

Lasersko perforiranje

Delinić, Dario

Master's thesis / Diplomski rad

2020

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:169:156479>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-04**



Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

RUDARSKO-GEOLOŠKO-NAFTNI FAKULTET

Diplomski studij općeg naftnog rudarstva

LASERSKO PERFORIRANJE

Diplomski rad

Dario Delinić

N-283

Zagreb 2020.

LASERSKO PERFORIRANJE

DARIO DELINIĆ

Diplomski rad je izrađen: Sveučilište u Zagrebu

Rudarsko-geološko-naftni fakultet

Zavod za naftno-plinsko inženjerstvo i energetiku

Pierottijeva 6, 10 000 Zagreb

Sažetak

Perforiranje je ključan segment opremanja kanala zacijevljene bušotine, a većina današnje proizvodnje nafte i plina ne bi bila moguća bez primjene ovog postupka. Aktualne metode perforiranja koriste se već gotovo sto godina, no one imaju svoje mane i prednosti. Razvojem lasera visoke snage se pojavila nova mogućnost za perforiranje zaštitnih cijevi, cementnog kamena i stijene, korištenjem snage svjetlosti. Laserski perforatori predstavljaju inovativnu i neeksplozivnu alternativu postojećim tehnologijama perforiranja kao što su mlazni perforatori ili perforatori sa zrnima. U ovome radu dan je pregled lasera koji imaju potencijal u naftnoj industriji i kao i njegove karakteristike koja ga čine pogodnim za perforiranje. Opisana su također laboratorijska ispitivanja koja su proveli različiti autori s pojedinim vrstama lasera u idealnim, ali i in-situ uvjetima, te je analizirana mogućnost primjene u stvarnim uvjetima.

Ključne riječi: mlazno perforiranje, laser, lasersko perforiranje, optička vlakna

Diplomski rad sadrži: 43 stranice, 20 slika, 13 referenci.

Jezik izvornika: Hrvatski

Diplomski rad pohranjen: Knjižnica Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta

Pierottijeva 6, 10 000 Zagreb

Mentor: Dr. sc. Borivoje Pašić, docent RGNF-a

Ocjenjivači: 1. Dr. sc. Borivoje Pašić, docent RGNF-a

2. Dr. sc. Zdenko Krištafor, redoviti profesor RGNF-a

3. Dr. sc. Željko Andreić, redoviti profesor RGNF-a

Datum obrane: 14.2.2020., Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Sveučilište u Zagrebu

LASER PERFORATION

DARIO DELINIĆ

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

Perforation is a crucial segment of well completion. In most cases, oil and gas production would not be possible without perforation. The current methods have been used for almost a hundred years, but they have as many flaws as they have advantages. The development of high-power lasers has introduced new options for the perforation of casing, cement rocks and rock formations, by using the power of light. High-power lasers are a non-explosive and innovative alternative to the existing technology. This thesis reviews promising lasers that are in the petroleum industry, and possess properties that make them suitable for perforation. Laboratory tests with different types of lasers will be covered to see how they cope in ideal, but also in in-situ conditions. Finally, the possibility of their implementation in the field will be analysed.

Keywords: jet perforation, laser, laser perforation, optic fiber

Thesis contains: 43 pages, 20 pictures, 13 references.

Original in: Croatian

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

Pierottijeva 6, 10 000 Zagreb

Supervisor: Assistant Professor Borivoje Pašić, PhD

Ocjenjivači: 1. Assistant Professor Borivoje Pašić, PhD

2. Full Professor Zdenko Krištafor, PhD

3. Full Professor Željko Andreić, PhD

Date of defense: February, 14, 2020

Sadržaj

| | |
|--|-----------|
| 1. UVOD | 1 |
| 2. PERFORIRANJE..... | 2 |
| 3. LASER..... | 6 |
| 3.1. Interakcija lasera i stijene | 9 |
| 3.2. Specifična energija | 9 |
| 3.2.1. Faktori koji utječu na specifičnu energiju | 10 |
| 3.2.2. Vrsta emisije | 11 |
| 3.2.2.1. Promjer zrake | 11 |
| 3.2.2.2. Vrijeme izlaganja stijene djelovanju lasera (ekspozicija) | 11 |
| 3.2.2.3. Gustoća snage lasera..... | 11 |
| 3.2.2.4. Širina pulsa | 11 |
| 3.2.2.5. Brzina ponavljanja | 12 |
| 3.2.2.6. Frakture | 12 |
| 3.2.2.7. Kompakcija mineralnih zrnaca stijene | 12 |
| 3.2.2.8. Raspadanje minerala stijene | 13 |
| 3.2.2.9. Toplinska vodljivost stijene | 13 |
| 4. PRVO LABORATORIJSKO ISPITIVANJE | 14 |
| 4.1. Laboratorijska ispitivanja dobivena upotrebom MIRACL-a..... | 15 |
| 4.2. Laboratorijska ispitivanja dobivena upotrebom COIL-a..... | 16 |
| 4.3. Mjerenje propusnosti ispitivanih uzoraka stijene | 16 |
| 4.4. Mjerenje poroznosti ispitivanih uzoraka stijene | 17 |
| 4.5. Svojstva perforacija | 18 |
| 4.6. Rezultati i analiza prvog testiranja | 19 |
| 5. UTJECAJ TLAKA..... | 22 |
| 5.1. Laboratorijsko ispitivanje utjecaja bušotinskih uvjeta na perforiranje zasićenih i nezasićenih uzoraka stijene | 23 |
| 5.2. Laboratorijsko ispitivanje utjecaja bušotinskih uvjeta na perforiranje zasićenih i nezasićenih „obloženih“ uzoraka stijene | 27 |

| | |
|---|-----------|
| 6. TERENSKA ISPITIVANJA PRIMJENE LASERSKE TEHNOLOGIJE ZA PERFORIRANJE STIJENE..... | 32 |
| 6.1. Prototip alatke za perforiranje formacije | 35 |
| 6.1.1. Elementi sustava neophodni za primjenu laserskih perforatora na terenu . | 36 |
| 6.1.1.1. <i>Optički kablovi</i> | 37 |
| 6.1.1.2. <i>Bušotinski optički sklop (oBHA)</i> | 38 |
| 7. ZAKLJUČAK..... | 41 |
| 8. LITERATURA | 42 |

Popis tablica

| | |
|--|----|
| Tablica 3-1. Usporeba parametara za industrijske lasere pri izlaznoj snazi od 4 kW..... | 8 |
| Tablica 4-1. Usporedba poroznosti prije i nakon djelovanja kemijskim kisik–jod laserom | 18 |
| Tablica 4-2. Rezultati mjerenja propusnosti i efikasnosti protoka kroz uzorak Berea pješčenjaka perforiran kemijskim deuterij–fluorid laserom..... | 20 |
| Tablica 5-1. Pokusi Berea pješčenjaka u visokotlačnoj ćeliji | 25 |
| Tablica 5-2. Pokusi Indiana vapnenca u visokotlačnoj ćeliji | 25 |

Popis slika

| | |
|---|----|
| Slika 2-1. Pojednostavljeni prikaz puške za mlazno perforiranje | 3 |
| Slika 3-1. Efikasnosti pojedinih lasera | 7 |
| Slika 4-1. Propusna stijenka pješčenjaka nakon primjene kemijskog kisik–jod lasera (uslikano elektronskim mikroskopom) | 14 |
| Slika 4-2. Nepropusna stijenka Berea pješčenjaka nakon primjene kemijskog kisik-jod lasera | 15 |
| Slika 4-3. Konturna karta propusnosti uzorka Berea pješčenjaka dobivena mjerenjem prije i nakon djelovanja kemijskog deuterij–fluorid lasera | 17 |
| Slika 4-4. Pukotina u zrncu kvarca stvorena nakon djelovanja topline na uzorak (uslikano elektronskim mikroskopom)..... | 19 |
| Slika 5-1. Triaksijalna ćelija dizajnirana za ispitivanje djelovanja lasera na uzorke stijene pri visokom tlaku | 23 |
| Slika 5-2. Vrijednosti specifične energije potrebne za lasersko perforiranje suhih i zasićenih uzoraka Berea pješčenjaka pod visokim tlakom | 26 |
| Slika 5-3. Vrijednosti specifične energije potrebne za lasersko perforiranje suhih i zasićenih uzoraka Indiana vapnenca pod visokim tlakom | 26 |
| Slika 5-4. Rezultati laboratorijskih perforiranja uzoraka stijene uz simuliranje postojanja čelične zaštitne cijevi i cementnog kamena | 28 |
| Slika 5-5. CT snimka uzroka vapnenca, čelične ploče i cementnog kamena perforiranog laserom | 29 |
| Slika 6-1. Laserska glava pričvršćena na biaksijalni sklop | 33 |
| Slika 6-2. Posebna laserska glava za perforiranje i prototip alatke za | 33 |
| Slika 6-3. In-situ perforacija u vertikalnom kanalu bušotine..... | 34 |
| Slika 6-4. Zakoni refrakcije i refleksije. Upadna zraka može biti refraktirana, reflektirana ili totalno reflektirana..... | 35 |
| Slika 6-5. a) Kolimator, b) Poseban sustav za ispiranje | 36 |
| Slika 6-6. Elementi sustava za lasersko perforiranje..... | 37 |
| Slika 6-7. Puška za lasersko perforiranje s dva otvora | 39 |
| Slika 6-8. Laserska puška orijentirana ravno za bušenje kanala bušotine | 40 |
| Slika 6-9. Laserska puška orijentirana bočno za perforiranje stijene | 40 |

Popis kratica

LASER – (engl. *Light amplification by stimulated emission of radiation*)

GTI – Institut za plinsku tehnologiju (engl. *Gas Technology Institute*)

COIL – infracrveni kemijski kisik–jod laser (engl. *chemical oxygen iodine laser*)

MIRACL – deuterij-fluorid laser (engl. *mid-infrared advanced chemical laser*)

Nd:YAG – laser s čvrstom jezgrom koji se sastoji od štapića itrij – aluminijevog granata dopiranog atomima neodimija (engl. *neodymium doped yttrium aluminum garnet*)

BPP – umnožak parametra snopa snage (engl. *beam parameter product*)

LED – svjetleća dioda (engl. *light emitting diode*)

CFE – efikasnost protoka kroz uzorak (engl. *core flow efficiency*)

oBHA - bušotinski optički sklop (engl. *optical bottom-hole-assembly*)

ZBLAN – fluoridno staklo s teškim metalima (**ZrF₄-BaF₂-LaF₃-AlF₃-NaF**)

1. UVOD

Perforiranje (propucavanje) je nužno kako bi se ostvarila komunikacija između kanala bušotine i ležišta u svrhu pridobivanja ugljikovodika i geotermalne vode te eventualne stimulacije ležišta. Ono je jedan od najčešće upotrebljivanih postupaka u zacijevljenim bušotinama. Namjena perforiranja je osigurati protok i komunikaciju između ležišta i bušotine. To se ostvaruje probijanjem otvora kroz zaštitne cijevi i cementni kamen sa zadovoljavajućom dubinom prodiranja perforacije u ležišnu stijenu. Postoji više tehnika perforiranja, a svaka mora biti usklađena s odgovarajućom tehnikom opremanja, ovisno o uvjetima u bušotini. Ukoliko se ne primjene odgovarajuće tehnike, može doći do oštećenja zaštitnih cijevi, ležišta ili samih perforacija. U ekstremnim slučajevima, kao posljedica loše planiranog i provedenog perforiranja, pojedina proizvodna zona ili cijelo ležište mogu biti značajno oštećeni i napušteni, ili mogu biti potrebni dijagnosticiranje oštećenja, stimulacijski radovi i ponovno perforiranje za koje će se utrošiti značajna sredstva. Perforiranje je nepovrativ postupak i potrebno je dobro planiranje prije njegova izvođenja.

Danas se u svijetu više od 90% perforacija izrađuje mlaznim perforatorima s oblikovanim eksplozivnim punjenjem. Primjena te tehnike uvjetovana je čvrstoćom stijene i temperaturom u bušotini na dubini perforiranja. Eksplozivi imaju ograničenje vezano s obzirom na temperature samozapaljenja i ono je maksimalno 260°C (Matanović i Moslavac, 2011).

Generalno, problem korištenja ove tehnike perforiranja je otpadni materijal koji kao sekundarni mlaz čepi perforaciju, zbija stijenu na stijenkama perforacije, smanjuje protočnost kroz perforaciju, te predstavlja sigurnosnu i zdravstvenu opasnost zbog rukovanja s eksplozivima. Navedeni se utjecaji mogu smanjiti, ali ne i eliminirati.

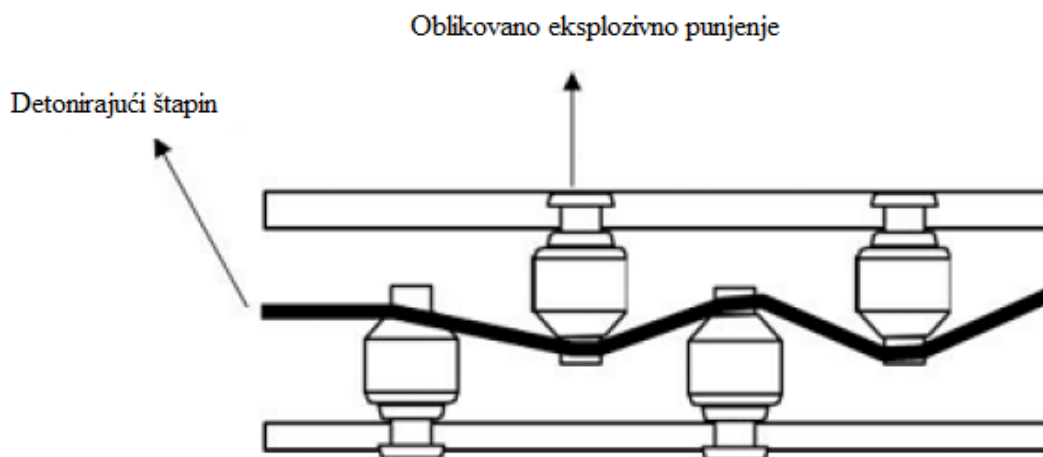
U ovome radu se predstavlja inovativna tehnika perforiranja u bušotinima pomoću lasera velike snage. Sagledati će se pojedine vrste lasera i njihova svojstva, te sposobnost da perforiraju zaštitne cijevi, cementni kamen i stijene. Analizirati će se laboratorijska ispitivanja u različitim uvjetima tlakova i mogućnost primjene u praksi.

