

# Primjena turbinskih bušilica i impregniranih dlijeta za bušenje slojeva izrazite tvrdoće

---

Čagalj, Ivan

Undergraduate thesis / Završni 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://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:169:138519>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-11-12**



*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

RUDARSKO-GEOLOŠKO-NAFTNI FAKULTET

Preddiplomski studij naftnog rudarstva

**PRIMJENA TURBINSKIH BUŠILICA I IMPREGNIRANIH  
DLIJETA ZA BUŠENJE SLOJEVA IZRAZITE TVRDOĆE**

Završni rad

Ivan Čagalj

N4238

Zagreb, 2020.

Rudarsko-geološko-naftni fakultet

**PRIMJENA TURBINSKIH BUŠILICA I IMPREGNIRANIH  
DLIJETA ZA BUŠENJE SLOJEVA IZRAZITE TVRDOĆE**

Ivan Čagalj

Završni rad izrađen: Sveučilište u Zagrebu  
Rudarsko-geološko-naftni fakultet  
Zavod za naftno-plinsko inženjerstvo i energetiku  
Pierottijeva 6, 10000 Zagreb

Sažetak

Stijene izrazite tvrdoće pokazale su se kao ozbiljan problem prilikom izrade bušotina, a oprema kojom su se pokušavale bušiti kao neprikladna što je rezultiralo čestim izvijanjima i lomovima bušaćih alatki, povećanim trošenjem, neplaniranim instrumentacijama i manevrima. Kao moguće rješenje razvijena je posebna skupina dijamantnih dlijeta gdje su dijamanti kao rezni elementi dodatno poboljšani i ugrađeni u matricu (impregnirani). Dlijeta se koriste u kombinaciji s dubinskim hidrauličkim motorima, turbinskim bušilicama, čiji odabir ovisi o željenim radnim parametrima. Ovaj rad prikazuje isplativost primjene predloženog načina bušenja, pritom navodeći njegove osnovne karakteristike i usporedbu s rotacijskim načinom bušenja, kao i ostalim korištenim dlijetima.

Ključne riječi: bušenje, turbinske bušilice, impregnirana dlijeta, tvrdoća, abrazivnost

Završni rad sadrži: 24 stranice, 11 slika i 19 referenci

Jezik izvornika: hrvatski

Završni rad pohranjen: Knjižnica Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta

Pierottijeva 6, Zagreb

Mentor: Dr. sc. Zdenko Krištafor, redoviti profesor RGNF-a

Ocjenjivači: 1. Dr. sc. Zdenko Krištafor, redoviti profesor RGNF-a

2. Dr. sc. Nediljka Gaurina-Međimurec, redovita profesorica RGNF-a

3. Dr. sc. Borivoje Pašić, docent RGNF-a

Datum obrane: 11.9.2020.

## **SADRŽAJ:**

<b>POPIS SLIKA.....</b>	<b>II</b>
<b>POPIS KORIŠTENIH KRATICA.....</b>	<b>III</b>
<b>1. UVOD.....</b>	<b>1</b>
<b>2. TURBINSKE BUŠILICE.....</b>	<b>3</b>
<b>2.1. Razvoj.....</b>	<b>3</b>
<b>2.2. Izvedba i princip rada.....</b>	<b>4</b>
<b>2.3. Prednosti i nedostaci.....</b>	<b>6</b>
<b>2.4. Suvremene inovacije i poboljšanja.....</b>	<b>7</b>
<b>3. IMPREGNIRANA DIJAMANTNA DLIJETA.....</b>	<b>10</b>
<b>3.1. Dijamantna dlijeta.....</b>	<b>10</b>
<b>3.2. Impregnirana dlijeta.....</b>	<b>11</b>
<b>3.3. Trošenje impregniranih dlijeta.....</b>	<b>14</b>
<b>4. TERENSKI PRIMJER PRIMJENE TURBINSKIH BUŠILICA I     IMPREGNIRANIH DLIJETA.....</b>	<b>18</b>
<b>5. ZAKLJUČAK.....</b>	<b>22</b>
<b>6. LITERATURA.....</b>	<b>23</b>

## **POPIS SLIKA:**

<b>Slika 2-1.</b> Presjek jednog stupnja turbinske bušilice.....	5
<b>Slika 2-2.</b> Radijalni kuglasti ležajevi.....	6
<b>Slika 2-3.</b> Zaštitno kućište za senzore.....	8
<b>Slika 2-4.</b> Turbina s optimiziranim reduktorom.....	9
<b>Slika 3-1.</b> Impregnirano dljeto.....	12
<b>Slika 3-2.</b> Ciklus trošenja dijamanata u impregniranom dljetu.....	14
<b>Slika 3-3.</b> Istrošeno dljeto.....	17
<b>Slika 4-1.</b> Broj manevara po bušotini.....	20
<b>Slika 4-2.</b> Vrijeme izrade po bušotini.....	20
<b>Slika 4-3.</b> Prosječni dnevni napredak po bušotini.....	20
<b>Slika 4-4.</b> Prosječni napredak za jedno spuštanje po bušotini.....	21

### **POPIS KORIŠTENIH KRATICA:**

DOC (engl. *depth of cut*)- dubina prodiranja dlijeta

IADC (engl. *International association of drilling contractors*)- Udruženje američkih bušaćih ugovaratelja (inženjera)

MWD (engl. *measurement while drilling*)- mjerenje tijekom bušenja

PDC (engl. *polycrystalline diamond compact*)- polikristalinski dijamantni umetak

ROP (engl. *rate of penetration*)- napredak bušenja

TDC (engl. *total drilling control*)- sustav potpune kontrole bušaćih parametara

## 1.UVOD

Pronalaženje novih i optimalno iskorištavanje postojećih rezervi nafte i plina jedan je od glavnih zadataka naftne industrije u 21. stoljeću. U tom dugotrajnom procesu naftni inženjeri suočeni su s velikim brojem izazova i nepredviđenih okolnosti koje moraju svladati u okviru tehnoloških, ekoloških, ekonomskih i sigurnosnih ograničenja.

Pridobivanje nafte i plina kao neizostavan preduvjet zahtijeva izradu bušotina, u početku većinom vertikalnih. Napredak tehnologije doveo je do razvoja novih alatki, uređaja i procesa koji su olakšali njihovu izradu te omogućili izradu drugih tipova bušotina kao što su koso usmjerene i horizontalne bušotine. Glavna prednost izrade takvih bušotina je povećanje dodirnog područja ležišta nafte i/ili plina i samog kanala bušotine što za posljedicu ima povećano proizvodno područje tj. veći iscrpak.

Glavni izazovi koji prate izradu svih tipova bušotina su: velike dubine ležišta na kojima vladaju uvjeti visokog tlaka i/ili temperature, utoci neželjenih fluida, prisustvo korozivnih medija, stijenske mase sklone bubrenju i/ili zarušavanju, stijenske mase promjenjive strukture, abrazivnosti, tvrdoće itd.

