

Metoda ugradnje i cementacije proizvodnog niza u otvoreni kanal bušotine

Open hole cemented monobore completion method

Ivan Kesić
Vermilion
Zagreb Exploration

Duje Bakarić, Mate Ledenko,
Marin Roguljić i Marina Hudoletnjak
Fika Eco d.o.o., Ivanić Grad

dr. sc. Damir Zdravec
Fika Eco d.o.o., Ivanić Grad
damirzdravec9@gmail.com



Ključne riječi: monobor, cementacija, opremanje, proizvodni niz, ušteda, efikasnost

Key words: monobore, cementing, completion, tubing, savings, efficiency

Sažetak

Metoda ugradnje i cementacije proizvodnog niza u otvoreni kanal bušotine (engl. Monobore Cemented Completion) efikasno se primjenjuje u naftno – plinskoj industriji već dugi niz godina. Velike multinacionalne kompanije u Perzijskom zaljevu (Qatar Petroleum, ADNOC, Saudi Aramco), metodu koriste osobito pri opremanju plinskih bušotina. Njome se ostvaruju velike uštede i omogućuje efikasno i racionalno vođenje eksploatacije ležišta ugljikovodika. Za primjenu spomenutog načina opremanja moraju postojati određeni preduvjeti, kao što su konsolidirane naslage stijena u području ležišta i pokrovnih stijena iznad ležišta. Primjenom ove metode ostvaruju se velike uštede u ekonomskim i ključnim pokazateljima uspješnosti cjelokupnog projekta izrade bušotina. U ovom radu, prikazan je opis metode, uvjeti za opravdanost takvog opremanja bušotine, primjeri korištenja na bušotinama u svijetu, prednosti i nedostaci same metode te inovativno, primjena metode u Republici Hrvatskoj.

Abstract

Open hole cemented monobore completion is being effectively applied in oil and gas industry worldwide for a long time. Large multinational companies in Persian Gulf (Qatar Petroleum, ADNOC, Saudi Aramco) are especially applying it when completing gas wells. It allows achieving great cost savings as well as efficient and rational exploitation of hydrocarbon reservoirs. For this type of completion, favorable reservoir conditions must exist in the well, such as consolidated formations in and above the reservoir. As already mentioned, application of this method brings great cost savings in key performance indicators of the project. This article describes application of this method of completion, conditions in which it is justified to apply it, examples of its application worldwide, its advantages and disadvantages and its innovative application in Croatia.

1. Uvod

Opremanje bušotine predstavlja važan dio kapitalnih troškova, ali uvelike utječe i na operativne troškove u njenom životnom vijeku. Opremanjem se smatraju svi postupci koji se primjenjuju u izrađenoj bušotini s namjenom privođenja proizvodnji. Značajno

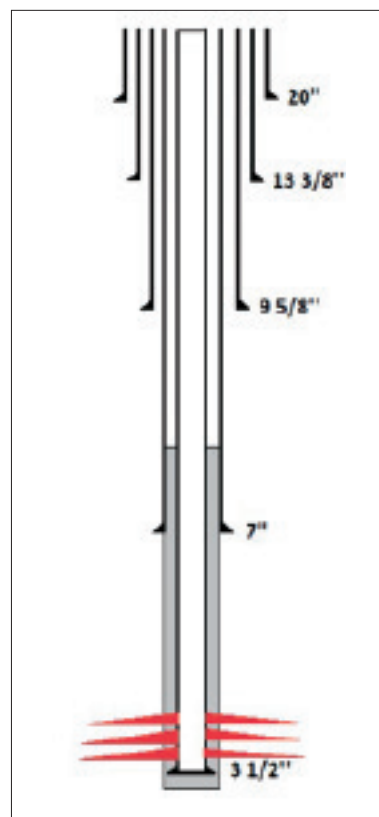
ovisi o fazama i postupcima koji su mu prethodili ili će iza njega slijediti (Matanović & Moslavac, 2011). Postoje različite metode opremanja bušotine, a odabir ovisi o parametrima kao što su: ležišni uvjeti, očekivana količina pridobivanja i vrsta fluida, karakteristike konstrukcije bušotine te uvjeti u okolišu bušotine.

Jedna od metoda opremanja je i metoda ugradnje i cementacije proizvodnog niza u otvoreni dio kanala bušotine koja se primjenjuje od kasnih '80-ih godina prošlog stoljeća. Ovu metodu karakterizira jednak unutarnji promjer zaštitnih/proizvodnih cijevi od dna bušotine do njenog ušća. To se može postići na dva načina: cementacijom proizvodnog niza (tubinga) u otvorenom dijelu kanala bušotine ili ugradnjom proizvodnog niza u poliranu prihvatnu cijev (engl. Polished Bore Receptacle, PBR) na lajneru promjera jednakog promjeru proizvodnog niza. Ovakav način opremanja bušotine može se primijeniti na bušotinama velikog promjera otvorenog dijela kanala (engl. big-bore monobore completions), bušotinama malog promjera otvorenog dijela kanala (engl. slimhole monobore completions) te kod bušotina specijalnih namjena (engl. special function applications monobore completions) (Al-Fadhli, 2018).