2. PERFORIRANJE

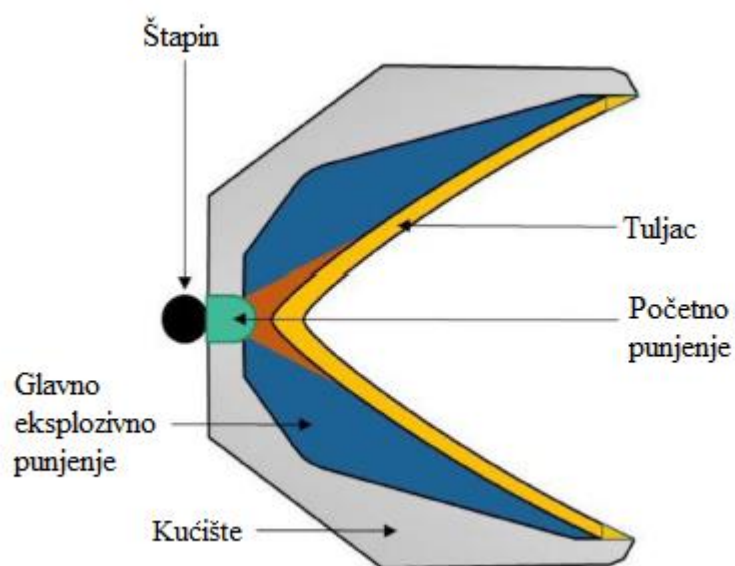
Prvi uređaji za perforiranje su se pojavili početkom dvadesetog stoljeća, odnosno točnije 1902. kada je Thomas E. Clark izumio alatku za perforiranje zaštitne kolone i formacije, koja je koristila mehanički perforator (engl. *lever*) koji je prodirao u zaštitnu cijev i stijenu, te se uvlačio u početni položaj kako bi se omogućio tok fluida u bušotinu iz izrađenog otvora. Clark i nekolicina ulagača su istraživali i nove tehnike za izradu perforacija koje su i implementirane početkom dvadesetog stoljeća, ali nažalost bez većeg uspjeha.

Stoga je industriji bila potrebna nova metoda za ostvarivanje komunikacije između kanala bušotine i ležišta te istodobno povećanje pridobivanja ugljikovodika. Tridesetih godina prošlog stoljeća Ira J. McCullough dizajnirao je alatku nazvanu puška za perforiranje, koja je mogla ispaliti metke kroz zaštitne cijevi u formaciju. Dizajnirani uređaj mogao je simultano ispaljivati metke čime se omogućilo željeno povećanje komunikacije između kanala bušotine i ležišta ugljikovodika te povećalo njihovo pridobivanje. Industrija je brzo prihvatila novu tehniku perforiranja, a varijacije te alatke dovele su do razvoja kumulativnih naboja eksploziva (engl. *shaped charge*) koji se nalazi danas u širokoj primjeni.

Slika 2-1. prikazuje pojednostavljen dizajn mlaznog perforatora. Na slici 2-2. prikazane su glavne komponente kumulativnog naboja. Temeljna tehnologija je razvijena tijekom Drugog svjetskog rata kao protutenkovsko oružje. Razvio ga je Henry Mohaupt, nakon čega ga je angažirao Fort Worth da modificira tehnologiju za perforiranje naftnih i plinskih bušotina (Batarseh et al., 2019).



Slika 2-1. Pojednostavljeni prikaz puške za mlazno perforiranje (Batarseh et al., 2019)



Slika 2-2. Glavne komponente oblikovanog eksplozivnog punjenja (kumulativnog naboja) (Batarseh et al., 2019)

Glavne komponente kumulativnih naboja su: štapin, početno punjenje, glavno eksplozivno punjenje, kućište i tuljac. Funkcija detonirajućeg štapina je detoniranje početnog punjenja (engl. *primer*), koje sadrži male količine izrazito eksplozivnog materijala. Glavno eksplozivno punjenje smješteno je unutar kućišta te zatvoreno tuljcem izrađenim od čelika ili bimetala (dvoslojne kombinacije bakra i cinka). Detoniranjem

glavnog eksplozivnog punjenja oslobađa se energija i stvara mlaz koji perforira zaštitnu cijev, cementni kamen i stijenu. Mlazni perforatori ostvaruju najveće dubine prodiranja u stijenama veće tlačne čvrstoće. Promjer perforacije varira od 8,4 mm do 19 mm, a duljina perforacije od 203 mm do 1220 mm.

Pri oblikovanju primarnog mlaza, onog koji stvara perforaciju, sudjeluje glavni dio eksplozivnog punjenja neposredno uz kućište, ovisno o dimenziji, obliku i gustoći punjenja, obliku kućišta i brzini rasprskavanja eksploziva. Rasprskavanje ostalog, pasivnog dijela eksploziva, širi se u stranu i ne pridonosi stvaranju primarnog mlaza, ali zato sudjeluje u stvaranju sekundarnog mlaza koji oštećuje perforaciju.

Najvažniji čimbenici koji utječu na dubinu prodiranja i promjer otvora perforacije su vezani uz tuljac. To su kut tuljca, materijal i debljina. Značajna je i konfiguracija naboja, uključujući razmak (udaljenost) od inicijalnog eksploziva (početno punjenje) do vrha tuljca. Utjecaj ima i raspored eksploziva unutar naboja i njegova gustoća jer određuju brzinu detonacije, iako se stvarno iskoristi samo 20% raspoložive energije eksploziva. Ispitivanja su pokazala da postoji međuovisnost između količine eksploziva i dimenzija kućišta naboja, tj. s povećanjem promjera i duljine kućišta naboja povećava se količina materijala koji sudjeluje u primarnom mlazu pri izradi perforacije.

Promjene tlaka u bušotini, te temperature i gustoće servisnog fluida zanemarivo utječu na performanse kumulativnih punjenja. Neke razlike u dubini prodiranja perforacije mogu se očekivati kod propucavanja u plinu, ali općenite dimenzije perforacija su veće ili jednake onima u tekućinama. Posebnu važnost treba pridati udaljenosti naboja od mete koju se može nazvati zračnost. Najčešće su u primjeni perforatori za opaljenje u nekoliko smjerova istovremeno. Dubina prodiranja i promjer otvora perforacije variraju s obzirom na udaljenost od mete, a najveće dubine prodiranja ostvaruju se kada je naboj priljubljen uz metu.

Važan čimbenik je i čvrstoća materijala–mete. Što je veća čvrstoća mete manja je probojnost. Mjerenjem u praksi dokazano je da povećanje granice tečenja materijala zaštitnih cijevi i debljine stijenke utječu na promjenu dubine prodiranja. Djelomičan utjecaj imaju i debljina stijenke zaštitnih cijevi, te debljina i kvaliteta cementnog kamena kao potpore (Matanović i Moslavac, 2011).

Svrha perforiranja je stvaranje protočnih kanala između ležišta i kanala bušotine kako bi se omogućilo pridobivanje nafte i plina. Na protočnost slojnih fluida kroz perforacije utječe duljina perforacije, promjer perforacije, broj perforacija na određenoj duljini kanala bušotine i njihov raspored. Stoga se optimiziranjem tih varijabli može bitno utjecati na pridobivanje ugljikovodika iz određenog ležišta. Zbog pojave visokog tlaka i temperature tijekom detoniranja glavnog eksplozivnog punjenja i izrade perforacije, dolazi do pojave zbivanja stijene uokolo stijenki izrađene perforacije čime se značajno smanjuje propusnost stijene u zbijenoj zoni.

U većini slučajeva su poželjne perforacije maksimalnog promjera i duljine, što korištenjem postojeće tehnologije nije uvijek moguće postići. Ovisno o dimenzijama oblikovanog punjenja mlaznog perforatora mogu se izraditi perforacije različite duljine i promjera. Duboka perforacija je poželjna jer se njome "zaobilazi" oštećena pribušotinska zona nastala bušenjem, a perforacija većeg promjera kako bi se smanjili otpori protjecanju.

3. LASER

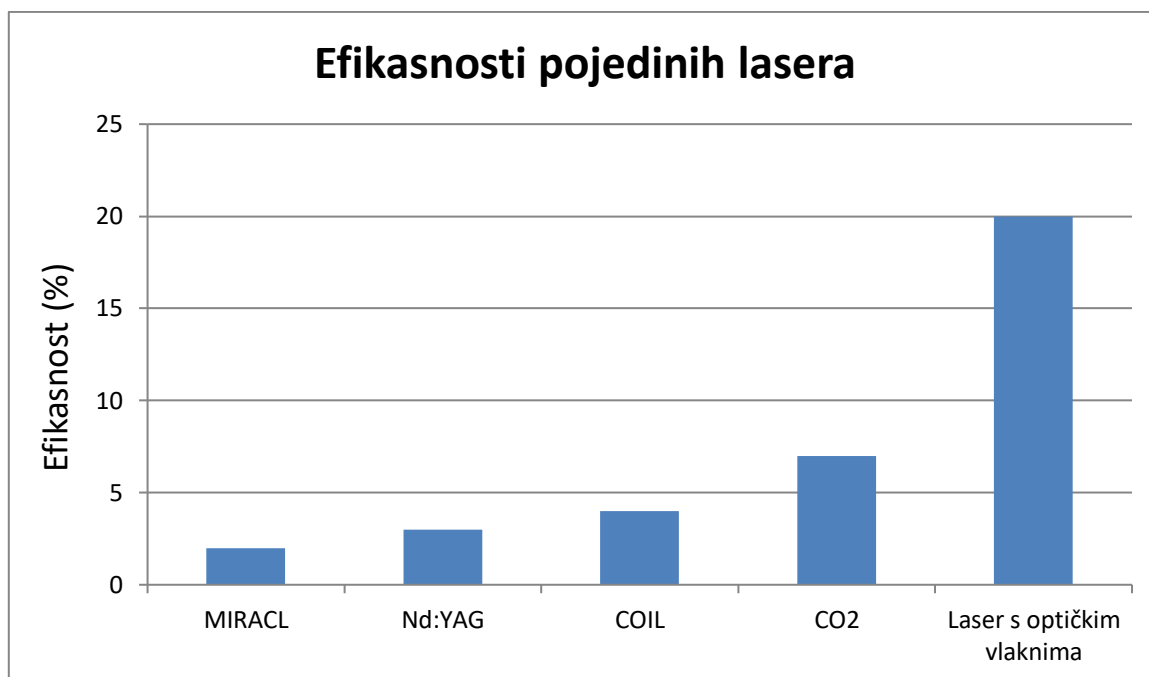
Riječ "laser" je akronim za amplifikaciju svjetlosti stimuliranom emisijom radijacije (engl. *LASER - Light amplification by stimulated emission of radiation*). To je uređaj za stvaranje i pojačavanje koherentnog elektromagnetskog, najčešće monokromatskog, usko usmjerenog zračenja. Induciranu stimuliranu emisiju predvidio je u svojim radovima Albert Einstein još 1916., a prvi optički laser je demonstrirao Theodore Maiman 1960. godine u Hughesovom istražnom laboratoriju (engl. *Hughes Research Laboratory*) u Kaliforniji (Batarseh et al., 2019). Prvi je laser proizvodio kratke pulseve energije u rangu mikrovata. U desetljećima koja su slijedila, izumljeni su novi tipovi lasera koji su imali snagu u megavovima. Danas, laserska industrija nudi širok spektar laserskih uređaja s različitim izlaznim snagama, frekvencijama i profilima laserskog snopa u vremenu i prostoru (kontinuirani i u pulsevima), a o njihovim karakteristikama ovisi i mogućnosti i ograničenja laserske tehnologije.

Laseri imaju široku primjenu te se između ostalog koriste i za optički zapis (CD, DVD, Blu-ray disk), u laserskim printerima, skenerima barkodova, optičkim kablovima, laserskoj kirurgiji i tretmanima za kožu, za rezanje i varenje materijala, u vojnoj i policijskoj primjeni (markiranje mete, mjerenje udaljenosti i brzine), te kod luksuznih automobila i svjetla.

Od 1997. godine Institut za plinsku tehnologiju (engl. *Gas Technology Institute, GTI*) i njegovi partneri istražuju primjenu lasera visoke snage za perforiranje i opremanje bušotina. U sklopu tih istraživanja ispitani su razni tipovi lasera kojima je izlazna snaga iznosila od jednog do 1200 kilovata:

- CO₂ laser koji kao aktivni medij koristi molekule ugljikovog dioksida;
- laser s čvrstom jezgrom koji se sastoji od štapića itrij-aluminijevog granata dopiranog atomima neodimija (Nd:YAG);
- infracrveni kemijski kisik-jod laser (engl. *chemical oxygen iodine laser - COIL*);
- infracrveni kemijski deuterij-fluorid laser (engl. *mid-infrared advanced chemical laser - MIRACL*) te
- laser s optičkim vlaknom (engl. *fiber laser - FL*).

Napredci u razvoju lasera s optičkim vlaknom ga čine najboljim kandidatom za primjenu kod perforiranja u bušotinama. Njegova prednosti nad ostalim komercijalnim laserima su visoka efikasnost izlazne snage od 20% (Slika 3-1.), električna efikasnost od 20 do 25%, malen prostor od 0,5 m² koji laser zauzima, jednostavno dovođenje laserskih zraka do dubine preko optičkog kabla, te nema potrebe za njegovim održavanjem.



Slika 3-1. Efikasnosti pojedinih lasera (Batarseh et al., 2005)

Napredci u razvoju industrijskih lasera visoke snage učinili su lasere s optičkim vlaknom komercijalno isplativom alternativom za ostale tipove lasera. Iako su bili dostupni od početaka razvoja laserske tehnologije, upotreba im je bila ograničena na pojačivače optičkog signala u telekomunikacijskoj industriji. Iako su i laseri visoke snage u teoriji postojali, njihov komercijalni industrijski razvoj kreće tek 2001. godine razvojem lasera s optičkim vlaknima snage 10 kW.

Lasери s optičkim vlaknima imaju brojne prednosti nad ostalim industrijskim laserima te su unaprijedili razumijevanje primjene lasera visoke snage za perforiranje bušotina kao i drugih metoda izrade i obrade bušotina. Jedno od najvažnijih dostignuća je povećanje iskorištenja energije (20%) koje je višestruko veće u odnosu na većinu drugih komercijalno dostupnih lasera. U tablici 3-1. su dani podaci o snazi, umnošku parametra snopa zrake (engl. *Beam parameter product - BPP*), stupnju iskorištenja energije, stabilnosti, osjetljivosti na odbojno zračenje, volumenu i mobilnosti različitih komercijalno dostupnih

lasera. Umnožak parametra snopa zraka (BPP) kvantificira kvalitetu laserske zrake i koliko može biti fokusirana na malu površinu. Ukoliko bi se pretpostavili identični uvjeti, standardnom Nd:YAG laseru bilo bi potrebno 200 kW električne snage, a laser s iterbijskim vlaknima oko 25 kW da bi se poslalo 4 kW laserske energije do mete. Znači da je za laser s optičkim vlaknima potrebno 87,5% manje ulazne snage (Gahan et al., 2004).

Tablica 3-1. Usporeba parametara za industrijske lasere pri izlaznoj snazi od 4 kW (Gahan et al. 2004)

| Parametar | Laseri | | | | |
|--|-----------------|-----------|-------------|-------------|-------------|
| | CO ₂ | LP-YAG | DP-YAG | DLS | FL |
| Snaga, kW | 1 - 30 | 1 - 5 | 1 - 4 | 1 - 4 | 1 - 30 |
| BPP, mm x mrad | 3 - 6 | 22 | 22 | >200 | 2 - 25 |
| Iskoristivost energije, % | 8 - 10 | 2 - 3 | 4 - 6 | 25 - 30 | 16 - 20 |
| Stabilnost izlazne snage | loša | loša | loša | dobra | veoma dobra |
| Osjetljivost na odbojno zračenje | visoka | visoka | visoka | niska | niska |
| Površina koju zauzima laser, m ² | 10 - 20 | 11 | 9 | 4 | 0,5 |
| Električna energija, kW | 40 - 50 | 133 - 200 | 67 - 100 | 13 - 16 | 16 - 25 |
| Voda za hlađenje, m ³ /h | 10 | 22 | 6 - 8 | 8 - 10 | <2 |
| Mobilnost | / | / | / | ograničena | visoka |
| Vrijeme nakon kojeg je potrebno zamjeniti lampu, h | / | 300 - 500 | 2000 - 5000 | 2000 - 4000 | >50 000 |

Vrste industrijskih lasera su: CO₂ laser; LP-YAG (engl. *lamp pumped*) koji kao izvor energije za laser koristi lampu (žarulju); DP-YAG (engl. *diode pumped*) je laser koji koristi LED diodu; DLS (engl. *diode laser system*) je diodni laser gdje dioda direktno proizvodi

lasersko svjetlo (problem je dobiti velike snage); FL (engl. *fiber laser*) je laser kod kojeg lasersko zračenje nastaje direktno u optičkom vlaknu, a pumpa se obično sa LED izvorom svjetla.

