency. Various companies create manuals to facilitate decision-making, which is often based on experience. Ultimately, the correct application of these methods can significantly extend the productive lifespan of wells.
Keywords: sand control, gravel packing, mechanical methods, chemical consolidation, resins, screens, liners

Thesis contains: 43 pages, 1 table, 22 figures, i 13 references.

Original in: Croatian

Archived in: Library of Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering, Pierottijeva 6, Zagreb

Supervisors: Assoc. Prof. Vladislav Brkić, PhD

Reviewers: Assoc. Prof. Vladislav Brkić, PhD
Assoc. Prof. Sonja Koščak Kolin, PhD
Assoc. Prof. Borivoje Pašić, PhD

SADRŽAJ

POPIS SLIKA.....	I
POPIS TABLICA	I
POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I JEDINICA	II
1. UVOD	1
2. DOTOK PIJESKA	2
2.1. Razlozi proizvodnje pijeska	2
2.2. Opći kriteriji za dotok pijeska.....	3
2.3. Razlozi kontrole dotoka slojnog pijeska	10
2.3.1. Taloženje slojnog pijeska	10
2.3.2. Oštećenje opreme.....	11
2.3.3. Odlaganje slojnog pijeska	11
3. MEHANIČKE METODE KONTROLE PIJESKA.....	12
3.1. Ograničavanje proizvodnje fluida.....	13
3.2. Prorezani lajneri	13
3.3. Filtri	15
3.3.1. Žicom omotani filtri	15
3.3.2. Pretpakirani filtri.....	17
3.3.3. Premium filtri.....	18
3.3.4. Specijalno dizajnirani filtri	19
4. PJEŠČANI ZASIPI	20
4.1. Odabir veličine čestica pijeska i kvaliteta pijeska	21
4.2. Metode ugradnje pješčanog zasipa	25
4.2.1. Metoda ugradnje pješčanog zasipa s povratnom cirkulacijom	26
4.2.2. Metoda s križnim prijelazom.....	27
5. KEMIJSKA KONSOLIDACIJA PIJESKA	28
5.1. Smole.....	29
5.2. Postupci konsolidiranja.....	29
5.3. Postavljanje smola	31
5.4. Plastičan zasip	33
6. IZBOR METODA	34
6.1. Način opremanja bušotine povezan s kontrolom pijeska	35

7. ZAKLJUČAK.....	42
8. LITERATURA	43

POPIS SLIKA

Slika 2-1. Raspodjela naprezanja duž osi bušotinskog kanala	4
Slika 2-2. Koordinatni sustav prema konfiguraciji bušotine	5
Slika 2-3. Tangencijalna naprezanja na stijenkama bušotinskog kanala.....	8
Slika 3-1. Tri osnovna načina opremanja bušotina	12
Slika 3-2. Podjela lajnera s obzirom na proreze	14
Slika 3-3. Oblici proreza lajnera.....	14
Slika 3-4. Žicom omotan filter	16
Slika 3-5. Pretpakirani filter	17
Slika 3-6. Premium filter	18
Slika 3-7. Specijalna vrsta filtera.....	19
Slika 4-1. Česti oblici ugradnje pješćanih zasipa	20
Slika 4-2. Pakiranje zrnaca pijeska.....	22
Slika 4-3. Odnosi radijusa pijesaka pješćanog zasipa i uzorka slojnog pijeska	23
Slika 4-4. Ovisnost propusnosti zasipa o omjeru radijusa zasipa i slojnog pijeska.....	24
Slika 4-5. Krumbeinova skala za određivanje sferičnosti i zaobljenosti zrna	25
Slika 4-6. Prikaz osnovnih metoda za ugradnju pješćanog zasipa	26
Slika 5-1. Zrnca slojnog pijeska nakon kemijske konsolidacije.....	28
Slika 5-2. Sustav za protiskivanje smole	31
Slika 6-1. Stablo odluke za odabir kontrole pijeska	34
Slika 6-2. Stablo odluke za opremanje bušotine	37
Slika 6-3. Stablo odluke za provođenje metoda kontrola u zacijevljenom kanalu.....	39
Slika 6-4. Stablo odluke za provođenje metoda kontrola u otvorenom kanalu.....	41

POPIS TABLICA

Tablica 5-1. Postupci kemijskog konsolidiranja smolom u industriji	30
--	----

POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I JEDINICA

Oznaka	Opis	Jedinica
A	poro-elastična konstanta	[-]
a_w	smjer bušotinskog kanala	[°]
c	koeficijent jednolikosti	[-]
C_o	kohezivna čvrstoća stijene	[Pa]
c_r	kompresibilnost stijene	[Pa ⁻¹]
c_b	kompresibilnost zrna	[Pa ⁻¹]
$CBHFP$	kritični tlak protjecanja na dnu bušotine	[Pa]
CDP	kritični pad tlaka koji uzrokuje lom	[Pa]
d_{10}	veličina čestica u 10 % uzorka	[m]
E	Youngov modul elastičnosti	[Pa]
i_w	otklon bušotinskog kanala s obzirom na vertikalu	[°]
p_e	tlak u ležištu	[Pa]
p_{pi}	početni tlak u porama	[Pa]
p_w	tlak u bušotini	[Pa]
p_{wf}	tlak na dnu bušotine	[Pa]
r_w	radijus bušotine	[m]
T_i	početna temperatura u ležištu	[K]
T_w	temperatura stijenske kanala bušotine	[K]
TWC_{sp}	tlak gnječenja uzorka (engl.)	[Pa]
U	efektivna čvrstoća stijene	[Pa]
α_p	Biotova konstanta	[-]
α_t	volumetrijsko-toplinska-ekspanzijska konstanta	[K ⁻¹]
θ	kut između projekcija smjera bušotinskog kanala u ravnini i smjera (σ_H)	[°]
ϕ	unutarnji kut trenja	[°]
ν	Poissonov omjer za stijene	[-]
σ	koeficijent razvrstanosti	[-]
σ_1	maksimalno glavno naprezanje	[Pa]
σ_2	srednje glavno naprezanje	[Pa]
σ_3	minimalno glavno naprezanje	[Pa]
σ_a	uzdužna naprezanja	[Pa]

σ_h	minimalno horizontalno naprezanje	[Pa]
σ_H	maksimalno horizontalno naprezanje	[Pa]
σ_r	radijalno naprezanje	[Pa]
σ_t	tangencijalno naprezanje	[Pa]
$\sigma_{t1,2}$	tangencijalna naprezanja na stijenci kanala bušotine	[Pa]
σ_x	naprezanja u smjeru osi x	[Pa]
σ_y	naprezanja u smjeru osi y	[Pa]
σ_z	naprezanja u smjeru osi z	[Pa]
W&P	postavljanje pješčanog zasipa slojnom vodom (engl. <i>WaterPack</i>)	
F&P	frakturiranje i pakiranje (engl. <i>Frack&Pack</i>)	
PaF	pretpakiranje iznad tlaka frakturiranja (engl. <i>Prepacking above Frac pressure</i>)	

1. UVOD

U naftno-plinskom inženjerstvu, s obzirom na sve veću potrebu za iskorištavanjem energetske resursa, posebna se pažnja posvećuje svim čimbenicima koji mogu otežati postupak pridobivanja nafte i plina. Pijesak, kao jedna od takvih komponenti, često uzrokuje značajne probleme koji mogu uključivati oštećenja opreme, smanjenje proizvodnje nafte i plina, a samim time i povećanje operativnih troškova. Na odobalnim postrojenjima i na nepristupačnim lokacijama pijesak stvara još veće probleme jer su svi zahvati na opremi skuplji i vremenski dugotrajniji.

Proizvodnja pijeska posljedica je raznih čimbenika koji uključuju mehaničku nestabilnost formacija, eroziju nastalu protokom raznih fluida, migraciju finih čestica i slično. Smanjenje proizvodnje pijeska postiže se raznim načinima koji, ovisno o parametrima u kanalu bušotine, bolje ili lošije sprječavaju prodor pijeska u samu bušotinu. Tradicionalno, neke od metoda kojima se postiže kontrola dotoka pijeska su mehaničke barijere, pod kojima se najčešće smatraju zasipi pijeska, ali isto tako i kemijske metode konsolidacije koje povećavaju koheziju unutar same formacije.

Velike kompanije temelje svoje odluke na strukturiranom procesu odlučivanja kako bi što bolje uzele u obzir sve parametre za odabir ispravnog načina kontrole pijeska. Svaka bušotina zahtijeva svoj individualni pristup i to se podosta razlikuje od nekih sličnih problema pri proizvodnji. Na temelju raznih informacija koje se uzimaju u obzir pri donošenju odluka, operatori mogu donijeti odluke koje će optimizirati sigurnost i učinkovitost proizvodnje, pritom minimizirajući rizik od oštećenja opreme i konačnog gubitka proizvodnje.

Kontrola pijeska zahtijeva pažljivo planiranje i provedbu, što uključuje pravilan izbor opreme i fluida koji će se koristiti pri bušenju te postupke i tehnike pri perforiranju i cementiranju. Učinkovita kontrola pijeska može produljiti vijek trajanja bušotine, povećati njenu produktivnost i smanjiti ukupne operativne troškove. Stoga je razumijevanje mehanizama proizvodnje pijeska i pravilna primjena tehnologija ključna za uspješno upravljanje bušotinama. Kroz ovaj rad obraditi će se različite metode kontrole dotoka slojnog pijeska, s naglaskom na mehaničke i kemijske metode. Analizirati će se metode poput postavljanja pješčanog zasipa i filtra, te prorezanih lajnera te kemijska konsolidacija smolama, s ciljem povećavanja produktivnosti i dugovječnosti bušotina.

2. DOTOK PIJESKA

Dizajniranje sustava i metoda za upravljanje dotokom pijeska u prošlosti se fokusiralo na male promjene u uvjetima formacije i proizvodnim parametrima do kojih dolazi tijekom operativnog vijeka bušotine. U svrhu boljeg razumijevanja u obzir bi trebalo uzeti (Matanović i Moslavac, 2011):

- uzroke pokretanja ili migracije pijeska
- načine na koji pješćani zasipi sprječavaju njihovo kretanje i
- metode predviđanja proizvodnje pijeska.

Najčešće korištena metoda kontrole dotoka pijeska je primjena pješćanog zasipa. Istraživanjem se može primijetiti kako svaka kompanija ima svoj pristup i preporuku za projektiranje i određivanje dimenzija zrnaca zasipa. Bolje rečeno, svi pristupi potencijalno pridonose kontroli dotjecanja pijesaka, ali uspješnost svake pojedine metode ostvaruje se samo ako se proizvodne karakteristike nalaze unutar određenih granica koje odgovaraju odabranom izboru zasipa.

"Mehanizam proizvodnje pijeska iznimno je kompleksan i uzrokovan je mnogim čimbenicima; od početnog razrušavanja dlijetom, opremanja, ostvarivanja proizvodnje do injektiranja i slično" (Matanović i Moslavac, 2011, p375).

Strujanje fluida i čvrstoća ležišnih stijena su dva glavna faktora koja najviše utječu na to hoće li i kada doći do dotoka pijeska. Čestice pri dotoku mogu biti raznih veličina, od krutih čestica u vidu ostataka stijena nakon razrušavanja, do iznimno finih čestica. Ukoliko uopće dođe do proizvodnje pijeska, puno je povoljnije ako su te čestice što finije. Primarni je cilj zadržati stopu proizvodnje pijeska na niskim razinama, što najčešće nije ekonomski isplativo.

2.1. Razlozi proizvodnje pijeska

Raspalom stijena na sve sitnije čestice, koje na kraju postaju pijesak i sitniji materijal, dolazi do sve lakše proizvodnje pijeska. Stijena se raspada iz raznih razloga, a neki od njih

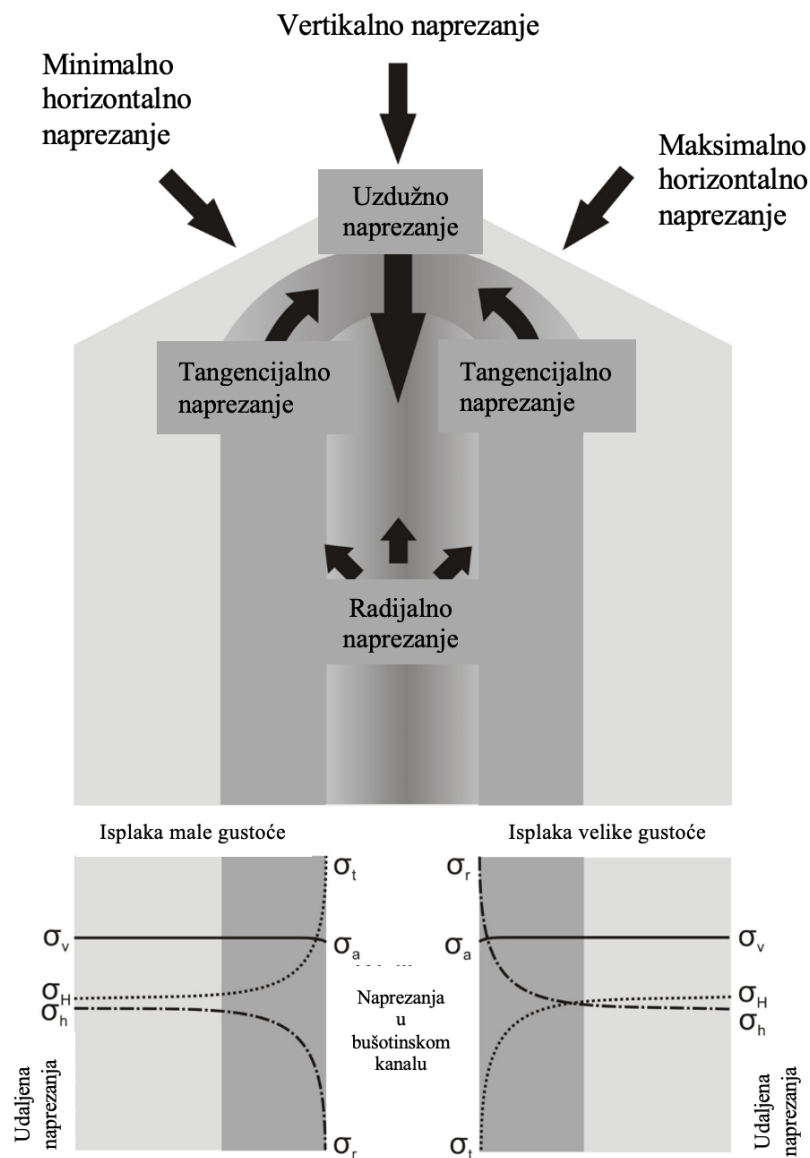
su tektonske aktivnosti, pritisak pokrovnih naslaga te naprezanja koja nastaju zbog prodiranja raznih fluida i dlijeta u stijenu.