Ugradnjom proizvodnog niza zaštitnih cijevi u bušotinama malog promjera otvorenog dijela kanala smatra se ugradnja proizvodnog niza promjera manjeg od 0,014 m (6 5/8"). Obzirom na planirani promjer proizvodnih cijevi koje će se ugraditi u otvoreni kanal bušotine od 0,089 m (3 1/2"), u tu kategoriju spada i plinska bušotina opisana u ovom radu. Opremanjem bušotine ugradnjom i cementacijom proizvodnog niza u otvorenom dijelu kanala bušotine planiraju se ostvariti velike uštede, kao i omogućiti efikasno i racionalno vođenje eksploatacije ležišta plina. Metoda će prvi put biti primijenjena u Hrvatskoj.

2. Metoda ugradnje i cementacije proizvodnog niza u otvoreni dio kanala bušotine

Kao što je već navedeno, izbor metode opremanja bušotine ovisi o nekoliko različitih čimbenika. Budući da se za opremanje bušotine izdvaja velik dio kapitalnih troškova bušotine, a kasnije i troškova održavanja tijekom proizvodnje, ugrađena oprema trebala bi odgovarati danim uvjetima čim većim dijelom životnog vijeka te bušotine. Zbog toga je važno predvidjeti buduće karakteristike bušotine. Da bi se bušotina mogla opremiti ugradnjom i cementacijom proizvodnog



Slika 1. Jednostavna monobor bušotina

niza u otvoreni kanal bušotine, moraju postojati određeni uvjeti.

Kod konvencionalnog opremanja bušotine, u kanal bušotine ugrađuju se kolone zaštitnih cijevi nakon svake izbušene sekcije, pri čemu je s povećanjem duljine kanala svaka sekcija zaštitnih cijevi manjeg promjera od prethodne. Pritom sekcija ležišta može biti nezacijevljena, zacijevljena lajnerom s prorezima ili pješčanim zaslonom i necementirana ili zacijevljena (do ušća bušotine ili lajnerom), cementirana i naknadno perforirana kako bi se ostvarila komunikacija s ležištem. Najčešće se primjenjuje upravo posljednja metoda opremanja proizvodnog intervala (Matanović & Moslavac, 2011). Nakon završetka izrade bušotine, u kanal bušotine obično se do krovine proizvodnog intervala ugrađuje niz uzlaznih cijevi (tubinga) koji je namijenjen provođenju fluida do površine u proizvodnim bušotinama, a prstenasti prostor između uzlaznih cijevi i proizvodne kolone zaštitnih cijevi ili proizvodnog lajnera izolira pakerom. Kod takvog načina opremanja bušotine, unutarnji promjer proizvodnog niza zaštitnih cijevi duž proizvodnog intervala veći je od promjera niza uzlaznih cijevi (tubinga) iznad proizvodnog intervala, odnosno, postoji restrikcija protočne površine iznad ležišta.

Metoda ugradnje i cementacije proizvodnog niza u otvoreni dio kanala bušotine odnosi se na monobor bušotine (engl. monobore). Pojam monobor podrazumijeva jednak unutarnji promjer cijevi od dna do ušća bušotine, odnosno opremanje bušotina proizvodnim nizom zaštitnih cijevi koje ujedno služe kao uzlazne cijevi kojima se fluid provodi do površine u proizvodnim bušotinama, kao što je prikazano na slici 1.

3. Uvjeti za primjenu metode ugradnje i cementacije proizvodnog niza u otvorenom kanalu bušotine

Isplativost bušotine je najvažniji čimbenik pri donošenju odluke o tome hoće li se bušotina uopće izrađivati. Dobit koja se očekuje pridobivanjem ugljikovodika u nekom razumnom vremenu mora biti veća od troškova izrade, opremanja i privođenja bušotine proizvodnji. U današnje vrijeme često se izrađuju bušotine kojima se želi ostvariti pridobivanja ugljikovodika iz manjih ležišta u relativno kratkom vremenu (engl. harvest wells), što često podrazumijeva monobor tip opremanja. Mnoge od tih bušotina ne bi bile isplative ukoliko bi se morale opremiti konvencionalnim metodama, te se stoga ne bi ni izrađivale. Smanjenje troškova bušenja te eliminacija dodatnog niza zaštitnih cijevi i opreme kao što su pakeri i klizni rukavci predstavljaju najveću motivaciju za primjenu ove metode jer direktno utječu na troškove izrade bušotine (Ingvarsdson & Kritzler, 2009). Iako postoje i određeni nedostaci, mnoge prednosti monobor bušotina čine ovu metodu prihvatljivom. Uvjeti koji moraju biti zadovoljeni za primjenu monobor metode opremanja usko su povezani s prednostima i nedostacima same metode.

3.1. Prednosti metode ugradnje i cementacije proizvodnog niza u otvorenom kanalu bušotine

Očita prednost ovakvog tipa opremanja nasuprot konvencionalnog opremanja bušotina su uštede koje se njime ostvaruju. Monobor način opremanja bušotina pruža određeni stupanj fleksibilnosti kod budućih operacija održavanja bušotina (Robison, 1994). Zbog korištenja cementirane proizvodne kolone zaštitnih cijevi u svrhu uzlaznih cijevi, eliminira se ugradnja dodatnog niza cijevi u usporedbi s konvencionalnim

načinom opremanja. Uz jednake promjere uvodne kolone i tehničkih kolona zaštitnih cijevi, ovom metodom dobiva se veća protočna površina za pridobivanje fluida. Obzirom na eliminaciju jednog od nizova zaštitnih cijevi, te ako uvjeti u bušotini to dopuštaju, radi primjene ove metode moguće je izrađivati kanal bušotine manjeg promjera. Izrada kanala bušotine manjeg promjera također donosi uštede u vidu mogućnosti korištenja manjeg i jeftinijeg postrojenja, reduciranja količine opreme bušotinske glave, potrebne količine isplake, zaštitnih cijevi, cementacije te troškova dlijeta. Osim toga, smanjuje se broj potrebnih specijalnih servisa pri opremanju bušotine, a potencijalno i eliminira potreba za remontnim postrojenjem što rezultira bržim privođenjem bušotine proizvodnji. U slučaju potrebe za stimulacijom proizvodnih slojeva frakturiranjem, zbog monobor tipa opremanja ponekad se može eliminirati i ugradnja niza za frakturiranje (King, 2009).

