

Povećanje proizvodnosti bušotine X-1 primjenom hidrauličkog frakturiranja

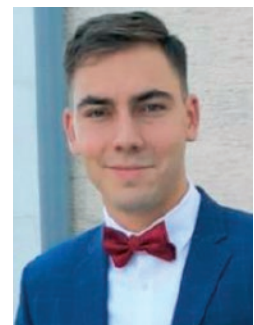
Improving the productivity of an X-1 well by hydraulic fracturing

dr. sc. Vladislav Brkić

Rudarsko-geološko-naftni fakultet
vladislav.brkic@rgn.unizg.hr

Fran Leskovar, mag. inž. naft. rud.

Rudarsko-geološko-naftni fakultet
fran.leskovar@gmail.com



Ključne riječi: hidrauličko frakturiranje, proizvodnja nafte i plina, proizvodnost bušotine

Key words: hydraulic fracturing, production of oil and gas, well productivity

Sažetak

Hidrauličkim frakturiranjem nastoji se premostiti pribušotinsko oštećenje stvaranjem pukotine visoke vodljivosti. Na taj način omogućen je lakši dotok fluida iz ležišta u bušotinu, što će za posljedicu imati povećanje proizvodnosti bušotine. Uspješnost hidrauličkog frakturiranja ovisi o pravilnom odabiru kandidata za fakturiranje. Izbor odgovarajućeg fluida ovisi o ležišnoj temperaturi, ležišnom tlaku te vrsti ležišne stijene. Smještaj odgovarajuće koncentracije i vrste podupirača u pukotini ključan je za uspješno frakturiranje. Vodljivost, poluduljina i visina frakture, najvažniji su parametri stvorene frakture. U radu je opisan primjer hidrauličkog frakturiranja na plinsko-kondenzatnom polju X.

Abstract

Hydraulic fracturing is performed to bypass the near wellbore damage by creating a high conductivity

fracture. With created fracture, fluid flow from formation to wellbore is improved and that will result with increased well productivity. Hydraulic fracturing efficiency depends on right candidate selection. Selection of fracturing fluid depends on reservoir temperature, reservoir pressure and type of reservoir. Placing the right concentration of proppant and right type of proppant is key for successful hydraulic fracturing treatment. Example of hydraulic fracturing in gas-condensate reservoir is described in this paper.

1. Uvod

Dvije glavne djelatnosti proizvodnog inženjerstva u naftnoj industriji su: povećanje proizvodnosti ležišta i optimiziranje podizanja fluida s dna bušotine na površinu. Glavna svrha povećanja proizvodnosti jest povećanje vrijednosti određenog ležišta, odnosno maksimalno iskorištavanje perioda određenog trajanjem koncesije. Obrada ležišnih stijena ima za cilj povratiti ili čak poboljšati prirodnu vezu bušotine s ležištem, što može odgoditi potrebu za umjetnim podizanjem fluida iz bušotine (Brkić, 2019). Hidrauličkim frakturiranjem stvara se pukotina visoke vodljivosti kojom se povećava kontaktna površina između bušotine i ležišta. Time će se smanjiti otpori pri protjecanju fluida

iz ležišta u bušotinu, što će rezultirati manjim padom tlaka pri protjecanju a u konačnici i većim indeksom proizvodnosti bušotine.

Bušotine se najčešće hidraulički frakturiraju zbog oštećenja izazvanog prilikom bušenja ili opremanja bušotine ili zbog male propusnosti ležišta. Prilikom odabira kandidata za hidrauličko frakturiranje u obzir treba uzeti više parametara. Najbolji kandidati za frakturiranje su ležišta koje sadrže značajne rezerve nafte i plina, imaju zadovoljavajuću propusnost te ležišta gdje je do pada proizvodnje došlo zbog oštećenja (*engl. skin*). Kod projektiranja izvedbe hidrauličkog frakturiranja potrebno je prikupiti podatke o karakteristikama ležišta i ležišnog fluida. To uključuje i mehanička svojstva stijena od kojih su najbitnija: Youngov modul elastičnosti, Poissonov koeficijent, posmični modul, volumni modul i žilavost stijene. Ovisno o uvjetima u ležištu dizajnirat će se odgovarajući fluid za frakturiranje. Odabrani fluid treba stvoriti vodljivu frakturu, odgovarajuće širine i duljine za smještanje podupirača. Da bi to ostvario, u osnovni fluid dodaju se razni aditivi koji će omogućiti da prenese podupirač od površine do pukotine. Pri tome je bitno da fluid bude kompatibilan s ležišnim fluidom i stijenom kako se ne bi dodatno smanjila propusnost. Također, podupirač mora imati odgovarajuća svojstva kako bi zadržao pukotinu otvorenom nakon prestanka utiskivanja. Idealni podupirač je čvrst, otporan na drobljenje, otporan na koroziju, male gustoće, lako dostupan i prihvatljive cijene.

U radu je detaljnije opisan primjer hidrauličkog frakturiranja na plinsko-kondenzatnom polju X. Frakturiranje je uspješno provedeno te se prosječna dnevna proizvodnja povećala, s dotadašnjih 2 000 m³ plina dnevno, na otprilike 16 000 m³ dnevno. Ovakav značajan porast proizvodnje pokazuje zašto je hidrauličko frakturiranje tako popularna metoda stimulacije te zašto se i dalje svakodnevno provodi.

2. Hidrauličko frakturiranje

Hidrauličko frakturiranje je postupak stvaranja pukotine (frakture) u stijeni prenošenjem tlaka s površine na ležište preko fluida za frakturiranje (gela). Utiskivanjem fluida za frakturiranje u bušotinu povećava se dinamički tlak u bušotini uslijed otpora protjecanju fluida. Kada vrijednost dinamičkog tlaka u bušotini dosegne vrijednost tlaka frakturiranja dolazi do stvaranja pukotina u stijeni. Stvorene frakture su vrlo visoke vodljivosti te je na taj način omogućen lakši

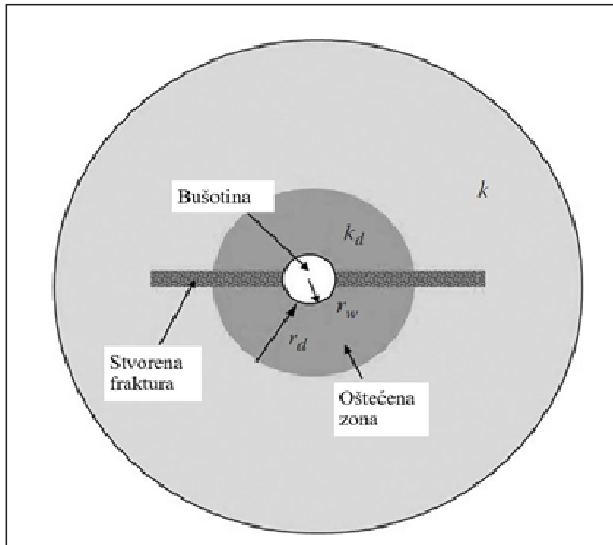
dotok fluida u kanal bušotine (Brkić, 2019). Time je moguće u određenim ležištima povećati trenutnu proizvodnju, a u slučaju nekonvencionalnih ležišta i ukupnu pridobivu količinu ugljikovodika.