Dva glavna razloga zbog kojih dolazi do proizvodnje pijeska su čvrstoća pijeska i strujanje fluida. Što se stijena lakše raspada, veća je vjerojatnost da će doći do proizvodnje pijeska, no i povećana brzina strujanja fluida također uzrokuje povećanu proizvodnju pijeska.

2.2. Opći kriteriji za dotok pijeska

Procesom izrade bušotinskog kanala stijene koje se nalaze u ležištu su u ravnotežnom stanju. Naprezanja koja u tom trenutku postoje nazivaju se (lat.) *in-situ*, odnosno naprezanja baš na tom određenom mjestu. Tijekom izrade bušotinskog kanala naprezanja u samim stijenama, koje se nalaze neposredno blizu bušotinskog kanala, mijenjaju se jer je prirodna potpora tih stijena narušena bušenjem te se one zamjenjuju isplakom. Ta se naprezanja mogu definirati kao vertikalna, odnosno tlak pokrovnih naslaga σ_v , uz dva horizontalna naprezanja, σ_H (maksimalno horizontalno naprezanje) i σ_h (minimalno horizontalno naprezanje). Ta dva horizontalna naprezanja najčešće nisu jednaka (McLean i Addis, 1990).

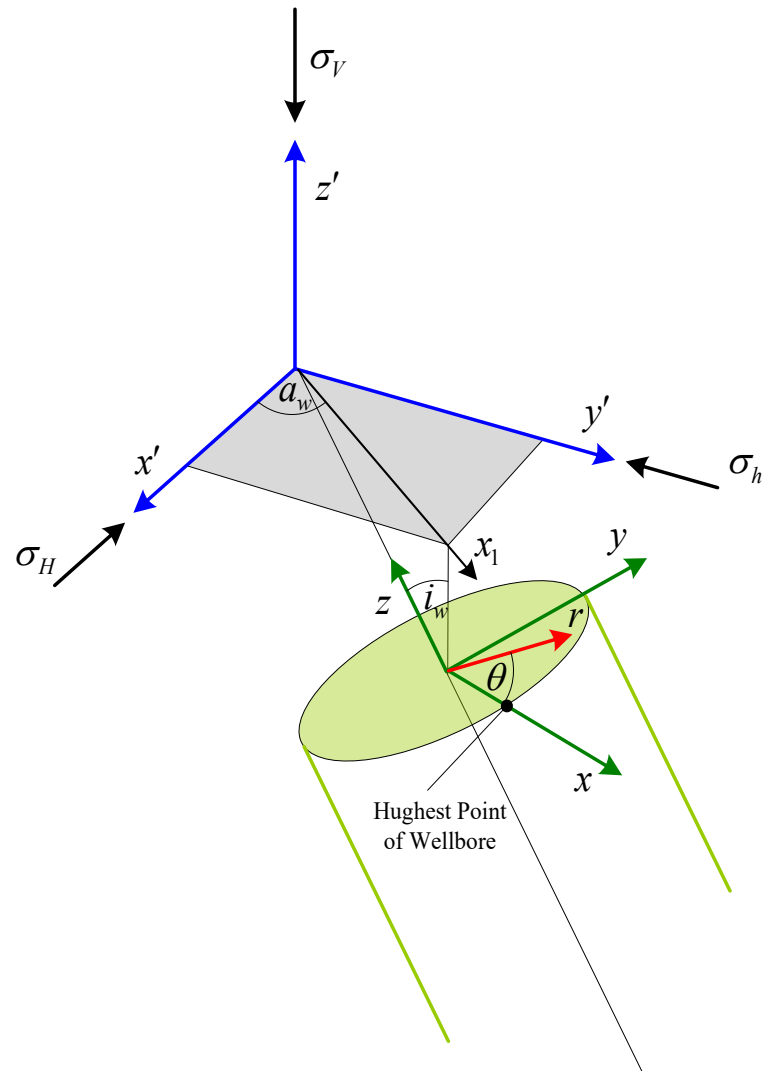
Nakon bušenja, kao što je vidljivo na Slici 2-1., uz navedena naprezanja u razmatranje se mogu pridružiti radijalno naprezanje σ_r , tangencijalno naprezanje σ_t te uzdužno naprezanje σ_a .



Slika 2-1. Raspodjela naprezanja duž osi bušotinskog kanala (Matanović et al., 2012)

Smjer djelovanja radijalnog naprezanja okomit je na stijenke bušotinskog kanala, dok uzdužno naprezanje djeluje duž osi kanala, a tangencijalno naprezanje zaokružuje bušotinski kanal. Udaljavanjem od osi bušotinskog kanala jasno je vidljivo da se sva naprezanja značajno mijenjaju, odnosno vraćaju se u početna naprezanja u ležištu prije početka bušenja. Prema donjem dijelu Slike 2-1, radijalna naprezanja prelaze u minimalna horizontalna naprezanja, a tangencijalna se mijenjaju u maksimalna horizontalna naprezanja.

Naprezanja s obzirom na položaj bušotine u prostoru označavaju se u skladu s napreznanjima u presjeku bušotine, a iz Slike 2-2 vidljivo je da su:



Slika 2-2. Koordinatni sustav prema konfiguraciji bušotine (Matanović et al., 2012)

- σ_x – naprezanja u smjeru osi x, [Pa]
- σ_y – naprezanja u smjeru osi y, [Pa]
- σ_z – naprezanja u smjeru osi z, [Pa]
- i_w – otklon bušotinskog kanala s obzirom na vertikalu, [°]
- θ – kut između projekcija smjera bušotinskog kanala u ravnini i smjera (σ_H), [°]
- α_p – smjer bušotinskog kanala [°]

Lokalna naprezanja inducirana (lat.) *in-situ* naprezanjima i hidraulički efekti na stijenke bušotinskog kanala ($r = r_w$) za vertikalni bušotinski kanal mogu biti opisani kao (Fjær et al., 2008):

$$\sigma_r = p_w \quad (2-1.)$$

$$\sigma_t = (\sigma_x + \sigma_y) - (\sigma_x - \sigma_h) \cos 2\theta - p_w \quad (2-2.)$$

$$\sigma_a = \sigma_z - 2(\sigma_x - \sigma_y) \nu \cos 2\theta \quad (2-3.)$$

Gdje su:

- p_w – tlak u bušotini, [Pa]
- ν – Poissonov omjer za stijene [bezdimenzionalan]

Iz jednadžbi se može zaključiti ovisnost radijalnog naprezanja o tlaku u bušotini, odnosno gustoći servisnog fluida. Isto tako, vidljivo je da će na tangencijalno naprezanje utjecati vertikalno naprezanje u smjeru osi x , vertikalno naprezanje u smjeru osi y , minimalno horizontalno naprezanje σ_h , kut između točke na obodu bušotinskog kanala, smjer maksimalnog horizontalnog naprezanja i tlak u bušotini. Uzdužno naprezanje ovisi o okomitom naprezanju u z smjeru, okomitom naprezanju u x smjeru, Poissonovom omjeru za stijenu, kutu između točke na obodu bušotinskog kanala i smjeru maksimalnog horizontalnog naprezanja. S odmakom od bušotinskog kanala ova naprezanja se mijenjaju i prelaze u početna naprezanja u ležištu, kao što je već navedeno, jer su tamo u nenarušenom stanju.

Lokalna naprezanja na stijenci bušotinskog kanala ($r = r_w$) inducirana kemijskim i termičkim efektima mogu se prikazati kao:

$$\sigma_r = 0. \quad (2-4.)$$

$$\sigma_t = \frac{\alpha_p(1-2\nu)}{1-\nu} (p_w - p_{pi}) + \frac{E\alpha_t}{3(1-\nu)} (T_w - T_i) \quad (2-5.)$$

$$\sigma_a = \frac{\alpha_p(1-2\nu)}{1-\nu} (p_w - p_{pi}) + \frac{E\alpha_t}{3(1-\nu)} (T_w - T_i) \quad (2-6.)$$

Gdje su:

- α_p – Biotova konstanta, [bezdimenzionalna]
- α_t – volumetrijsko-toplinska-ekspanzijska konstanta, [K^{-1}]

- E – Youngov modul elastičnosti, [Pa]
- p_{pi} – početni tlak u porama, [Pa]
- T_w – temperatura stijenke kanala bušotine, [K]
- T_i – početna temperatura u ležištu, [K]

Iz navedenih jednadžbi, vidljivo je da su za izračun rasporeda naprezanja oko bušotinskog kanala nastalih zbog kemijskih i toplinskih efekata potrebni sljedeći parametri Biotova konstanta, Poissonov omjer za stijenu, tlak u bušotinskom kanalu, početni tlak u porama, Youngov modul elastičnosti, konstanta volumetrijske-toplinske-ekspanzije, temperatura stijenke bušotinskog kanala i početna temperatura ležišta.

Za analizu modela urušavanja bušotinskih kanala najčešće se upotrebljava Mohr-Coulombov model odreznog loma stijene. Taj model zapostavlja glavna naprezanja, ali uključuje efekt čvrstoće šejlova. Može se prikazati u obliku:

$$(\sigma_1 - \alpha_p p_p) \leq C_o + (\sigma_3 - \alpha_p p_p) \tan^2 \phi \quad (2-7.)$$

Gdje su:

- σ_1 – maksimalno glavno naprezanje, [Pa]
- p_p – porni tlak, [Pa]
- C_o – kohezivna čvrstoća stijene, [Pa]
- σ_3 – minimalno glavno naprezanje, [Pa]
- ϕ – unutarnji kut trenja, [°]

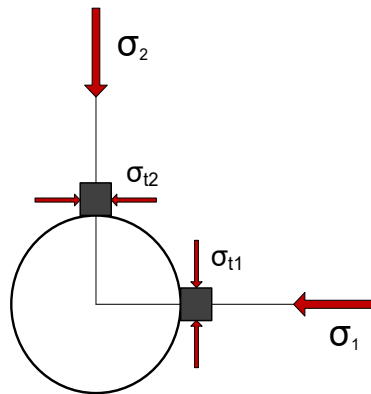
Prema Wilsonu et al. (2002), da bi se izbjegla proizvodnja pijeska, najveće efektivno tlačno tangencijalno naprezanje (σ_{maxe}) treba biti manje ili jednako od efektivne čvrstoće stijena (U).

$$\sigma_{maxe} \leq U \quad (2-8.)$$

Gdje su:

- σ_{maxe} - najveće efektivno tlačno tangencijalno naprezanje, [Pa]
- U - efektivna čvrstoća stijene, [Pa]

Prema Slici 2-3. i jednadžbama može se odrediti tangencijalno naprezanje.



Slika 2-3. Tangencijalna naprezanja na stijenkama bušotinskog kanala (Wilson et al., 2002)

$$\sigma_{t1} = 3\sigma_2 - \sigma_1 - p_{wf}(1 - A) - Ap_e \quad (2-9.)$$

$$\sigma_{t2} = 3\sigma_1 - \sigma_2 - p_{wf}(1 - A) - Ap_e \quad (2-10.)$$

Gdje su:

- $\sigma_{t1,2}$ – tangencijalna naprezanja na stijenci kanala bušotine, [Pa]
- A – poro-elastična konstanta, [bezdimenzionalna]
- p_e – tlak u ležištu, [Pa]
- σ_2 – srednje glavno naprezanje, [Pa]

Nadalje, poro-elastična konstanta A definirana je kao:

$$A = \frac{(1-2\nu)\alpha_p}{1-\nu} \quad (2-11.)$$

Biotova konstanta definirana je idućom jednadžbom:

$$\alpha_p = 1 - \frac{c_r}{c_b} \quad (2-12.)$$

Gdje su:

- c_r – kompresibilnost stijene, [Pa⁻¹]
- c_b – kompresibilnost zrna, [Pa⁻¹]

Opisuje učinkovitost djelovanja tlaka fluida nasuprot ukupno primijenjenom tlaku. Ukoliko je vrijednost Biotove konstante jednaka 1, fluid u pornom prostoru ima maksimalnu efikasnost u djelovanju protiv djelovanja opterećenja krovinih naslaga. U suprotnom, ako je vrijednost manja od 1, tlak fluida u pornom prostoru je mali i slabo djeluje suprotno tlaku krovinskih naslaga i samo efektivno naprezanje u stijeni postaje veće. Za guste i kompaktno zbijene stijene Biotova konstanta iznosi približno 1, a za stijene male gustoće se približava 0.

Da bi došlo do proizvodnje pijeska kritični tlak treba biti dosegnut.

$$p_{wf} \geq CBHFP = \frac{3\sigma_{t1} - \sigma_{t2} - U}{2-A} - p_e \frac{A}{2-A} \quad (2-13.)$$

- p_{wf} – tlak na dnu bušotine, [Pa]
- $CBHFP$ – kritični tlak protjecanja na dnu bušotine (engl. *Critical bottomhole flowing pressure*), [Pa]
- CDP – kritični pad tlaka koji uzrokuje lom (engl. *Critical drawdown pressure to cause failure*), [Pa]

Proizvodnja pijeska je funkcija pada tlaka od ležišta prema bušotinskom kanalu, a tlak na dnu bušotine je razlika ležišnog tlaka i kritičnog tlaka [CDP] nakon kojeg bi došlo do urušavanja ležišnih stijena. Nastavno, može se pronaći povezanost između ležišnog tlaka i kritičnog tlaka.

$$CDP = \frac{1}{2-A} [2p_e - (3\sigma_{t1} - \sigma_{t2} - U)] \quad (2-14.)$$

Za određivanje već spomenute efektivne čvrstoće stijene u primjeni se većinski koristi test debelo-stijenog cilindra, odnosno tlak gnječenja uzorka. Stijena se optereti tlačnim ili vlačnim naprezanjima te se podvrgne raznim stupnjevima deformiranja:

- elastična deformacija – stijena se deformira kada se naprezanje ostvari, ali se vraća u prvobitni položaj nakon što se opterećenje popusti
- plastična deformacija – stijena se nakon određenog opterećenja više ne može vratiti u prvobitni položaj, odnosno mijenja joj se oblik nakon popuštanja opterećenja

- prekidna čvrstoća – dolazi do frakturiranja stijene, odnosno stijena se lomi
- Stvarna čvrstoća stijene određuje se kao:

$$U = b_f \cdot 1,55TWC_{sp} \quad (2-15.)$$

- TWC_{sp} – tlak gnječenja uzorka (engl. *Collapse pressure of the standard specimen*), [Pa]
- b_f – faktor pojačanja

Zbog različitosti stijena i preostale čvrstoće u jednadžbu se još uključuje faktor pojačanja koji najčešće iznosi 2.

$$U = 3,1TWC_{sp} \quad (2-16.)$$

2.3. Razlozi kontrole dotoka slojnog pijeska

Kao što je već spomenuto, primarni razlog kontrole dotoka slojnog pijeska je ekonomski. Osim što dolazi do smanjene proizvodnje nafte i plina, povećavaju se troškovi održavanja opreme i uključuju se troškovi vezani za odlaganje slojnog pijeska. Stvaranjem taložnih masa unutar zaštitnih cijevi ili tubingu nastaje ozbiljan problem. Zbog kompliciranih i unaprijed planiranih sustava, ekonomski gledano, dotok slojnog pijeska treba ukomponirati u samom početku planiranja opremanja bušotine.