3.2. Ograničenja metode ugradnje i cementacije proizvodnog niza u otvorenom kanalu bušotine

Primjena monobor tipa opremanja nije uvijek optimalna. Ukoliko se izrađuje bušotina promjera smanjenog na minimalnu veličinu uz planirano monobor opremanje, u slučaju nailaska na nepredviđene problematične naslage stijena, otežana je ili čak onemogućena ugradnja dodatne kolone zaštitnih cijevi za premošćivanje tih slojeva. Radi cementacije proizvodne kolone u kanalu bušotine kod ovakvog tipa opremanja, otežana je instalacija dubinske opreme, kao što su klizni rukavci, dubinski sigurnosni ventili, nazuvice, te ventili za plinsko podizanje kapljevine. Budući da je proizvodni niz cementiran i ne može biti zamijenjen, materijal proizvodne kolone zaštitnih cijevi mora biti dobro odabran s obzirom na postojanje kiselih plinova, CO_2 i H_2S , kao i druge uvjete trošenja tijekom očekivanog životnog vijeka bušotine. Također, u odnosu na konvencionalne načine opremanja, kod ovakvog tipa postoje veća ograničenja za izradu bočnih kanala ili re-entry bušotina. Manji promjer monobor bušotina u odnosu na konvencionalno opremljene bušotine može predstavljati ograničenje promjera instrumenata za izvođenje mjerenja u bušotini, kao i promjera alatki kod kasnijih intervencija u bušotini (King, 2009). Uspješna cementacija proizvodne kolone zaštitnih cijevi od velike je važnosti u monobor bušotinama malog promjera obzirom da cementni kamen predstavlja jedinu izolaciju između

proizvodnog sloja i uzlaznog niza cijevi. Bitno je dobro čišćenje unutrašnjosti kolone uzlaznih cijevi od ostataka cementne kaše nakon završetka protiskivanja kako ne bi predstavljali restrikcije unutrašnjeg promjera kolone. Također, krhotine perforacijskih puški zaostale nakon perforiranja bušotine mogu predstavljati velik problem pa tip perforacijskih puški koji će biti korišten treba pomno izabrati (Al-Fadhli, 2018). Izolacija perforacija u plćim intervalima uz zadržavanje komunikacije s dubljim slojevima moguća je uz postavljanje kratkog niza tubinga, što također predstavlja restrikciju unutarnjeg promjera. Onemogućena je obrnuta cirkulacija fluida kroz prstenasti prostor. Kod stimulacije ležišta frakturiranjem, sadržaj iz bušotine mora se ispumpati prije nego fluid za frakturiranje dospije do perforacija, što može utjecati na djelotvornost stimulacije (King, 2009).

Neki od nabrojanih nedostataka mogu se izbjeći ugradnjom proizvodnog niza u poliranu prihvatnu cijev (engl. Polished Bore Receptacle, PBR) na lajneru promjera jednakog promjeru proizvodnog niza, no korištenjem takve metode monobor opremanja smanjuju se i ostvarene uštede u opremi i vremenu.

4. Primjene metode ugradnje i cementacije proizvodnog niza u otvorenom kanalu bušotine u svijetu

Ovakav način opremanja bušotina primjenjuje se već dugi niz godina u cijelom svijetu, a vrlo je čest u Tajlandskom i Perzijskom zaljevu. U Tajlandskom zaljevu ovakav tip opremanja bušotina često se primjenjuje jer je na tom području sposobnost operatorske kompanije da izbuši čim više bušotina sa što manjim troškovima ključan faktor dugoročnog financijskog opstanka. Primjerice, tvrtka UNOCAL, od 2006. u vlasništvu Chevrona, s partnerima PTEPP i MOECO bavila se istraživanjem ugljikovodika na tom području od 1962., a monobor bušotine s promjerom tubinga od samo 0,073 m (2 7/8") počeli su izrađivati 1994. godine. Implementacijom ovog koncepta postigli su velike uštede u troškovima i vremenu izrade bušotina (Callahan & Schut, 1997). U Perzijskom zaljevu ova metoda se često primjenjuje kod plinskih bušotina koje se opremaju proizvodnim nizom promjera 0,178 m (7") radi velikih količina dnevnog pridobivanja plina. Primjer takvog opremanja su monobor bušotine velikog promjera na polju Khuff, najvećoj svjetskoj akumulaciji prirodnog plina s rezervama procijenjenim na više od

15 bilijuna m³ (15 · 10¹² m³). Konvencionalno opremljene bušotine u ranim 1990-im na tom polju bile su zacijevljene proizvodnim tubingom promjera 0,1397 m x 0,127 m (5 1/2" x 5"), a dnevno su proizvodile oko 1,4 milijun m³ (1,4 · 10⁶ m³) plina. Nakon opremanja bušotina monobor metodom proizvodnim kolonama promjera 0,178 m (7"), dnevna proizvodnja se povećala na 2,5 milijuna m³ (2,5 · 10⁶ m³) plina (Khosravianian & Wood, 2016).