Kada se radi o diodama, bilo LED ili laserskim, radi se o malenom kristalu poluvodiča koji proizvodi svjetlo kada kroz njega teče električna struja. Kod LED dioda je svjetlo "obično" kao kod žarulje, ali je bolje prostorno usmjereno. Kod diodnog lasera je kristal tako oblikovan (i oblikom i izborom materijala) da direktno proizvodi lasersko svjetlo. Obje vrste dioda imaju vrlo veliku efikasnost, što osim uštede na električnoj energiji ima i prednost da se manje zagrijevaju kao što se vidi u potrebnoj količini vode za hlađenje.

3.1. Interakcija lasera i stijene

Kada laserska zraka udara u stijenu, energija zračenja lasera se prenosi na tri načina, odnosno refleksijom, refrakcijom i apsorpcijom. Stijene s ravnim površinama reflektiraju značajne količine energije zračenja dok stijene s grubim površinama uglavnom refraktiraju upadne zrake. Na refleksiju energije također utječe i sastav stijene (boje minerala), a refrakciju zraka uvjetuje valna duljina lasera. Jedino apsorbirana energija dovodi do zagrijavanja i razrušavanja stijene, dok refleksija i refrakcija predstavljaju gubitak energije. Stoga, udio energije koji se reflektira i refraktira treba biti sveden na minimum kako bi se maksimalizirala dostupna energija za zagrijavanje i razrušavanje stijene.

Laboratorijska istraživanja su pokazala da brzina širenja topline (engl. *heat diffusion*) u stijeni brzo nadilazi brzinu apsorpcije energije iz laserske zrake u stijenu. Kako apsorbirana energija raste, lokalna temperatura raste do temperature taljenja minerala, odnosno posljedično taljena stijene. Količina apsorbirane energije ovisi o sekundarnim utjecajima, koji uključuju nastanak otopljenih minerala, nastale plinove koji apsorbiraju laserske zrake, te nastale frakture u okolnim stijenama (Adenji, 2014).

3.2. Specifična energija

Stijene mogu biti razrušene mehanički ili termički. Mehaničko razrušavanje stijene je ostvareno kada naprezanje (tlak) premaši čvrstoću stijene. Isto tako, termičko razrušavanje se javlja kada primijenjena toplina premaši temperaturu taljenja minerala koji čine stijenu.

Laser razrušava stijenu na tri načina: spalacijom, taljenjem i isparavanjem. Spalacija je nuklearna reakcija pri kojoj atomska jezgra izbacuje nekoliko lakih čestica, obično neutrona (www.enciklopedija.hr, 2014).

Počevši od 2003., spomenuti GTI je nastavio istraživanja primijene optičkog lasera s iterbijem snage 5,34 kW za izradu dubokih perforacija. Kako bi odredili najbolje karakteristike lasera za perforiranje stijene, kvantificirali su energiju potrebnu za uklanjanje jediničnog volumena neke stijene, kao specifičnu energiju. Specifična energija (SE) je uobičajena jedinica za interakciju lasera i stijene pri uspoređivanju efikasnosti perforiranja, a definira se sljedećim izrazima:

$$SE = \frac{\text{Utrošena energija (J)}}{\text{Uklonjeni volumen (m}^3\text{)}}$$
$$SE = \frac{\frac{\text{Snaga lasera (W)}}{\text{Dimenzija zrake (m}^2\text{)}} \times \text{Vrijeme djelovanja (s)}}{\text{Dubina penetracije (m)}}$$

Iz navedenih izraza vidljivo je da specifična energija predstavlja stvarnu količinu utrošene energije za perforiranje stijene određenog volumena stijene, te da niže vrijednosti specifične energije ukazuju na lakše perforiranje stijene. Uklonjeni volumen ovisi o svojstvima laserske zrake i željenoj dubini perforacije, a utrošena energija o snazi lasera i vremenu djelovanja na stijenu.

3.2.1. Faktori koji utječu na specifičnu energiju

Različiti faktori utječu na dovođenje energije od lasera do stijene, uključujući promjenu medija kroz koji laserska zraka prolazi, taljenje stijene, fizikalne karakteristike stijene, kao i broj krhotina i oslobođenih plinova koji reagiraju sa zrakom lasera. Ovi se često nazivaju sekundarnim utjecajima. Ulazni parametri lasera i metode primjene se mogu prilagoditi kako bi se smanjili ranije spomenuti faktori koji mogu smanjiti efikasnost dovođenja energije od lasera do stijene. Prilagođavaju se vrsta emisije, promjer zrake, ekspozicija, vrijeme izlaganja stijene djelovanju lasera, gustoća snage lasera, širina pulsa i brzina ponavljanja.

3.2.2. Vrsta emisije (engl. discharge)

Laseri mogu emitirati zraku kontinuirano ili u pulsevima. Pulsirajući način rada omogućuje upotrebu plina za pročišćavanje izrađene perforacije (engl. *purging gas*) kako bi se uklonili plinovi nastali raspadanjem minerala. Posljedično, pulsirajući laseri obično smanjuju specifičnu energiju u odnosu na kontinuirane.

3.2.2.1. Promjer zrake

Što je veći promjer laserske zrake, to je potrebna manja specifična energija. Razlog je to što veća zraka ima manji intenzitet i pokriva veću površinu stijene bez da se fokusira na specifičnu točku. Prema tome, dolazi do manje taljenja, više spalacije i većih brzina penetracije u stijenu.

3.2.2.2. Vrijeme izlaganja stijene djelovanju lasera (ekspozicija) (engl. *exposure time*)

Istraživanja su pokazala da vrijednost specifične energije raste kako raste vrijeme izlaganja stijenske mase djelovanju lasera. Također je primijećeno da je za šejlove potrebna najmanja količina laserske energije kako bi se uklonio jedinični volumen stijene. Ovaj rezultat je nepovezan s činjenicom da u ranim fazama izloženosti laserskom zračenju zraka lasera reagira samo s površinom stijene, dok su sekundarni učinci kao npr. taljenje stijena i oslobađanje plinova minimalni. U tom slučaju, laser izravno dopire do stijene i spalatira ju. Kako raste vrijeme izloženosti, stijena se počinje taliti, troši se veća količina energije te bez ukljanjana razrušene stijene vrlo malo energije dopire do same stijene. Duže vrijeme izloženosti vodi i do toga da se više topline širi u minerale koji čine stijenu, što pak vodi do termalne ekspanzije, frakturiranja formacije i raspadanja minerala.

3.2.2.3. Gustoća snage lasera (engl. *power density*)

Gustoća snage lasera je snaga po jedinici površine laserske zrake. Što je manja gustoća snage lasera, to je manja potrebna specifična energija za razrušavanje stijene.

3.2.2.4. Širina pulsa (engl. *pulse width*)

Širina pulsa je naziv za trajanje pulsa, odnosno izražava se u jedinici vremena. Rezultati dobiveni na pješčenjacima za pulseve širine 1 ms i 2 ms pokazali su da se specifična energija smanjuje sa širinom pulsa kod sličnih snaga lasera. To se može objasniti s

količinom energije koja se primjeni na uzorku u jedinici vremena i vremenom hlađenja između pulseva. Pri određenoj snazi lasera, količina topline prenesena na stijenu pri širini pulsa od 1 ms je upola manja od one kod 2 ms. Drugim riječima, što je veća širina pulsa, to se više energije prenosi na stijenu tijekom njenog razrušavanja te je manje vremena za hlađenje stijene.

3.2.2.5. Brzina ponavljanja (engl. repetition rate)

Kako bi se ispitaio utjecaj brzine ponavljanja djelovanja zrake (brzine pulziranja) ostali parametri lasera zadržani su konstantnim. Specifična energija se smanjivala s brzinom ponavljanja pulseva. Uzrok toga je činjenica da pulsevi stvaraju cikličko grijanje i hlađenje uzorka stijene, što rezultira toplinskim naprezanjem te posljedično stvaranjem mikropukotine. Pri velikim brzinama ponavljanja, vrijeme između pulseva je kratko i uzorak nema dovoljno vremena da se ohladi, što smanjuje mikropukotine. Pri manjim brzinama ponavljanja, stijene imaju dovoljno vremena da se ohlade, time raste i razlika temperatura koja vodi do nastanka mikropukotina. Brzina ponavljanja ima manji utjecaj na specifičnu energiju od širine pulsa.

3.2.2.6. Frakture

Frakture nastale perforiranjem predstavljaju gubitke energije što rezultira većim vrijednostima specifične energije. To mogu biti mikrofrakture i makrofrakture. Mineralogija uzorka stijene znatno utječe na nastajanje fraktura. Na primjer, glina sadrži vodu koja će ispariti kada se stijena izloži visokim temperaturama. Time će se povećati volumen pare i tlak u porama te će doći do nastanka fraktura. Za razliku od pješčenjaka i šejlova, vapnenci sadrže male količine glina i kvarca. Iz navedenih razloga proizlazi da se frakture mogu očekivati u pješčenjacima i šejlovima, ali ne i u vapnencima. Na nastanak frakture utjecaj ima i poroznost, odnosno u slučaju manje poroznosti, zrnca imaju manje prostora za ekspanziju te nastaju frakture. Laboratorijskim ispitivanjima došlo se i do zaključka da na nastanak fraktura u laboratorijskim uvjetima značajan utjecaj ima i veličina uzorka, pri čemu su manji laboratorijski uzorci stijene jače frakturirani od onih većih.

3.2.2.7. Kompakcija mineralnih zrnaca stijene (engl. grain packing)

Količina rastaljenih minerala stijene je funkcija kompakcije samih mineralnih zrnaca. Što su zrnca gušće zbijena, više se topline prenosi i veće je taljenje stijena. Međutim, kod jako gusto pakiranih zrnaca, provođenje topline je jako izraženo što ima za posljedicu bržu

disipaciju topline i slabije taljenje minerala. Osim što se s povećanjem kompaktacije mineralnih zrna intenzivira taljenje stijene smanjuje se i specifična energija.

3.2.2.8. Raspadanje minerala stijene

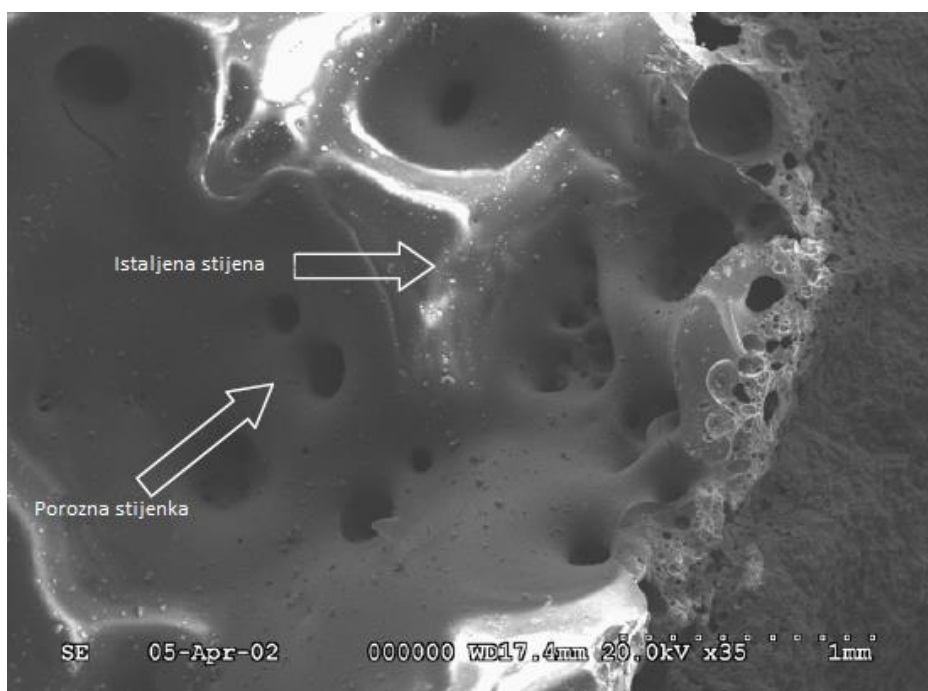
Neki minerali u stijenama se raspadaju pri visokim temperaturama i stvaraju plinove. Nastala taljevina i plinovi apsorbiraju dio energije lasera pa manje energije dolazi do stijene, što za posljedicu ima povećanje potrebne specifične energiju.

3.2.2.9. Toplinska vodljivost stijene

I toplinska vodljivost stijene utječe na efikasnost njenog razrušavanja pomoću lasera, odnosno što je veća toplinska vodljivost, to je bolja disipacija topline u stijeni i stoga će se manje minerala rastaliti. To znači i manju potrebnu specifičnu energiju. Međutim, kod jako gusto pakiranih zrnaca s visokom toplinskom vodljivošću, apsorbirana toplina uzrokuje naglo širenje zrnaca te nastaju frakture uslijed manje praznog prostora. U tom slučaju će zbog nastalih fraktura specifična energija rasti.

4. PRVO LABORATORIJSKO ISPITIVANJE

Institut za plinsku tehnologiju 1997. Godine započinje dvogodišnje istraživanje mogućnosti i isplativosti primjene lasera visoke snage, koje je razvila vojska Sjedinjenih Američkih Država, za bušenja i opremanja bušotina. Početno istraživanje interakcije lasera i stijena je trebalo ustanoviti imaju li laseri potrebnu snagu, mobilnost, pouzdanost, trajnost i sigurnost za ekonomično bušenje i opremanje naftnih i plinskih bušotina uz minimalni utjecaj na okoliš. Istraživanje je jasno pokazalo da je tadašnja laserska tehnologija i više nego dovoljna da razruši, rastali ili vaporizira bilo koju stijenu koja se može naći u podzemlju. Rastaljena stijena ili bolje reći rastaljena stijenka kanala bušotine ili perforacije može biti propusna (Slika 4-1.) ili nepropusna (Slika 4-2.) sa svojstvima sličnim keramici.



Slika 4-1. Propusna stijenka pješčenjaka nakon primjene kemijskog kisik–jod lasera (uslikano elektronskim mikroskopom) (Batarsehet al., 2003)

U spomenutim laboratorijskim istraživanjima korišteni su uzorci Berea pješčenjaka i Bedford vapnenca. Berea pješčenjak je sedimentna stijena sastavljena većinom (90 do 95%) od zrnaca kvarca povezanih materijalom koji sadrži silicij, željezo, kalcijev karbonat ili kombinaciju tih i drugih materijala. Berea pješčenjak je odabran kao primarni tip stijene zbog svojih relativno homogenih fizikalnih karakteristika te velike količine dostupnih

postojećih eksperimentalnih podataka dobivenih ispitivanjem na ovoj stijeni. Uzorci Bedford vapnenca su se sastojali od 97% kalcijeva karbonata.