Stijene izrazite tvrdoće pokazale su se kao ozbiljan problem prilikom izrade bušotina, a oprema kojom su se pokušavale bušiti kao neprikladna što je rezultiralo čestim izvijanjima i lomovima bušaćih alatki, povećanim trošenjem dlijeta i ispadanjem reznih elemenata, zaglavama, neplaniranim instrumentacijama i manevrima. Sve to dovelo je do potrebe za uskom suradnjom inženjera na bušenju, servisnih kompanija i proizvođača opreme, ponajprije dlijeta, sa svrhom pronalaska adekvatnog rješenja koje će maksimalno smanjiti neproduktivno vrijeme i minimizirati troškove.

Kao moguće rješenje razvijena je posebna skupina dijamantnih dlijeta gdje su dijamanti kao rezni elementi dodatno poboljšani i ugrađeni u matricu (impregnirani) kako bi im se povećala trajnost i smanjilo trošenje. Takva dlijeta zbog svojstava stijene koju buše plitko prodiru u istu te posljedično zahtijevaju veliku brzinu rotacije. Budući da se u pravilu radi i o bušotinama koje su usmjerene (pod određenim kutom otklona) kao pogonski sustav koriste se dubinski uronjivi hidraulički motori, vijčani ili turbinski, čiji odabir ovisi o uvjetima na dnu bušotine kao i o željenim radnim parametrima.

Ovaj će rad prikazati isplativost primjene predloženog načina bušenja, pritom navodeći njegove osnovne karakteristike i usporedbu s rotacijskim načinom bušenja, kao i ostalim korištenim dlijetima.



## 2. TURBINSKE BUŠILICE

Primjena usmjerenog bušenja i povećanje dubine postojećih i novih bušotina značajno je potpomognuto pojavom dubinskih hidrauličkih motora, vijčanih i turbinskih, čija je glavna karakteristika da rotaciju prenose izravno na dlijeto čime se eliminira rotacija cijelog niza bušaćih alatki.

Turbinske bušilice (turbine) dubinski su motori koji se u bušotini ugrađuju neposredno iznad dlijeta, a spuštaju na bušaćim šipkama. Rade na principu pretvorbe hidrauličke energije nastale protjecanjem isplake kroz turbinu u mehanički rad tj. rotaciju dlijeta koja obavlja proces bušenja (Gretić et al., 1973).

### 2.1. Razvoj

Počeci primjene i prvi primjeri dizajna ovih motora vežu se uz SSSR i M. A. Kapeljushnikova čija je jednostupanjska turbina s reduktorom za smanjenje broja okretaja upotrijebljena 1924. godine na naftnim poljima u blizini Bakua. Već 1934. godine postavljeni su temelji konstrukcije prvih višestupanjskih turbina (Shumilov) koje su ubrzo postale dominantan način bušenja u toj zemlji što se održalo do današnjih dana. Prva uspješna bušenja uz primjenu turbinskih bušilica u ostatku svijeta obavljena su 1956. godine u Francuskoj nakon čega se njihova primjena ubrzano širi diljem svijeta i počinje koristiti za odobalna (engl. *offshore*) bušenja u Meksičkom zaljevu i Sjevernom moru. U Hrvatskoj višestupanjske turbinske bušilice prvi su put korištene 1964. godine za izradu vertikalnih bušotina u vapnenim stijenama Dinarida uz korištenje isplaka na bazi vode te za usmjereno bušenje (Gretić et al., 1973).

Daljnji napredak tehnologije uključivao je povećanu kontrolu stabilnosti stijenki kanala bušotine i kuta otklona. Kompanija Neryfor 1982. godine predstavila je prvi upravljivi turbinski motor koji je kontrolirao otklanjanje primjenom stabilizatora, a 1992. godine i prvu upravljivu turbinsku bušilicu s podesivim kućištem što je našlo značajnu primjenu u izradi usmjerenih, a posebno horizontalnih dionica kanala bušotine ([www.drillers.com](http://www.drillers.com), 20.5.2020.).

## 2.2. Izvedba i princip rada

Širok raspon konstrukcijskih rješenja omogućio je primjenu dva glavna tipa turbinskih bušilica, brzohodnih i sporohodnih, uz dodatnu skupinu turbina za posebne namjene (jezgrovanje, reaktivni agregati). Odabir potrebne turbinske bušilice ovisi o željenim tehničkim karakteristikama (Gretić et al., 1973), tj. o:

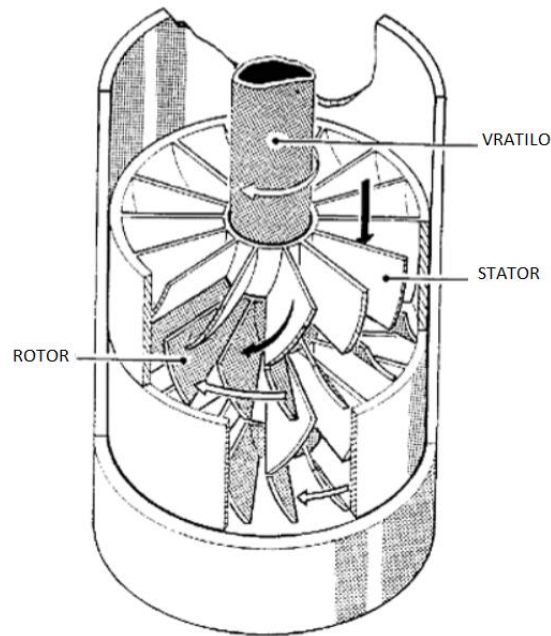
- profilu i nagibu lopatica rotora,
- polumjeru turbine,
- broju stupnjeva (sekcija),
- broju okretaja vratila,
- maksimalnoj očekivanoj snazi,
- okretnom momentu,
- padu tlaka u turbini,
- volumetrijskoj efikasnosti.

Sve turbinske bušilice sastoje se od tri glavna dijela:

- pogonskog dijela,
- pogonskog vratila,
- ležajeva.

Pogonski dio sastoji se od skupine povezanih elemenata rotora i statora. Rotor čine lopatice koje su povezane s pogonskim vratilom, dok je stator nepomičan i pričvršćen za kućište motora. Svaki par povezanih rotorskih i statorskih elemenata čini jedan stupanj turbine, kao što je prikazano na slici 2-1., a svaka turbina ima između 25 i 250 takvih stupnjeva. Cirkulacijom isplake kroz turbinu, lopatice statora skreću struju fluida do lopatica rotora što pokreće rotaciju vratila u smjeru kazaljke na satu. Manji dio isplake istovremeno se dodatno skreće i koristi za podmazivanje ležajeva, a veći dio, prolaskom kroz sve stupnjeve turbine, izlazi kroz mlaznice ili otvore dlijeta na dno bušotine (Inglis, 1987). Cirkulacija se završava povratkom kroz prstenasti prostor do isplačnih bazena na površini.

Lopatice rotora i statora izrađuju se najčešće od ugljičnog čelika s malim dodatkom legiranih metala (primjerice kroma), a postoje i plastične izvedbe koje pokazuju izrazita antiabrazivna svojstva, ali su primjenjive samo do temperatura od 100 °C (Gretić et al., 1973).