Uspješnost izvedbe hidrauličkog frakturiranja ovisi o prirodnoj propusnosti formacije, vodljivosti frakture i duljini kreirane frakture. Vodljivost frakture predstavlja značajan kontrast u odnosu na prirodnu propusnost ležišta. Prema osnovnom principu mehanike stijena, fraktura stvorena u formaciji pratit će smjer najmanjeg otpora stijene. Postupak frakturiranja zahtijeva mnogo mehanizacije i velike količine fluida i podupirača. Fluid za frakturiranje i podupirači miješaju se (*engl. blend*) zajedno i potom utiskuju u ležište bilo kroz postojeći tubing ili kroz posebno dizajnirani niz cijevi. Fluid utisnut pod visokim tlakom otvara frakturu, dok podupirač održava frakturu otvorenom nakon što tlak utiskivanja opada (Economides et. al., 1989). Hidrauličko frakturiranje koristi se već više od 70 godina, no u zadnjih dva desetljeća njegova primjena je značajno porasla i to za proizvodnju nafte i plina iz šejlova (*engl. shale*).

U prijašnjim vremenima, kada su rezerve nafte i plina bile obilne i kada je postojala mala vjerojatnost za prekide u opskrbi, nije postojala potreba za frakturiranjem šejlova. Zbog niske cijene nafte i plina, smatralo se da nije ekonomski isplativo i tehnologija nije bila toliko razvijena. S konstantnim rastom nesigurnosti u opskrbi i povećanom potražnjom za energijom, potaknuto modernizacijom i većim životnim standardima, cijena nafte značajno je porasla. Cijena plina također je porasla gotovo u svim dijelovima svijeta, izuzev ona područja koja obiluju rezervama plina. Visoka potražnja za energijom potaknula je sve veća ulaganja u istraživanja i razvoj tehnologije kako bi proizvodnja energije bila što efikasnija. Hidrauličko frakturiranje se tijekom godina značajno poboljšao što je dovelo do veće proizvodnje nafte i plina. Za razliku od prijašnjih vremena, hidrauličko frakturiranje danas se intenzivno provodi čak i blizu gusto naseljenih područja, kao i ekološki osjetljivih dijelova, što je svakako rezultat mogućnosti praćenja čitavog postupka u realnom vremenu (Donaldson et. al., 2013).

2.1. Ciljevi hidrauličkog frakturiranja

Hidrauličko frakturiranje provodi se u bušotini iz više razloga. Neki od njih bit će opisani u nastavku. Najčešći razlog za hidrauličko frakturiranje je premostiti pribušotinsko oštećenje i vratiti bušotini „pri-



Slika 2-1. Premošćivanje oštećene zone pomoću frakture visoke vodljivosti (Smith i Montgomery, 2015)

rodnu“ proizvodnost (proizvodnost prije oštećenja). Takvo oštećenje može biti izazvano iz više razloga, uključujući oštećenje tijekom bušenja koje je rezultat prodora finih čestica u sloj ili kemijske nekompatibilnosti isplake i sloja. Oštećenje se također može stvoriti zbog stvariti zbog prirodnih procesa u ležištu kao što je promjena zasićenja u ležištu uzrokovana niskim ležišnim tlakom u blizini bušotine, migracijom finih čestica ili taloženjem kamenca. Bez obzira na uzrok, uslijed oštećenja, propusnost oštećene zone (*engl. damaged zone*), k_d , bit će manja od propusnosti neoštećenog dijela ležišta, k , te će to rezultirati smanjenom proizvodnosti same bušotine. Obrada skeleta stijene se uglavnom vrši kemijskom obradom da bi se bušotini vratila prirodna proizvodnost. U slučajevima kada kemijska obrada nije prikladna ili dovoljno učinkovita, tada se izvodi hidrauličko frakturiranje kako bi se premostilo oštećenje. To se postiže stvaranjem visoko vodljive frakture kroz oštećenu zonu, da bi se povratila veza s neoštećenim dijelom ležišta, shematski prikazano na slici 2-1. Oznaka r_w predstavlja radijus bušotine (*engl. wellbore*), dok r_d predstavlja radijus oštećene zone (*engl. damage zone*).

Da bi se povratila prijašnja proizvodnost bušotine, vodljivost frakture, $k_f w$, pri čemu je w širina frakture (*engl. width*), mora iznositi:

$$k_f w = 2\pi r_w k \quad 2.1$$

Osim vraćanja prirodne proizvodnosti, hidrauličkim frakturiranjem se svakako nastoji i povećati proizvodnost bušotine kako bi se povećala ekonomska

dobit u željenom periodu. Proizvodnja ugljikovodika temelji se na Darcyevom zakonu (Smith i Montgomery, 2015):

$$Q = \frac{kh \Delta p A}{\mu \Delta x h} \quad 2.2$$

gdje Q predstavlja dobavu, k propusnost sloja, h debljinu ležišta, μ viskoznost ležišnog fluida, $\Delta p/\Delta x$ depresiju tlaka i A predstavlja protočnu površinu. Razrada ležišta temelji se na interpretaciji i modifikaciji parametara gore navedene jednadžbe. Primjerice, depresija na sloj može se povećati mehaničkim načinom podizanja nafte (*engl. artificial lift*) čime se smanjuje dinamički tlak na dnu bušotine. Utiskivanjem vode, kao sekundarnom metodom iscrpka nafte, nastoji se povećati ili zadržati ležišni tlak. Tercijarne metode istiskivanja nafte, podzemno izgaranje nafte i utiskivanjem pare, koriste se za smanjenje viskoznosti ležišnog fluida čime se smanjuju otpori protjecanju fluida, a u konačnici i povećava produktivnost bušotine.