2.3.1. Taloženje slojnog pijeska

Pijesak koji se taloži unutar proizvodne opreme u bušotini i zaštitnih cijevi otežava protok fluida. Začepljivanjem proizvodne opreme potrebno ju je redovno ispirati što dovodi do značajnih financijskih troškova. Ukoliko se primijeni neka od odgovarajućih metoda za sprječavanje taloženja pijeska, smanjuje se potreba za čišćenjem bušotine i održavanjem sustava. Prema (Matanović i Moslavac, 2011) neke od metoda za sprječavanje taloženja pijeska su:

- smanjivanje proizvodnje slojnog fluida, što za posljedicu ima i smanjeni udio proizvodnje pijeska (cijeli sustav zbog toga je manje isplativ)

- povećanje proizvodnje slojnog fluida, kako bi se ubrzalo kretanje istog u tubing-u i spriječilo/smanjilo taloženje pijeska
- preusmjerenjem slojnog fluida, odnosno povećanjem brzine protjecanja

Kao najlošiji izbor u praksi se je pokazalo ignoriranje vidljivih problema, te nastavak proizvodnje bez rješavanja istih.

2.3.2. Oštećenje opreme

Oštećenja proizvodnih zaštitnih cijevi ili lajnera često mogu biti izravna posljedica proizvodnje pijeska. U slučajevima kada je formacija dobro konsolidirana, takva oštećenja mogu biti povezana s neujednačenim lateralnim opterećenjima koja se javljaju tijekom proizvodnje iz određenih slojeva, kao i s velikim uzdužnim tlačnim opterećenjima uzrokovanim urušavanjem slojeva iznad ležišta. U formacijama gdje su većinski stijene nekonsolidirane, dodatna kompaktiranja naslaga mogu stvoriti značajna dodatna opterećenja na zaštitne cijevi.

Osim na zaštitne cijevi, nije rijetka pojava da tijekom dotoka pijeska cijevne alatke ugrađene unutar proizvodnog sloja budu oštećene zbog erozije. Kada se na eroziju doda i korozija, to dovodi do velikih i skupih problema. Uz opremu ugrađenu unutar bušotinskog kanala, i površinska oprema na mjestima bliskim promjenama smjera fluida često je izložena oštećenjima zbog erozije.

2.3.3. Odlaganje slojnog pijeska

Prvi korak pri odlaganju pijeska je separacija pijeska od proizvedenog fluida. Samo za to nam je potrebna dodatna oprema, koja naravno smanjuje ekonomsku isplativost. Nakon odvajanja, pijesak se prikuplja i skladišti za daljnju obradu i odlaganje. Prilikom privremenog skladištenja u području bušotine potrebno je spriječiti raspršivanje pijeska u okoliš jer može sadržavati zaostale ugljikovodike i druge tvari koje bi mogle zagađivati okoliš.

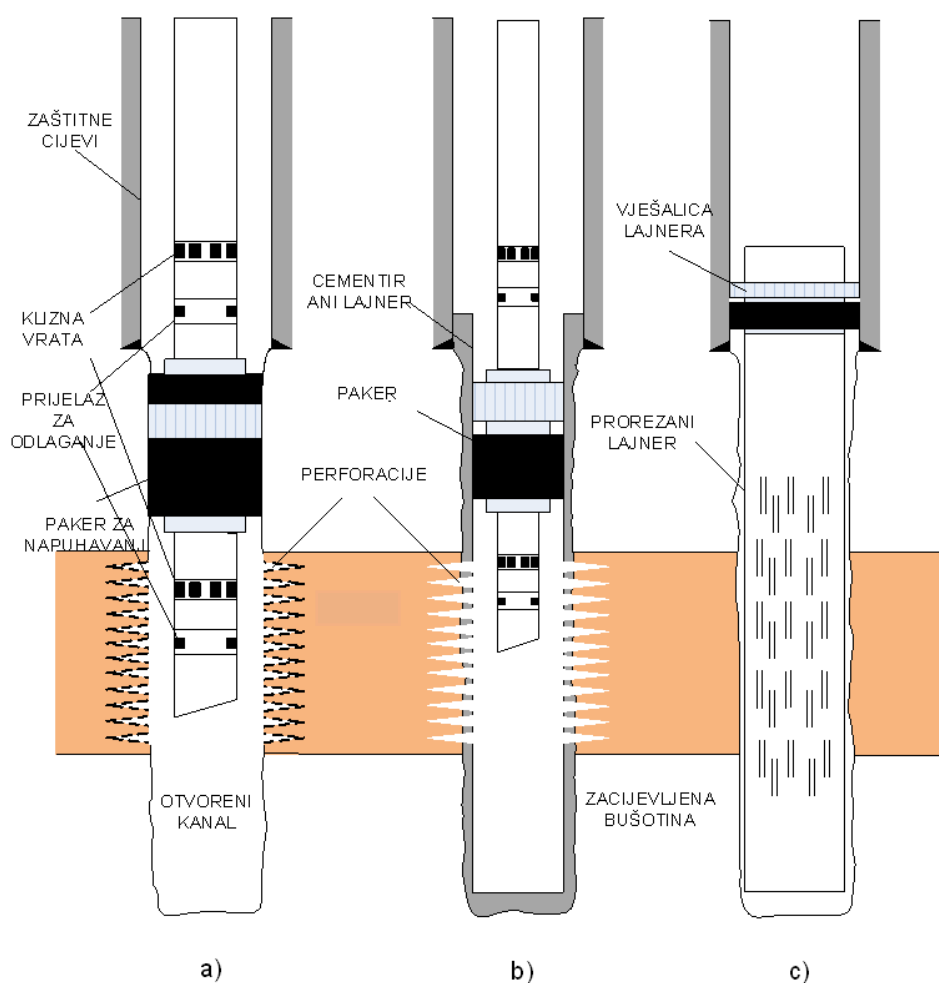
Porastom svijesti o zaštiti okoliša proizvedeni pijesak mora se odvoziti na posebna odlagališta za opasni ili industrijski otpad. Ta su odlagališta opremljena tako da spriječe kontaminaciju podzemnih voda i tla. Zato je važno u svakom procesu planiranja bušotine dobro razraditi plan kontrole pijeska, pogotovo na odobalnim postrojenjima kojima gore navedeni postupci dodatno povećavaju troškove.

3. MEHANIČKE METODE KONTROLE PIJESKA

Metode za kontrolu pijeska mogu se podijeliti u dvije glavne kategorije: mehaničke metode i kemijske metode. Svaka kategorija uključuje različite tehnike i pristupe koji se koriste za smanjivanje dotoka pijeska. Mehaničke metode kontrole pružaju fizičku barijeru koja sprječava dotok pijeska u bušotinu. Češće su od kemijskih metoda, ali zahtijevaju dobru pripremu za postavljanje.

Opremanje bušotinskog kanala za kontrolu dotoka pijeska možemo podijeliti na tri osnovna načina (Slika 3-1):

- a. opremanje otvorenog bušotinskog kanala
- b. opremanje zacijevljenog bušotinskog kanala
- c. opremanje bušotinskog kanala s prorezanim lajnerom.



Slika 3-1. Tri osnovna načina opremanja bušotina (Matanović et al., 2012)

Proizvodnja slojnih fluida na Slici 3-1. prikazanoj pod a) odvija se kroz otvoreni bušotinski kanal. Tada se najčešće koriste pakeri za napuhavanje, odnosno bubreći pakeri koji radi svojih svojstava najbolje ostvaruju kontrolu sa stijenkama bušotinskog kanala. Opremanje kroz otvoreni niz koristi se kod ležišta niske propusnosti koja su konsolidirana i s malo ili nimalo proizvodnje pijeska.

Kada se dio bušotinskog kanala, koji se proteže preko ležišta, cementira i obloži cijevima, smatra se da se proizvodnja ostvaruje kroz zacijevljeni bušotinski kanal kao na Slici 3-1. pod b). Da bi se ostvarila komunikacija između ležišta i površinskih pogona, potrebno je odraditi perforacije. Pakeri koji se koriste u ovakvom načinu opremanja bušotine najčešće se mehanički aktiviraju s površine. Ovakav stil opremanja ostvaruje bolju kontrolu, ali je i skuplji u odnosu na prethodni.

Nakon što se završni dio bušotinskog kanala izradi, spuštaju se prorezani lajneri. Kao što je vidljivo na Slici 3-1. pod c), lajneri imaju unaprijed prorezane obloge s ciljem sprječavanja nepotrebne proizvodnje pijeska. Oni se postavljaju bez zatrpavanja pijeskom između šupljina i stijenki bušotinskog kanala.

Mehanička premošćenja koja se najčešće ugrađuju u bušotinu s ciljem smanjivanja proizvodnje pijeska su; pješćani i šljunčani zasipi, prorezani lajneri, predpakirani filtri, konsolidirani zasipi i slično.

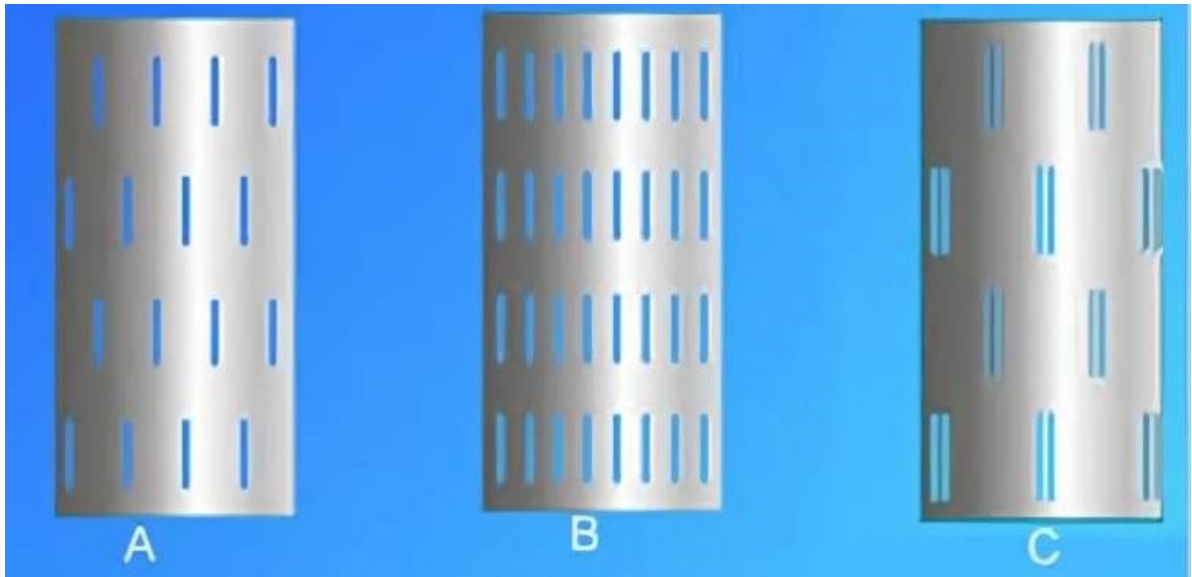
3.1. Ograničavanje proizvodnje fluida

Kao najjednostavnija, najjeftinija i najdjelotvornija metoda kontrole proizvodnje pijeska smatra se ograničavanje brzine proizvodnje fluida. Takva metoda temelji se na količini specifičnog fluida koja može biti proizvedena bez pretjerane proizvodnje pijeska. Najbolji pristup ovoj metodi je testiranje pojedine bušotine, odnosno postupno povećavanje brzine proizvodnje dok se ne počne proizvoditi pijesak ili dok se ne postigne maksimalna prihvatljiva brzina proizvodnje.

3.2. Prorezani lajneri

Prorezane lajnere može se svrstati u jednu od najjeftinijih kontrola dotoka slojnog pijeska. Često se primjenjuju u bušotinama koje proizvode visokoviskozne fluide, odnosno naftu. Svi prorezi obrađuju se tako da budu glatki, čisti i testirani prema (American Petroleum Institute [API], 1996) standardima. Lajneri su dostupni u različitim duljinama, neovisno o

promjeru. Može ih se podijeliti na tri vrste, kao na Slici 3-2., s obzirom na proreze, odnosno na četiri, ako uvrstimo lajnere s horizontalnim prorezima za horizontalne bušotine.

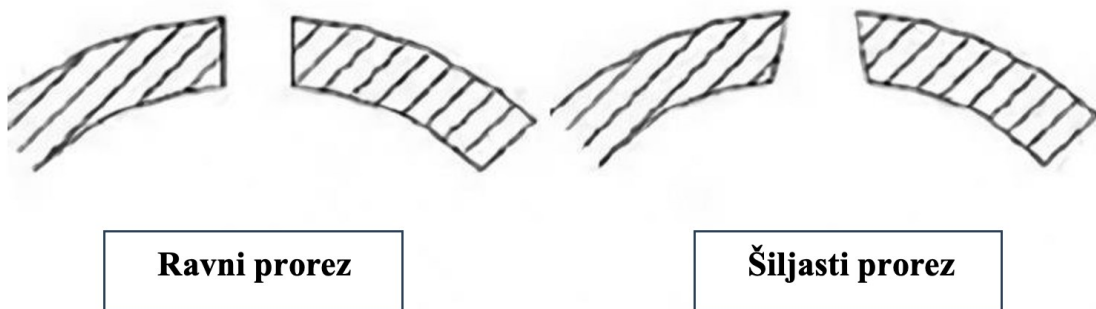


Slika 3-2. Podjela lajnera s obzirom na proreze (Shiney Steel, 2024)

- a. jednostruki isprekidani prorezi.
- b. ravni prorezi i
- c. višestruki isprekidani prorezi.

Rubovi proreza su okomiti, glatki i bez neravnina te širina proreza treba biti jednolika. Prorezani lajneri dodatno se premazuju gustim zaštitnim prevlakama protiv korozije. To im smanjuje trošenje i produljuje vijek trajanja u podzemnim uvjetima.

Prorezi se izvode na dva načina, kao što je prikazano na Slici 3-3.



Slika 3-3. Oblici proreza lajnera (Shiney Steel, 2024)

Ravni prorezi učestaliji su od šiljastih proreza te su uz to ekonomski isplativiji od navedenih. Manje se i sporije troše, ali mana im je što se puno lakše začepe od šiljastih. Šiljasti su skuplji za izradu od ravnih, ali značajno smanjuju mogućnost začepljenja i poboljšavaju učinkovitost rada. Imaju oblik naopako okrenutog slova " V " s užim razmakom na površini lajnera i širim unutar stijenke cijevi.