5. Primjena na bušotini u Hrvatskoj

Metoda opremanja bušotine ugradnjom i cementacijom proizvodne kolone zaštitnih cijevi, odnosno monobor metoda, dosad nije bila primijenjena na nijednoj bušotini u Hrvatskoj. Bušotina na kojoj je metoda primijenjena je vertikalna istražna bušotina konačne dubine 1269 metara kojom je probušeno plinsko ležište. U sastavu plina nema kiselih plinova, H₂S i CO₂, koji uzrokuju jako trošenje i oštećivanje zaštitnih cijevi pri pridobivanju slojnog fluida.

Bušotina je izrađena bušenjem dvije sekcije kanala bušotine: dlijetom promjera 0,222 m (8 3/4") i promjera 0,152 m (6"). Nakon bušenja svake pojedine sekcije kanala, u njih su ugrađene zaštitne cijevi, a prstenasti prostor između stijenki izbušenog kanala i vanjskih stijenki zaštitnih cijevi popunjen cementnom kašom (tj. nakon stvrdnjavanja, cementnim kamenom).

Dubine ugradnje kolona, njihove jedinične masa i kvaliteta materijala zaštitnih cijevi te metode izvođenja cementacije odabrane su prema sljedećim ulaznim parametrima:

- geološki profil,
- gradijenti slojnog tlaka i tlaka frakturiranja,
- karakteristike slojnog fluida,
- sigurnosni koeficijenti,
- proračuni naprezanja,
- programirani tehnološkim zahtjevima u najnepovoljnijim bušotinskim uvjetima
- položaj i svojstva ležišta ugljikovodika.

S obzirom na komercijalno otkriće plinskog ležišta, u bušotinu je ugrađena i cementirana proizvodna kolona cijevi promjera 0,089 m (3 1/2"). Metodom ugradnje i cementacije proizvodnog niza promjera 0,089 m (3 1/2") u otvorenom kanalu bušotine, odnosno monobor metodom opremanja opisanom u ovom radu (engl. *Monobore Cemented Completion*), ostvaruju se velike uštede i omogućava efikasno i racionalno vođenje eksploatacije ležišta plina.

5.1. Konstrukcija bušotine

Promjeri kanala bušotine, promjeri kolona zaštitnih cijevi i njihove dubine ugradnje prikazane su u tablici 1 i na slici 2.

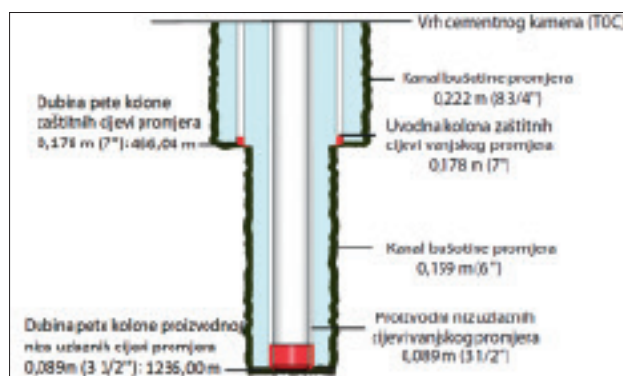
5.2. Sekcija kanala bušotine promjera 0,222 m (8 3/4")

Kanal bušotine promjera 0,222 m (8 3/4") izrađen je do dubine od 471 m (TVD). U ovu sekciju kanala bušotine ugrađena je i cementirana uvodna kolona zaštitnih cijevi promjera 7" do dubine od 466 m (TVD) u glinovitoj naslazi Vuka formacije. Svrha ugradnje i cementacije uvodne kolone zaštitnih cijevi je prekrivanje glinovitim proslojcima ispresijecani pliocensko-kvartarni šljunci, pijesci i gline, izolacija vodonosnika te omogućavanje nesmetanog i sigurnog nastavka bušenja.

Osim toga, ugrađena i cementirana uvodna kolona zaštitnih cijevi zajedno s prethodno navrnutom baznom pribudnicom služila je i kao oslonac za ugradnju sklopa za sekundarnu kontrolu tlaka u bušotini (preventerskog sklopa) promjera 0,346 m (13 5/8").

5.3. Sekcija kanala bušotine promjera 0,152 m (6")

Sljedeća sekcija kanala bušotine izrađena je dlijetom promjera 0,152 m (6") do konačne dubine bušotine od 1269 m. Radi pozitivnog otkrića plinskog ležišta, u ovu sekciju kanala bušotine ugrađen je i cementiran proizvodni niz uzlaznih cijevi (tubinga) vanjskog promjera 0,089 m (3 1/2"). Svrha ugradnje i cementacije kolone uzlaznih cijevi je prekrivanje navedene formacije ležišta plina, a ujedno će služiti i kao



Slika 2. Konstrukcija bušotine

uzlazne cijevi pri proizvodnji plina (monobor metoda opremanja bušotine).