Slika 4-2. Nepropusna stijenka Berea pješčenjaka nakon primjene kemijskog kisik-jod lasera (Batarseh et al., 2003)

U sklopu spomenutih istraživanja koje je proveo GTI provedena su dva seta laboratorijskih ispitivanja koristeći MIRACL i COIL tip lasera

4.1. Laboratorijska ispitivanja dobivena upotrebom MIRACL-a.

Kemijski deuterij–fluorid laser je korišten za perforiranje uzorka Berea pješčenjaka dimenzija 30 cm x 30 cm x 7,6 cm. Prosječna propusnost uzorka bila je od $2,467 \times 10^{-8} \text{ cm}^2$ do $3,454 \times 10^{-8} \text{ cm}^2$ a prosječna poroznost 23%. Maksimalna prosječna snaga lasera je iznosila 900 kW, promjer zrake je bio 5 cm, a valna duljina 3,8 mikrometra. Vrijeme izloženosti iznosilo je od 4 do 6 sekundi. Kontinuirana emisija zrake usmjerena je u horizontalnom smjeru okomito na bočni uzorak ispitivane stijene kako bi se simuliralo stvarne uvjete pri perforiranju. Uzorak je bio suh te je ispitivanje provedeno bez primjene tlaka.

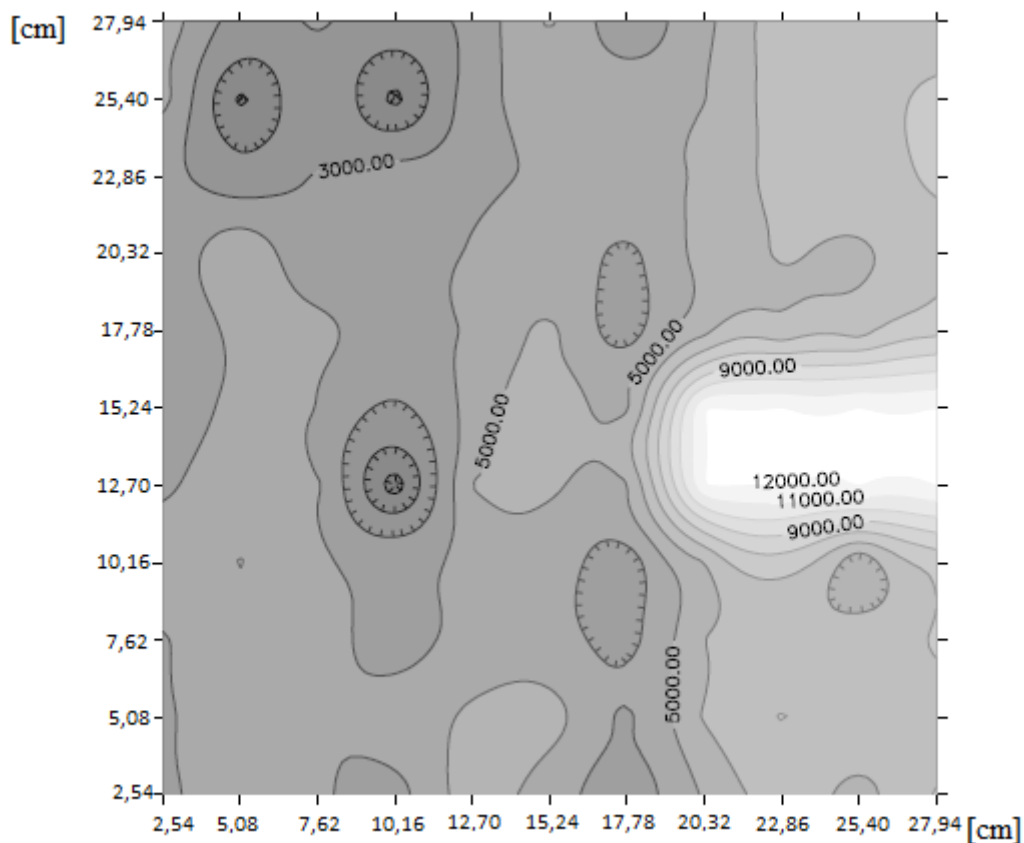
4.2. Laboratorijska ispitivanja dobivena upotrebom COIL-a

Nekoliko uzoraka stijene, uključujući spomenuti Berea pješčenjak, ležišni pješčenjak, Bedford vapnenac i šejl, su izloženi djelovanju infracrvenog kemijskog kisik–jod lasera. Uzorci korišteni za ovo ispitivanje bili su valjkastog oblika, vanjskog promjera 5 cm i unutarnjeg promjera 2,5 cm, te duljine 5 cm. Maksimalna prosječna snaga lasera bila je 6 kW, emisija zrake promjera 0,6 cm bila je kontinuirana, uz valnu duljinu od 1,3 mikrometra te vrijeme izloženosti od 8 s.

Budući da su odabrane jezgre predstavljale različite litološke formacije, na uzorcima su provedene analize prije i nakon djelovanja lasera, uključujući određivanje mineraloškog sastava stijena, identificiranje postojećih i novonastalih fraktura i termalna analiza. Mineraloški sastav uzoraka prije i nakon djelovanja lasera dobiven je iz izbrusaka (preparata) (engl. *thin section*), difrakcije rendgenskim zrakama (engl. *x-ray diffraction*) i skeniranja elektronskim mikroskopom. Promjene u svojstvima stijena ovise o njenoj toplinskoj vodljivosti, temperaturi taljenja, mineraloškom sastavu i cementaciji mineralnih zrna.

4.3. Mjerenje propusnosti ispitivanih uzoraka stijene

Mjerenje propusnosti svakog uzorka ovisilo je prvenstveno o obliku i dimenzijama samih uzoraka. Propusnost Berea pješčenjaka dimenzije 30 cm x 30 cm x 7,6 cm na kojem su se ispitivanja provodila MIRACL-om, mjerenje je izvedeno permeametrovom PDPK–200 (engl. *Pressure Decay Profile Permeameter*) kako bi se odredila propusnost prije i nakon djelovanja lasera. Nakon provedenih ispitivanja, mjereni su podaci korišteni za generiranje konturne skice promjene propusnosti kao posljedice djelovanja lasera (Slika 4-3.). Permeametar i porozimetar CMS-300 (engl. *Core Measurement System*, CMS-300) korišten je za mjerenje propusnosti valjkastih jezgri prije djelovanja lasera, ali se nije mogao koristiti nakon djelovanja lasera (www.corelab.com). Kod Berea pješčenjaka je došlo do porasta propusnosti od 2%, dok je kod vapnenca taj porast iznosio 33% a kod Šejla 28%, a najbolji rezultati su dobiveni na ležišnom pješčenjaku gdje je porast propusnosti iznosio 171%.



Slika 4-3. Konturna karta propusnosti uzorka Berea pješčenjaka dobivena mjerenjem prije i nakon djelovanja kemijskog deuterij–fluorid lasera (Batarseh et al., 2003)

4.4. Mjerenje poroznosti ispitivanih uzoraka stijene

Poroznost uzoraka prije djelovanja lasera na njih dobivena je iz volumetrijskog računa, permeametrom i porozimetrom CMS-300. Akustičkim profiliranjem i iz izbrusaka (engl. thin slices) se poroznost mjerila prije i nakon djelovanja laserom. U tablici 4-1. su prikazane su izmjerene vrijednosti poroznosti ispitivanih uzoraka stijene dobivene primjenom različitih metoda mjerenja.

Tablica 4-1. Usporedba poroznosti prije i nakon djelovanja kemijskim kisik–jod laserom (Batarseh et al., 2003)

| Uzorak | CMS-300 | Mjerenje na izbruscima | | Akustično mjerenje | |
|--------------------|--------------|------------------------|--------------|--------------------|--------------|
| | Prije lasera | Prije lasera | Nakon lasera | Prije lasera | Nakon lasera |
| Berea pješčenjak | 0,23 | 0,25 | 0,4 | 0,21 | 0,33 |
| Ležišni pješčenjak | 0,06 | 0,02 | 0,02 | 0,05 | 0,06 |
| Vapnenac | 0,2 | 0,18 | 0,4 | 0,12 | 0,31 |
| Šejl | 0,02 | 0,01 | 0,03 | 0,01 | 0,08 |

4.5. Svojstva perforacija

Jedan od parametara korišten kao indeks za mjerenje svojstva perforacija bila je efikasnost protoka kroz jezgru (engl. *Core Flow Efficiency*, CFE):

$$CFE = \frac{k_p}{k_i}$$

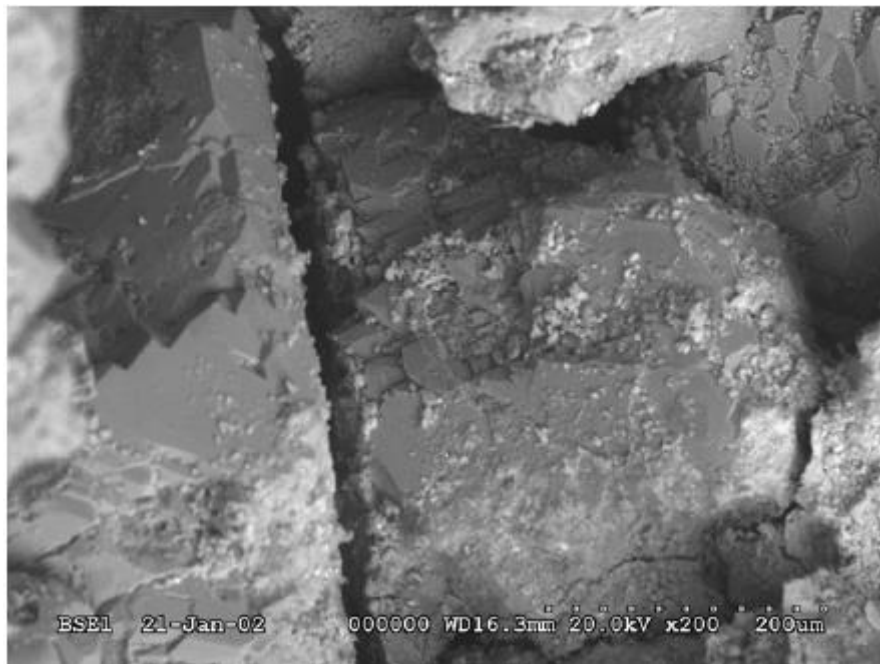
Gdje je k_p efektivna propusnost perforirane stijene, a k_i je idealna propusnost neoštećene stijene (početna propusnost uzorka) u jedinici površine (m^2). Jednadžba pokazuje jaku ovisnost CFE o propusnosti perforirane zone. Ako je perforirana zona oštećena, CFE će biti manji, što će utjecati na protok slojnog fluida i na davanje bušotine dok vrijednost 1 označava da nije došlo do oštećenja perforirane zone. U većini slučajeva CFE varira između 0,65 i 0,85. Također, na temelju praktičnih iskustava uočeno je da nakon mlaznog perforiranja dolazi do smanjenja propusnosti za 20% (Halleck, 1997). Također, prosječna debljina oštećene zone je oko 1,5 puta veća od promjera perforacije kada se koriste mlazni perforatori (Batarseh, 2003).

Nekoliko studija je provedeno kako bi se okarakteriziralo i razumjelo oštećenje uzrokovano mlaznim perforiranjem, te kvantificirao utjecaj istoga na davanje bušotina (Blok et al., 1996). Primjena dostatnog podtlaka (engl. *surge*) ili većeg davanja bušotina su

postupci korišteni za uklanjanje krhotina zadržanih u tunelu perforacije, iako se sve krhotine ne mogu ukloniti iz perforacije. Povećano davanje bušotine može za posljedicu imati destabilizaciju zrnca u formaciji i izazvati pokretanje slojnog pijeska pa stoga ima ograničenu primjenu.

4.6. Rezultati i analiza prvog testiranja

Učinkovitost djelovanja lasera visoke snage na stijenu mjeri se količinom topline prenesene na uzorak stijene. Količina topline prenesena na jedinicu volumena stijene po jedinici vremena je definirana kao toplinska vodljivost stijene. Veća toplinska vodljivost rezultira većim širenjem prenesene topline. Visoke temperature uzrokuju dehidraciju glina (npr. gline u šejlovima), nastajanje mikropukotina u zrcima kvarca (npr. u pješčenjacima) i disocijaciju (raspadanje molekula na sastavne ione) karbonata u vapnencima. Svaki od ovih mehanizama rezultira povećanjem propusnosti i poroznosti. Razvoj mikropukotina ovisi o udjelu kvarca i postojećim šupljinama u stijeni. Kako se toplinska energija akumulira u zrcu kvarca, ono ekspanzira, a zatim kontrahira uz hlađenje. Ekspanzija i kontrakcija dovode do razvoja mikropukotina unutar zrna. Slika 4-4. prikazuje pukotine nastale djelovanjem lasera na zrcu kvarca u Berea pješčenjaku.



Slika 4-4. Pukotina u zrcu kvarca stvorena nakon djelovanja topline na uzorak (uslikano elektronskim mikroskopom) (Batarseh et al., 2003)

Mali volumen pornog prostora također utječe na formiranje mikropukotina tijekom ekspanzije i kontrakcije kvarca. Kada kvarc expandira u uzorku s manjim pornim volumenom, zrnca sudaraju jedno o drugo zbog nedovoljnog prostora za ekspanziju, što rezultira nastajanjem mikropukotina.

U vapnencima su promjene u propusnosti bile minimalne uslijed slabije toplinske vodljivosti u usporedbi sa pješčenjacima, te niskog udjela glina.

Visoke temperature koje se razvijaju tijekom djelovanja lasera oslabile su stijenu jer razvoj mikropukotina i dehidracija glina dovode do povećanja slobodnog prostora unutar same stijene. Promjene u nekim stijenama su bile značajnije nego u drugima, poput promjena u vapnencima i šejlovima u usporedbi s onima u pješčenjacima.

Tablica 4-2. Rezultati mjerenja propusnosti i efikasnosti protoka kroz uzorak Berea pješčenjaka perforiran kemijskim deuterij–fluorid laserom (Batarseh et al., 2003)

| Udaljenost (cm) | Propusnost ($\times 10^{-12}$ m ²) | | Porast propusnosti (%) | CFE |
|-----------------|---|--------------|------------------------|------|
| | Prije lasera | Nakon lasera | | |
| 2,54 | 3400 | 3410 | 0,3 | 1,00 |
| 5,08 | 3454 | 4240 | 22,75 | 123 |
| 7,62 | 3456 | 3980 | 15,16 | 1,15 |
| 10,16 | 3245 | 2830 | -12,79 | 0,87 |
| 12,70 | 3298 | 4350 | 31,89 | 1,32 |
| 15,24 | 3254 | 12000 | 368,78 | 3,69 |
| 17,78 | 3416 | 12000 | 351,29 | 3,51 |
| 20,32 | 3245 | 12000 | 368,78 | 3,70 |
| 22,86 | 3365 | 12000 | 356,61 | 3,57 |
| 25,40 | 3498 | 12000 | 343,05 | 3,43 |
| 27,94 | 3299 | 12000 | 363,75 | 3,64 |
| 30,48 | 3456 | 12000 | 347,22 | 3,47 |

Efikasnost protoka fluida kroz uzorak na koji se djelovalo MIRACL-om izračunata je na temelju mjerenja propusnosti uzorka stijene (Tablica 4-2.). Iz prikazanih podataka vidljivo je da je došlo do povećanja propusnosti zbog visoke toplinske vodljivosti uzorka Berea pješčenjaka. U perforaciji (kao na slici 4-3.) je CFE varirao od 3,43 do 3,70, što je iznimno visoka vrijednost u usporedbi s CFE kod konvencionalnih metoda perforiranja koji iznosi 0,65 do 0,85. Mjerenja su također ukazala na to da nigdje u bloku nije bilo kompaktirane zone, nego samo povećanje CFE u stijeni oko perforacije.