**Slika 2-1.** Presjek jednog stupnja turbinske bušilice ([www.drillingformulas.com](http://www.drillingformulas.com),

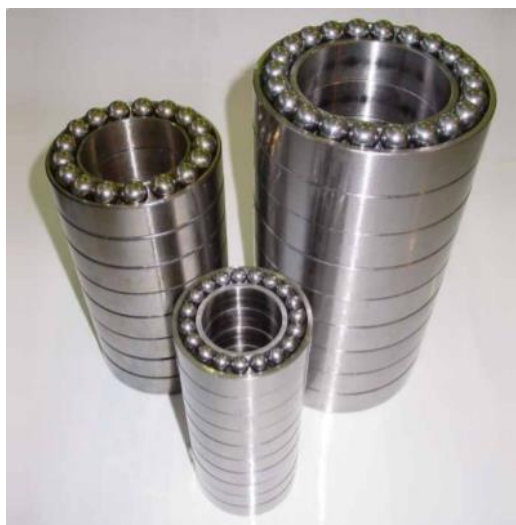
22.5.2020.)

Lopatice rotora i statora u turbini formiraju prsten i postavljaju se uvijek pod određenim kutom (profil) što dominantno utječe na pretvorbu energije, iznos pada tlaka i radne rezultate. Svi elementi turbine moraju u samoj konstrukciji biti glomazni i predimenzionirani kako bi mogli izdržati sva opterećenja kojima su izloženi u karakterističnim radnim uvjetima. Rotor i stator, tj. pogonski dio, posebno je osjetljiv na prisustvo veće količine čvrstih čestica u isplaci koje mogu izazvati čepljenje. Kako bi se ono izbjeglo nužno je osigurati dobro čišćenje dna bušotine i posebnu pažnju posvetiti kondicioniranju isplake prije povratka u bušotinu.

Pogonsko vratilo prenosi rotaciju (brzinu i okretni moment) pogonskog dijela na dlijeto. Gornji dio vratila rotira, dok je donji fiksni i povezan s dlijetom. Najčešće se izrađuje od titana zbog njegove izrazite otpornosti na koroziju, velike tvrdoće i stabilnosti pri visokim temperaturama.

Ležajevi omogućuju preuzimanje opterećenja pri radu turbine, u aksijalnom i radijalnom smjeru. Aksijalni ležajevi prenose opterećenje kolone bušaćih alatki i pogonskog dijela turbine na dlijeto, a u trenutcima dok je dlijeto podignuto iznad dna bušotine preuzimaju i hidraulička opterećenja (Gretić et al., 1973). Radijalni ležajevi centriraju pogonsko vratilo i postavljaju se duž vratila na udaljenostima od dva do tri metra. Posebnu

ulogu ima donji radijalni ležaj koji centrirajući donji dio vratila sprječava nastanak izvijanja i radijalnih vibracija te kontakt između lopatica rotora i statora. Za ispunjavanje ovih zadataka koriste se većinom kuglasti ležajevi, prikazani na slici 2-2., koji za razliku od kliznih mogu prenositi veća opterećenja uz manje gubitke zbog trenja, podnijeti više temperature i efektivno djelovati s isplakama većih gustoća (Gretić et al., 1973). Alternativna opcija su zatvoreni ležajevi s vlastitim spremnikom s uljem za podmazivanje. Izrađuju se od različitih kompozitnih materijala koji omogućuju stabilna svojstva na temperaturama do 650 °C i otpornost na utjecaje različitih fluida s kojima su u kontaktu te korozivnih medija (primjerice H<sub>2</sub>S).



**Slika 2-2.** Radijalni kuglasti ležajevi (<http://www.turbodrill.com/>, 23.5.2020.)

### **2.3. Prednosti i nedostaci**

Odabir načina bušenja određenog intervala ili cijele bušotine prvenstveno je određen ekonomskim načelima. Cilj svakog inženjera na bušenju je smanjenje neproduktivnog vremena i povećanje napretka bušenja, tj. smanjenje cijene po jedinici duljine bušotine. S tim ciljem primarna dvojba mnogih operatorskih kompanija je primjena rotacijskog načina bušenja ili bušenja dubinskim motorima, a u slučaju potonje opcije i odabir željenog tipa motora. U odnosu na rotacijsko bušenje turbinske bušilice imaju sljedeće prednosti ( Inglis, 1987):

1. snaga koju proizvode turbine veća je od one koju rotacijski sustav bušenja može prenijeti dlijetu;
2. turbine proizvode izrazito veću brzinu rotacije;

3. budući da je rotacija niza bušaćih alatki eliminirana, znatno je smanjeno trošenje samih alatki i zaštitnih cijevi što utječe na smanjenje broja instrumentacija i neplaniranih manevara;
4. budući da je rotacija niza bušaćih alatki eliminirana, smanjena su i naprezanja kojima su alatke izložene što omogućuje primjenu jeftinijih spojnica i alatki;
5. ostvaruje se od 20 do 50% veća mehanička brzina bušenja;
6. podjednako se uspješno koriste za izradu vertikalnih i usmjerenih bušotina;
7. uspješno se primjenjuju u uvjetima visokog tlaka i temperature;
8. manje su vibracije pri radu u usporedbi s drugim tipovima hidrauličkih motora.

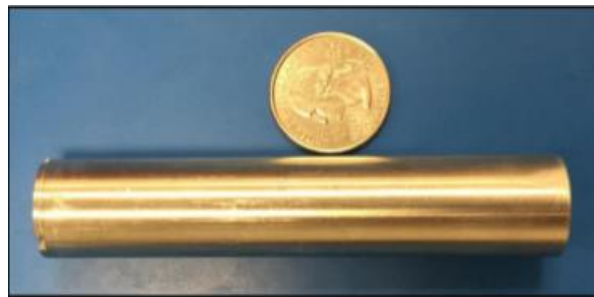
Primjena turbinskih bušilica ima i određene nedostatke:

1. povećani su početni troškovi uslijed nabavne cijene motora i potrebnih specijalnih dijelova;
2. potrebne su isplachne sisaljke većih kapaciteta kako bi se osigurao dovoljan tlak i volumen isplake;
3. osjetljive su na prisustvo čvrstih čestica u isplaci zbog čega je potreban pažljiv odabir njenog sastava i detaljnije pročišćavanje izlazne isplake;
4. ostvaruju skroman izlazni okretni moment;
5. zahtijevaju periodička održavanja koja obavljaju specijalizirane kompanije po preporuci proizvođača.

#### **2.4. Suvremene inovacije i poboljšanja**

Automatizacija i informatizacija, karakteristična za gospodarstvo 21. stoljeća, nezaobilazno je zahvatila i naftno-plinski sektor. Nova dostignuća značajno su olakšala praćenje podataka vezanih uz parametre bušenja, svojstva ugljikovodika i osobitosti dubinskih geoloških struktura. Često korišten sustav na istražnim i nekim proizvodnim bušotinama je sustav potpune kontrole ( engl. *total drilling control-TDC*) kojim se, između ostalog, kontrolira brzina rotacije, opterećenje na dlijeto, dobava tj. podaci nužni za uspješno bušenje bez obzira izrađuje li se bušotina rotacijskim načinom ili primjenom dubinskih motora.