3.3. Filtri

Još jedna metoda za kontrolu dotoka slojnog pijeska koja se koristi radi jednostavnosti i nižih troškova su filtri ili sita. Oni se mogu postaviti u bušotinu bez zasipa, pretpostavljajući da će slojni pijesak stvoriti prirodna premoštenja preko njihovih otvora. Filtri bi trebali imati otvore, odnosno proreze koji su jednaki kao 10 % najvećih zrnaca slojnog pijeska. Zaustavljanjem tih zrnaca pretpostavlja se da će se stvoriti premoštenja za sitniji pijesak i uz tu metodu do 90 % slojnog pijeska trebalo bi biti zaustavljeno.

Iako u teoriji takav postotak zvuči i više nego dovoljno, u praksi se je pokazalo da prije stvaranja premoštenja kod filtera dolazi do erozije. Erodirani filtri ne mogu kontrolirati dotjecanje slojnog pijeska. Zato se danas u većini sustava kombinira zasip s filterima.

3.3.1. Žicom omotani filtri

Žicom omotani filtri, prikazani na Slici 3-4., koriste se prilikom opremanja vertikalnih i horizontalnih bušotina. Sastoje se od:

- perforirane unutarnje cijevi,
- uzdužnih elemenata (šipki) zavarenih na cijevi i
- žice namotane na šipke.



Slika 3-4. Žicom omotan filter (Sand Screen, 2024)

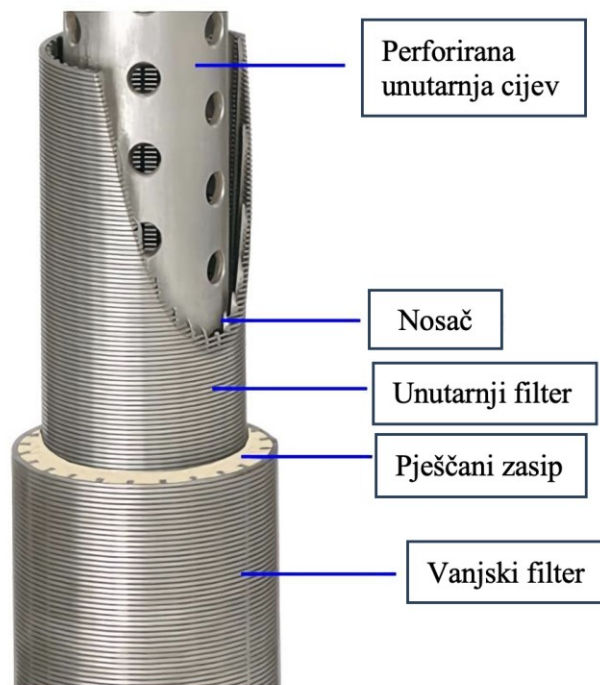
Prilikom odabira odgovarajućih filtera i njihovih dimenzija za opremanje bušotinskog kanala u obzir se uzimaju idući čimbenici:

- čvrstoća filtera i otpornost na oštećenja,
- veličina otvora,
- otpornost na začepljenje i eroziju,
- laboratorijsko testiranje s uzorcima pijeska iz formacije i
- iskustva iz prethodnih projekata.

Svi dijelovi ove opreme najčešće su izrađeni od materijala visoke čvrstoće i otpornosti na koroziju. Površina za protok kroz filter ovisi o širinama proreza, debljini žica i duljini samog filtera. Propusnost ovih filtera obično je puno veća od propusnosti samih ležišta.

3.3.2. Pretpakirani filtri

Pretpakirani filtri sa Slike 3-5., najčešće se koriste u bušotinskim kanalima s posebnim zahtjevima.



Slika 3-5. Pretpakirani filter (Sand Screen, 2024)

Prema Slici 3-5. vidljivo je da su bazni elementi ovakve vrste filtera isti kao i kod žičanih filtera. U principu, sastoje se od:

- perforirane unutarnje cijevi,
- uzdužnih elemenata (šipki) zavarenih na cijevi,
- unutarnjih žica namotanih na šipke,
- ugrađenog pješčanog zasipa i
- vanjskih žica namotanih oko pješčanog zasipa.

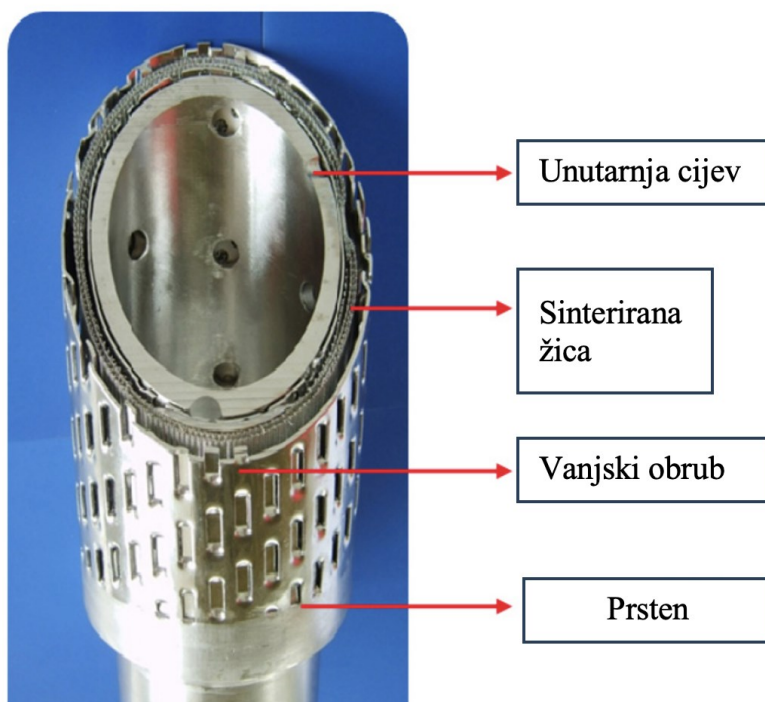
Ovakav je prikaz samo osnovna verzija pretpakiranih filtera te su moguće razne kombinacije s dodatcima mikrofiltera i slično. Pretpakirani filtri omogućuju visoku proizvodnju s dobrom kontrolom pijeska. S obzirom da su pješčani zasipi u samim filterima visoke propusnosti, ne dolazi do velikih padova tlaka kroz filtere.

Kao nedostatak ovakvim metodama može se pridodati kako unutar pješčanog zasipa može doći do narušavanja strukture zrnaca što značajno može smanjiti propusnost. Unatoč

tome, pretpakirani filteri široko su korišteni u mnogim otvorenim ili zatvorenim bušotinskim kanalima.

3.3.3. Premium filteri

Kao što i sam naziv sugerira, ovi filteri predstavljaju skuplju verziju kontrole dotoka slojnog pijeska (Slika 3-6).



Slika 3-6. Premium filter (Anton Oil, 2024)

Sastoje se od mnogih različitih slojeva, na Slici 3-6 prikazani su:

- unutarnja perforirana cijev
- sinterirana žica oko unutarnje cijevi
- vanjski obrub
- prsten/držač.

Vanjski elementi na ovakvim sustavima čuvaju unutarnje elemente od mogućih većih oštećenja. Ovakvi filteri dosta su izdržljivi u svim uvjetima te umanjuju broj potrebnih operacija s njima, no zbog svoje početne cijene koriste se samo u određenim slučajevima.

3.3.4. Specijalno dizajnirani filtri

Specijalno dizajnirani filtri vrsta su filtera koja se koristi u specifičnim situacijama i koja se najčešće izrađuje ovisno o uvjetima gdje će se koristiti. Na Slici 3-7. prikazani su nehrđajućom čeličnom vunom omotani filteri prekriveni zaštitnom oblogom. Ovakva vrsta filtera dizajnirana je da zadrži sve veličine pijeska. S obzirom na visoku otpornost na koroziju i eroziju, koriste se kao samostalna metoda kontrole dotoka slojnog pijeska.

Mogući su još filteri od visokokvalitetnih legura i kroma koji imaju visoku otpornost na agresivne plinove koji se koriste u uvjetima visokog tlaka i visoke temperature.

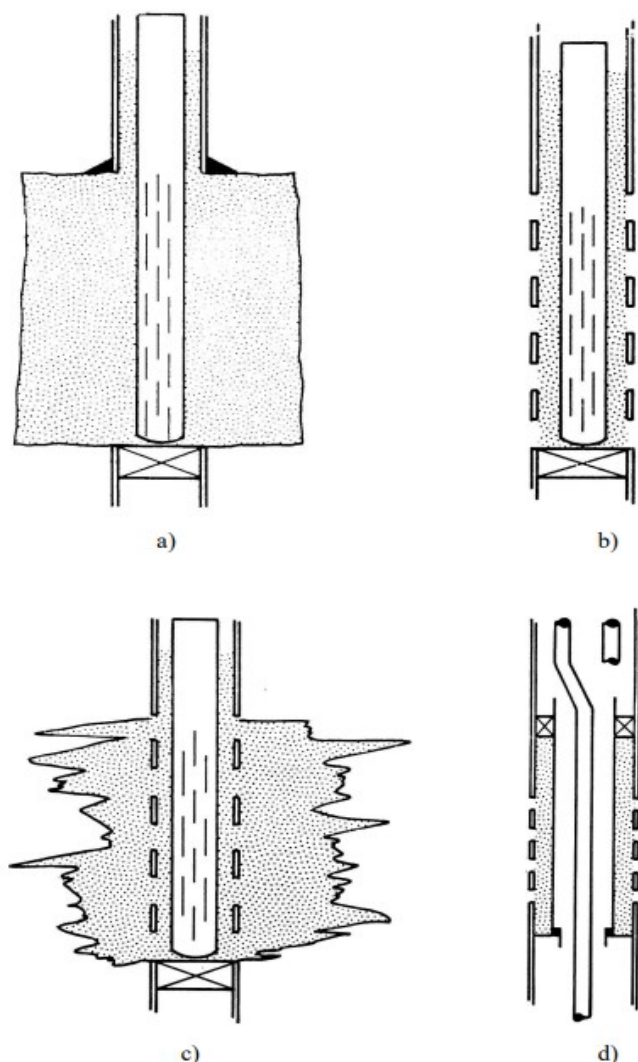


Slika 3-7. Specijalna vrsta filtera (Matanović et al., 2012)

4. PJEŠČANI ZASIPI

Pješčani zasip ili šljunčani zasip, kako se u početnim primjenama ustalio naziv, najčešće je korištena metoda za kontrolu dotoka slojnog pijeska. Početno su se primjenjivala sitna zrna šljunka, ali danas je to već kombinacija raznih čestica stijena pa ih je prikladnije nazvati pješčani zasip. Koriste sitne čestice pijeska kao filter koji sprječava dotok slojnog pijeska u bušotinski kanal.

Neke od standardnih metoda ugradnje pješčanog zasipa prikazane su na Slici 4-1.:



Slika 4-1. Česti oblici ugradnje pješčanih zasipa (Matanović i Moslavac, 2011)

Slika prikazuje:

- a. prorezani lajner ugrađen u otvoreni dio bušotinskog kanala,
- b. prorezani lajner postavljen unutar perforiranih zaštitnih cijevi,
- c. prorezani lajner postavljen unutar perforiranih zaštitnih cijevi i sa zasipom utisnutim u ležište i
- d. lajner za dvozonsko opremanje.

Prije spuštanja prorezanog lajnera u situaciji pod a., bušotinski kanal se proširi proširivačima kako bi se dobila veća debljina zasipa između samog lajnera i stijenki kanala bušotine. Kod ugradnje zaštitnih cijevi, one su i u slučajevima pod b. i pod c. uvijek perforirane, a razlika je u tome hoće li se zasip ugraditi u pukotine u ležištu ili samo između lajnera i zaštitnih cijevi. Pješčane zasipe može se postaviti i kod dvozonskog opremanja prikazanog pod d., ali tada filter i zasip ograničavaju mogući prostor za prolaz alatki čime se održavanje donje zone ne može obavljati alatkama punog presjeka.

Zasipi se mogu podijeliti na:

- unutarnje i
- vanjske.

Ovisno o uvjetima u bušotinskom kanalu donosi se odluka na koji način će se postaviti zasipi. Unutarnji zasip praktičniji je u postavljanju, posebno u bušotinama manjeg promjera, ali samim tim ima i manju količinu čestica i manju filtracijsku sposobnost. Vanjski zasip će pružiti bolju kontrolu dotoka slojnog pijeska, veću površinu filtracije, ali je složeniji za postavljanje što znači da je u nekim slučajevima ekonomski neisplativ.

4.1. Odabir veličine čestica pijeska i kvaliteta pijeska

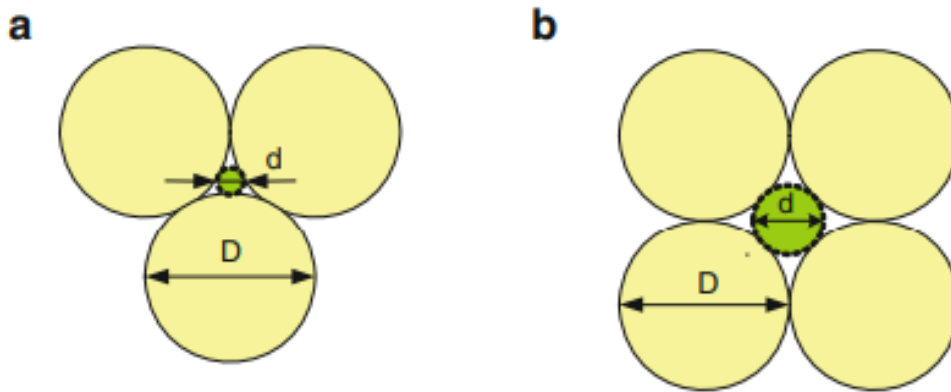
Korištenje dosad navedene opreme bez pješčanog zasipa dovodi do čestih problema u radu, odnosno oštećenja opreme puno prije projektiranog vremena za zamjenu. Kako bi se takvi problemi izbjegli, postavlja se pješčani zasip. Da bi pješčani zasip bio učinkovit u bušotinskom kanalu, treba uzeti u obzir nekoliko čimbenika:

- pravilno dimenzioniranje čestica pijeska kako bi se pijesak iz sloja zadržao na mjestu
- definiranje pravilnih metoda za postavljanje pješčanih zasipa i
- odabir otvora na lajnerima ili filterima kako bi se zadržao odabrani pijesak.

Dodatni faktori koji utječu na kvalitetu samog pijesku su uglatost čestica, oblik čestica, čvrstoća i topljivost.