5.4. Proračun naprezanja uzlaznih cijevi promjera 0,089 m (3 1/2")

U fazi projektiranja, u proračunu rezultante naprezanja unutarnjeg tlaka bili su razmatrani sljedeći uvjeti:

- ispitivanje hermetičnosti nakon cementacije niza uzlaznih cijevi, tj. za vrijeme zgušnjavanja cementne kaše,
- ispitivanje hermetičnosti,
- propuštanje uzlaznih cijevi (engl. *tubing leak*).

Najveće opterećenje unutarnjim tlakom javlja se pri ispitivanju hermetičnosti niza uzlaznih cijevi, a odabrane uzlazne cijevi zadovoljavaju sve postavljene uvjete uz najmanji postignuti koeficijent sigurnosti 5,83 i to u području pete kolone.

Pri projektiranju niza uzlaznih cijevi, u proračunu rezultante naprezanja vanjskog tlaka razmatrani su sljedeći uvjeti:

Tablica 1: Konstrukcija bušotine

Promjer kanala bušotine m (inch)	Promjer zaštitnih cijevi m (inch)	Dubina ugradnje zaštitnih cijevi m
0,222 (8 3/4)	0,178 (7)	0 - 466
0,152 (6)	0,089 (3 1/2)	0 - 1236

Tablica 2: Svojstva i nazivne čvrstoće uvodne kolone zaštitnih cijevi

Promjer m (in)	Kvaliteta čelika	Jedinična težina, N/m (lb/ft)	Spojnicica	Dubina ugradnje m	Kritični unutarnji tlak, MPa	Kritični vanjski tlak, MPa	Dopušteno vlačno opterećenje, kN
0,178 (7)	L-80	336 (23)	BTC	466	43,7	26,4	2370

Tablica 3: Svojstva i nazivne čvrstoće proizvodne kolone zaštitnih cijevi

Promjer m (in)	Kvaliteta čelika	Jedinična težina, N/m (lb/ft)	Spojnica	Dubina ugradnje m	Kritični unutarnji tlak, MPa	Kritični vanjski tlak, MPa	Dopušteno vlačno opterećenje, kN
0,089 (3 1/2)	L-80	134 (9,2)	VAGT	1236	70,1	72,6	922

Tablica 4: Ulazni podaci za proračun napreznja niza uzlaznih cijevi vanjskog promjera 0,089 m (3 1/2")

Ulazni parametri pri projektiranju niza uzlaznih cijevi promjera 0,089 m (3 1/2")	
Dubina ugradnje	1100 m
Gustoća isplake u bušotini	1,15 kg/dm ³
Gustoća slojne vode	1,05 kg/dm ³
Gustoća slojnog fluida	0,23 kg/dm ³
Gustoće cementnih kaša	1,6/1,9 kg/dm ³
*Gradijent pornog tlaka	1,03 bar/10 m
*Gradijent tlaka frakturiranja	1,64 bar/10 m
*Gradijent statičke temperature	5,1 °C/100 m
* (Prikazani podaci odnose se na područje neposredno ispod pete kolone z.c.)	

- potpuno pražnjenje niza uzlaznih cijevi (engl. *full evacuation*)
- uvjeti cementacije.

Najveće opterećenje vanjskim tlakom javlja se pri uvjetima potpunog pražnjenja niza uzlaznih cijevi. Rezultati proračuna pokazali su da odabrane zaštitne cijevi zadovoljavaju postavljene uvjete uz najmanji postignuti koeficijent sigurnosti 5,53 i to u području pete kolone.

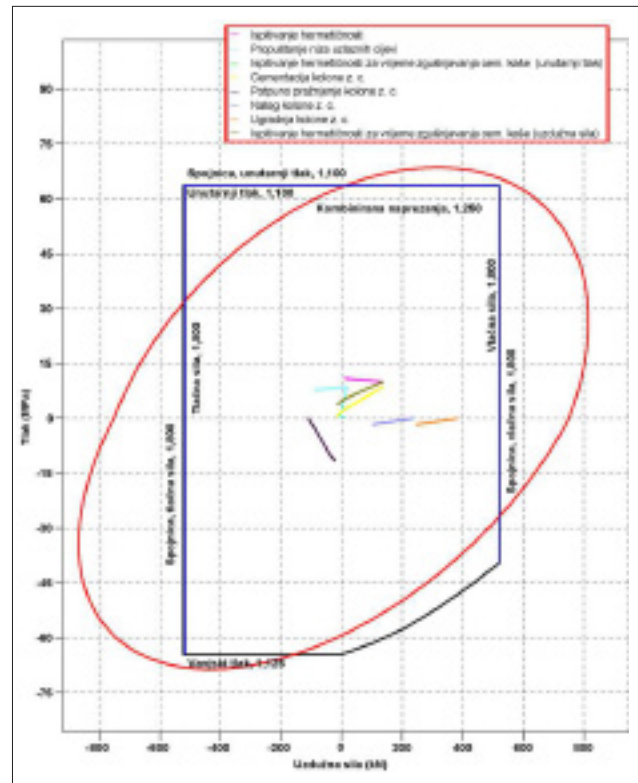
Pri provjeri niza uzlaznih cijevi na uzdužna napreznja u fazi projektiranja, u proračunu rezultante uzdužnih napreznja razmatrani su sljedeći uvjeti:

- ugradnja niza uzlaznih cijevi,
- nateg niza uzlaznih cijevi,
- ispitivanje hermetičnosti nakon cementacije niza uzlaznih cijevi, odnosno za vrijeme zgušnjavanja cementne kaše.