Podaci vezani uz uvjete u bušotini dobivaju se primjenom različitih tipova senzora. Senzori predstavljaju sastavni dio današnje bušaće opreme, s posebnom važnošću kod dubinskih motora zbog teže kontrole istih. Turbinske bušilice imaju postavljene senzore u prijelazima s bušaćim šipkama i dlijetom (Jones et al., 2016). Senzori trodimenzionalno bilježe podatke o kutu odklona, udarcima, intenzitetu i učestalosti vibracija te o temperaturi. Ovaj način postavljanja osigurava neometan rad senzora, sprječava nepotrebno produljenje kolone bušaćih alatki i ne narušava njihovu stabilnost. Kako bi se maksimalno zaštitili, postavljaju se u posebno dizajnirana valjkasta ili okrugla kućišta, kao što je prikazano na slici 2-3., koja mogu podnijeti tlakove do 100 MPa. Senzori mogu samostalno memorirati podatke ili su pak spojeni sa sustavom mjerenja tijekom bušenja (engl. *measurement while drilling- MWD*), vrlo često korištenim pri usmjerenom bušenju.



**Slika 2-3.** Zaštitno kućište za senzore (Jones et al., 2016)

Kako bi se podaci zabilježeni sensorima i telemetrijskim sustavom uspješno koristili, u novije vrijeme bilježi se znatan razvoj programskih modela (primjerice OMRON) koji omogućuju praćenje i kontrolu podataka, a posebnu pažnju posvećuju uspješnom prijenosu istih s dubinskih mjernih uređaja (Kostarev i Sereda, 2017). Također, na tržištu su i sve napredniji senzori s vlastitim izvorima energije (primjerice triboelektrični generator) koji svoju primjenu tek nalaze u svijetu turbinskih bušilica (Wu et al., 2019).

Konstruktivski dizajn turbinskih bušilica također bilježi određene promjene. Glavna ideja je rješavanje problema malog okretnog momenta pri prijenosu na dlijeto sa zadržavanjem zadovoljavajuće brzine rotacije. Brzina rotacije i okretni moment obrnuto su proporcionalni i kod dosadašnjih turbina jedan zahtjev poništavao je drugi. Kao potencijalno rješenje predstavljen je optimizirani sustav reduktora koji obuhvaća planetarne, sunčane (engl. *sun gear*) i prstenaste zupčanike i postavljen je između pogonskog dijela i ležajeva (Jones et al., 2016). Ova promjena dizajna dolazi kao želja da se iskoriste sve prednosti turbinskog bušenja, a istodobno, povećavajući moment, smanji razlika u radnim

karakteristikama u odnosu na vijčane motore. Dosadašnja istraživanja pokazala su znatno bolje rezultate turbina s optimiziranim reduktorom, prikazane na slici 2-4., u odnosu na vijčane motore uspoređujući podatke o ostvarenim brzinama rotacije i vibracijama nastalim pri radu. Budući da pri bušenju slojeva izrazite tvrdoće nema zahtjeva za izraženim okretnim momentom i dalje su dominantne klasične turbinske bušilice, no smatra se da dodatna testiranja, vezana uz primjenu novog tipa turbina u ovom području, tek slijede.



**Slika 2-4.** Turbina s optimiziranim reduktorom (Jones et al., 2016)

### 3. IMPREGNIRANA DIJAMANTNA DLIJETA

#### 3.1. Dijamantna dlijeta

Izbor dlijeta i postizanje zadovoljavajuće mehaničke brzine bušenja predstavljaju jedan od najvažnijih zadataka na bušaćem postrojenju. Učinkovitost dlijeta bit će maksimalna pri optimalnoj ravnoteži osnog opterećenja, brzine rotacije i dobave, a izbor će ovisiti o geološkim i ekonomskim ograničenjima. Tri su glavna tipa dlijeta između kojih se bira najpovoljnije za određene uvjete bušenja: žrvanjska, dijamantna i polikristalinska.

Dijamantna dlijeta primjenjuju se, po opće prihvaćenom pravilu (Matanović, 2007), pri padu brzine bušenja ostalim dlijetima na 3 m po satu bušenja ili manje ili za bušenje kanala bušotine promjera manjih od 152,4 mm (6"). Izrađeni su od matičnog tijela u koje su utisnuti ili impregnirani elementi za razrušavanje što smanjuje njihovo trošenje. Elementi za razrušavanje su dijamantni prah ili zrnca dobivena od prirodnih ili termički stabilnih dijamanta, a mogu se koristiti do temperature od 1200 °C kako bi se spriječila grafitizacija tj. prelazak dijamanta u stabilniji ugljični oblik-grafit. Prije ugradnje dijamantni prah prolazi proces sinteriranja tj. okrupnjavanja zagrijavanjem na temperaturu površinskog taljenja kako bi se dobila poboljšana svojstva reznih površina.

Hlađenje dlijeta i odstranjivanje krhotina postiže se prolaskom isplake, a otvori za isplaku mogu biti križni ili centralni. Križni karakterizira izmjena visokotlačnih i niskotlačnih područja na licu dlijeta, a centralni otvor protjecanje isplake od centra dlijeta prema obodu. Po obliku, dijamantna dlijeta mogu biti dvostrukog, modificiranog dvostrukog i okruglog konusa pri čemu je postupno širenje čela i zaobljavanje konusa proporcionalno povećanju tvrdoće stijena. Promjenu oblika prati i promjena izgleda i rasporeda dijamanta na samom licu dlijeta pa se tako za mekše stijene koriste veliki i široko razmaknuti dijamanti, a za tvrde oni manji i vrlo gusto raspoređeni (Matanović, 2007).

Razrušavanje stijena primjenom dijamantnih dlijeta postiže se utiskivanjem, abrazijom ili istiranjem. Najčešći način je utiskivanje gdje se odlamanje stijene postiže kao posljedica iniciranih naprezanja u bušenoj stijeni, a najrjeđi abrazija gdje je tvrdoća stijene ekstremna pa je jedino moguće njezino postupno trošenje. Dijamantna dlijeta, u slučaju optimalne ravnoteže bušaćih parametara, buše kanal bušotine nominalnog promjera bez obzira na način razrušavanja ili vrijeme bušenja što im daje značajnu prednost u odnosu na ostala dlijeta. Kako bi to bilo moguće, potrebno je koristiti dlijeta smanjenog promjera ako je dijamantnom dlijetu u bušotini prethodilo žrvanjsko dlijeto. U tom slučaju, promjer je



manji za 1,6 mm (1/16"), a u slučaju loše stabilizacije za 3,2 mm (1/8"). Veliku uštedu predstavlja i mogućnost ponovnog iskorištavanja dijela neoštećenih dijamanta iz istrošenog u novom dlijetu jer se time posljedično smanjuje njegova početna cijena (Matanović, 2007).