Hidrauličkim frakturiranjem, osim što se želi premostiti pribušotinsko oštećenje, želi se i stvorenom frakturom povećati protočna površina da se ostvari lakši dotok fluida iz ležišta u bušotinu, što za posljedicu ima povećanu dobavu (Smith i Montgomery, 2015). S druge strane, jednom bušotinom tako se može zahvatiti veće područje crpljena, stoga možda neće biti potrebe za izradom dodatnih bušotina.

Ostali ciljevi hidrauličkog frakturiranja su povezati ranije prisutne prirodne frakture u sloju s bušotinom, smanjiti pad tlaka uokolo kanala bušotine kako bi se umanjio dotok pijeska, smanjiti tlak da bi se smanjili problemi s odlaganjem parafina i asfaltena, poboljšati postavljanje pješčanog zasipa. U slučaju retrogradnog plinsko-kondenzatnog ležišta, hidrauličkim frakturiranjem, nastoji se smanjiti pad tlaka u području blizu bušotine da se odgodi formiranje kondenzata (Pongratz, 2019). Posljedica izotermičke retrogradne kondenzacije u plinsko-kondenzatnim ležištima može biti znatan gubitak pridobivih tekućih ugljikovodika (kondenzata, prirodnog benzina), jer se oni kondenziraju na površini pora ležišne stijene, gdje su pretežno nepokretni, pa je proizvedeni plin sve siromašniji tekućom fazom, a sastav fluida preostalog u ležištu se kontinuirano mijenja na način da se gubici tekuće faze pri retrogradnoj kondenzaciji povećavaju. Ti gubici se mogu smanjiti ili spriječiti podržavanjem ležišnog tlaka prirodnim vodonapornim režimom ili cikličkim injektiranjem suhog plina, ovisno o veličini podržavanog tlaka (Perić, 2007).

3. Kriteriji odabira ležišta za hidrauličko frakturiranje

Svako oštećenje ležišne stijene negativno se očituje na proizvodnost bušotine. Ako bušotina proizvodi manje količine ugljikovodika od očekivanih, potrebno je otkriti uzročnika oštećenja i ukloniti ga na prikladan i ekonomski isplativ način. Oštećenje je uglavnom povezano s djelomičnim čepjenjem pornog prostora stijena pribušotinske zone, koje smanjuje originalnu propusnost u oštećenom području (Gaurina-Međimurec, 2004). Bilo da se radi o tek izrađenoj bušotini ili bušotini koja proizvodi već dulji niz godina, postoje dva glavna razloga za stimulacijske radove u bušotini. Prvi razlog je mala prirodna propusnost ležišta, pri čemu nije ekonomski isplativo crpiti naftu bez prethodne stimulacije. Nažalost, na tu pojavu se ne može utjecati, već se nekom od metoda obrade može povećati propusnost ležišta, a time i povećati proizvodnja nafte i plina. Drugi razlog za stimuliranje ležišta je premostiti pribušotinsko oštećenje stijene i time uspostaviti vezu ležišta i bušotine. Tako će se proizvodnost bušotine vratiti na prvobitnu vrijednost ili će se u još boljem slučaju povećati. Takvo pribušotinsko oštećenje može biti posljedica proizvodnje ležišnog fluida, odnosno prirodno oštećenje, ili može biti rezultat bušenja ili opremanja bušotine, odnosno izazvano oštećenje (Brkić, 2019). Izazvana oštećenja moguće je izbjeći pravilnim odabirom fluida koji je kompatibilan s ležišnim fluidom i odgovarajućom filtracijom utisnog fluida kako bi se izbjeglo čepjenje pora.

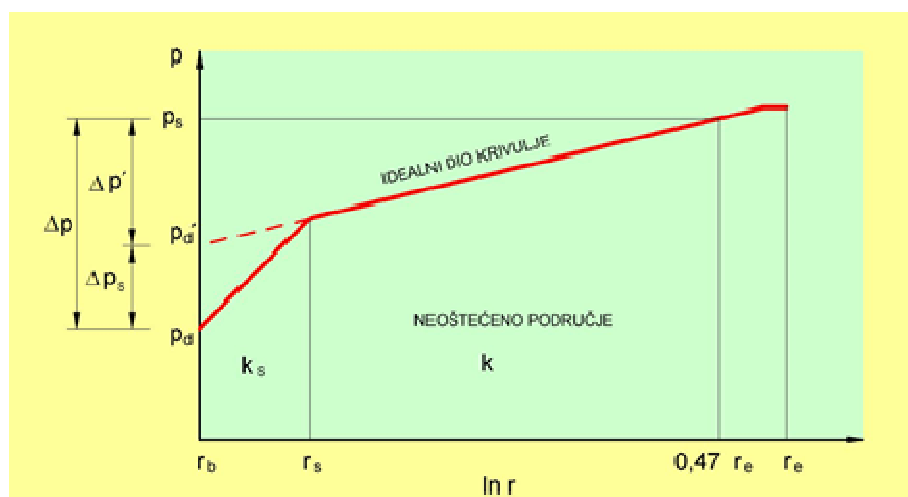
Uspješnost hidrauličkog frakturiranja uvelike ovisi o pravilnom odabiru kandidata za frakturiranje. Potrebno je uložiti dosta vremena pri selektiranju prikladnog kandidata kako bi se u konačnici postigli što bolji rezultati. Tijekom povijesti se pokazalo da nije

svaka bušotina pogodna za hidrauličko frakturiranje i loš odabir bušotine može stvoriti razne probleme. Neki od problema povezani s lošim odabirom kandidata su nekontrolirano širenje pukotine u gornje i donje slojeve, izrazito visoki tlak za iniciranje pukotine, smanjena vodljivost frakture zbog visokih naprezanja u ležištu, neželjen gubitak fluida za frakturiranje i sl. Neki od kriterija koje treba uzeti u obzir pri odabiru ležišta za frakturiranje su: propusnost ležišta, skin faktor, povijest pridobivanja određene bušotine, zasićenje naftom i plinom, ležišni tlak, raspodjela opterećenja u ležištu (Heydarabadi, 2010).

3.1. Skin-efekt

Svako oštećenje stijene bez obzira na oblik i uzrok pojavljivanja označava se kao tzv. skin-efekt. Direktna posljedica oštećenja proizvodnih stijena je smanjeni dotok fluida u kanal bušotine u odnosu na dotok iz neoštećenog dijela ležišta. Krivulja raspodjele tlakova u području oštećenih i neoštećenih stijena uokolo kanala bušotine prikazana je na slici 3-1. Na slici je p_d stvarni dinamički tlak, a Δp stvarna depresija, dok je p_d' idealni dinamički tlak i $\Delta p'$ idealna depresija (Gaurina-Međimurec, 2004).