Veličina, tip, oblik, snaga i smjer laserske zrake mogu biti precizno kontrolirani da simuliraju veličinu, oblik, duljinu i kut ulaska perforacije u stijenu. Ovisno o željenoj primjeni, stijenka perforacije može biti čista u konsolidiranim formacijama ili može biti pretvorena u čvrst, propusan istaljeni zid u nekonsolidiranim formacijama.

Uočeno je i da se primjenom lasera visoke snage povećava poroznost i propusnost stijene u perforiranoj zoni. Promjene u svojstvima stijena ovisile su o njenim toplinskim svojstvima i o mineraloškom sastavu. Veće toplinske vodljivosti rezultirale su boljom distribucijom topline u stijeni, stoga i povećanjem propusnosti i poroznosti. Rezultati laboratorijskih ispitivanja pokazali su da je povećanje propusnosti u pješčenjacima i do 171%, te da ono varira ovisno o tipu stijene. Iste zakonitosti uočene su i kod mjerenja poroznosti.

5. UTJECAJ TLAKA

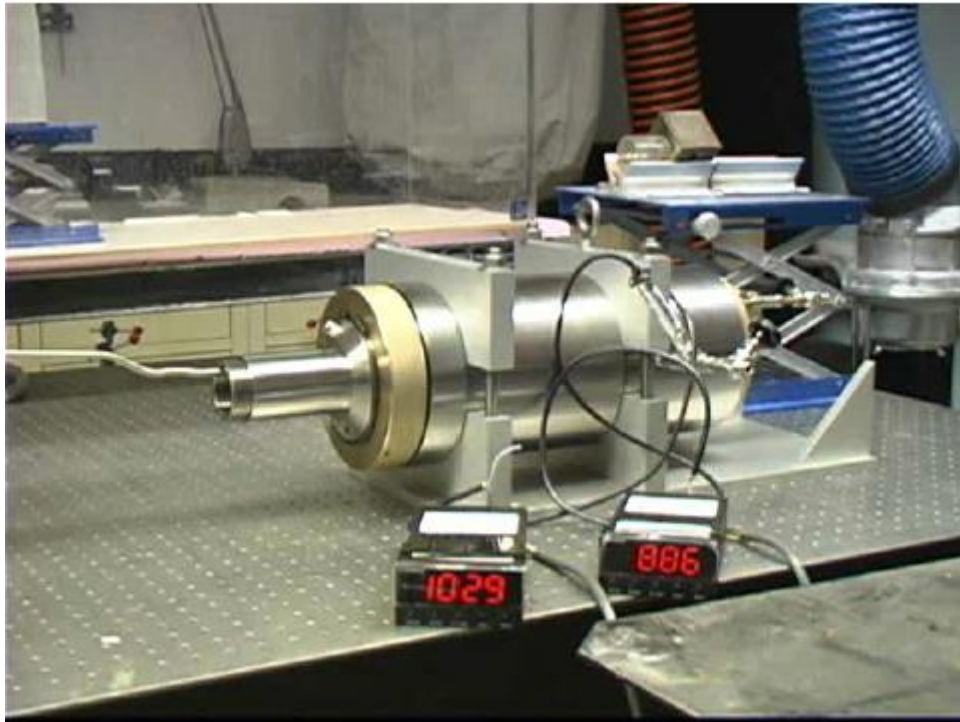
Sva prethodno opisana laboratorijska ispitivanja provedena su pod atmosferskim uvjetima u laboratoriju. Idući je zadatak bio istražiti utjecaj tlaka u bušotini na djelovanje lasera. Gahan i suradnici pozabavili su se ovom problematikom, a svoje rezultate su obavili u radu "*Učinak podzemnih uvjeta tlaka na perforiranje laserima visoke snage*". U njihovim laboratorijskim ispitivanjima mjerena je specifična energija pri djelovanju lasera u različitim uvjetima tlaka kako bi se napravila kvantitativna usporedba.

Iako je na temelju ranije provedenih laboratorijskih ispitivanja, laserska tehnologije pokazala obećavajuće rezultate u perforiranju stijene, utjecaj tlaka u podzemlju nije bio istražen. Kako bi se provela ispitivanja pri visokom tlaku, dizajnirana je triaksijalna ćelija koja dozvoljava primjenu različitih vrijednosti tlaka simulirajući stvarne uvjete u kanalu bušotine tijekom perforiranja. Na triaksijalnoj ćeliji nalazio se prozor koji je omogućavao djelovanje lasera na uzorak i iznošenje materijala razrušenog laserima.

Za potrebe ovog ispitivanja korišten je laser s optičkim vlaknom snage 5,34 kW s valnom duljinom emitirane zrake od 1,07 mikrona. Triaksijalna ćelija dizajnirana je da izdrži tlak od 206 bar te istovremeno omogući djelovanje laserske zrake na stlačeni valjkasti uzorak stijene dimenzija 10 cm promjera i 15 cm duljine kroz safirni prozor.

Između safirnog prozora i jezgre je komora koja simulira kanal bušotine (engl. *wellbore chamber*) i u kojoj je moguće narinuti tlak kako bi se simulirali stvarni uvjeti tijekom ispitivanja. Uvjeti ravnoteže su se simulirali atmosferskim tlakom u toj komori i bez pornog tlaka u uzorku stijene, dok su se uvjeti podtlaka simulirali atmosferskim tlakom u komori i pornim tlakom u uzorku stijene.

Otvori za izbacivanje krhotina i drugih materijala nalaze se na komori koja simulira kanal bušotine, a dizajnirani su tako da minimiziraju izlaganje lasera materijalima izbačenim iz uzorka tijekom procesa djelovanja lasera. Opisana visokotlačna triaksijalna ćelija prikazana je na slici 5-1.



Slika 5-1. Triaksijalna ćelija dizajnirana za ispitivanje djelovanja lasera na uzorke stijene pri visokom tlaku (Gahan et al., 2005)

Za potrebe ovog ispitivanja nekoliko uzoraka jezgri je pripremljeno iz Berea pješčenjaka i Indiana vapnenca. Također su pripremljeni i obloženi uzorci na način da se izbušila rupa promjera 5 cm i dubine 5 cm na sredini baze valjkaste jezgre, a zatim se zacementirala čelična pločica promjera 5 cm i debljine 1,3 cm, kako bi se simulirali stvarni uvjeti u kanalu bušotine gdje se nalaze zaštitna cijev, cementni kamen i stijena. Korištenjem čeličnih pločica manjih promjera osiguralo se da gumeni rukavac ćelije neće biti u kontaktu s naglo užarenom čeličnom pločicom.

5.1. Laboratorijsko ispitivanje utjecaja bušotinskih uvjeta na perforiranje zasićenih i nezasićenih uzoraka stijene

Početni testovi su provedeni na jezgrama Berea pješčenjaka i Indiana vapnenaca u različitim uvjetima aksijalnih, pornih i svestranih tlakova (engl. *confining pressure*), dok su parametri lasera u svim slučajevima bili identični. Kontinuirano je primijenjena puna izlazna snaga lasera s iterbijskim vlaknima od 5,34 kW na svaki uzorak kroz safirni prozor ćelije, zrakom promjera 0,89 cm u trajanju od 8 sekundi. Vrijeme djelovanja laserskom zrakom proračunato je iz prethodnih ispitivanja kako bi se ostvarilo prodiranje laserske

zrake u jezgru bez rizika da se probije puna duljina ispitivanog uzorka i eventualno ošteti ćelija.

Provedeno je pet ispitivanja na nezasićenim uzorcima svake stijene. Laboratorijsko ispitivanje 1 je bilo temeljno ispitivanje budući da je provedeno za svaki tip stijene i pri uvjetima atmosferskog tlaka. Laboratorijsko ispitivanje 2 provedeno je na svakoj stijeni sa svestranim tlakom i aksijalnim tlakom od 69 bar. Laboratorijsko ispitivanja 1 i 2 provedena su u ravnotežnim uvjetima odnosno simulirani porni tlak bio je jednak simuliranom tlaku u kanalu bušotine. Budući je simulirani tlak unutar same jezgre bio jednak atmosferskom, za ispiranje nabušenih čestica korišteno je visokotlačno plinsko ispiranje pod tlakom od 6 bar kroz mlaznicu promjera 6,4 mm.

Zatim je provedeno treće laboratorijsko ispitivanje na svakom tipu stijene s istim uvjetima tlaka kao u drugom ispitivanju, ali je u jezgri porni tlak iznosio 60 bar. Tijekom provođenja trećeg ispitivanja nije bilo potrebno koristiti plinsko ispiranje jer je lasersko perforiranje provedeno u uvjetim podtlaka, odnosno simulirani porni tlak bio je veći od simuliranog tlaka u kanalu bušotine. Dijelovi stijene razrušeni djelovanjem lasera uklonjeni su iz stlačene jezgre kroz ranije spomenute otvore tijekom rada lasera.

Provedena su još dva laboratorijska ispitivanja ponavljajući drugi odnosno treći, ali s dvostrukim vrijednostima tlakova. Četvrti eksperiment proveden je sa svestranim i aksijalnim tlakom pri 138 bar i s plinskim ispiranjem. Peto laboratorijsko ispitivanje provedeno je sa svestranim i aksijalnim tlakom pri 138 bar i pornim tlakom oko 110 bar bez ispiranja plinom. Rezultati provedenih ispitivanja utjecaja tlakova na efikasnost laserskih perforatora prikazani su u tablici 5-1. za pješčenjake i tablici 5-2. za vapnenca.

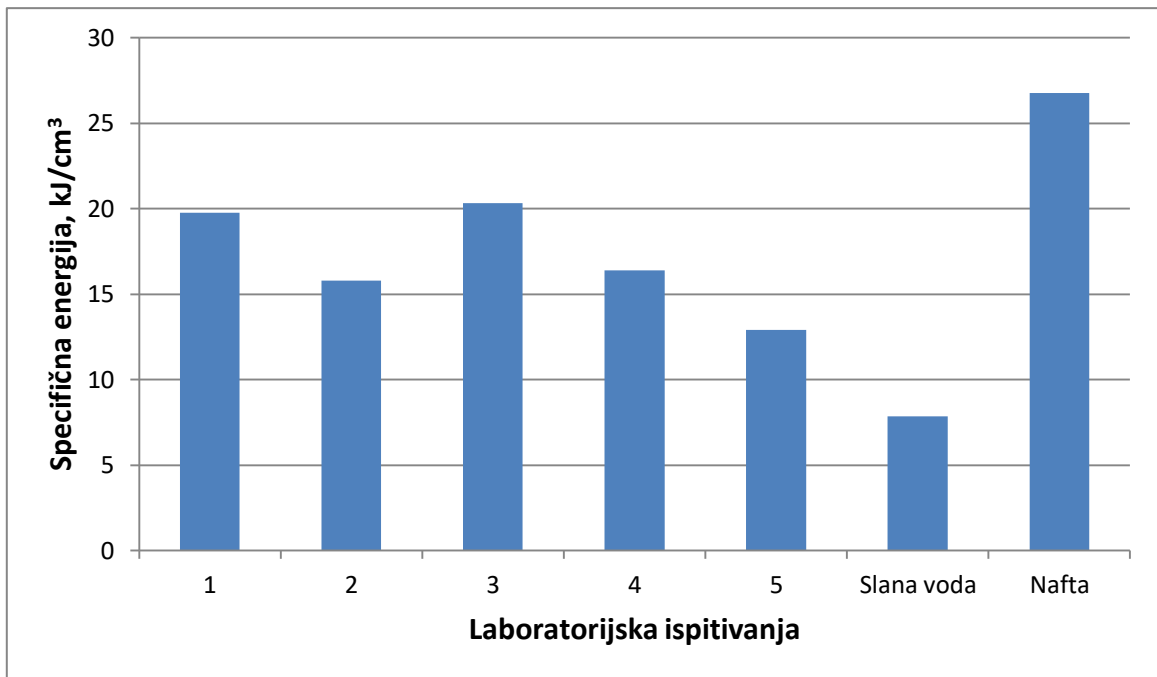
Kako bi se bolje razumjelo djelovanje lasera u in-situ uvjetima, u prisutnosti ležišnih fluida, jezgre pješčenjaka i vapnenca su zasićene otopinama slane vode i tekućim ugljikovodicima prije perforiranja laserom. Slana voda je pripremljena kao otopina 50 ppm natrijeva klorida, a ugljikovodik je predstavljala rafinirana mješavina nafte s gustoćom 840 kg/m³. Uzorci jezgri su prethodno stavljani u vakuum te zatim zasićeni slanom vodom ili naftom minimalno 24 sata prije samog ispitivanja. Uvjeti tlaka pri kojima su provedena ispitivanja i postavke lasera bili slični onima u četvrtom laboratorijskom ispitivanju za svaki tip stijene. Rezultati ispitivanja efikasnosti lasera u uvjetima visokog tlaka provedenim na zasićenim uzorcima stijene prikazani su u tablicama 5-1. i 5-2., te na slikama 5-2. i 5-3.