Klasifikacija dijamantnih dlijeta predstavlja standardizirani prikaz dlijeta dostupnih na tržištu koje je usvojilo Udruženje američkih bušačkih poduzetnika (engl. *International association of drilling contractors- IADC*) 1992. godine (Matanović, 2007). Sastoji se od slovno-brojčane oznake i obuhvaća četiri parametra:

1. materijal tijela dlijeta gdje M označava matrična tijela karakteristična za ovaj tip dlijeta;
2. dimenziju elemenata za razrušavanje gdje:
  - broj 6 označava do 3 dijamanta na karat,
  - broj 7 označava 3 do 7 dijamanta na karat,
  - broj 8 označava više od 7 dijamanta na karat.
3. tip dlijeta gdje:
  - broj 1 odnosi se na prirodne dijamante,
  - broj 2 odnosi se na termički stabilne dijamante,
  - broj 3 odnosi se na kombinaciju prirodnih i termički stabilnih dijamanta,
  - broj 4 odnosi se na impregnirana dlijeta.
4. profil dlijeta gdje:
  - broj 1 predstavlja ravno dlijeto,
  - broj 2 predstavlja kratko dlijeto,
  - broj 3 predstavlja srednje dlijeto,
  - broj 4 predstavlja dugo dlijeto.

### **3.2. Impregnirana dlijeta**

Impregnirana dlijeta, čiji primjer je prikazan na slici 3-1., poseban su tip dijamantnih dlijeta koja se koriste za bušenje izrazito tvrdih i/ili abrazivnih slojeva. Građena su od matričnog tijela u koje su impregnirani dijamantni prah ili zrnca pa ih karakterizira velika gustoća dijamantnog materijala. Izrađuju se najčešće u promjerima od 149,2 mm (5 7/8") do 311,2 mm (12 1/4") (Pantoja et al., 2015).



**Slika 3-1.** Impregnirano dlijeto (<https://www.bhge.com/>, 28.5.2020.)

Matrica impregniranih dlijeta izrađuje se od volframovog karbida, kobalta ili željeza, a ima ulogu pridržavanja i zaštite dijamanta te formiranja osnove samog dlijeta (Songcheng et al., 2013). Matrice od volframovog karbida najviše su zastupljene, sinteriraju se na visokim temperaturama, a odlikuje ih velika tvrdoća i snažna otpornost na abrazivno trošenje. Kobaltne matrice imaju dobru žilavost, prilagodljive su tvrdoće, ali slabije otpornosti na trošenje u usporedbi s volframovim karbidom. Željezne matrice su najjeftinije i najdostupnije, ali imaju značajno slabiju tvrdoću i otpornost na trošenje od prethodnih.

Impregnirana dlijeta razrušavaju stijene istiranjem. Prilikom razrušavanja dijamanti se intenzivno troše i potpunim istrošenjem ispadaju iz matrice. Njih zamjenjuju novi dijamanti koji postupnim trošenjem matrice postaju izloženi tj. aktivno sudjeluju u razrušavanju stijene. Ovaj proces poznat je kao samooštrenje dlijeta i ponavlja se sve dok ne dođe po potpunog istrošenja dlijeta tj. svih dijamanta ugrađenih u matricu (Xuefeng i Shifeng, 1994). Kako bi se produžio radni vijek dlijeta, svi dijamanti moraju biti jednako izloženi trošenju tj. imati jednake radne visine čemu se posvećuje pažnja prilikom konstrukcije.

Impregnirana dlijeta imaju relativno mali napredak bušenja (engl. *rate of penetration- ROP*) u usporedbi s drugim poznatim tipovima dlijetima. To je posljedica

male radne visine tj. izloženosti reznih elemenata i tvrdoće stijena koje buše pa ostvaruju malu dubinu prodiranja (engl. *depth of cut-DOC*). Kako bi učinkovito bušila takve stijene, impregnirana dlijeta zahtijevaju veliku brzinu rotacije zbog čega se primjenjuju s dubinskim motorima, ponajprije turbinskim bušilicama. Istraživanja su pokazala da se pri konstantom opterećenju ROP gotovo linearno povećava s brzinom rotacije (Husgard et al., 2015).

Primjena velikih brzina rotacije, s druge strane, poništava zahtjev za velikim osnim opterećenjem što daje impregniranim dlijetima određene prednosti (Langille et al., 2009). Smanjeno opterećenje pomaže u održavanju vertikalnosti kanala bušotine jer su smanjene mogućnosti nastanka savijanja u navojnim spojevima, a dodatnu zaštitu pružaju stabilizator i/ili podesivo kućište turbinske bušilice. To je u kombinaciji s održavanjem nominalnog promjera kanala bitno jer se smanjuje potreban volumen cementa nužan za cementaciju zaštitnih cijevi, trošenje bušaćih alatki i omogućuje se bolje čišćenje dna.

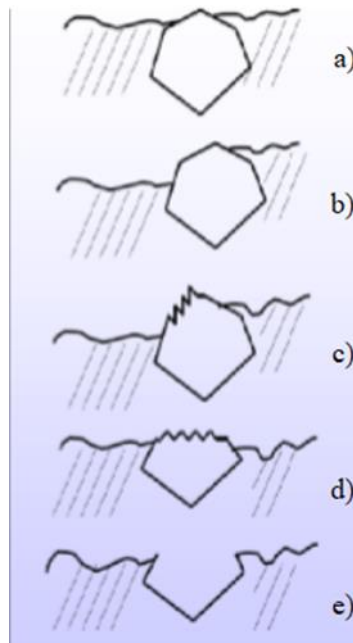
Odabir impregniranih dlijeta preferira se u odnosu na preostala poznata dlijeta zbog značajno manjeg trošenja. Žrvanjska dlijeta u uvjetima izuzetno tvrdih i/ili abrazivnih stijena pojačano gube rezne elemente, a nerijetko dolazi i do loma žrvnjeva što najčešće zahtijeva instrumentaciju, a neprikladna su i zbog ograničenja ležajeva. Polikristalinska dijamantna dlijeta (engl. *polycrystalline diamond compact-PDC*) s povećanjem tvrdoće stijene pokazuju povećanu torziju, vibracije i gube stabilnost pri radu (Pantoja et al., 2015). Pojačano se troše vanjski rezni elementi zbog čega se smanjuje promjer kanala, a istovremeno je ograničeno maksimalno opterećenje zbog mogućeg izvijanja koje bi povećalo mali DOC i ROP.

Impregnirana dlijeta izrazito su podložna optimizaciji kako bi se ostvarila maksimalna učinkovitost pri radu (Langille et al., 2009). Primarna optimizacija postiže se variranjem broja i radne visine izloženih dijamantata. U širem smislu, može se varirati veličina, tip i gustoća dijamantata uz kemijski sastav matrice, a te karakteristike dolaze u kombinaciju s glavnim pokazateljima režima bušenja: osnim opterećenjem, brzinom rotacije i dobavom. Budući da s ostalim dijamantnim dlijetima dijele osjetljivost na udarce, potrebno je osigurati dobro čišćenje dna bušotine (uklanjanje čvrstih čestica koje smetaju i turbinskim bušilicama), a od velike koristi je i poznavanje mehanizama trošenja.