Sa stanovišta oštećenja stijena od iznimne je važnosti izdašnost dotoka (ID) fluida u kanal bušotine koja predstavlja odnos između stvarnog (IP) i idealnog indeksa proizvodnosti (IP'). Prema tome, potrebno je utvrditi odnos proizvodnje bušotine za slučaj oštećenih i neoštećenih stijena. Idealni dio krivulje na slici 3-1 predstavlja raspodjelu tlaka u stijenama kod kojih nema oštećenja, gdje za određenu proizvodnju slojnog fluida (q) treba ostvariti depresiju (razlika između statičkog i dinamičkog tlaka na dnu bušotine). Međutim, ako su prisutna oštećenja stijena, za istu vrijednost proizvodnje (q) potrebno je ostvariti veću depresiju (Gaurina-Međimurec, 2004).



Slika 3-1. Krivulja raspodjele tlakova u stijenama uokolo kanala bušotine (Gaurina-Međimurec, 2004)

Pozitivna vrijednost faktora oštećenja ukazuje na oštećenje stijena, a njegova negativna vrijednost znači povećanje propusnosti u izmijenjenom području. Očuvanje početne vrijednosti izdašnosti dotoka ili čak njeno povećanje može se postići detaljnom kontrolom procesa bušenja, odnosno primjenom metoda obrada stijena u svrhu stimuliranja njenih proizvodnih karakteristika: efektivne propusnosti oštećene zone (k_s) i radijusa oštećene zone (r_s) (Gaurina-Međimurec, 2004). Ako se tijekom ispitivanja dokaže da bušotina proizvodi manje od procijenjene vrijednosti, tada se daljnjom geološkom i ekonomskom analizom utvrđuje hoće li se raditi stimulacijski radovi i na koji način će se provesti. U načelu, ovisno o propusnosti ležišta i prirodni oštećenja ležišta, postoje dvije metode obrade stijena: kemijske obrade stijena i hidrauličko frakturiranje.

Okvirna skala vrijednosti skin faktora, ovisno o tome radi li se o oštećenoj ili stimuliranoj bušotini glasi: $s < 0$ stimulirana bušotina (povećana površina kontakta između bušotine i ležišta), $s \approx -3$ uzima se kao limit kemijske obrade, $s \approx -4$ uspješno izvedeno hidrauličko frakturiranje, $s \approx -5,5$ najniža moguća vrijednost postupkom obrade stijena. Ako se radi o oštećenoj bušotini (slab kontakt između bušotine i ležišta), tada je vrijednost skin faktora pozitivna, $s > 0$, pri čemu je oštećenje klasificirano na sljedeći način: $s \approx 1-2$ umjereno oštećenje, $s \approx 5$ značajno oštećenje i vrijednost $s > 10$ odnosi se na mehanički problem (Brkić, 2018). Negativna vrijednost skin faktora ne znači nužno da nije potrebno provesti hidrauličko frakturiranje. Negativna vrijednost ukazuje na to da je propusnost ležišta manja od propusnosti pribušotinske zone. Takva situacija ukazuje da je bušotina prethodno stimulirana, primjerice kemijskom obradom, ili postoje prirodne pukotine. Ako je u bušotini prethodno izvršena kemijska obrada, a proizvodnost se nije značajno poboljšala, tada hidrauličko frakturiranje predstavlja bolju opciju.

4. Opis postupka hidrauličkog frakturiranja

Postoji jasno definirana hijerarhija koju treba slijediti prilikom postupka hidrauličkog frakturiranja kako bi se postigli što bolji rezultati. To uključuje prikupljanje potrebnih podataka, dizajniranje postupka u računalnim simulatorima, optimiranje izvedbe, provođenje hidrauličkog frakturiranja te na kraju ocjenu postignutih rezultata. Prvi korak je prikupiti sve potrebne podatke koji će se koristiti kao ulazni parametri u

računalnim programima za modeliranje frakture i njenih parametara. Vrlo bitni podaci su poroznost i propusnost sloja, Poissonov koeficijent, Youngov modul elastičnosti, naprezanja u ležištu, te ležišni tlak i temperatura. Prikupljanje i analiza takvih podataka zahtijeva interakciju više disciplina, kao što su bušenje, geologija, petrofizika, ležišno i proizvodno inženjerstvo. Podaci će se interpretirati iz dijagrama dobivenih bušotinskom karotažom, analize jezgri u laboratoriju, praćenja proizvodnih parametara bušotine te ispitivanja vršenih u bušotini. Prilikom modeliranja postupka hidrauličkog frakturiranja, razlikujemo dvije grupe podataka: podaci koji su izmjereni ili procijenjeni te podaci koje određuje sami inženjer (Pongratz, 2019). Najznačajniji podaci nabrojani su u tablici 4-1.

Tablica 4-1. Podaci potrebni za modeliranje hidrauličkog frakturiranja (Pongratz, 2019)

Podaci koje određuje inženjer	Podaci koji su izmjereni ili procijenjeni
opremljenost bušotine	dubina sloja za frakturiranje
volumen fluida za frakturiranje	propusnost sloja
volumen osnovnog fluida	naprezanja u proizvodnom sloju
brzina utiskivanja	naprezanja u okolnim slojevima
viskoznost fluida za frakturiranje	mehanička svojstva stijena
gustoća fluida za frakturiranje	ležišni tlak
volumen aditiva	poroznost sloja
vrsta podupirača	stlačivost stijene
volumen podupirača	debljina ležišta

Prilikom odabira baznog fluida za frakturiranje i aditiva vrlo je bitno uzeti u obzir ležišnu temperaturu i ležišni tlak jer će ti parametri imati značajan utjecaj na svojstva fluida za frakturiranje. Nakon što je određen sastav fluida za frakturiranje, prije samog frakturiranja, izvodi se dijagnostički test frakturiranja i pokusno frakturiranje (*engl. micro frac, mini frac*). Dijagnostički test frakturiranja izvodi se kako bi se na relativno brz i jednostavan način odredili parametri ležišta, od kojih je najbitniji tlak zatvaranja pukotine.