Tablica 5-1. Pokusi Berea pješčenjaka u visokotlačnoj ćeliji (Gahan et al., 2005)

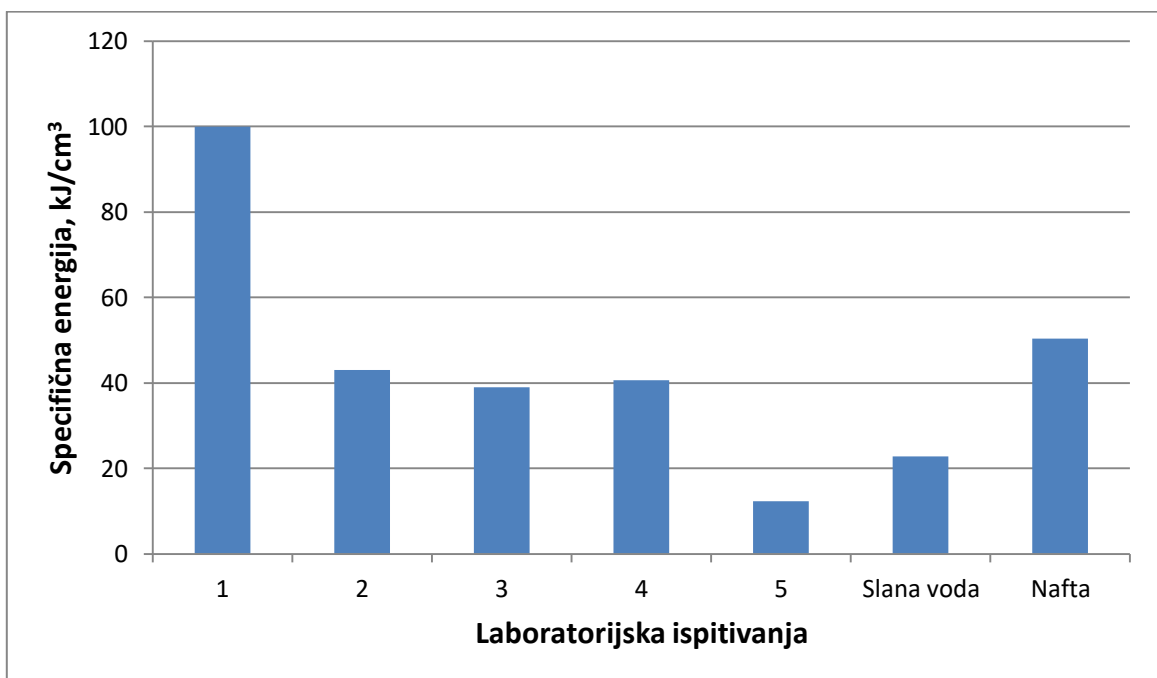
| Laboratorijsko ispitivanje | Conf. Tlak (bar) | Aksijalni tlak (bar) | Porni tlak (bar) | Uklonjeni volumen (cm ³) | Specifična energija (kJ/cm ³) |
|----------------------------|------------------|----------------------|------------------|--------------------------------------|---|
| 1 | 0 | - | - | 2,03 | 19,75 |
| 2 | 77,24 | 81,38 | - | 2,53 | 15,80 |
| 3 | 75,93 | 76,27 | 59,59 | 1,97 | 20,31 |
| 4 | 140,07 | 137,93 | - | 2,44 | 16,38 |
| 5 | 144,83 | 152,76 | 107,93 | 3,10 | 12,91 |
| Otopina soli | 130,55 | 137,31 | - | 5,45 | 7,84 |
| Nafta | 127,17 | 134,89 | - | 1,60 | 26,76 |

Tablica 5-2. Pokusi Indiana vapnenca u visokotlačnoj ćeliji (Gahan et al., 2005)

| Laboratorijsko ispitivanje | Conf. Tlak (bar) | Aksijalni tlak (bar) | Porni tlak (bar) | Uklonjeni volumen (cm ³) | Specifična energija (kJ/cm ³) |
|----------------------------|------------------|----------------------|------------------|--------------------------------------|---|
| 1 | 0 | - | - | 0,40 | 99,97 |
| 2 | 70,97 | 78,55 | - | 0,93 | 43,00 |
| 3 | 67,72 | 72,83 | 59,59 | 1,02 | 39,04 |
| 4 | 142,69 | 149,59 | - | 0,98 | 40,67 |
| 5 | 144,83 | 153,45 | 112,07 | 3,26 | 12,27 |
| Otopina soli | 132,55 | 136,62 | - | 1,87 | 22,78 |
| Nafta | 124,14 | 133,10 | - | 0,85 | 50,36 |



Slika 5-2. Vrijednosti specifične energije potrebne za lasersko perforiranje suhih i zasićenih uzoraka Berea pješčenjaka pod visokim tlakom (Gahan et al., 2005)



Slika 5-3. Vrijednosti specifične energije potrebne za lasersko perforiranje suhih i zasićenih uzoraka Indiana vapnenca pod visokim tlakom (Gahan et al., 2005)

5.2. Laboratorijsko ispitivanje utjecaja bušotinskih uvjeta na perforiranje zasićenih i nezasićenih „obloženih“ uzoraka stijene

Nakon promatranja djelovanja lasera na stijene pješčenjaka i vapnenca u uvjetima visokoga tlaka te dobivenih vrijednosti specifične energije, provedeno je laboratorijsko ispitivanje kako bi se što bolje simulirali podzemni (in-situ) uvjeti i materijali koje je potrebno probušiti tijekom izvođenja perforiranja u bušotini.

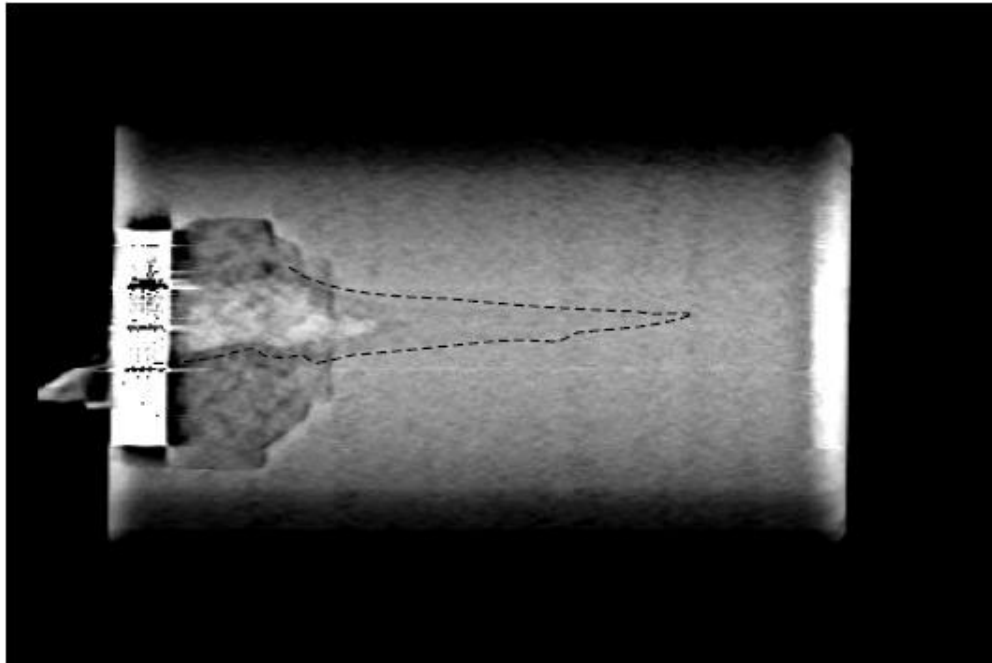
Kao što je to ranije spomenuti u valjkastim uzorcima stijene promjera 10 cm i duljine 15 cm, izbušeni su otvori promjera 5 cm i dubine 1,3 cm u koje su zacementirane čelične pločice promjera 5 cm i debljine 1,3 cm. Tako pripremljeni „obloženi“ uzorci smješteni su u visokotlačnu ćeliju s tlakovima koji simuliraju ravnotežne uvjete, odnosno porni tlak bio je jednak atmosferskom. Uvjeti tlaka su bili slični onima u četvrtom laboratorijskom ispitivanju s jezgrama stijena. Za uzorak pješčenjaka su primjenjeni aksijalni i svestrani tlak 144,83 bar i 140 bar. Aksijalni i svestrani tlakovi primjenjeni na uzorku vapnenca iznosili su 143,03 bar i 135,59 bar.

Pripremljeni uzorci izloženi su laserskim zrakama istih parametara kao i u prethodnim ispitivanjima. Ukupno vrijeme djelovanja laserske zrake iznosilo je 90 sekundi po uzorku, a odabrano vrijeme proračunato je na temelju prethodnih vremena djelovanja lasera za uklanjanje određene jedinice volumena čelika, cementnog kamena i stijene (Gahanet al., 2005). Laser je djelovao u intervalima od po 30 sekundi s prekidima po 20 sekundi kako bi se spriječilo pregrijavanje sklopa ćelije. Na slici 5-4. su prikazani ispitivani uzorci pješčenjaka prije i nakon djelovanja lasera.



Slika 5-4. Rezultati laboratorijskih perforiranja uzoraka stijene uz simuliranje postojanja čelične zaštitne cijevi i cementnog kamena (Gahan et al., 2005)

Rezultat perforiranja bila je perforacija duljine 6,4 cm, odnosno probušeno je 1,3 cm čelika, 3,8 cm cementnog kamena te 1,3 cm stijene. Tijekom ispitivanja na vapnencu dobivena je perforacija duljine 11,45 cm, odnosno laserska zraka probušila je čeličnu ploču debljine 1,3 cm, cementni kamen debljine 3,8 cm i 6,35 cm stijene. Na slici 5-5. prikazana je CT snimka perforiranog uzorka vapnenca promjera 10 cm i duljine 15 cm. Primjenjen je laser s iterbijskim vlaknima snage 5,34 kW, koji je djelovao laserskom zrakom promjera 0,9 cm s vremenom djelovanja tri puta po 30 sekundi. Uzorak je perforiran u ravnotežnim uvjetima pri aksijalnim tlakom od 143 bar, svestranom tlaku od 135,6 bar i uz plinsko ispiranje razrušenih čestica stijene tlakom od 6,2 bar.



Slika 5-5. CT snimka uzroka vapnenca, čelične ploče i cementnog kamena perforiranog laserom (Gahan et al., 2005)

Podaci dobiveni iz niza laboratorijskih ispitivanja na pješčenjacima i vapnencima demonstrirali su pozitivno djelovanje tlaka unutar kanala bušotine i ležišne stijene na efikasnost laserskih perforatora. Za oba tipa stijena se vrijednosti specifične energije smanjuju s porastom svestranog i aksijalnog tlaka koji djeluju na uzorak stijene. Također, taj efekt vidljiviji je kod uzorka vapnenca u odnosu na uzorke pješčenjaka.

Mehanizam za razrušavanje stijene u Berea pješčenjacima je spalacija, gdje nagla temperaturna ekspanzija uzrokuje pucanje zrnaca stijene i cementa. Kao bazni slučaj za pješčenjake uzeto je prvo laboratorijsko ispitivanje, gdje nije primjenjivan nikakav tlak i vrijednost specifične energije iznosila je $19,75 \text{ kJ/cm}^3$. Uvjeti ispitivanja bili su slični prethodnim ispitivanjima koja su se provodila u laboratoriju. Uzorak je bio u atmosferskim uvjetima tijekom djelovanja lasera, a korištena je mlaznica s plinskim ispiranjem pri uklanjanju nabušenih čestica.

Najniža vrijednost specifične energije je zabilježena u pješčenjacima i iznosila je $12,91 \text{ kJ/cm}^3$, odnosno 35% manje od baznog slučaja (ili referentne vrijednosti), a dobivena je u petom laboratorijskom ispitivanju. Pri tom laboratorijskom ispitivanju su vrijednosti tlakova bile najviše, odnosno svestrani tlak iznosio je 144,83 bar, aksijalni 152,76 bar i porni 107,93 bar, Uklanjanje razrušenog stijenskog materijala je potpomognuto

diferencijalnim tlakom, odnosno razlikom simuliranog slojnog tlaka i tlaka unutar komore koji simulira tlak u kanala bušotine. S porastom diferencijalnog tlaka materijal se brže iznosi iz stvorene perforacije, minimizira se putovanje kroz lasersku zraku i apsorbira se manje energije laserske zrake na samim razrušenim česticama stijene. Što se manje energije apsorbira u putujućim česticama, više je dostupno za daljnje perforiranje, a što se najbolje vidi u padu specifične energije.

Iz provedenih laboratorijskih ispitivanja vidljivo je da svestrani tlak i aksijalni tlak imaju i ograničen utjecaj na vrijednosti specifične energije kod pješčenjaka. Povećanje spomenutih tlakova kod pješčenjaka vodi do gušćeg pakiranja stijenskog matriksa i većeg kontakta među zrcima što povećava termalnu difuzivnost stijene. U oba je slučaja materijal pročišćen plinom za ispiranje pri istim uvjetima. Najveći napredak je bio u drugom laboratorijskom ispitivanju gdje je vrijednost specifične energije pala 20% u odnosu na bazni (referentni) slučaj odnosno s $19,75 \text{ kJ/cm}^3$ na $15,8 \text{ kJ/cm}^3$.

U trećem laboratorijskom ispitivanju uočene su veće vrijednosti specifične energije od baznog (referentnog) slučaja. Glavna razlika između ta dva laboratorijska ispitivanja je bio mehanizam za iznošenje krhotina. U trećem laboratorijskom ispitivanju je diferencijalni tlak bio zadužen za iznošenje nabušenih čestica stijene te su dobiveni slabiji rezultati u odnosu na plinsko ispiranje primjenjeno u prvom laboratorijskom ispitivanju, uzevši u obzir geometriju perforacije. Ovaj problem je riješen većim diferencijalnim tlakom tijekom petog laboratorijskog ispitivanja.

Mehanizam uklanjanja nabušenih čestica kod vapnenaca je kalcinacija (engl. *calcination*) gdje energija laserske zrake uzrokuje termalnu disocijaciju karbonata na ugljični dioksid i kalcijev oksid (vapno). Kako je ispitivani vapnenac dobiven iz kamenoloma u početku nestlačen, specifična energija potrebna za njegovo perforiranje je smanjena za gotovo 60% tijekom drugog, trećeg i četvrtog laboratorijskog ispitivanja. Naime, dodanim tlakom je ostvaren bolji kontakt zrna o zrno što je rezultiralo učinkovitijim procesom kalcinacije.

Najniža vrijednost specifične energije kod perforiranja vapnenca zabilježena je bila u petom laboratorijskom ispitivanju sa svestranim tlakom od 144,83 bar, aksijalnim tlakom od 153,45 bar i pornim tlakom od 111,38 bar. Ponovo je diferencijalni tlak igrao značajnu ulogu kod uklanjanja nabušenog materijala što se očitovalo značajno manjom specifičnom energijom od $12,27 \text{ kJ/cm}^3$, tj. 88% manje u odnosu na bazni (referentni) slučaj i 69%

manje u odnosu na drugi najbolji rezultat postignut tijekom trećeg laboratorijskog ispitivanja.

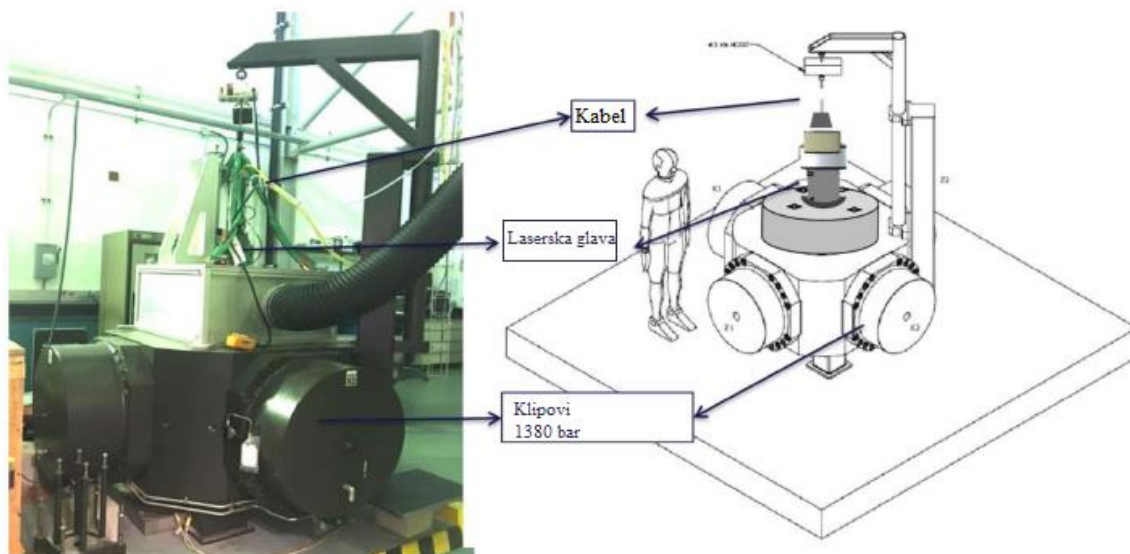
Djelovanje zasićenja uzorka stijene kapljevinama dalo je uvid u to kako njihova prisutnost u stijeni utječe na efikasnost lasera u izradi perforacija. Pješčenjak zasićen otopinom soli donio je porast efikasnosti laserskog perforiranja sa specifičnom energijom $7,84 \text{ kJ/cm}^3$. To je 60% manje od baznog (referentnog) slučaja (laboratorijskog ispitivanja 1) i 50% niže od najboljeg slučaja s povećanim tlakom (laboratorijskog ispitivanja 2). Pretpostavlja se da naglo isparavanje vode iz otopine soli pomaže u procesu spalacije kao što je prethodno zabilježeno s uzorcima pješčenjaka zasićenim vodom. I kod uzoraka vapnenca zasićenog otopinom soli vidljivo je povećanje efikasnosti laserskog perforiranja u vidu smanjenja specifične energije $22,78 \text{ kJ/cm}^3$, što je 77% manje od baznog (referentnog) slučaja i 42% manje nego u najboljem slučaju pri povećanom tlaku (Laboratorijsko ispitivanje 3).