### 3.3. Trošenje impregniranih dlijeta

Trošenje impregniranih dlijeta neizbježan je proces povezan s radom na dnu bušotine i ovisi o svojstvima dijamanata, matrice, bušenih stijena te o primijenjenim pokazateljima režima bušenja. Kao što je već spomenuto, tijekom razrušavanja stijene matrica se postupno troši i tako izlaže nove dijamente koji zamjenjuju potrošene. Na slici 3-2., prikazan je tipičan radni ciklus jednog dijamenta u impregniranom dlijetu pri čemu:

- a) novi, neoštećeni dijament u matrici predstavlja početak ciklusa;
- b) dijament počinje sudjelovati u razrušavanju;
- c) počinje trošenje tj. nastaju tzv. mikrofrakture;
- d) dijament je izrazito istrošen;
- e) potpuno istrošen dijament "ispada" i ustupa mjesto novom daljnjim trošenjem matrice.



**Slika 3-2.** Ciklus trošenja dijamanata u impregniranom dlijetu (Langille et al., 2009)

Prikazano trošenje matrice predstavlja poželjno trošenje, a uzroci trošenja mogu biti:

- kontakt s bušenom stijenom,
- isplaka,
- krhotine bušenih stijena.

Krhotine bušenih stijena predstavljaju glavni uzrok trošenja matrice impregniranih dlijeta (Li et al., 2013). Budući da je tvrdoća kvarca, koji je glavni mineral bušenih stijena, manja od tvrdoće volframovog karbida koji je najvažniji dio matrice, neće doći do trošenja samih čestica volframovog karbida nego vezivnog materijala sačinjenog od mekših legura. Taj vezivni materijal povezuje čestice volframovog karbida i zadržava dijamente u matrici do trenutka izlaganja. Njegovim nestajanjem razbija se struktura matrice i posljedično smanjuje volumen. Kako bi se održao željeni intenzitet trošenja nužno je kontrolirati količinu krhotina koje ispunjavaju prostor između dna bušotine i lica dlijeta. Prevelika količina krhotina pretjerano će trošiti dlijeto i smanjiti njegov radni vijek, a dokazano je da se količina krhotina povećava s dubinom prodiranja tj. s povećanjem napretka bušenja. Premala količina krhotina povezana je s lošim ili nikakvim napretkom dlijeta. U tom slučaju, trošenjem izloženih dijamanata matrica preuzima ulogu bušenja za što nije namijenjena što rezultira brzim i naglim istrošenjem dlijeta (Xuefeng i Shifeng, 1994).

Trošenje dijamanata tijekom bušenja podrazumijeva abrazivno i mikrofrakturno trošenje. Mikrofrakturno trošenje je dominantan oblik trošenja i odnosi se na smanjenje radne visine i volumena dijamanata kao posljedica razrušavanja stijene. Na taj oblik trošenja primarno utječu postojeća oštećenja, pukotine u kristalografskom sustavu i karakteristike svih vanjskih opterećenja tijekom rada. Kako bi se održalo željeno trošenje potrebno je kontrolirati dubinu prodiranja i ROP kako bi se omogućilo širenje i povezivanje mikropukotina u dijamantnom prahu. Njihovim povezivanjem odbacuje se potrošeni dio dijamanata i omogućuje puna iskorištenost volumena što je bitno u pogledu očuvanja ROP-a i ostvarivanja željenog napretka (Xuefeng i Shifeng, 1994).

Temperaturno trošenje poseban je oblik trošenja koji intenzivnije pogađa dijamente od matrice i povezan je s krhotinama razrušenih stijena koje sudjeluju u redovitom trošenju matrice. Pri većoj dubini prodiranja, krhotine tvore vrlo guste i kompaktne nakupine koje prijanjaju na lice dlijeta i obljepljuju dijamente. Tijekom bušenja, trenje između dlijeta i bušene stijene pretvara se u toplinu i posljedično dovodi do porasta temperature duž dodirne zone dlijeto-stijena. Budući da većina bušenih stijena ima nisku toplinsku vodljivost povećana temperatura se zadržava na dijamantima i u normalnim uvjetima taj višak topline odvodi isplaka. Kod temperaturnog trošenja obljepljene nakupine krhotina tvore prepreku između dijamanata i isplake, onemogućeno je odvođenje topline i dolazi do efekta mikrospaljivanja koje ubrzano troši dijamente i povećava troškove bušenja (Xuefeng i Shifeng, 1994).

Praćenje istrošenosti i odabir trenutka vađenja za impregnirana dlijeta kompleksniji su procesi u usporedbi s ostalim dlijetima. Pri bušenju izrazito tvrdih stijena mali ROP i pojačane vibracije su očekivani stoga je potrebno pratiti i dodatne parametre. Posebno korisnim pokazalo se praćenje oblika i količine krhotina bušenih stijena u isplaci korištenjem površinskih sita različitih veličina (Fierro et al., 2015). Smanjenje udjela grubih krhotina, karakterističnih za efektivno razrušavanje stijena, i povećanje udjela glatkih jasan su znak istrošenosti dlijeta pri čemu udio glatkih krhotina od 15% i više označava vjerojatnu potrebu za promjenom dlijeta. Istrošenost dlijeta izvađenog na površinu, čiji primjer je prikazan na slici 3-3., može se odrediti korištenjem IADC-ovog standardiziranog obrasca za dijamanata dlijeta (Matanović, 2007). Obrazac sadrži osam stupaca, oznaka je brojčano-slovna i prikazuje podatke o:

- istrošenosti dijamanata na unutarnjoj površini određenoj s  $2/3$  polumjera dlijeta (stupac 1); prikazuje se brojevima 0-8;
- istrošenosti dijamanata na vanjskoj površini određenoj s  $1/3$  polumjera dlijeta (stupac 2); prikazuje se brojevima 0-8;
- vrsti oštećenja (stupac 3); slovna oznaka;
- mjestu oštećenja (stupac 4); slovna oznaka;
- stanju ležajeva (stupac 5); oznaka X jer nisu dio impregniranih dlijeta;
- kalibru (stupac 6); prikazuje se u koracima smanjenja od 1,6 mm ( $1/16''$ );
- drugim oštećenjima (stupac 7); slovna oznaka;
- razlogu vađenja (stupac 8); slovna oznaka.