Pokusno frakturiranje ili mini frak obično se izvodi dan prije zakazanog frakturiranja. Izvodi se istom brzinom utiskivanja i istim tipom fluida (ili sličnim), ali s manjim volumenom i često bez podupirača. Rezultati dobiveni ovim testom koriste se da bi se dobili stvarni podaci o tlaku loma ležišnih stijena, vremenu zatvaranja pukotine, djelotvornosti radnog fluida za ostvareni protok i visini nastale pukotine u odnosu na predviđenu (Montgomery i Smith, 2014). Time je moguće testirati efikasnost fluida za frakturiranje te prije samo frakturiranja, naknadno optimirati svojstva fluida ako je potrebno.

Postupak hidrauličkog frakturiranja razlikuje se ovisno o svojstvima ležišta, opremljenosti bušotine i lokaciji izvedbe. Međutim, tipičan program hidrauličkog frakturiranja obuhvaća četiri faze (Fink, 2013):

1. U prvoj fazi (*engl. spearhead stage*) utiskuje se mješavina vode i razrijeđene kiseline (primjerice klorovodična kiselina), koja ima svrhu ukloniti ostatke koji su prisutni u bušotini. Time će se ostvariti prohodan put fluidu za frakturiranje i olakšati iniciranje pukotine.
2. U drugoj fazi (*engl. pad stage*) utiskuje se viskozni fluid, ali bez dodatka podupirača, koji će inicirati pukotinu u željenom sloju.
3. Nakon što se stvorila pukotina, u trećoj fazi (*engl. proppant stage*), zajedno s fluidom za frakturiranje, utiskuju se i podupirači i prenose se u pukotinu. Nakon smanjenja tlaka, podupirači će zadržati pukotine otvorenima i tako omogućiti visoko vodljiv put ugljikovodicima iz ležišta u bušotinu.
4. U zadnjoj fazi (*engl. flush stage*), u bušotinu se utiskuje voda (s ostalim aditivima namijenjenim za čišćenje) koja ima svrhu isprati višak podupirača koji može biti prisutan u bušotini.

Nakon provedbe hidrauličkog frakturiranja, testovima se ispituje uspješnost izvedbe hidrauličkog frakturiranja. Najbitniji parametri novo stvorene frakture su propusnost frakture i duljina frakture. Rezultat visoko vodljive, dugačke frakture u većini slučajeva bit će poboljšana produktivnost bušotine, što će u konačnici opravdati ekonomsku isplativost projekta. Vodljivost frakture, C_{FD} , je bezdimenzionalna vrijednost i opisana je jednadžbom 6.1 (Pongraz, 2019).

$$C_{FD} = \frac{k_f \cdot w}{k \cdot x_f} \quad 4.1$$

U gore navedenoj jednadžbi, k_f predstavlja propusnost smještenog podupirača, k je propusnost sloja, w

je prosječna širina pukotine a x_f je poluduljina pukotine. Nažalost, u nekim slučajevima nakon puštanja bušotine u proizvodnju, zna se dogoditi da bušotina ne proizvodi željene količine ugljikovodika iako je hidrauličko frakturiranje provedeno po planu. U tom slučaju uzročnik manjeg davanja bušotine od predviđenog, mogu biti neispravnosti u površinskoj opremi, oštećenja u podzemnoj opremi ili odaziv ležišta nije bio kakav je planiran. Uzročnik tomu može biti kriva pretpostavka ležišnih parametara koji su ranije opisani u radu.

5. Primjer projektiranja hidrauličkog frakturiranja na bušotini X-1

U nastavku rada bit će opisan primjer hidrauličkog frakturiranja koje je izvela tvrtka Schlumberger na bušotini X-1, a naručitelj radova je bila tvrtka INA d.d. Tijekom 2015. godine, zbog niskog radnog tlaka na ušću, bušotina je prestala s proizvodnjom te je donesena odluka da će se provesti hidrauličko frakturiranje s ciljem povećanja proizvodnje bušotine.

5.1. Povijest pridobivanja i osnovni podaci o bušotini X-1

Bušotina X-1 je u proizvodnji od 22. siječnja 1989. godine i proizvodi na plinsko-kondenzatnom polju X iz ležišta X. Prije puštanja u proizvodnju u listopadu 1987. godine u bušotini, na intervalu 3818,5-3795,0 m izvedeno je masivno hidrauličko frakturiranje. Prije frakturiranja bušotina je davala (Tehnička dokumentacija INA, 2017):

- $q_g = 40\,000 \text{ m}^3/\text{d}$ plina,
- $q_c = 24 \text{ m}^3/\text{d}$ kondenzata i
- $q_w = 10 \text{ m}^3/\text{d}$ vode,
- $p_t = 39 \text{ bar}$,

a nakon frakturiranja:

- $q_g = 81\,890 \text{ m}^3/\text{d}$ plina,
- $q_c = 77,55 \text{ m}^3/\text{d}$ kondenzata i
- $q_w = 14,12 \text{ m}^3/\text{d}$ vode,
- $p_t = 317 \text{ bar}$.

Kasnije 1995., 1997. i 1998. godine provedene su kemijske obrade, ali bez značajnih rezultata. Stoga je 2000. godine napravljeno refrakturiranje na intervalu 3818,5-3788,0 m i proizvodnost se povećala.

Prije radova dnevna proizvodnja iznosila je:

- $q_g = 13\,000 \text{ m}^3/\text{d}$ plina,
- $q_c = 16 \text{ m}^3/\text{d}$ kondenzata i
- $q_w = 2 \text{ m}^3/\text{d}$ vode,

- $p_t = 61$ bar,

dok je nakon refraktiranja proizvodnja bila:

- $q_g = 33\,000$ m³/d plina,
- $q_c = 36$ m³/d kondenzata i
- $q_w = 5$ m³/d vode,
- $p_t = 126$ bar.

Tijekom studenog 2014. prosječna proizvodnja iznosila je 2 000 m³ plina i 1 m³ kondenzata uz tlak na ušću od 27 bar. Tijekom 2015. godine zbog niskog radnog tlaka na ušću, bušotina je prestala s proizvodnjom. Prema analizi hidrodinamičkih i karotažnih mjerenja donesena je odluka da se na bušotini X-1 izvede hidrauličko frakturiranje u svrhu privođenja proizvodnji. Cilj je bio da se hidrauličkim frakturiranjem poveća indeks proizvodnosti i ekonomičnost crpljenja bušotine (Tehnička dokumentacija INA, 2017). U tablici 5-1. prikazane su karakteristike ležišta X za bušotinu X-1.