Prisutnost ugljikovodika u pješčenjaku je povisila specifičnu energiju na $26,76 \text{ kJ/cm}^3$. To je povećanje od 35% utrošene energije u odnosu na temeljni slučaj i povećanje od 63% u odnosu na slično nezasićeno stanje (Laboratorijsko ispitivanje 4). Ta je pojava vjerojatno rezultat činjenice da ugljikovodici i njihovi nusproizvodi apsorbiraju više energije laserske zrake nego što je se dobije naglim isparavanjem u porama. Sličan je rezultat primjećen u vapnencima, iako ne tako izražen. Zabilježena specifična energija kod vapnenca zasićenog naftom bila je $50,36 \text{ kJ/cm}^3$, što je oko 50% niže nego u baznom slučaju, a 24% više nego u sličnom slučaju s nezasićenom jezgrom (Laboratorijsko ispitivanje 4).

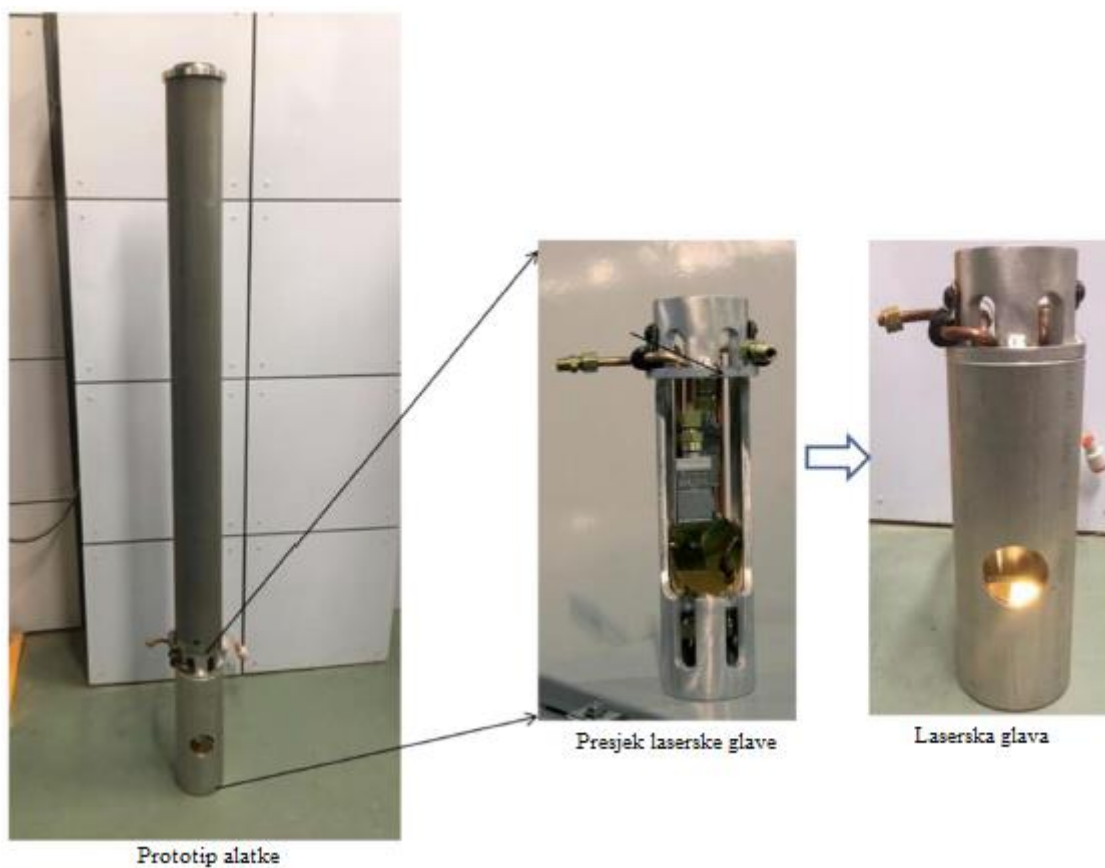
6. TERENSKA ISPITIVANJA PRIMJENE LASERSKE TEHNOLOGIJE ZA PERFORIRANJE STIJENE

Napredci u razvoju sustava lasera visoke snage pružili su mogućnosti za različite primjene u naftnoj industriji, od perforiranja do bušenja. Moderni laserski sustavi visoke snage su kompaktni, učinkoviti, komercijalno dostupni i sigurni za upotrebu. Razvoj i napredci lasera visoke snage rasli su velikom brzinom kako bi ispunili brojne zahtjeve industrije. Prethodni laserski sustavi visoke snage su bili na kemijskoj osnovi i razvijeni su za obrambenu i vojnu primjenu što ih je učinilo zabranjenim za širu komercijalnu upotrebu. Provedena temeljna laboratorijska ispitivanja pružila su znanje i informacije za razvoj strategije primjene laserske tehnologije na terenu. Kako bi se ostvario ovaj cilj i kako bi se uspjeh iz laboratorija ponovio i tijekom terenske primjene, potreban je razvoj jedinstvenih tehnoloških rješenja i potpuna karakterizacija učinaka podzemnih uvjeta na sustav i mogućnost njegove primjene. Mogućnost terenske primjene ispitivali su Batarseh i suradnici, a postignute radove obavili su u radu „Lasersko perforiranje: Iz laboratorija na teren“ objavljenom 2017. godine.

Temeljne laboratorijske studije, djelom ospiane i u ovom radu sadržavale su i rezultate dobivene na triaksijalnoj ćeliji kako bi se procijenio učinak tlaka na mogućnost perforiranja stijene upotrebom lasera. Međutim, ispitivanja su bila ograničena na uzorke stijena valjkastog oblika, promjera 10 cm i duljine 15 cm. Kako bi se istražio učinak u većim blokovima, izrađen je napredniji biaksijalni sklop na koji je pričvršćen laserski sustav (Slika 6-1.). Uređaj koristi posebno rađeni optički sklop (Slika 6-2.) i biaksijalni sklop koji može proizvesti anizotropni svestrani tlak do 1380 bar. Optički sklop usmjerava zrake za simuliranje in-situ perforiranja.



Slika 6-1. Laserska glava pričvršćena na biaksijalni sklop (Batarseh et al., 2017)



Slika 6-2. Posebna laserska glava za perforiranje i prototip alatke za (Batarseh et al., 2017)

Jedna perforacija je izrađena u vertikalnoj bušotini kao što se vidi na slici 6-3. Perforacija je bila čista i neoštećena s poboljšanim svojstvima protoka, izrađena pri

uvjetima visokoga tlaka uz korištenje prototipa alatke za perforiranje pričvršćenog na biaksijalni okvir.



Slika 6-3. In-situ perforacija u vertikalnom kanalu bušotine (Batarseh et al., 2017)

Nakon što laser izađe iz optičkog sklopa, reagirati će s okolišem u bušotini. Bušotina je obično ispunjena fluidima, krhotinama i ostalim česticama koji će reagirati s laserskom zrakom i blokirati ju, što posljedično dovodi do njene apsorpcije i raspršenja. Iz tog razloga se primjenjuje ispiranje kako bi se osiguralo da će energija laserske zrake stići do „mete“ bez apsorpcije od strane materijala kojima je ispunjen kanal bušotine. Dizajniran je i primjenjen fluid za operaciju laserskog perforiranja, a takav fluid mora imati određena svojstva:

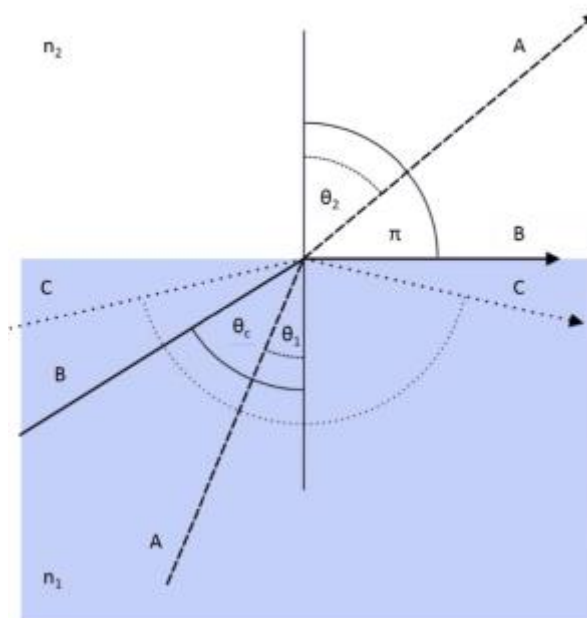
- veći indeks loma nego fluidi u kanalu bušotine (engl. *downhole fluids*),
- nisku optičku apsorpciju,
- visok toplinski kapacitet.

Veći indeks loma omogućava da laserska zraka ostane zadržana unutar fluida, dok niska optička apsorpcija omogućava da zraka napreduje bez gubitaka. Visok toplinski kapacitet znači da će fluid biti relativno stabilan na visokim temperaturama, čak i ako dođe do apsorpcije zrake u okolinu, odnosno totalne refleksije (engl. *total internal reflection*).

Totalna refleksija fizikalno se može objasniti na sljedeći način. Ukoliko se pretpostave dva granična sloja različitih materijala s indeksom loma n_1 i n_2 svjetlo koje upada iz sloja s indeksom loma n_1 u sloj s indeksom loma n_2 pod kutom θ_1 refraktira se pod kutom θ_2

(Slika 6-4.). Vrijednost kuta refraktirane zrake može se odrediti preko Snellovog zakona pomoću sljedećeg izraza:

$$\theta_2 = \arcsin\left(\frac{n_1 \sin \theta_1}{n_2}\right)$$



Slika 6-4. Zakoni refrakcije i refleksije. Upadna zraka može biti refraktirana, reflektirana ili totalno reflektirana (Batarseh et al., 2017)

Ako je $n_1 > n_2$ onda navedena jednadžba vrijedi samo za neke upadne kutove. Postoji kritični kut θ_c , pa je za svaki upadni kut koji je veći ili jednak θ_c , rezultat biti totalno reflektirana zraka. Kritični kut se može dobiti rješavanjem sljedeće jednadžbe:

$$\theta_c = \arcsin\left(\frac{n_2}{n_1}\right)$$

Za zrak je $n = 1$, a za kvarcno staklo $n = 1,5$ te se dobije $\theta_c = 41,8^\circ$. Znači da će svaka zraka koja upadne na granicu ovih dvaju materijala pod kutem većim od $41,8^\circ$ biti u potpunosti reflektirana.

6.1. Prototip alatke za perforiranje formacije

Lasersko perforiranje kroz zaštitnu cijev, cementni kamen i formaciju zahtjeva optički sklop koji kolimira (engl. *collimate*) zraku, zadržavajući gustoću energije konstantnom sve do željene zone i dublje u formaciju. Kolimacija je oblikovanje paralelnog snopa

elektromagnetskog zračenja ili čestica iz divergentnog snopa (dovodi zračenje u ravnu liniju) (www.enciklopedija.hr). Slika 6-5.a prikazuje prototip kolimatora, koji je dizajniran i izrađen za usmjeravanje i oblikovanje laserske zrake, a slika 6-5.b sustav za ispiranje.



a) Kolimator



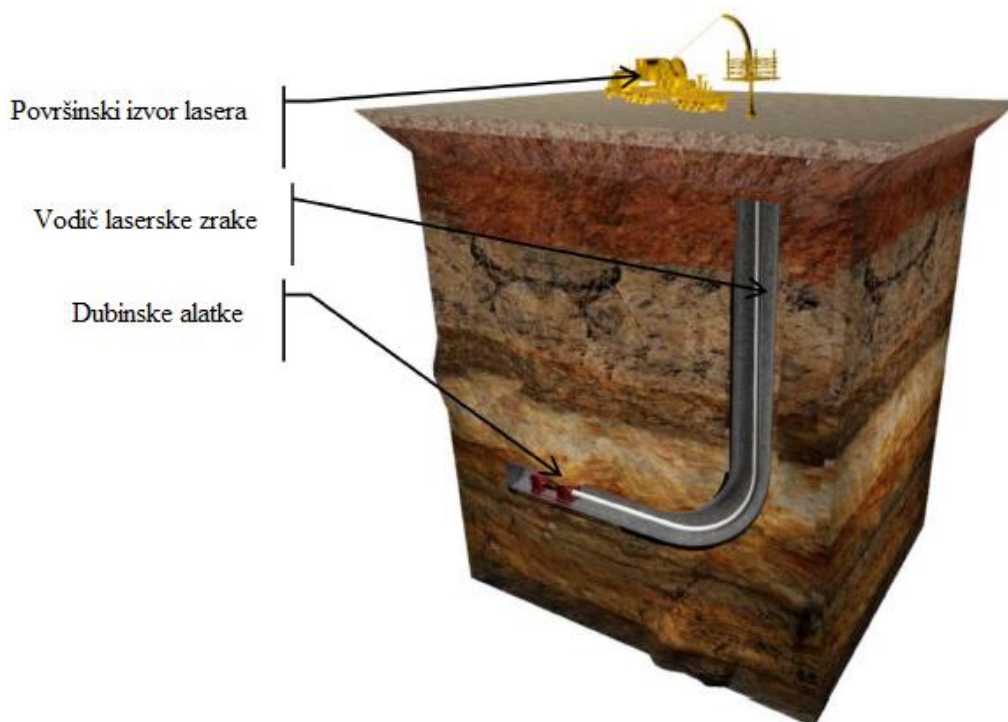
b) Sustav za ispiranje

Slika 6-5. a) Kolimator, b) Poseban sustav za ispiranje (Batarseh et al., 2017)

6.1.1. Elementi sustava neophodni za primjenu laserskih perforatora na terenu

Na terenu, zraka površinskog lasera bi trebala putovati s minimalni gubicima na dubine od nekoliko kilometara u podzemlju, u „teškim“ uvjetima, prije nego dosegne lasersku glavu. Rezultat ovisi o svojstvima triju važnih komponenti (Slika 6-6.):

- laseru na površini i pomoćnoj opremi,
- sklopu optičkih vlakana,
- bušotinskom optičkom sklopu (engl. *optical bottom-hole-assembly*, oBHA).