Na Slici 4-2 vidljiva su dva oblika slaganja zrnaca pijeska unutar zasipa:

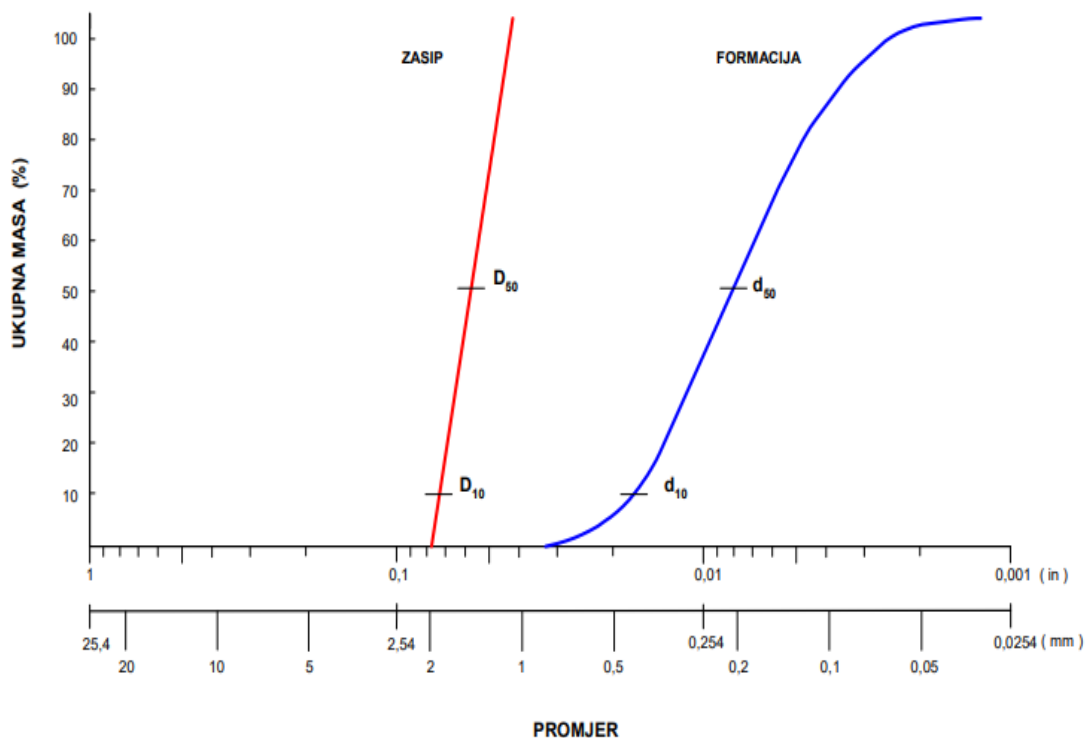
- gusto
- labavo.



Slika 4-2. Pakiranje zrnaca pijeska (Matanović et al., 2012)

Prema svim parametrima, kad se zrnca pijeska strukturiraju gusto, veća je propusnost u svim smjerovima.

Pijesci se opisuju radijusima koji odgovaraju specifičnim udjelima ukupne mase; prema Slici 4-3 vidljivo je da D_{10} predstavlja radijus zrna zasipa pri 10 % ukupne mase na krivulji raspodjele, dok d_{50} predstavlja radijus formacijskog pijeska pri 50 % mase.



Slika 4-3. Odnosi radijusa pijesaka pješčanog zasipa i uzorka slojnog pijeska (Matanović i Moslavac, 2011)

Tri su karakteristike rasporeda zrna koje se obično primjenjuju za opisivanje slojnog pijeska (Matanović i Moslavac, 2011):

- 1) **prosječni radijus**, (“medijan“) – to je radijus na točki 50 % krivulje (d_{50})
- 2) **koeficijent razvrstanosti**, (σ) – to je drugi korijen omjera promjera kod 25 % prema promjeru kod 75 %:

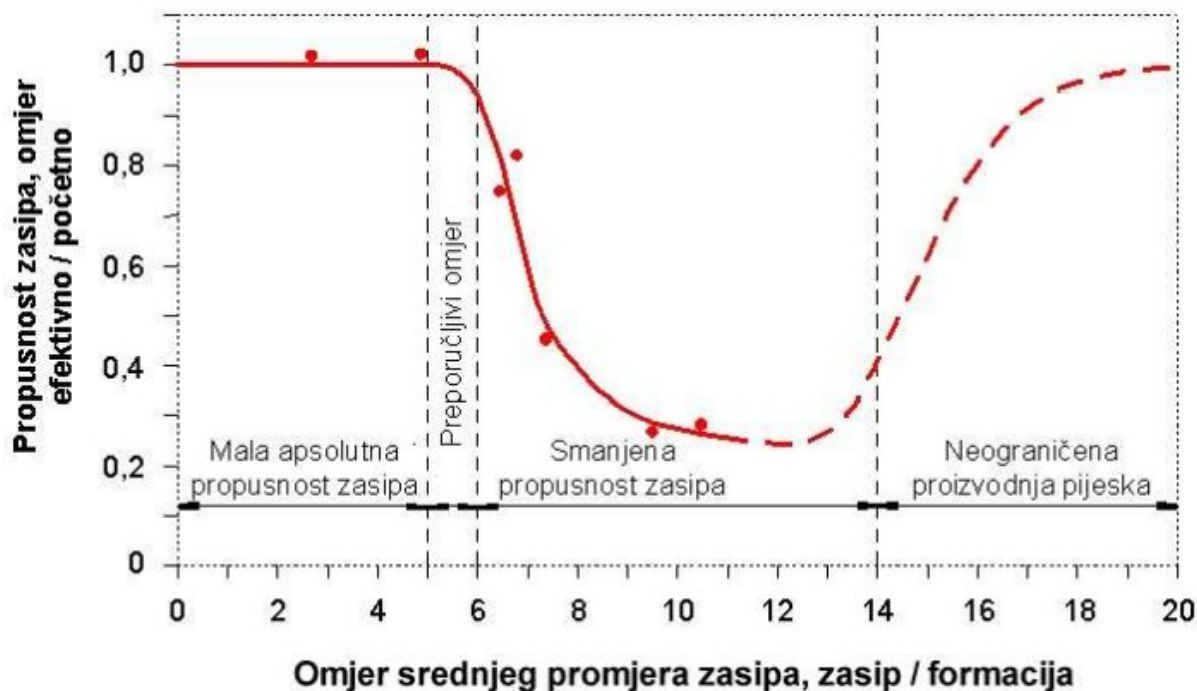
$$\sigma = \sqrt{\frac{d_{25}}{d_{75}}} \quad (3-1.)$$

- 3) **koeficijent jednolikosti**, (c) – prikazuje jednoličnost rasporeda i omjer promjera kod 40 % prema onom kod 90 %:

$$c = \sqrt{\frac{d_{40}}{d_{90}}} \quad (3-2)$$

U idealnim uvjetima koeficijenti razvrstanosti i koeficijenti jednolikosti iznosili bi 1.

Isto tako, razna literatura predviđa različite raspodjele veličine zrna slojnog pijeska i pijesaka zasipa. Kada se u obzir uzmu svi zaključci, dobije se preporučljivi omjer srednjeg radijusa zasipa kao što je prikazano na Slici 4-4.

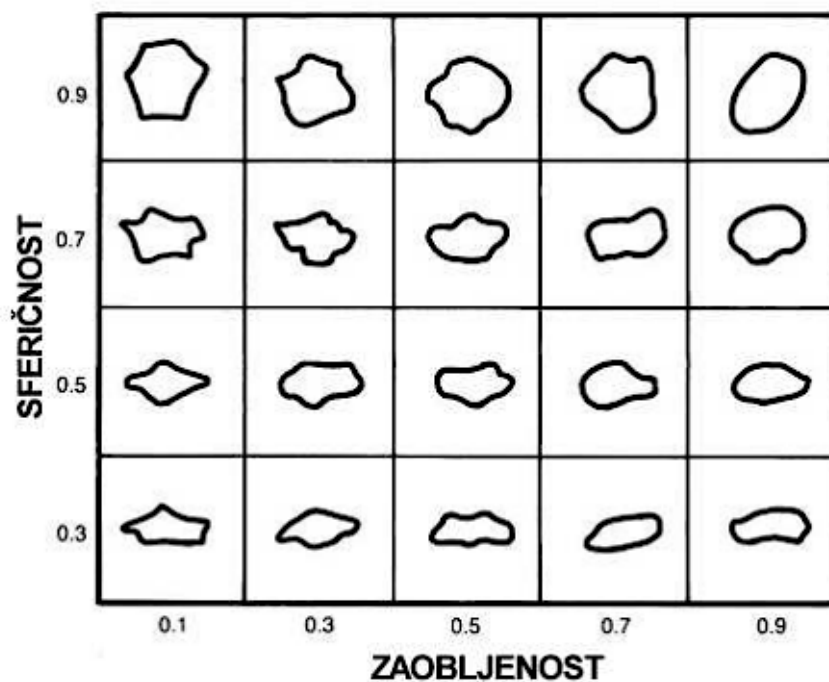


Slika 4-4. Ovisnost propusnosti zasipa o omjeru radijusa zasipa i slojnog pijeska (Matanović i Moslavac, 2011)

Isto tako, u praksi su učestale neke preporuke koje se koriste za izbor pijesaka u pješčanom zasipu (Matanović i Moslavac, 2011):

- kroz sito bi prolazak trebalo ostvariti 96 % mase pješčanog zasipa
- donja granica zaobljenosti trebala bi biti 0,6 vrijednosti prikazane Krumbeinovom skalom, kao što je prikazano na Slici 4-5. i
- u kiselini 12 % HCl/ 3% HF najveća dozvoljena količina koja se može otopiti je 1 % zasipa pijeska

Može se zaključiti kako se kod zasipa s uglatim zrnima lakše ostvaruju prirodna premoštenja. Zasipi su puno čvršći kad se ostvaruju sa zaobljenim zrnima. Uz pijesak, moguće je koristiti staklena zrnca, materijale na bazi aluminijske, ugljikove minerale i slično.



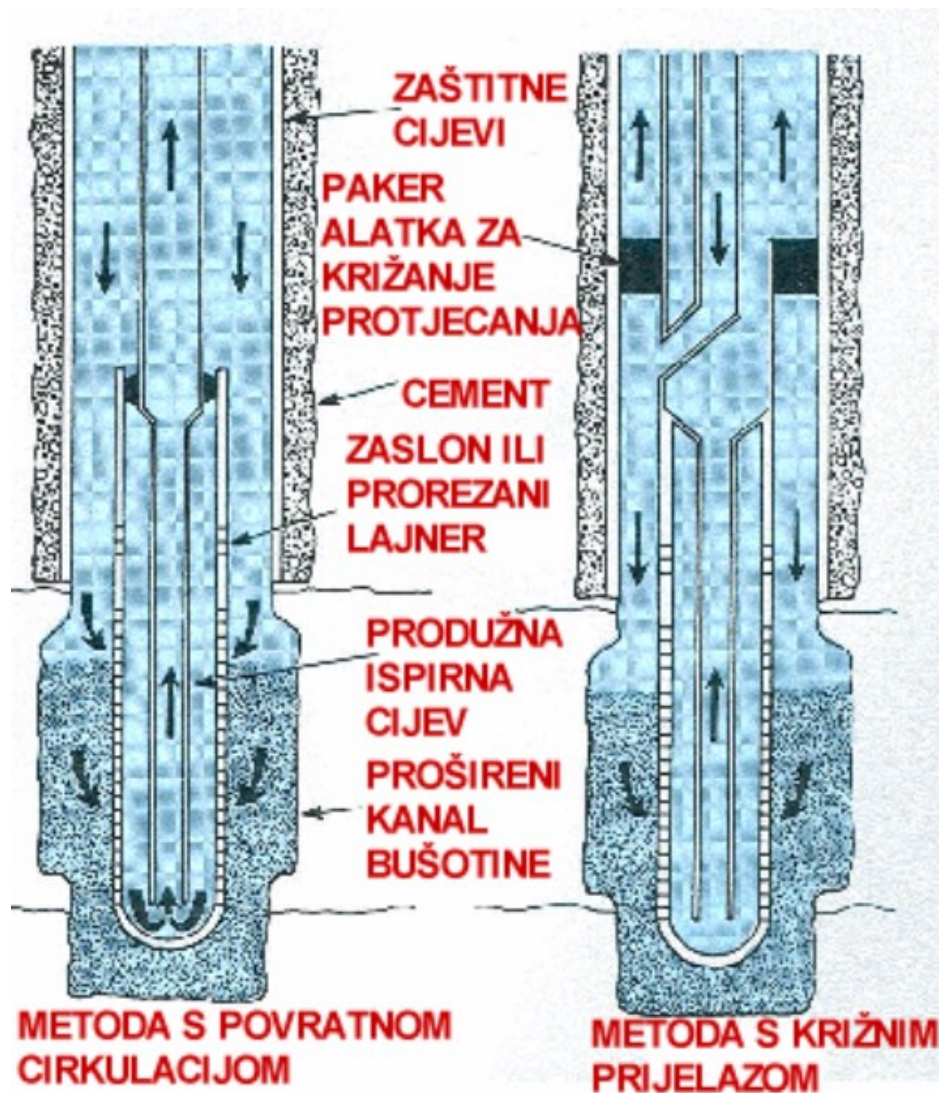
Slika 4-5. Krumbeinova skala za određivanje sferičnosti i zaobljenosti zrna (Matanović et al., 2012)

4.2. Metode ugradnje pješčanog zasipa

Metode koje se najčešće primjenjuju za ugradnju pješčanih zasipa su:

- metoda povratne cirkulacije i
- metoda uz pomoć alatke za preusmjeravanje protjecanja.

To nisu jedine metode kojima se pješčani zasip može ugraditi. U primjeni su još mnoge razne metode kao što su dvostupanjska metoda, protiskivanje uz primjenu pakera, metode s ispiranjem i slično. U nastavku rada biti će opisane metode na Slici 4-6., te će se pojasniti još neke metode koje se koriste u industriji.



Slika 4-6. Prikaz osnovnih metoda za ugradnju pješčanog zasipa (Pašić, 2022)

Razlika između navedenih metoda je u protiskivanju smjese do dna kanala bušotine.

4.2.1. Metoda ugradnje pješčanog zasipa s povratnom cirkulacijom

Metoda ugradnje pješčanog zasipa s povratnom cirkulacijom zasigurno je jedna od najstarijih i najjeftinijih metoda koje se koriste u današnjoj industriji.

Kod ove se metode filter postavlja dužinom proizvodnog intervala, a u proračunati volumen prstenastog prostora utiskuje se smjesa nosećeg fluida i zasipa kroz prstenasti prostor. Povratni tok ostvaruje se kroz filter i unutrašnjost tubinga. Nakon provjere zasipa, radni se niz izvlači i ugrađuje se sustav brtvljenja na proizvodnom nizu. Najveća mana kod ove metode je da se filtrat isplake i talozi kamenca mogu isprati pri protiskivanju zasipa i time pomiješati sa zasipom. Primjenom ove metode značajno se smanjuje propusnost zasipa.

4.2.2. Metoda s križnim prijelazom

Kako ne bi dolazilo do onečišćenja zasipa i smanjenja njegove propusnosti kao u prethodno navedenoj metodi, u praksi je usvojena metoda postavljanja pješčanog zasipa s križnim prijelazom. Danas su u upotrebi različite metode, ali kod svih je zajednički princip djelovanja, odnosno određivanje smjera protjecanja.