Prema podacima prikazanim u tablici 5-1, može se uočiti da je bušotina X-1 dobar kandidat za izvođenje hidrauličkog frakturiranja. Propusnost ležišta X iznosi 2,07 mD što je veće od uvjeta koji navodi da bi propusnost trebala biti veća od 0,1 mD. Nadalje, debljina ležišta je veća od 10 m, zasićenje plinom je veće od 50% te je ležišni tlak mnogo veći od tlaka napuštanja što garantira stabilnu proizvodnju još dugi niz godina.

Tehnički podaci o bušotini navedeni su na slici 5-1.

5.2. Program simulacije hidrauličko frakturiranja

Za projektiranje hidrauličkog frakturiranja INA upotrebljava programski paket MEYER. Da bi se dobili izlazni podaci: ponašanje tlaka u ležištu, širina i du-

Tablica 5-1. Karakteristike ležišta X za bušotinu X-1 (Tehnička dokumentacija INA, 2017)

Tip ležišta	masivno ležište u uzdignutom paleoreljevu
Kolektor	kvarciti T1-k
Starost ležišnih stijena	donji trijas
Pokrovne stijene	klastiti badenske starosti
Interval ležišta u plinu (početno stanje)	3782-3832 m
Kontakt plin/voda (početni)	3968 m (3860 m)
Ležišni tlak (početni)	334 bar (505,25 bar u početnoj fazi)
Temperatura ležišta	195°C (referentna dubina 3716 m)
Poroznost	10%
Propusnost	2,07 mD

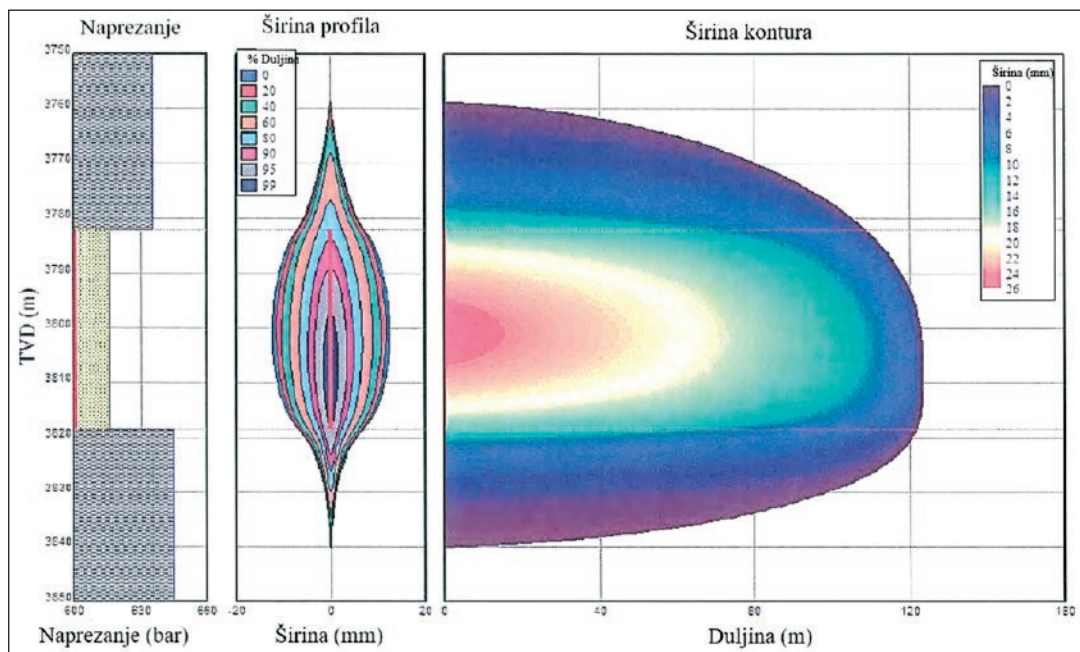
ljina pukotine, optimalna količina podupirača, trodimenzionalni prodor fluida te naprezanje u ležišnim stijenama, u program se moraju unijeti određeni ulazni podaci. Ti podaci obuhvaćaju podatke o bušotini (volumen, dimenzije tubinga, zaštitne cijevi, odklon, perforacije), podatke o ležištu (vrsta ležišne stijene i ležišnog fluida, filtracija fluida, propusnost i šupljikavost) te podatke o fluidu za frakturiranje (tip fluida, viskoznost, umreživači i vrsta podupirača).

Temeljem proračuna u software-u PROSPER, izračunata je proizvodnja bušotine nakon hidrauličkog frakturiranja. Korištenjem tih podataka i pro-

Status:	proizvodna-plinska			
Nadmorska visina ušća:				
Dubina:	po BS	4642,0 m		
	po EK	4644,0 m		
Zacjvljenje:	Uvodna kolona	ϕ 508,0 mm	223,5 m	zacimentirana do ušća
	I. Tehnička kolona	ϕ 339,7 mm	1760,0 m	zacimentirana do ušća
	II Tehnička kolona	ϕ 244,5 mm	3705,0 m	zacimentirana do ušća
	Proizvodna kolona	ϕ 177,8 mm	4205,6 m	zacimentirana do ušća
Cementni most:	3836 – 3849 m 3870 – 3884 m			
Mehanički čep:	3835,6 m 4003,0 m			
Vrh cementa u koloni:	4176,11 m			

Slika 5-1. Tehnički podaci o bušotini X-1 (Tehnička dokumentacija INA, 2017)

Slika 5-2. Prikaz podataka o širini i duljine pukotine te naprezanju u stijenama korištenjem računalne simulacije za hidrauličko frakturiranje (Tehnička dokumentacija INA, 2017)



grama Mprod i MNpv izračunati su različiti scenariji za poluduljine frakture. Izračunata je prognoza proizvodnje bušotine X-1 s frakturiranjem i bez njega. Na slici 5-2. prikazani su podaci o širini i duljini pukotine dobiveni simulacijom.

Usporedbom različitih opcija, dobivena je optimalna poluduljina od 110 m, širine 3,5 mm te je dan predizajn hidrauličkog frakturiranja. Za pokusno frakturiranje odlučeno je utisnuti: 50 m³ gela i 3 000 kg propanta 16/20 mesh dok je za hidrauličko frakturiranje odlučeno utisnuti: 528 m³ gela, od kojih je prethodnica 200 m³ te 149 000 kg propanta (20/40 mesh). Kontakt plin/voda određen je na osnovi analize karotažnih mjerenja i hidrodinamičkih mjerenja u bušotinama i nalazio se na apsolutnoj dubini od 3860 m. Statički tlak na dubini od 3803 m (težinska sredina perforacija) iznosio je 332,6 bar-a, a izmjerena temperatura na dubini 3819 m iznosila je 190°C (Tehnička dokumentacija INA, 2017).