Slika 6-6. Elementi sustava za lasersko perforiranje (Batarseh et al., 2017)

Površinski sustav čine laser i pomoćna oprema slični onima koji su korišteni u laboratoriju. Tu se nalaze generatori, sustav za hlađenje, plinovi i tekućine za ispiranje, poluvodički i laser s čvrstom jezgrom, spojnice za laser i optičko vlakno, sustavi za kontrolu i senzori. Svi ti dijelovi su sklopivi zajedno i stanu u prikolicu ili na jedinicu za operacije savitljivim tubingom. Laseri s optičkim vlaknima su najbolji kandidat za operacije na terenu, a predstavljaju podvrstu lasera s čvrstom jezgrom, originalno zamišljeni kao pojačivači za optičku telekomunikaciju.

6.1.1.1. Optički kablovi

Prva generacija alatki za perforiranje laserima koristiti će optička vlakna za prijenos zrake lasera visoke snage od površine do mete u podzemlju. Optički kabel treba biti dizajniran da stane u jedinicu za rad sa savitljivim tubingom, te bude zaštićen kako bi podnio uvjete u kanalu bušotine. Također, dizajn kabla bi trebao ublažiti gubitke koji proizlaze iz transmitiranja zrake lasera visoke snage kroz kilometarima dugo vlakno.

Materijali apsorbiraju, reflektiraju, prenose i raspršuju svjetlo različitim intenzitetom, ovisno o uvjetima okoliša te valnoj duljini ili frekvenciji upadnog svjetla. U optičkom

kablu je primarni izazov nadvladati prigušenje (engl. *attenuation*), raspršenje i degradaciju materijala.

Prigušenje ili gubitak se odnosi na smanjenje intenziteta zrake svjetlosti tijekom širenja kroz medij. Mjeri se u jednicama dB/km i jedan je od kritičnih faktora koji ograničavaju udaljenost i snagu koje pojedini sustav može podnijeti. U optičkim se kablovima to javlja uslijed apsorpcije i raspršenja. Do prvoga dolazi zbog unutarnjih svojstava materijala, tj. razmještaja molekula i elektrona u njemu. Drugo proizlazi iz mikronskih nepravilnosti nastalih tijekom proizvodnje. Na slici 6-7 je prikazan graf s odnosom intenziteta i udaljenosti za zraku lasera snage 10 kW koja putuje u različitim tipovima kablova (silicij, fluoridno staklo s teškim metalima, i šuplja jezgra (engl. *hollow core fiber*)).

Raspršenje je fizički fenomen koji pokazuju valovi kada skrenu s početne putanje uslijed lokalnih nepravilnosti u mediju kojim se šire. U optici raspršenje uključuje i slučajeve kada se javlja refleksija svjetlosti u putanjama različitim od one predviđene zakonima refleksije. Raspršenje se može podijeliti u linearno raspršenje, gdje su energija upadne i raspršene zrake očuvani; i nelinearno raspršenje gdje dolazi do prijenosa energije iz upadnog vala u medij. Prvo se može ublažiti unapređenjem procesa proizvodnje i smanjenjem nepravilnosti. Međutim, drugo ovisi o temeljnim elektromagnetskim svojstvima materijala i predstavlja izazov za daljnja istraživanja.

Degradacija materijala javlja se zbog fizikalnih nesavršenosti materijala, te zbog termičkih i mehaničkih naprezanja uzrokovanih zrakom visoke snage i uvjeta okoline. Manji brojevi i dimenzije nesavršenosti u unutrašnjosti vodiča pri niskim snagama neće značajno utjecati na performanse vodiča. Međutim, kako snaga raste, nesavršenosti mogu apsorbirati više energije što vodi do zagrijavanja i širenja materijala, rezultirajući degradacijom optičkog signala. Visoka temperatura i fluidi mogu također promijeniti materijal i dovesti do propadanja.

6.1.1.2. Bušotinski optički sklop (oBHA)

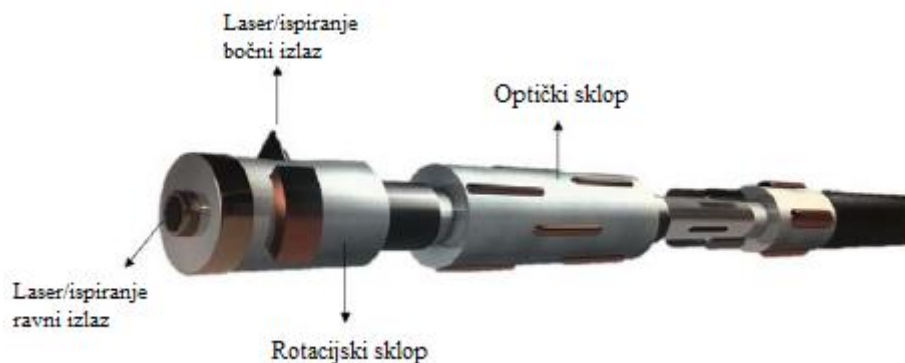
Na temelju laboratorijskog prototipa alatki, proizvest će se bušotinski optički sklop spreman za upotrebu na terenu. Sadržavati će optičke leće i zrcala, mlaznice za ispiranje, i elektronske sustave potrebne za izradu perforacije promjera 5 cm i dubine 61 cm. Uloge bušotinskog optičkog sklopa su:

- izbaciti lasersku zraku iz kabla,

- transformirati zraku i njen profil (fokusirati, defokusirati, usmjeriti),
- kontrolirati i usmjeravati fluide za ispiranje,
- upravljati zrakom do mete,
- pratiti interakciju laserske znake, okoliša i stijene,
- bilježiti svojstva i promjene u okolišu.

Poput kablova, i u optičkim elementima se javljaju apsorpcija, raspršenje i degradacija. Kako bi se ublažili, potrebno je odabrati materijale i strukture koje mogu podnijeti energiju, smanjiti nedostatke proizvodnje i održavati željenu temperaturu. Često su optičke leće i zrcala presvučene tankim folijama kako bi se spriječila neželjena refleksija, povećala transmisivnost i poboljšale performanse. Međutim, one mogu biti oštećene energijom lasera ili mogu degradirati zbog visokih temperatura. Trenutno rješenje je pažljiv dizajn folija i kontroliranje svih parametara laserske zrake. Alternativa je stvoriti fotonske strukture direktno na površini optičkih materijala.

Slika 6-8. prikazuje lasersku pušku. Ona sadrži optički sklop, rotacijski sklop i otvore za usmjeravanje lasera i ispiranja.

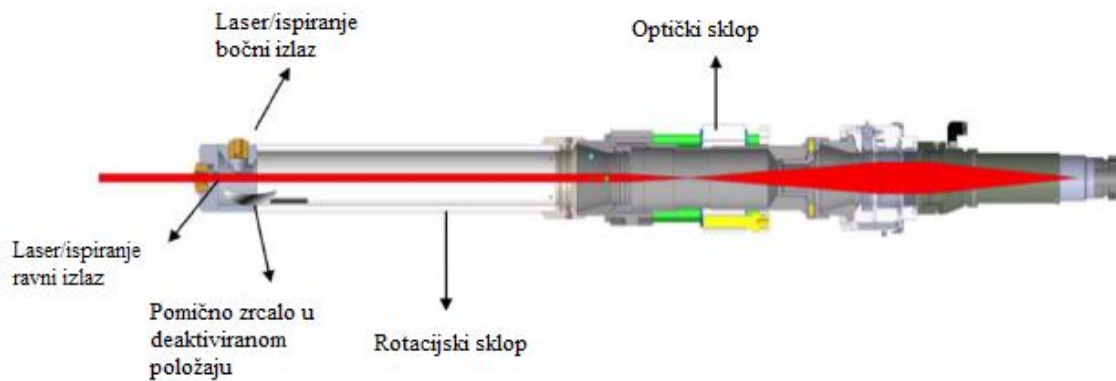


Slika 6-7. Puška za lasersko perforiranje s dva otvora (Batarseh et al., 2019)

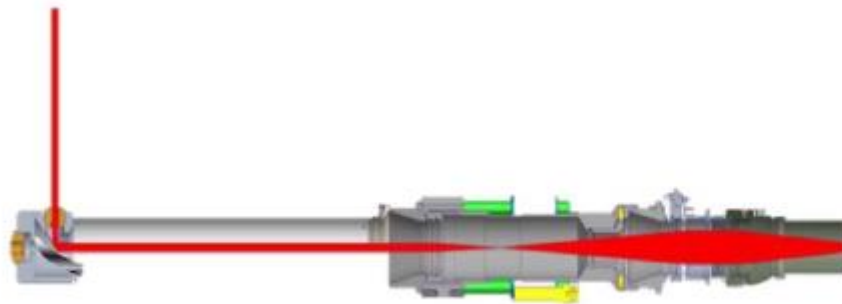
Optički sklop, koji transformira zraku i njen profil, sadrži leće, zrcala i prizme te je na njega spojena laserska glava. Nakon što laserska zraka (kontroliranog oblika) napusti optički sklop ulazi u rotacijski sklop.

Rotacijski sklop služi za usmjeravanje zrake do mete u formaciji kroz zaštitne cijevi i cementni kamen. Slika 6-8. prikazuje presjek alatke i laserske zrake izlazi ravno za primjenu u bušenju. Unutra alatke nalazi se zrcalo koje se pomiče i mijenja putanju zrake. Za svrhu perforiranja, zrcalo se aktivira i usmjerava lasersku zraku kroz perforacijski otvor

što je prikazano na slici 6-9. Zraka se može paliti i gasiti po želji, tako da ne treba alatku puniti i prazniti eksplozivima kako bi se dobio željeni broj perforacija po metru duljine kanala bušotine. Alatka se jednostavno pomiče, rotira i aktivira po želji. Postoji i varijanta alatke gdje se laserska zraka lomi na više zraka kako bi se simultano ostvarivalo više perforacija odjednom.



Slika 6-8. Laserska puška orijentirana ravno za bušenje kanala bušotine (Batarseh et al., 2019)



Slika 6-9. Laserska puška orijentirana bočno za perforiranje stijene (Batarseh et al., 2019)

7. ZAKLJUČAK

Rezultati laboratorijskih perforiranja uzorka pješčenjaka pokazali su da laser stvara čistu perforaciju bez čepjenja krhotinama i sitnim česticama. Također, nije uočeno postojanje kompaktirane ili oštećene zone oko perforacije, nego je u zoni uokolo perforacije došlo do povećanja poroznosti i propusnosti. Korištenjem energije fotona, ne dolazi do čepjenja perforacije kao što je to slučaj kod upotrebe mlaznih perforatora odnosno nije potrebno ispirati perforacije.

Iako je primjena energije lasera visoke snage uspješno demonstrirana u laboratorijskim uvjetima, proveden je i prvi pokušaj perforiranja uzoraka stijena laserom uz simuliranje in-situ uvjeta tlaka u kanalu bušotine. Istraživanje je demonstriralo pozitivne učinke naprezanja i tlakova koji djeluju na uzorak stijene na uspješnost lasera da perforira pješčenjake i vapnence. Nadalje, uspješno je demonstrirana sposobnost lasera s optičkim vlaknima da penetrira kombinaciju čelika, cementnog kamena i stijene pri in-situ tlakovima u kanalu bušotine.

Djelovanje laserom u uvjetima podtlaka demonstrirano je sposobnost lasera da perforira u stijenu bez potrebe za dodatnim sustavom za ispiranje perforacija. Razlika između ležišnog pornog tlaka i tlaka u kanalu bušotine bila je dovoljna za iznošenje razrušenih krhotina. Utvrđeno je da djelovanjem tlaka na stijenu dolazi do boljeg kontakta između zrnaca u stijeni, što rezultira boljim širenjem topline i utjecaja laserske zrake dalje u stijenu.

Unatoč odličnim rezultatima laboratorijskih ispitivanja i razvijenim prototipovima dubinske opreme, potrebna su daljnja istraživanja kako bi se učinilo ovu obećavajuću tehniku tehniku perforiranja komercijano primjenjivom u praksi.

8. LITERATURA

- 1) ADEWALE WASIU ADENJI, 2014., The Applications of Laser Technology in Downhole operations – A Review, U: International Petroleum Technology Conference, 20-22 Siječnja 2014., Doha, Katar, IPTC – 17357.
- 2) BATARSEH, S., GAHAN, B.C., GRAVES, R.M., PARKER, R.A., 2003., Well Perforation Using High-Power Lasers, U: SPE Annual Tehnical Conference and Exhibition, 5-8 Listopada 2003., Denver, Colorado, SAD, SPE 84418.
- 3) BATARSEH, S.I., GAHAN, B.C., SHARMA, B.C., 2005., Innovation in Wellbore Perforation Using High-Power Lasers, U. International Petroleum Technology Conference, 21-23 Studenog 2005., Doha, Katar, IPTC 10981.
- 4) BATARSEH, S.I., GRAVES, R., SAN ROMAN ALERIGI, D., CHAND, K., 2017., Laser Perforation: Lab to the Field, U: Abu Dhabi International Petroleum Exhibition & Conference, 13-16 Studenog 2017., Abu Dhabi, UAE, SPE-188729-MS.
- 5) BATARSEH, S., SAN ROMAN ALERIGI, D., AL OBAID, O., OTHMAN, H., 2019., Laser gun: The Next Perforation Technology, U: SPE Middle East Oil and Gas Show Conference, 18-21 Ožujka 2019., Manama, Bahrain, SPE-194775-MS.
- 6) BLOK, R.H.J., WELLING, R.W.F., BERHMANN, L.A., VENKITARAMAN, A., 1996., Experimental Investigation of the Influence of Perforation on Gravel-Pack Impairment, U: SPE Annual Technical Conference and Exhibition, 6-9 Listopada 1996., Denver, Colorado, SAD, SPE 36481.
- 7) GAHAN, B.C., BATARSEH, S., SHARMA, B., GOWELLY, S., 2004., Analysis of Efficient High-Power Lasers for Well Perforation, U: SPE Annual Tehnical Conference and Exhibition, 26-29 Rujna 2004., Houston, Texas, SAD, SPE 90661.
- 8) GAHAN, B.C., BATARSEH, S., WATSON, R., DEEG, W., 2005., Effect of Downhole Pressure Conditions on High-Power Laser Perforation, U: SPE Annual Tehnical Conference and Exhibition, 9-12 Listopada 2005., Dallas, Texas, SAD, SPE 97093.
- 9) HALLECK, P.M, 1997., Recent Advances in Understanding Perforator Penetration and Flow Performance, U: Drilling and Completion, Ožujak 1997., SPE 27981.
- 10) MATANOVIĆ, D., MOSLAVAC, B., 2011., Opremanje i održavanje bušotina, Zagreb: Rudarsko-geološko-naftni fakultet.

Internetski izvori:

- 1) Hrvatska enciklopedija, Leksikografski zavod Miroslav Krleža, URL: (<http://www.enciklopedija.hr/Natuknica.aspx?ID=57325>) (08.01.2020.)
- 2) Hrvatska enciklopedija, Leksikografski zavod Miroslav Krleža, URL: (<http://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?id=32418>) (10.01.2020.)
- 3) Corelab, URL: (<https://www.corelab.com/cli/routine-rock/core-measurement-system>) (10.01.2020.)

Izjava

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

Dario Delinić