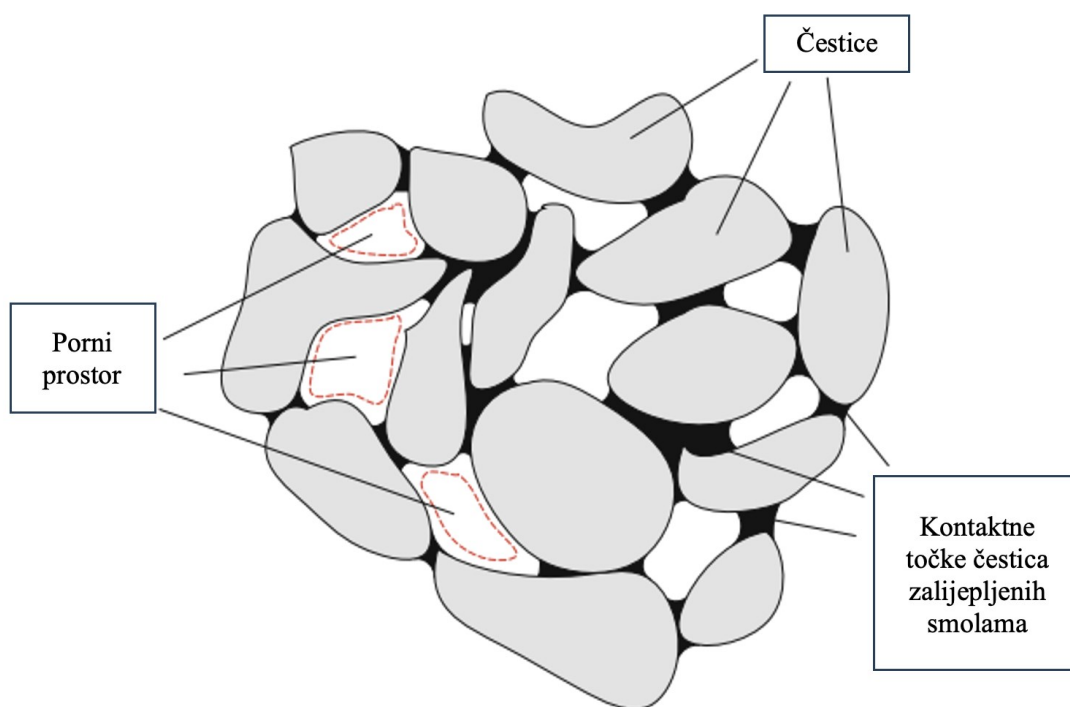
Smjesa se protiskuje kroz tubing te se u križnom prijelazu protjecanje preusmjerava u prstenasti prostor između filtra i zaštitnih cijevi ili bušotinskog kanala. Fluid kroz filter ili prorezani lajner ulazi u unutarnju cijev. U nastavku fluid prolazi kroz križni prijelaz u prstenasti prostor između radnog niza cijevi i zaštitnih cijevi iznad brtvećeg elementa, većinom pakera. Dakle, povratak fluida ostvaruje se kroz filter i preusmjerava u prstenasti prostor iznad pakera.

Kako bi se povećala mogućnost popunjavanja perforacija sa zasipom, pri povećanju tlaka odnosno dosezanju zasipa dna kanala bušotine, alatke se spuštaju u položaj za tlačenje, čime se sprječava cirkuliranje kroz alatke i fluid se prisiljava na kretanju u formaciju.

5. KEMIJSKA KONSOLIDACIJA PIJESKA

Kada slojni pijesak u zoni bušotinskog kanala nije dobro konsolidiran, lakše dolazi do razdvajanja sitnih čestica pijeska, a samim time i do povećane proizvodnje pijeska. Primjenama dosad navedenih metoda kontrola pijeska može se odlično ostvariti, ali ako je stijenu koja je u nenarušenom stanju moguće učvrstiti, odnosno konsolidirati, onda se ostvaruje maksimalna produktivnost ležišta. Konsolidiranje pijeska započeto je u industriji već početkom 1950-ih godina (Matanović i Moslavac, 2011). Za učvršćivanje slojnih pijesaka najčešće se koriste smole i neke vrste plastika.

S ekonomskog gledišta ovoj metodi pristupa se tek kada mehaničke metode ne ostvaruju dobre rezultate. Kod kemijskih konsolidacija ideja je konsolidirati slojni pijesak, odnosno njegova zrnca bez narušavanja propusnosti za slojne fluide. Prema Slici 5-1 vidljiv je shematski prikaz kako se to pokušava ostvariti, odnosno veće pore ostaju "šuplje" dok se sitnije pore ispunjavaju polimerima koji povećavaju tlačnu čvrstoću slojnom pijesku. Ispunjavanjem manjih pora, polimeri smanjuju propusnost formacije zauzimanjem tog prostora.



Slika 5-1. Zrnca slojnog pijeska nakon kemijske konsolidacije (Matanović et al., 2012)

5.1. Smole

Kao polimeri koji se najčešće koriste za konsolidaciju čestica stijena u slojnim pijescima smatraju se smole. Smola je čvrsta ili visoko viskozna tvar prirodnog ili umjetnog podrijetla. Smole su mješavine raznih organskih spojeva. U ovom konkretnom primjeru najčešće korištene smole su epoksidne, fenol-formaldehidne i aminoplastične koje postavljanjem u bušotinski kanal otvrdnu i čvrsto drže slojni pijesak.

Za postizanje bolje čvrstoće i kompaktnosti, smole moraju imati zadovoljavajuća svojstva (Matanović i Moslavac, 2011):

- Viskoznost – da bi se smola mogla utiskivati unutar sloja treba biti dovoljno viskozna. Velikim viskoznostima smanjuje se propusnost sloja.
- Adhezija – zrnca slojnog pijeska trebaju se povezati, a to znači da smola mora dovoljno moćiti kako bi se ta zrnca povezala kada se smola skruti.
- Dugo vrijeme skladištenja – smola mora biti dovoljno stabilna tako da prilikom odgode nekih projektiranih poslova ne dođe do potrebe za zamjenom smole
- Kratko vrijeme polimeriziranja – smola mora imati određenu vrijednost polimeriziranja, odnosno učvršćivanja. Rana polimerizacija može unišiti opremanje.
- Velika otpornost na kemikalije – smola mora izdržati razna djelovanja slojnih fluida, kiselina i kemikalija koje se utiskuju tijekom proizvodnog vijeka bušotine. Najbolji slučajevi su kada otpornost na kemikalije traje do trenutka napuštanja bušotine.
- Kompatibilnost s ležištem – svojstva smola ne bi se smjela narušavati djelovanjem svojstava ležišta kao što su temperatura, mineraloški sastav, tlak i slično.
- Kemikalije – moraju biti pogodne za rukovanje poštivanjem razumnih mjera zaštite i ne smiju imati preveliku toksičnost.
- Minimalno potrebno vrijeme pripreme na radilištu – kako bi se izbjeglo zagađivanje okoliša, smole trebaju biti jednostavne koliko to mogu biti za pripremu.

5.2. Postupci konsolidiranja

Različiti tipovi smola imaju i različite karakteristike. U industriji se najčešće koriste termoplastične smole i termoreaktivne smole. Karakteristika termoplastičnih smola je da više puta mogu mijenjati svoje agregacijsko stanje ovisno o temperaturi i tlaku koji

djeluju na njih. Kod termoreaktivnih smola, nakon što se zagriju i oblikuju, ostaju u tom obliku. Zagrijavanjem se ukružuju i ostaju čvrsti čak i pri novim zagrijavanjima. Iz Tablice 5-1. vidljivo je da se najčešće primjenjuju epoksidna smola, fenol-formaldehid i furan.

Tablica 5-1. Postupci kemijskog konsolidiranja smolom u industriji (Matanović i Moslavac, 2011)

RAZVOJ	IZVOĐAČ	VRSTA SMOLE	POSTUPAK	AKTIVIRANJE	TEMPERATURA °C	STVRDNJAVANJE
CHEVRON	Baker, Dowell, Completion Services	epoksidna	protiskuje se nahodnicom	na mjestu	10 do 120	10° do 32° 60 sati preko 32° 2 sata
SHELL	BJ Service	epoksidna	odvajanje faza	na površini	27 do 93	8 sati uz cirkuliranje, a 24 sata uz proizvodnju
DOWELL	Dowell	fenol-formaldehid	odvajanje faza	na površini	43 do 138	4 do 12 sati
HALLIBURTON	Halliburton	furan	protiskuje se nahodnicom	na mjestu	15 do 150	1 sat uz cirkuliranje 4 - 24 sata uz proizvodnju
HUMBLE	Halliburton, Completion Services, Dowell	fenol-formaldehid	odvajanje faza	na površini	32 do 93	6 do 12 sati uz cirkuliranje

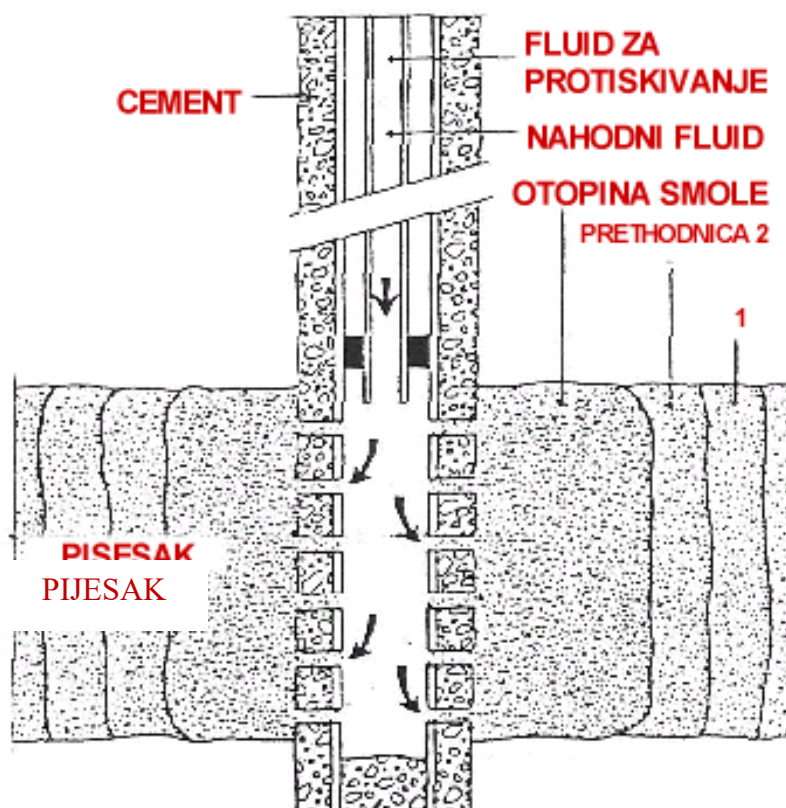
Kod protiskivanja s nahodnicom potreban je dodatni fluid uz koji se otopina smole utiskuje. Takvim se postupkom smola protiskuje dublje u ležište sa smanjenim

stvrđnjavanjem uz bušotinski kanal. Smola koja se utiskuje može biti aktivirana na površini ili (lat.) *in-situ*.

Ako se pak postupak konsolidacije izvršava odvajanjem faza, tada do polimerizacije smole dolazi u otopini. Aktivator se na površini umiješa s otopinom smole.

5.3. Postavljanje smola

Rani postupci konsolidiranja pijesaka smolom bili su primjenjivi samo na čiste, homogene pijeske s naslagama stijena tanjim od 1,5 m. Napretkom tehnologije i obradom podataka dosad provedenih postupaka, trenutno se postižu puno bolji rezultati. Da bi se osiguralo pravilno utiskivanje smole ili otopine kroz perforacije i izbjegli gubitci fluida i kontaminacija smole, potrebno je izolirati interval koji se tretira od ostatka bušotine. U današnjoj primjeni, postupci uključuju utiskivanje čepa fluida prije samih smola ili otopina kako bi se istisnuli preostali ugljikovodici i voda. Shematski prikaz protiskivanja smola prikazan je na Slici 5-2.



Slika 5-2. Sustav za protiskivanje smole (Baker perforating systems, 1990)

Svi fluidi prolaze kroz proizvodni tubing. Prvo se pristupa čišćenju preostalih ugljikovodika, nakon toga se utiskuje smola, a sredstvo za protiskivanje je potrebno da bi suvišak smole protisnulo dalje od pribušotinske zone. Samo smola koja se nalazi na kontaktu među zrcima trebala bi preostati nakon protiskivanja. Konačno, utiskuje se razdjelnica koja sprječava kontakte izopropil alkohola sa smolom. Uspješnost ovog sustava ovisi o kvaliteti primarne cementacije.

Kao glavne prednosti primjena kemijskih konsolidacija pijeska predvođenih smolom nad ostalim načinima mehaničkih kontrola može se navesti kako:

- Nije potrebno korištenje dodatnog pijeska u perforacijama, što znači da neće doći do značajnog smanjenja proizvodnje.
- Ne koriste se filteri koji se mogu mehanički oštetiti.
- Nije potreban najam bušačkog postrojenja tokom izvedbe samih radova kemijskih konsolidacija.
- U situacijama kada se puno opreme za kontrolu pijeska troši mehaničkim metodama, konsolidacija pijeska predvođenih smolom može biti jeftinija u odnosu na te mehaničke metode.
- Bušotinski kanal ostaje potpuno otvoren, odnosno ne treba opremom zauzimati unutarnji prostor.
- Moguća je primjena u bušotinama s povišenim tlakovima.
- Osigurava dobru tlačnu čvrstoću u slojevima blizu bušotinskog kanala, uz zadržavanje prosječno 75 % izvorne propusnosti.
- Može se koristiti i za popravak neuspješnih metoda kontrole pijeska.

Kao glavne mane kemijskih konsolidacija pijeska mogu se izdvojiti:

- Rukovanje kemikalijama može predstavljati velike rizike pri izvođenju poslova, stoga se pri svim radovima treba pristupati s najvećom mogućom pažnjom.
- Kemijska konsolidacija može izazvati značajna, trajna oštećenja slojeva blizu bušotinskog kanala, što za posljedicu ima smanjivanje poroznosti i propusnosti slojeva, a samim tim i smanjenje produktivnosti.
- Glavni faktor uspjeha izvođenja ovih operacija je pravilno raspoređivanje cjelokupnog volumena kemikalija kroz sve perforacije.