**Slika 3-3.** Istrošeno dlijeto (Huusgard et al, 2015)

Smanjenje trošenja dodatno je postignuto inovacijama u području konstrukcije i dizajna. Za izradu dlijeta sve više se koriste kompozitni materijali koji podrazumijevaju složene legure od nekoliko tipova metala (Songcheng et al., 2013). Njihova primjena prilagođena je pojedinom problematičnom tipu stijene ili korozivnom mediju s naglaskom na prilagodbu tvrdoće vezivnog sredstva matrice. Vrlo uspješnom promjenom pokazao se i novi dizajn površine dlijeta, tzv. bionički dizajn (Wang et al., 2015). Bionički dizajn podrazumijeva postojanje jednoliko raspoređenih konkavnih šupljina duž lica dlijeta koje aktivno sudjeluju u smanjenju trošenja, a nastao je po uzoru na živi svijet, točnije kukca kotrljana. Šupljine su ispunjene grafitnom i epoksi smolom koje osiguravaju učinke samopodmazivanja i regeneracije. Tijekom bušenja šupljine preuzimaju veći dio krhotina koje se inače vežu uz površinu dlijeta tako smanjujući trošenje matrice. Istovremeno smole podmazivanjem smanjuju trenje na dodirnoj zoni krhotina i površine dlijeta smanjujući tako i potencijalno izraženu toplinu. Također, postojanje neravne površine povećava uski prostor između lica dlijeta i bušene stijene što omogućuje bolju raspodjelu opterećenja duž dijamanata i veću učinkovitost bušenja, a smanjuje vjerojatnost pojave mikrospaljivanja.

#### **4. TERENSKI PRIMJER PRIMJENE TURBINSKIH BUŠILICA I IMPREGNIRANIH DLIJETA**

Kompanija Saudi Aramco pokrenula je prije desetak godina izradu nekoliko odobalnih plinskih bušotina koje bi Saudijsku Arabiju opskrbljivale plinom za domaću potrošnju i potrebe petrokemije. Njihova izrada podrazumijevala je bušenje izuzetno tvrde i abrazivne Khuff formacije koja u kombinaciji s visokim ležišnim temperaturama čini uvjete bušenja vrlo izazovnim i otežavajućim (Carrillo et al., 2009).

Khuff formacija obuhvaća nekoliko tipova stijena i proteže se na dubini od 4000 do 5000 m. Formaciju dominantno čine pješčenjaci u kombinaciji s vapnencima, šejlovima, dolomitima i anhidritima, a tlak frakturiranja može doseći 275 MPa. Osim tvrdoće i abrazivnosti problematični su i žilavost, nepravilnosti u rasporedu, veličini i orijentaciji mineralnih zrna te obljepljivanje dlijeta koje je često kod bušenja ove formacije, a nastaje zbog blokade pogonskog dijela turbinske bušilice (Carrillo et al., 2009).

Poučeni prethodnim iskustvima, u kompaniji Saudi Aramco odlučili su u prvoj fazi izraditi dvije bušotine primjenom turbinskih bušilica i impregniranih dlijeta i rezultate usporediti s trećom, izrađenom rotacijskim načinom bušenja i PDC dlijetima. Zbog lakšeg razumijevanja ove će bušotine u nastavku teksta biti označene B<sub>1</sub>, B<sub>2</sub>, a treća usporedna B<sub>0</sub>. Primjenom turbinskih bušilica i impregniranih dlijeta u kompaniji su htjeli postići (Carrillo et al., 2009):

- smanjenje učestalosti manevara,
- smanjenje broja instrumentacija,
- produljenje radnog vijeka dlijeta,
- povećanje napretka bušenja.

Početak projekta predstavljao je izradu bušotine B<sub>1</sub>. Bušotina je već bila izrađena do Khuff formacije i svrha primjene novog načina bušenja bilo je dosezanje željene dubine od 5455 m. Za bušenje formacije iskorišteno je pet impregniranih i jedno PDC dlijeto, korišteno u malom intervalu od 39 m rotacijskim načinom bušenja, jer se napredak bušenja impregniranih dlijeta pokazao nezadovoljavajućim. Prosječna vrijednost napretka bušenja svih dlijeta iznosila je 1,58 m/h i sva su dlijeta nakon vađenja bila u dobrom stanju. Promjer i stabilnost kanala bili su unutar očekivanih vrijednosti, nije došlo do promjene kuta otklona, a visoke temperature nisu narušile izdržljivost i radne karakteristike turbinskih bušilica. Nije



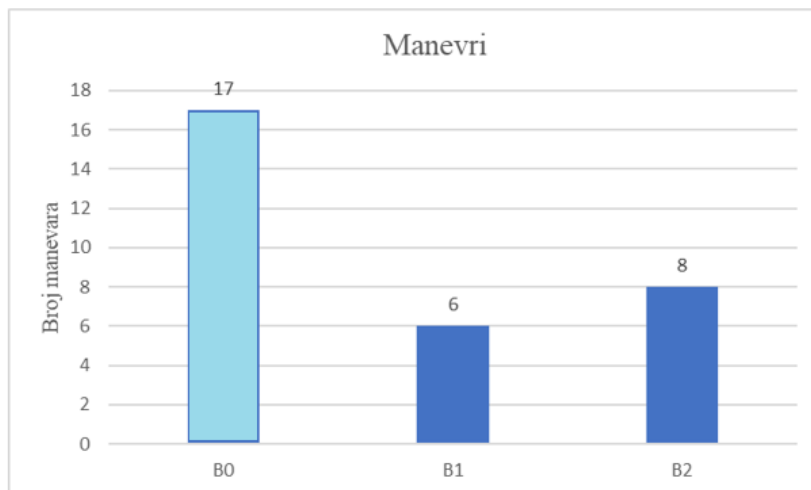
zabilježena pojava neproaktivnog vremena povezana s obljepijivanjem dlijeta što se pri samom planiranju nastojalo spriječiti smanjenjem vremena boravka alata u bušotini na 80 sati i primjenom posebnog automatiziranog sustava koji prijenosom dodatnog momenta vratilo turbine sprječava njenu blokadu. Zbog postignuća zadovoljavajućih rezultata nastavilo se s projektom i krenulo s izradom bušotine B<sub>2</sub> (Carrillo et al., 2009).

Bušotina B<sub>2</sub> izrađena je s ciljem dobivanja vrijednosti glavnih bušaćih parametara i usporedbe s bušotinom B<sub>1</sub> sa svrhom formiranja trenda za buduća bušenja. Izbušeno je 718 m duž Khuff formacije s prosječnim napretkom bušenja od 1,5 m/h. U izradi je korišteno šest impregniranih i dva PDC dlijeta (između prvog i drugog impregniranog), a tijekom izrade obavljeno je i jezgrovanje na intervalu od 18 m. Kao i u bušotini B<sub>1</sub> stabilnost kanala bila je zadovoljavajuća i nije zabilježena pojava neproaktivnog vremena povezana s obljepijivanjem dlijeta (Carrillo et al., 2009).