Najveće opterećenje uzdužnim silama javlja se pri uvjetima natega niza uzlaznih cijevi. Rezultati proračuna i ovdje su potvrdili da odabrane zaštitne cijevi zadovoljavaju postavljene uvjete uz najmanji postignuti koeficijent sigurnosti 1,37 u području ušća bušotine.

Kod kombiniranih opterećenja, uzdužne sile u nizu zaštitnih cijevi utječu na promjene nominalnih otpornosti cijevi na unutrašnji i vanjski tlak. Prilikom odabira uzlaznih cijevi prema izračunatim napreznjima u kritičnim presjecima kolone zaštitnih cijevi,

nazivne vrijednosti otpornosti uzlaznih cijevi na unutarjni i vanjski tlak korigiraju se za kombinirana opterećenja. Odabrane uzlazne cijevi zadovoljavaju



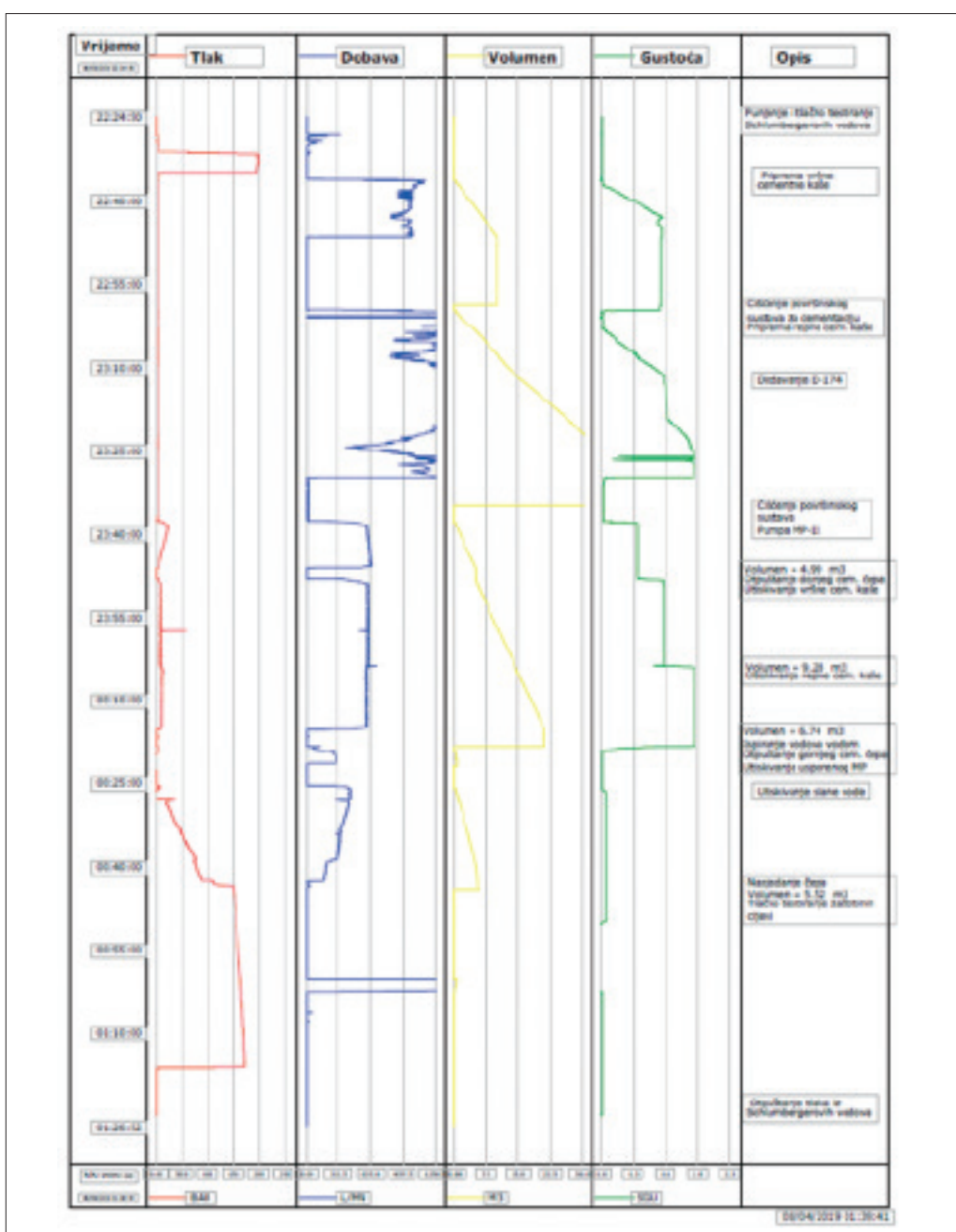
Slika 3. Elipsa napreznja za niz uzlaznih cijevi vanjskog promjera 0,089 m (3 1/2")

postavljene uvjete uz postignuti najmanji koeficijent sigurnosti od 1,98 u području ušća bušotine.