5.3. Tijek radova

Napravljen je detaljni plan i program radova koji su prethodili hidrauličkom frakturiranju te plan radova koje je bilo potrebno izvesti nakon frakturiranja. Najprije je bilo potrebno obaviti pripremne radove prije samog vađenja proizvodne opreme, a to je uključivalo i gušenje bušotine obrađenom vodom (2% KCl). Nakon toga izvađena je proizvodna oprema i izvršeno je obušivanje permenetnog pakera te pročišćavanje kanala bušotine do dna. Potom je ugrađen tubing 88,9 mm i oprema za hidrauličko frakturiranje. Na ušće je stavljena protočna glava i

ispitana je hermetičnost protočne glave i zadnjeg tubinga i spojnice tlakom vode od 690 bar. Prije početka frakturiranja izvršena je kompletna cirkulacija u bušotini obrađenom vodom kako bi se uklonio eventualno probijeni plin iz kanala bušotine. Najprije je provedeno pokusno frakturiranje. Nakon pokusnog frakturiranja, pomoću dobivenih podataka (tlak u ležištu, propusnost formacije, parametri vezani za radni fluid) korigirali su se ulazni parametri za hidrauličko frakturiranje. Hidrauličko frakturiranje obavljeno je s utisnutih 445,3 m³ gela i 151 500 kg propanta (20/40 MaxProp). Nakon dobivanja cirkulacije na trip tank i zatvaranja prstenastog prostora, utisnuta je prethodnica 149,3 m³. U prethodnici je bio utisnut i obrok propanta u koncentraciji od 100 kg/m³. Nakon prethodnice u gel je dodan propant u koncentraciji od 100 do 900 kg/m³ te je sve protisnuto sa 15,7 m³ linearnog gela. Nakon provedbe frakturiranja bušotina je proizvodno opremljena i ispitana te su montirani površinski vodovi (baklja, vodovi, prigušni uređaj i bazen). Bušotina je osvojena sa savitljivim tubingom primjenom dušika (N₂). Potom su u bušotini obavljena hidrodinamička mjerenja, što uključuje mjerenje dinamičkog gradijenta i mjerenje VTS-om u trajanju od 2 dana uz konstantno mjerenje dinamičkog tlaka. Nakon toga, bušotina je puštena u proizvodnju (Tehnička dokumentacija INA, 2017).

Za ispiranje te punjenje tubinga prije samo frakturiranja korišten je linearni polimerni gel WF840, a njegov sastav vidljiv je u tablici 5-2. Kao glavni fluid za frakturiranje korišten je SAPPHIRE XF

fluid. Karakteristike i efikasnost fluida prethodno su laboratorijski ispitani za pretpostavljene ležišne uvjete i parametre utiskivanja. U tablici 5-3 prik-

zan je sastav fluida za frakturiranje, dok su u tablici 5-4 navedene ukupne količine korištenih aditiva i podupirača.

Tablica 5-2. Sastav WF840 fluida za ispiranje (Tehnička dokumentacija INA, 2017)

Naziv	Koncentracija	Mjerna jedinica	Opis
J594	1,2	kg/m ³	viskozifer (guar)
F112	1,0	l/m ³	surfaktant
L071	2,0	l/m ³	stabilizator gline
J471	0,0-0,12	kg/m ³	razbijač gela

Tablica 5-3. Sastav SAPPHIRE XF fluida za frakturiranje (Tehnička dokumentacija INA, 2017)

Naziv	Koncentracija	Mjerna jedinica	Opis
J629	18-20	l/m ³	agens za geliranje
J642	4	l/m ³	umreživač polimera
L400	4,5-5	l/m ³	octena kiselina, 10%
F112	1	l/m ³	pH pufer
L071	2	l/m ³	umreživač polimera
J481	0,024-0,12	kg/m ³	razbijač gela
J490	0,06-0,84	kg/m ³	razbijač gela- u kapsulama
J353	0,6-0,36	kg/m ³	stabilizator
J579	4,8	kg/m ³	vlakna

Tablica 5-4. Količine materijala i aditiva korištenih pri hidrauličkom frakturiranju (Tehnička dokumentacija INA, 2017)

Naziv materijala	Mjerna jedinica	Planirana količina	Korištena količina
20/40 ISP	kg	151 500	151 500
obrađena voda	m ³	30	14,2
linearni gel	m ³	49,6	43,9
SAPPHIRE XF50	m ³	235	270
SAPPHIRE XF45	m ³	270	159,4
J629	l	9989	9459
J642	l	2020	1750
L400	l	495	438
F112	l	585	510
L071	l	1100	1020
J481	kg	100,5	129
J490	kg	115,6	125
J353	kg	288	285
J579	kg	144	127
J594	kg	100	100

Sastav fluida SAPPHIRE XF50 i SAPPHIRE XF45 podešen je tako da njihova reološka svojstva odgovaraju ležišnim uvjetima. U ležište je utisnuto 151 500 kg propanta, veličine 20/40 mesh, što je ujedno odgovaralo projektiranoj količini definiranoj u planu izvedbe frakturiranja.

5.4. Rezultati hidrauličkog frakturiranja

Mjerenja koja su izvršena nakon hidrauličkog frakturiranja, pokazala su da je hidrauličko frakturiranje uspješno izvedeno. Hidrauličko frakturiranje provedeno je prema planu bez velikih odstupanja i krajnji rezultati odgovarali su pretpostavkama iz modela. Ukupno 151,5 tona propanta utisnuta je u bušotinu X-1, pri čemu je otprilike 148,8 t izravno utisnuto u sloj. Geometrija pukotina stvorenih hidrauličkim frakturiranjem procijenjena je nakon stimulacije, korištenjem podataka iz zapisa tlakova tijekom obavljanja hidrauličkog frakturiranja. Prosječna vodljivost pukotine procijenjena je na 784 mD·m, bezdimenzionalna vodljivost (Fcd) je 147, prosječna širina pukotine iznosila je 3,5 mm, prosječna visina 35,9 m a poluduljina je iznosila 266,8 m. Efikasnost fluida procijenjena je 38,7%. Tijekom 2014. godine prosječna proizvodnja bušotine X-1 iznosila je 2 000 m³ plina i 1 m³ kondenzata uz tlak na ušću od 27 bar. U travnju 2015. godine, izvršeno je hidrauličko frakturiranje i nakon toga je kontinuirano praćena proizvodnja. Mjerenja su pokazala značajan porast proizvodnje. Tijekom 2015. godine, prosječna dnevna proizvodnja plina iznosila je 16 200 m³, prosječna proizvodnja kondenzata 16 m³ a vode 10 m³. Također porastao je i tlak na tubing u otprilike 27 bar na 35 bar.