5.4. Plastičan zasip

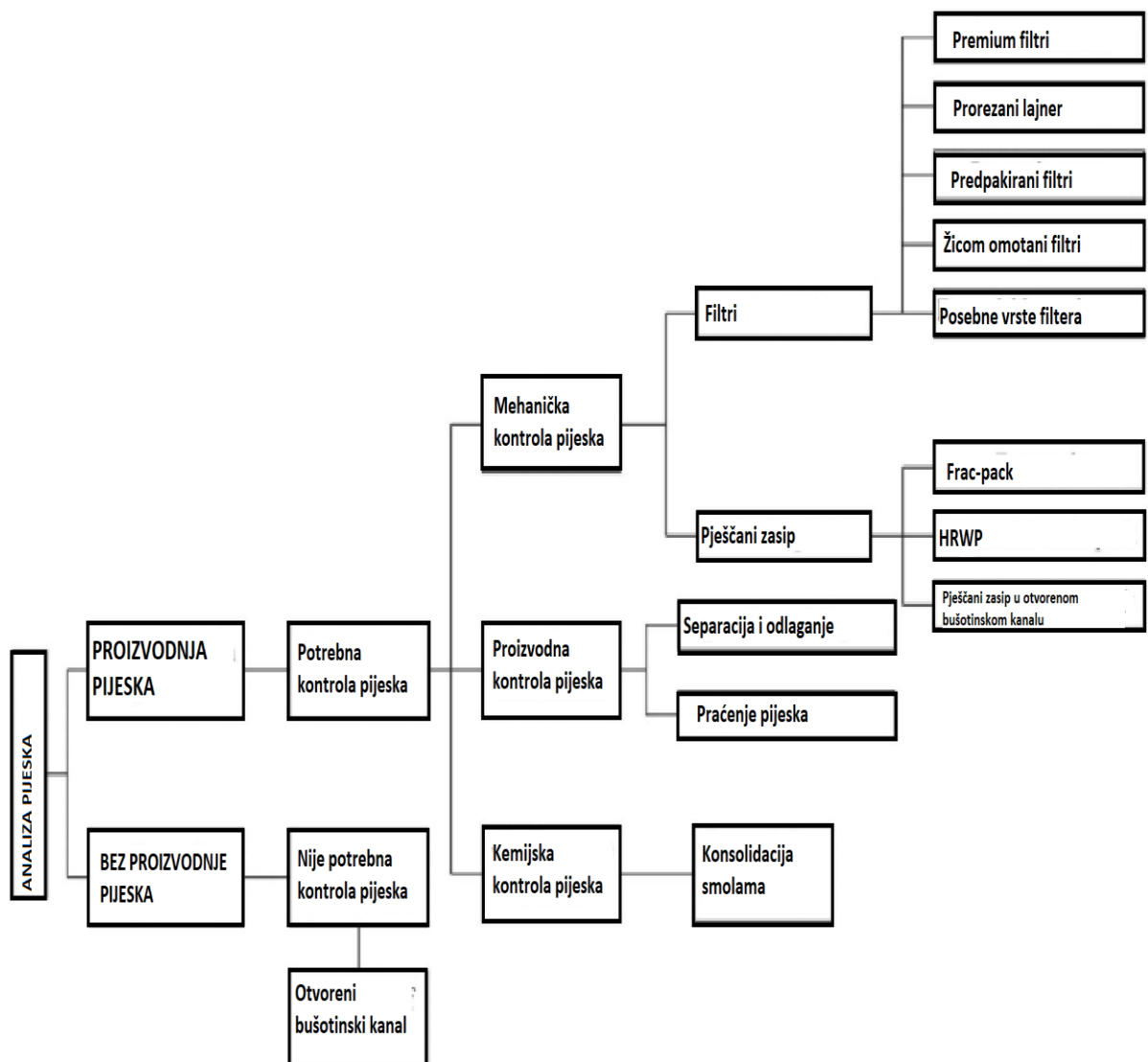
Kombinacijom mehaničkih metoda i metoda kemijske konsolidacije dobije se metoda koja je u praksi poznata kao pješčani zasip. U bušotinski kanal i kroz perforacije utiskuje se smjesa pijeska i pred-aktiviranih smola. Nakon konsolidacije, konsolidirani je dio potrebno izbušiti prije ostvarivanja proizvodnje. Plastični zasipi ugrađuju se i unutar lajnera primjenom odgovarajuće opreme (Matanović i Moslavac, 2011).

Naime, velik problem s ovom metodom je pozicioniranje samih smjesa. Budući da je potrebno određeno vrijeme da se sama smola aktivira kada se pozicionira, često dolazi do urušavanja smjese i taloženja pijeska na dnu. Ova metoda može se koristiti u kratkim intervalima, manjim od 1,5 m. Primjena plastičnog zasipa danas se koristi u manje od 1 % ukupne kontrole pijeska u cijelom svijetu. S obzirom na svoju cijenu i to što se sve manje koristi, servisne kompanije imaju i sve manje ljudi obučениh za izvođenje takvih operacija.

6. IZBOR METODA

U industriji nafte i plina odabir odgovarajućih metoda za kontrolu pijeska iz bušotina postaje sve važnije. S obzirom na stalne fluktuacije cijena energenata, operateri su, u ekonomskom smislu, primorani pronaći ravnotežu s brzinama izvođenja radova i dugoročnim učinkovitostima sustava. Današnje tehnologije nude širok spektar rješenja, od jednostavnih i jeftinih, do sofisticiranih i skupljih opcija.

Na Slici 6-1. prikazano je stablo odluke s najčešćim metodama koje ne uzima nikakve dodatne pretpostavke osim one o proizvodnji pijeska.



Slika 6-1. Stablo odluke za odabir kontrole pijeska (Mahmud et al., 2020)

Kada bi uistinu odabir metode kontrole bio ovako jednostavan i efikasan, puno velikih tvrtki bi smanjilo svoje probleme s proizvodnjom pijeska. Izbor metode za kontrolu pijeska je puno složeniji, pa će se u ovom radu u daljnjem primjeru obraditi kako određena kompanija postupa pri ovakvim odlukama.

6.1. Način opremanja bušotine povezan s kontrolom pijeska

Koristeći već unaprijed strukturiran metode za odlučivanje načina opremanja bušotina mnoge velike kompanije, ne samo da štede vrijeme nego se i osiguravaju da budući procesi budu temeljeni na provjerenim podacima i najboljim praksama. Metode za kontrolu pijeska odabiru se u širokom okviru planiranja bušotine, uzimajući geološke uvjete i specifične izazove za svaku pojedinu bušotinu. Interni priručnici omogućuju nastavak dobre prakse, odnosno konzistentnosti u radi, ali i laku prilagodbu realnim uvjetima.

Na Slici 6-2. je prikazano stablo odluke kojim se koristi Eni S.p.A, talijanska naftna kompanija s tržišnom kapitalizacijom od preko 45 milijardi eura. Općenito, svaka kompanija ima svoj pristup problemima, no najčešće oni ne odudaraju mnogo od ostalih.

Prema idućoj slici donosi se odluka, o tome je li bolje opremiti mehaničkim metodama u otvorenom kanalu ili zacijevljenom bušotinskom kanalu.

Stablo odluke može se podijeliti na nekoliko bitnih segmenata o kojim ovisi način opremanja bušotine:

Višeslojno ležište i opremanje najnižeg sloja ležišta – kod višeslojnih ležišta ako se ne pristupa opremanju najnižeg sloja preporučljivo je koristiti zacijevljene bušotinske kanala. Otvoreni bušotinski kanal se najčešće koristi za opremanje najnižih slojeva ležišta.

Medijan veličine čestica u ležištu – ako je u prosjeku nekih 50 % čestica manjeg radijusa od 55 mikrona tada se preporuča koristiti zacijevljeni kanal bušotine. Za analizu samih uzoraka stijene najčešće se koristi jezgrovanje. Ako to nije moguće pristupa se alternativnim metodama.

Kretanje sitnih čestica – migracija sitnih čestica pijeska može značajno utjecati na proizvodnju. Ukoliko dođe do kretanja sitnih čestica koje mogu začepiti pore, dolazi do smanjenja propusnosti. Zacijevljeni bušotinski kanala će omogućiti više mogućnosti u sprječavanju čepjenja što pora, što opreme.

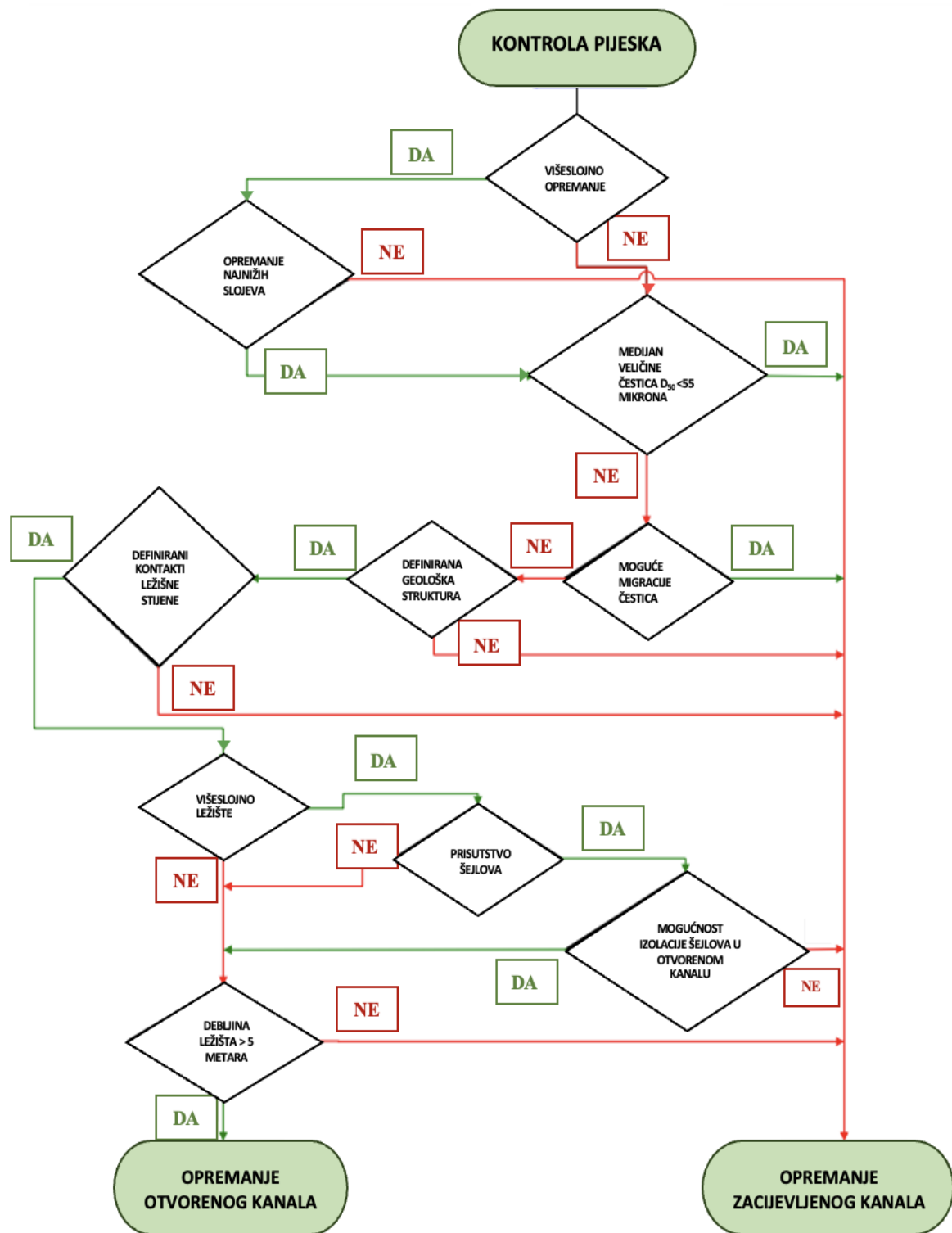
Geološka struktura ležišta – poznavanje geološke strukture ležišta može biti ključno u odlučivanju hoće li se koristiti otvoreni bušotinski kanal.

Definiranje zona kontakta s ležišnim fluidima – ako se pri pridobivanju nafte očekuje pojava slojne vode ili plina kod otvorenih kanala takav će slučaj dovesti do značajnih gubitaka.

Slojevito ležište i prisutnost šejlova – kada su u ležištu prisutni šejlovi nije dobra praksa pristupati otvorenom opremanju bušotinskog kanala. Pri kontroli pijeska u otvorenim kanalima može doći do miješanja pješčanih zasipa sa šejlovima što značajno smanjuje propusnost zasipa.

Izolacija šejlova – ako se šejlovi mogu izolirati, mehaničkim ili kemijskim putem, opremanje otvorenog bušotinskog kanala može ostati kao opcija.

Debljina ležišta – na kraju odluka se donosi i na račun debljine ležišta. Ukoliko je ležište manje debljine od 5 metara, ekonomski nije isplativo bušotinu opreмати kroz otvoreni kanal.



Slika 6-2. Stablo odluke za opremanje bušotine (Eni S.p.A, 2004)

Ovisno o odabranoj metodi, pristupa se odlučivanju o načinu provođenja metoda kontrole pijeska. Prema smjernicama kompanija Eni S.p.A, metode kontrole pijeska u zacijevljenim bušotinama provode se na tri najčešća načina.

Postavljanje pješčanog zasipa slojnom vodom, ili WP (engl. *Water Pack*) pri čemu je tlak utiskivanja manji od tlaka frakturiranja. Ova metoda je najbližnja metodama već opisan u radu, odnosno metodama ugradnje pješčanog zasipa, metoda povratne cirkulacije i metoda uz pomoć alatke za preusmjeravanje.