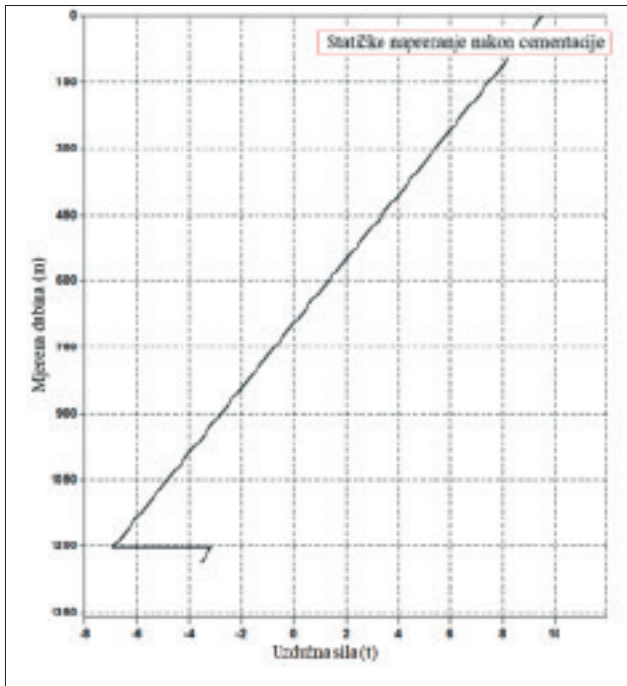
Proračunom naprezanja u uzlaznim cijevima utvrđeno je da odabrane uzlazne cijevi, vanjskog promjera 0,089 m (3 1/2"), jedinične težine 134 N/m (9,2 lb/ft), kvalitete čelika L-80 s navojnim spojem VAGT, zadovoljavaju postavljene kriterije. Iako je bušotina izrađena do veće konačne dubine nego što je bilo predviđeno u fazi projektiranja, obzirom na visoke vrijednosti koeficijentata sigurnosti pri naprezanju odabranih uzlaznih cijevi, one su i u stvarnim uvjetima zadovoljavale sve kriterije. Rezultati proračuna prikazani su elipsom naprezanja na slici 3.

5.5. Cementacija proizvodnog niza uzlaznih cijevi promjera 0,089 m (3 1/2")

Cementacija proizvodne kolone zaštitnih cijevi izvedena je od dna bušotine do 300 metara dubine. Prije početka utiskivanja vršne cementne kaše, isplacnim pumpama postrojenja još jednom je izvedena cirkulacija isplake dobavom od 375 l/min pri tlaku od 11 bar. Zatim je korištenjem cementacijskog agregata protisnuto 5 m³ otežane razdjelnice gustoće 1,35 kg/dm³. Nakon otpuštanja donjeg cementacijskog čepa, protisnuto je 9,2 m³ vršne cementne kaše gustoće 1,60 kg/dm³, dobavom od 600 l/min pri tlaku od 11 bar. Nakon protiskivanja 5,55 m³, primijećeno je nasjedanje

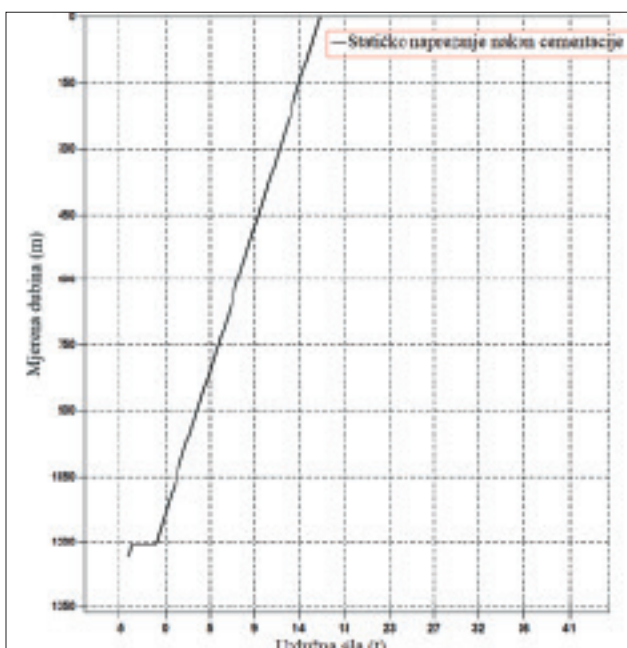


Slika 4. Grafički prikaz parametara tijekom cementacije niza uzlaznih cijevi promjera 3 1/2"



Slika 5. Grafički prikaz rezultata proračuna raspodjele uzdužnih sila na različitim dubinama pri djelovanju uzgona ukoliko se ne primjenjuje dodatan površinski tlak

donjeg čepa na zaustavnu ploču. Zatim je protisnuto $6,74 \text{ m}^3$ repne cementne kaše gustoće $1,90 \text{ kg/dm}^3$ i otpušten gornji cementacijski čep. Cementna kaša i čep potisnuti su utiskivanjem $0,25 \text{ m}^3$ vode s usporivačima stvrdnjavanja cementne kaše, i nakon toga $5,26 \text{ m}^3$ otopine KCl-a gustoće $1,03 \text{ kg/dm}^3$. Nasjedanje gornjeg cementacijskog čepa registrirano je pri tlaku od 92 bar,



Slika 6. Grafički prikaz rezultata proračuna raspodjele uzdužnih sila na različitim dubinama uz djelovanje uzgona uz primjenu tlaka od 130 bar s površine

Tablica 5: Rezultati proračuna raspodjele uzdužnih sila na različitim dubinama pri djelovanju uzgona ukoliko se ne primjenjuje dodatan površinski tlak