6. Zaključak

Hidrauličkim frakturiranjem stvara se jedna ili više pukotina koja će premostiti pribušotinsko oštećenje i tako olakšati protok nafte i plina iz ležišta u bušotinu. Budući da je stvorena pukotina veće vodljivosti (i propusnosti) od ležišta, rezultat će u konačnici biti veći indeks proizvodnosti bušotine. Uspješnost hidrauličkog frakturiranja uvelike ovisi o pravilnom odabiru kandidata za frakturiranje. Pri

tom, u obzir treba uzeti karakteristike ležišta (poroznost, propusnost, stlačivost stijene, debljinu ležišta, in-situ naprezanja...), uvjete koji vladaju u ležištu (tlak i temperaturu) te opremljenost i ispravnost bušotine. Od prvog hidrauličkog frakturiranja, koje je izvedeno 1947. godine na plinskom ležištu Hugoton u Kansasu, tehnologija se znatno unaprijedila i iskustvo stečeno tijekom više od sedamdeset godina značajno je unaprijedilo cijeli postupak. Današnje izvedbe frakturiranja provode se u mnogo većim opsezima pri čemu se koriste enormne količine fluida i podupirača. Također, mnogo je veći naglasak na zaštiti okoliša, stoga korišteni aditivi i materijali moraju biti detaljno ispitani u skladu sa strogim zakonskim regulativama.

Hidrauličkim frakturiranjem bušotine X-1, uspješno je povećana proizvodnja plina te kondenzata. Zajedničkom suradnjom geologa, ležišnih te proizvodnih inženjera nafte i plina napravljen je detaljni plan radova koje je bilo potrebno izvesti prije samog hidrauličkog frakturiranja te je opisan cijeli tijek radova za vrijeme frakturiranja i nakon izvođenja. Za projektiranje je korišten programski paket MEYER, kojim su određeni svi potrebni parametri za izvođenje frakturiranja. Temeljem proračuna u software-u PROSPER, izračunata je proizvodnja bušotine nakon hidrauličkog frakturiranja. Iz procijenjenih dimenzija frakture te poznatih podataka o ležištu određena je ukupna količina fluida i materijala koju je bilo potrebno utisnuti u bušotinu. Stvaranjem vodljive frakture, premostilo se pribušotinsko oštećenje što je u konačnici rezultiralo povećanjem dnevne proizvodnje plina, s otprilike 2 000 m³ na 16 000 m³. Ovaj slučaj pokazuje da je povrat uloženi sredstava ovim načinom stimulacije relativno brz. Također, povećanjem tlaka na ušću omogućen je duži vijek rada bušotine i veće pridobive rezerve plina s obzirom na tlak napuštanja ležišta i ograničenja transportnog sustava, tj. potreban tlak na ušću da se fluid transportira do plinske stanice. Rezultati hidrauličkog frakturiranja svakako su opravdali uložena sredstva te se čitav projekt pokazao kao ekonomski isplativ s obzirom na ostavarenu veću proizvodnju plina i kondenzata. Naravno, nerealno je uvijek očekivati pozitivne rezultate, stoga svaka bušotina, odnosno svaka izvedba frakturiranja zahtijeva individualni pristup.

Literatura

1. BRKIĆ, V., 2018. *Proizvodnja nafte i plina 2 –bilješke s predavanja, Rudarsko-geološko-naftni fakultet: Zagreb (neobjavljeno).*
2. BRKIĆ, V., 2019. *Obrade stijena u bušotinama –bilješke s predavanja, Rudarsko-geološko-naftni fakultet: Zagreb (neobjavljeno).*
3. ČIKEŠ, M., 1995. *Mogućnost povećanja pridobivih zaliha ugljikovodika primjenom postupka hidrauličkog frakturiranja- DISERTACIJA, Rudarsko-geološko-naftni fakultet: Zagreb.*
4. DONALDSON E. C., ALAM W., BEGUM N., 2013. *Hydraulic Fracturing Explained (Evaluation, Implementation and Challenges), Gulf Publishing Company, Houston, Texas*
5. FINK, J. H., 2013. *Hydraulic Fracturing Chemicals and Fluids Technology, Elsevier, Ujedinjeno Kraljestvo*
6. GAURINA-MEĐIMUREC, N., 2004. *Kemijske obrade ležišnih stijena – interna skripta RGN-a, Rudarsko-geološko-naftni fakultet: Zagreb.*
7. GAURINA-MEĐIMUREC, N., 2019. *Fludi za frakturiranje–bilješke s predavanja, Rudarsko-geološko-naftni fakultet: Zagreb (neobjavljeno).*
8. HABIJANEC Ž., 2014., *Hidraulička frakturiranja u nekonvencionalnim ležištima- što je tu novo?- PPT prezentacija, Zagreb.*
9. HEYDARABADI, F. R., MOGHADASI, J., 2010. *Criteria for Selecting a Candidate Well for Hydraulic Fracturing, Nigerija.*
10. INA-INDUSTRIJA NAFTE, d. d., 2017. *Tehnička dokumentacija.*
11. KEVRIĆ, I., 1999. *Utjecaj mehaničkih svojstava stijena na geometriju hidraulički stvorene frakture, tlak frakturiranja i količinu radnog fluida, Magistarski rad, Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Zagreb*
12. OLIGNEY, R., VLAKO, P., ECONOMIDES, M. J., VITTHAL, S., 1997. *Petroleum Well Construction, Chichester, Ujedinjeno Kraljestvo.*
13. PERIĆ, M., 2007. *Englesko-hrvatski enciklopedijski rječnik istraživanja i proizvodnje nafte i plina, Zagreb.*
14. PONGRATZ, R., 2019. *Formation Impairment and Stimulation –bilješke s predavanja, MU Leoben: Leoben (neobjavljeno).*
15. SMITH, M. B., MONTGOMERY, C. T., 2015 *Hydraulic fracturing, Boca Raton, Florida*
16. SUCHY, D. R., NEWELL, K. D., 2012. *Hydraulic Fracturing of Oil and Gas Wells in Kansas, Sveučilište u Kansasu, Kansas*
17. ŠIMIĆ, V., 2002. *Otpornost materijala 1, Školska knjiga, Zagreb*