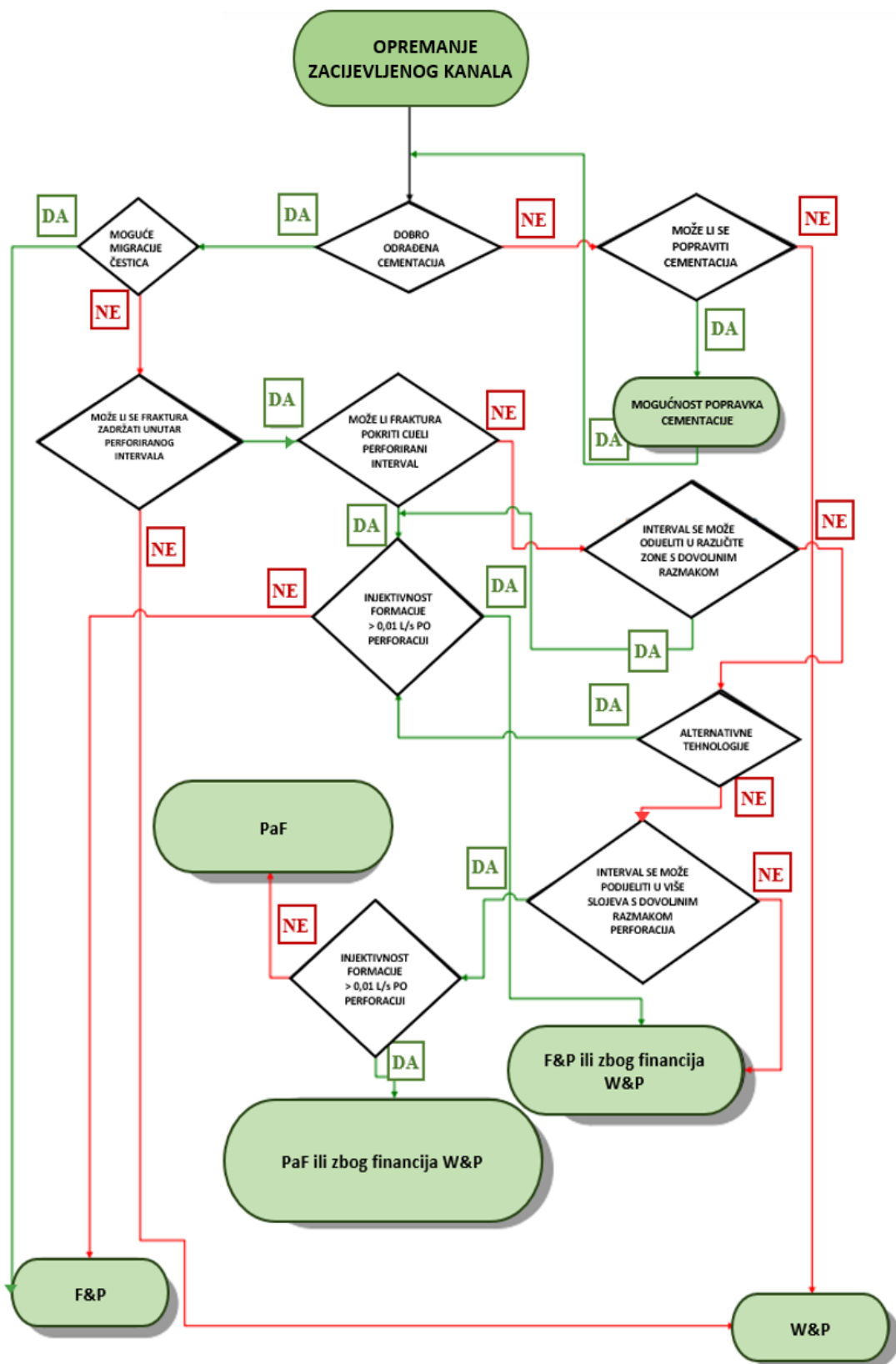
Metoda frakturiranja i postavljanja pješčanog zasipa, odnosno dalje u radu F&P (engl. *Frack&Pack*), je metoda gdje se koristi viskozni fluid za postavljanje pješčanog zasipa. Koristi se u situacijama kada su prisutna oštećenja u blizini bušotinskog kanala ili kada se perforacije ne mogu dobro očistiti. Umjesto pijeska se često koriste propanti koji mogu izdržati ekstremne uvjete i omogućiti visoke propusnosti za fluide.

Predpakiranje iznad tlaka frakturiranja odnosno PaF (engl. *Prepacking above Frac pressure*) koristi se kada je potrebno dulje sekcije bušotinskog kanala zapuniti pješčanim zasipom. Odvija se tako da se različiti proizvodni slojevi dijele na više intervala, nakon toga svaki sloj se perforira i frakturira te u konačnici se postavlja pješčani zasip kao jedna cjelina.

Kod metode sa Slike 6-3. izbor se bazira na više parametara. Kod loše izvedenih cementacija ne preporuča se izbor metoda koje uključuju frakturiranje zbog mogućnosti ostvarivanja povezivanja između različitih slojeva koji bi mogli utjecati na proizvodnost. Metode koje povećavaju dotoke iz ležišta, odnosno one koje uključuju frakturiranje, pogodnije su u slučajevima sitnijih čestica te kada slojevi imaju slabu apsorpciju fluida. Uz to, za ostvarivanje dobrih fraktura i spuštanja propanta potrebne su dovoljne visine šejlova koji će "zadržati" taj propant.

Na kraju, unatoč tome što bi neka metoda bolje odgovarala navedenim karakteristikama, pribjegava se jeftinijim metodama.

Kod otvorenih bušotinskih kanala, najčešće se koriste mehaničke metode kontrole dotoka slojnog pijeska. Primjenom pješčanog zasipa ili sustavima sa proširenjem, u koje spadaju lajneri s prorezima i razni filtri smanjuje se proizvodnja slojnog pijeska iz bušotine.

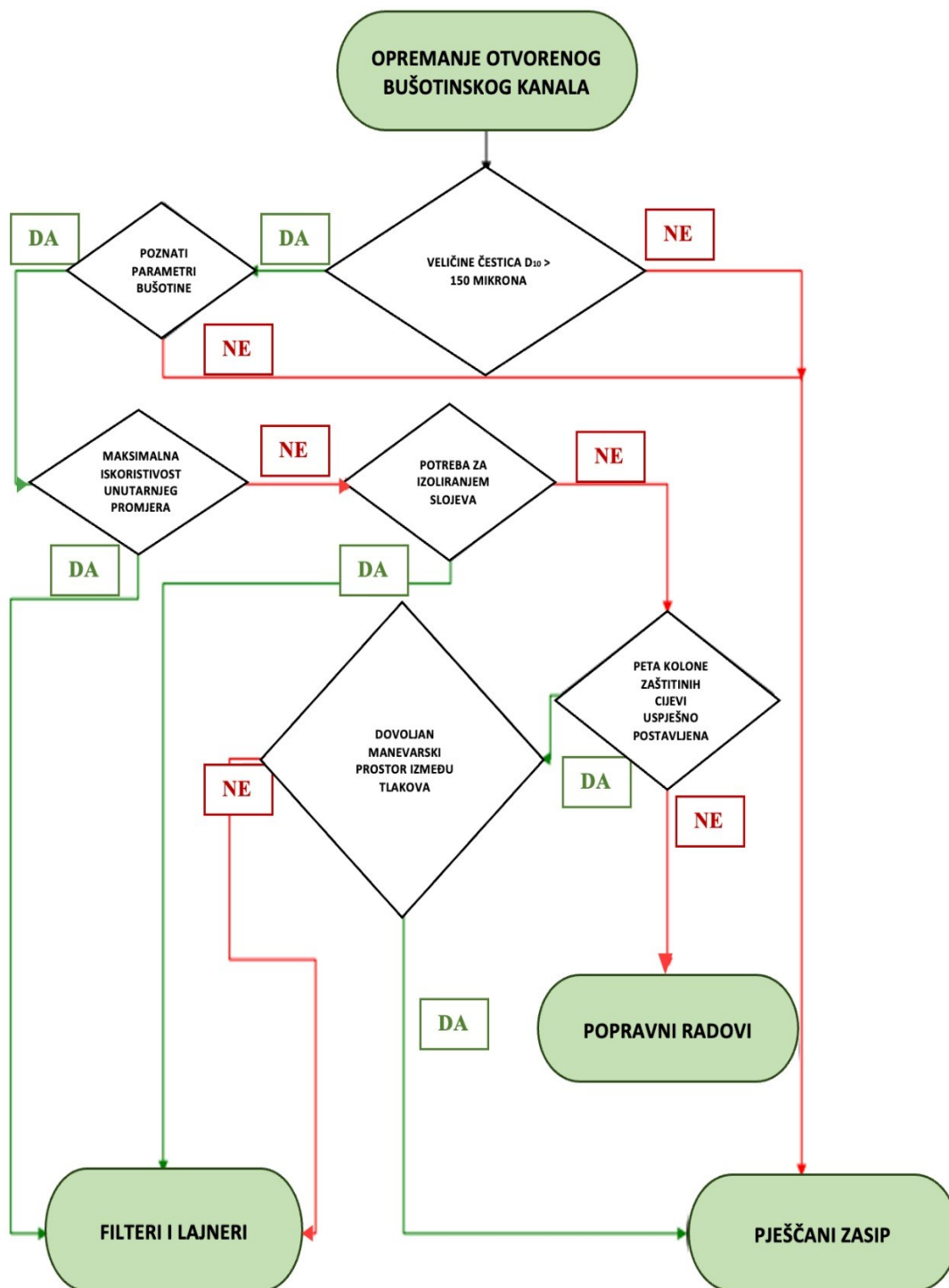


Slika 6-3. Stablo odluke za provođenje metoda kontrola u zacijevljenom kanalu (Eni S.p.A, 2004)

Na Slici 6-4. prikazano je stablo odluke za provođenje metoda kontrola otvorenog bušotinskog kanala. Kod otvorenih bušotinskih kanala pristup je nešto jednostavniji. Bušotinski kanali koji su precizno izrađeni i imaju maksimalno iskorišten unutarnji promjer cijevi, radi povećanja efikasnosti, za pridobivanje nafte koriste se filteri ili proširivi lajneri. Isto vrijedi i za slučajeve kada je potrebno razdvojiti više proizvodnih slojeva.

Pješčani zasipi smanjuju propusnosti ležišta, ali osiguravaju dobru kontrolu pijeska. Kada su u bušotinskom kanalu prisutne čestice većih dimenzija, najviše se isplati postavljati pješčane zasipe.

Izrada bušotinskog kanala ima veliku ulogu u sustavima kontrole pijeska, jer ako bušotinski kanal nije dobro izrađen, teško će biti ostvariti veliku proizvodnju, ali i kvalitetnu kontrolu pijeska. Zato se dosta puta u praksi mogu izvršavati popravni radovi, naravno ukoliko su mogući.



Slika 6-4. Stablo odluke za provođenje metoda kontrola u otvorenom kanalu (Eni S.p.A, 2004)

7. ZAKLJUČAK

Kontrola dotoka pijeska postaje sve važniji faktor pri proizvodnji nafte i plina. Napretkom industrije, svi procesi se pokušavaju optimizirati, ubrzati i automatizirati. Polja koja nemaju problema s dotokom slojnog pijeska postaju sve rjeđa, a pridobivanja iz zahtjevnih polja postaju sve češća.

Kroz ovaj diplomski rad opisane su neke od standardnih metoda kontrole pijeska koje se najčešće koriste kao što su neke od metoda postavljanja pješčanog zasipa, upotreba raznih filtera i lajnera te kemijska konsolidacija. Svakodnevnim istraživanjima, primjenama, otkrićima metode postaju naprednije, neke postaju skuplje neke postaju jeftinije. Proučavanjem novih metoda i kombinacijom postojećih dolazi se do sve boljih rezultata, koji su sve potrebni u trenutnim situacijama.

Primjena metoda kontrola pijeska u velikim kompanijama danas je učestala. Kompanije kreiraju svoje priručnike kako bi se brže i efikasnije odredile metode na temelju prethodnih iskustava. Analizom stabla odluke kompanije Eni S.p.A. vidljivo je kako su primjene nekih metoda često ograničene, najčešće zbog financijske prirode. Isto tako, vidljivo je da kompanije imaju svoje učestale metode, koje su iskustveno postale prihvaćene.

Geopolitička nesigurnost i fluktuacije cijena na tržištu neki su od važnih pokretača za današnje kompanije. Ignoriranjem potrebe za kontrolom pijeska, lako može doći do pada ili zaustavljanja proizvodnje što za posljedicu može imati velike financijske udare na same kompanije.

Opisati sve metode kontrole pijeska bilo bi gotovo nemoguće, isto kao što će u skorije vrijeme biti nemoguće planirati proizvodnju nafte i plina bez kontrole pijeska. Stoga kompanije razvijaju nove tehnologije za sprječavanje dotoka pijeska u kanal bušotine i stalno unaprjeđuju postojeće.

8. LITERATURA

1. Anton Oil, 2024. *Premium Sand Screens*. Dostupno na: <https://mall.antonoil.com/> (pristupljeno: 11. rujna 2024.).
2. API – AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE., 1996. *Introduction to Oil and Gas production*. Book one of the vocational training series, Fifth edition. Washington, D.C.: American Petroleum Institute.
3. BAKER PERFORATING SYSTEMS, 1990. *Baker Sand Control*, Houston, USA.
4. ENI S.p.A., Interna analiza kriterija za odabir kontrola pijeska, Sektor za opremanje i proizvodnju, Roma, Italija
5. FJÆR, E. HOLT, RM., HORSRUD, P., RAAEN, AM., RISNES, R., 2008. *Petroleum related rock mechanics*, 2nd edn. Elsevier, Amsterdam
6. MAHMUD, H.,B., LEONG, V., LESTARIONO, Y., 2020. *Sand production: A smart control framework for risk mitigation*
7. MATANOVIĆ, D., MOSLAVAC, B., 2011. *Opremanje i održavanje bušotina*. Zagreb: Rudarsko-geološko-naftni fakultet.
8. MATANOVIĆ, D., ČIKEŠ, M., MOSLAVAC, B., 2012. *Sand Control in Well Construction and Operation*, Zagreb: Springer Environmental Science and Engineering
9. MCLEAN, M.R., ADDIS, M.A., 1990. *Wellbore Stability Analysis: A Review of Current Methods of Analysis and Their Field Application*. Izloženo na IADC/SPE Drilling Conference, Houston, 1990.
10. PAŠIĆ, B., 2022. *Materijali s predavanja iz kolegija Opremanje i održavanje bušotina 2*, neobjavljeno. Zagreb: Rudarsko-geološko-naftni fakultet.
11. Sand Screen, 2024. *Wire Wrapped Pre-Packed Screen*. Dostupno na: <https://www.sand-screen.com/> (pristupljeno: 11. rujna 2024.).
12. Shiney Steel, 2024. *Stainless Steel Liners*. Dostupno na: <https://www.shineysteel.com/> (pristupljeno: 11. rujna 2024.).
13. WILSON, S.M., MOSCHOVIDIS, Z.A., CAMERON, J.R., PALMER, I.D., 2002. *New Model for Predicting the Rate of Sand Production*. Izloženo na SPE/ISRM Rock Mechanics Conference, Irving, 20-23. listopada 2002

IZJAVA

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



Mate - Grgo Jerković



KLASA: 602-01/24-01/166
URBROJ: 251-70-12-24-2
U Zagrebu, 24. 9. 2024.

Mate - Grgo Jerković, student

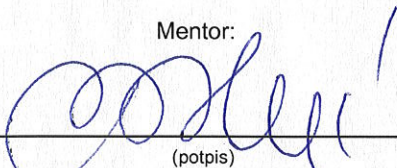
RJEŠENJE O ODOBRENJU TEME

Na temelju vašeg zahtjeva primljenog pod KLASOM 602-01/24-01/166, URBROJ: 251-70-12-24-1 od 20.09.2024. priopćujemo vam temu diplomskog rada koja glasi:

KONTROLA DOTOKA PIJESKA U KANAL BUŠOTINE

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:

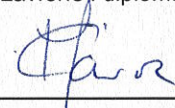


(potpis)

Izv. prof. dr. sc. Vladislav Brkić

(titula, ime i prezime)

Predsjednica povjerenstva za
završne i diplomske ispite:

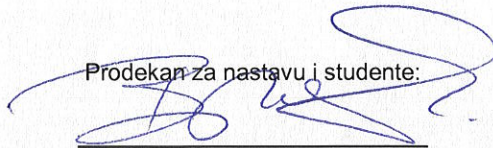


(potpis)

Izv. prof. dr. sc. Karolina
Novak Mavar

(titula, ime i prezime)

Prodekan za nastavu i studente:



(potpis)

Izv. prof. dr. sc. Borivoje
Pašić

(titula, ime i prezime)