	Mjerena dubina (m)	Uzdužna sila (t) Statičko naprezanje nakon cementacije kolone
1	0	9,5354
2	466,00	3,1554
3	466,00	3,1553
4	696,20	0,0037
5	696,50	-0,0004
6	700,00	-0,0483
7	975,00	-3,8134
8	980,00	-3,8819
9	1205,00	-6,9623
10	1205,00	-3,1596
11	1230,00	-3,5018
12	1230,00	-3,5019
13	1235,00	-3,5702
14	1235,00	-3,5703

Tablica 6: Rezultati proračuna raspodjele uzdužnih sila na različitim dubinama uz djelovanje uzgona uz primjenu tlaka od 130 bar s površine

	Mjerena dubina (m)	Uzdužna sila (t) Statičko naprezanje nakon cementacije kolone
1	0	15,5486
2	466,00	9,1686
3	466,00	9,1685
4	700,00	5,9648
5	975,00	2,1998
6	975,00	2,1997
7	980,00	2,1313
8	1135,50	0,0023
9	1135,80	-0,0018
10	1205,00	-0,9492
11	1205,00	-3,1596
12	1230,00	-3,5018
13	1230,00	-3,5019
14	1235,00	-3,5702
15	1235,00	-3,5703

čime je cementacija završila. Postupak cementacije je prikazan na slici 4.

Nakon cementacije niza uzlaznih cijevi, tj. za vrijeme zgušnjavanja cementne kaše, izvedeno je ispitivanje hermetičnosti niza tlakom od 150 bar pri trajanju od 30 min, što se pokazalo uspješnim. Nakon smanjivanja tlaka na 120 bar, bušotina je zatvorena, a tlak u uzlaznim cijevima održavao se pri vrijednostima od 120 do 130 bar ispuštanjem slane vode iz niza uzlaznih cijevi. Održavanjem visokog tlaka u nizu uzlaznih cijevi tijekom čekanja na stvrđavanje cementne kaše u cementni kamen, sprječava se izvijanje uzlaznih cijevi malog promjera na dnu bušotine radi djelovanja sile uzgona. Radi usporedbe tlakova u nizu uzlaznih cijevi tijekom stvrđavanja cementne kaše, napravljeni su proračuni prikazani tablici 5 i 6 te slici 5 i 6.

Prije raskrivanja potencijalnog ležišta perforiranjem proizvodnje kolone, provjerena je kvaliteta cementnog kamena u prstenastim prostorima: između proizvodnog niza vanjskog promjera 0,089 m (3 1/2") i otvorenog kanala bušotine promjera 0,159 m (6 1/4") te uzlaznog niza vanjskog promjera 0,089 m (3 1/2") i

prethodno ugrađene kolone zaštitnih cijevi vanjskog promjera 0,178 m (7").

6. Zaključak

Primjenom metode ugradnje i cementacije proizvodnog niza cijevi u otvorenom kanalu bušotine eliminira se ugradnja proizvodnog tubinga unutar proizvodne kolone zaštitnih cijevi. Time se postiže jednostavan dizajn opremanja bušotine, pojednostavljuje kasnije održavanje zbog manje restrikcija unutarnjeg promjera te skraćuje vrijeme izrade bušotine. Radi navedenog se ostvaruju uštede kako u kapitalnim, tako i u operativnim troškovima bušotine, što često predstavlja odlučujući faktor pri donošenju odluke o izradi bušotine. Metoda se u svijetu uspješno primjenjuje u različitim uvjetima već dugi niz godina, te su njenom primjenom dokazane navedene prednosti. Iako postoje i određeni nedostaci metode, uz pažljivo planiranje oni se često mogu izbjeći, što je pokazano na primjeru bušotine opremljene ovom metodom.

Literatura

1. AL-FADHLI, A. K.: Monobore completion design: Classification, applications, benefits and limitations. – Master's Thesis, Faculty of the Graduate School of the Missouri University of Science and Technology, 2018, 100 p.
2. CALLAHAN, E. R. III & SCHUT, G.: Slimhole Development in the Gulf of Thailand. - SPE Asia Pacific Oil and Gas Conference, Kuala Lumpur, Malaysia, 1997, SPE 8053, 313 – 323.
3. INGVARSEN, D. & KRITZLER, J.: Monobore Completion System Provides Low-Cost Completion Option. - SPE Annual Technical Conference and Exhibition, New Orleans, Louisiana, U.S.A., 2009, SPE 124797
4. KHOSRAVANI, R. & WOOD, D. A.: Selection of high-rate gas well completion designs applying multi-criteria decision making and hierarchy methods. - Journal of Natural Gas Science and Engineering 34, 2016, 1004 – 1016.
5. KING, B.: Monobore wellbore design: Bangladesh exploration program highlights pros, cons. - Drilling Contractor, Innovating While Drilling®, July/August, 2009.
6. MATANOVIĆ, D. & MOSLAVAC, B.: Opremanje i održavanje bušotina [*Well Completion and Servicing – in Croatian.*]- Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering, University of Zagreb, Zagreb, 2011, 659 p.
7. ROBISON, C.E.: Monobore Completions for Slimhole Wells. - 26th Annual Offshore Technology Conference, Houston, Texas, U.S.A., 1994, OTC 7551, 385 – 392.

Web izvori

- AAPG Wiki, 2014.
- URL: https://wiki.aapg.org/File:Well-completions_fig4.png