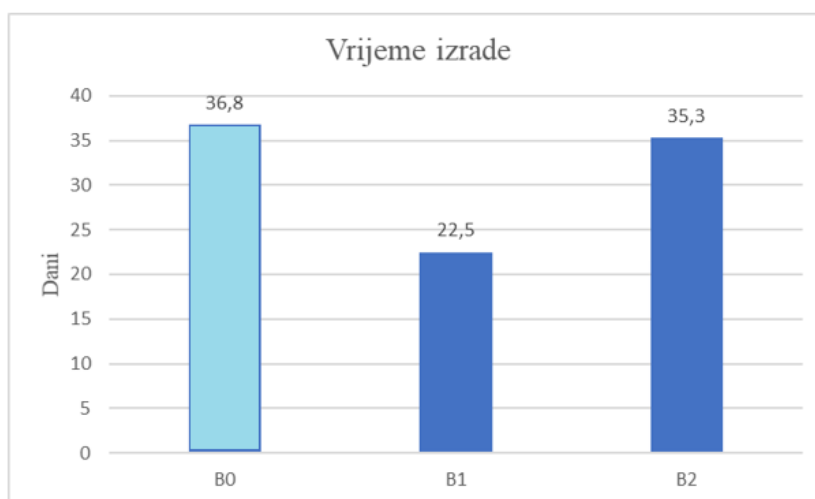
Bušotina B<sub>0</sub> jedna je od bušotina prethodno izrađenih rotacijskim načinom bušenja, a poslužila je kao usporedba u ovom projektu. Za izradu iste upotrijebljeno je sedamnaest PDC dlijeta, a konačna dubina iznosila je 5477 m (Carrillo et al., 2009).

Usporedba dijela rezultata za bušotine B<sub>0</sub>, B<sub>1</sub>, i B<sub>2</sub> dana je slikama 4-1., 4-2., 4-3. i 4-4. Ostali rezultati mogu se sumirati (Carrillo et al., 2009):

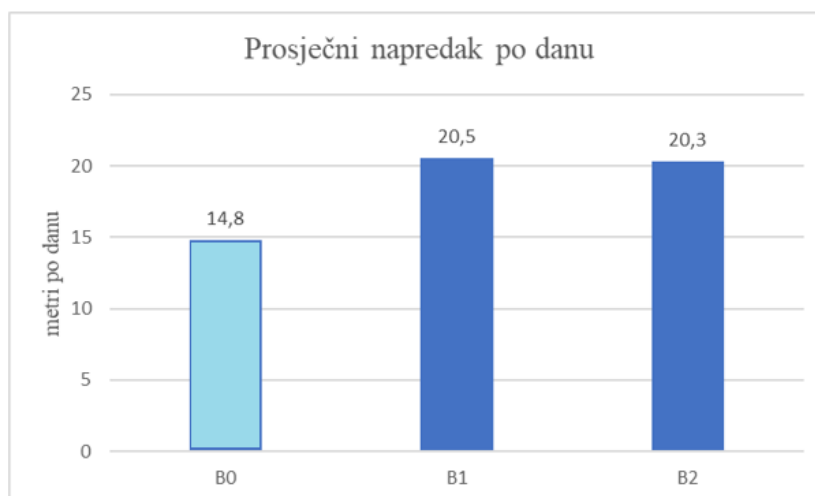
1. visoka temperatura formacije Khuff nije štetno utjecala na izdržljivost i rad turbinskih bušilica;
2. primjenom jedanaest impregniranih i tri PDC dlijeta izbušeno je 1177 m u dvije bušotine;
3. sve turbinske bušilice odradile su 80 sati u bušotini prije vađenja što se pokazalo kao zadovoljavajuće ograničenje jer nije došlo do većih kvarova;
4. sva impregnirana dlijeta izvađena su iz bušotine nakon 80 sati rada u odličnom stanju što ostavlja mogućnost korištenja u budućim bušenjima;
5. tijekom bušenja nije zabilježena pojava većeg trošenja kolone bušaćih alatki koje bi uzrokovalo neplanirane manevre.



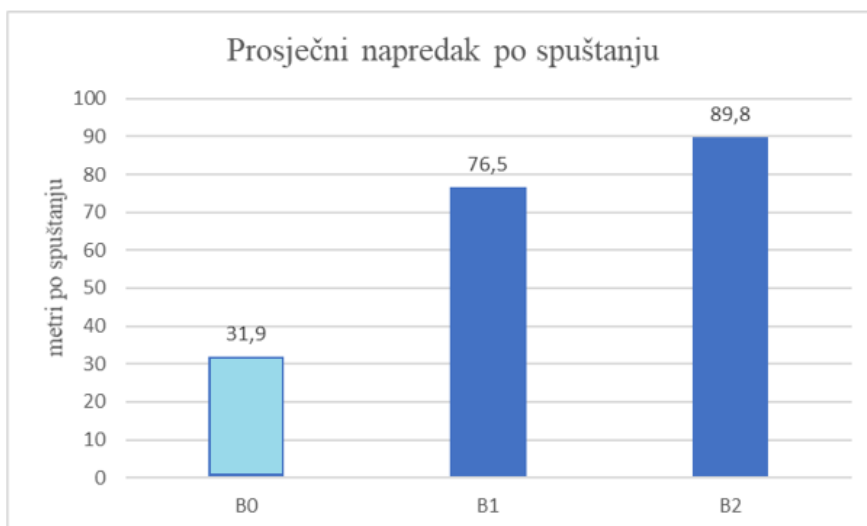
**Slika 4-1.** Broj manevara po bužotini (prema Carrillo et al., 2009)



**Slika 4-2.** Vrijeme izrade po bužotini (prema Carrillo et al., 2009)



**Slika 4-3.** Prosječni dnevni napredak po bužotini (prema Carrillo et al., 2009)



**Slika 4-4.** Prosječni napredak za jedno spuštanje po bušotini (prema Carrillo et al., 2009)

## 5. ZAKLJUČAK

Primjena turbinskih bušilica i impregniranih dlijeta pokazala se vrlo uspješnom u praksi za bušenje stijena izrazite tvrdoće. Vrijednost ostvarenog napretka bušenja približno je jednaka napretku bušenja dobivenim korištenjem žrvanjskih i/ili PDC dlijeta za isti tip stijena i nije pokazala veća odstupanja pri spomenutim radnim uvjetima. Na primjeru bušotina u Saudijskoj Arabiji vidljiv je čitav niz prednosti koje donosi ovaj način bušenja. Eliminacijom rotacije cijelog niza alatki znatno je smanjeno trošenje dlijeta i krutog alata čime je smanjen broj manevara za preko 50 %, vidljivo na slici 4-1., što je i bio jedan od glavnih ciljeva uvođenja ovog načina bušenja. Ukupna duljina probušenih intervala jednim dlijetom mnogostruko je povećana pri čemu je korišten manji broj dlijeta u usporedbi s rotacijskim načinom bušenja. Manji broj dlijeta omogućio je smanjenje broja dana potrebnih za izradu problematičnih intervala čime je automatski smanjeno ukupno vrijeme bušenja, cijena jedinice duljine i omogućeno ranije privođenje bušotina proizvodnji. Uz vremensku uštedu važnom karakteristikom pokazalo se i uspješno održavanje zadanog promjera kanala, vertikalnosti ili željenog kuta otklona.

Bušenje u uvjetima izrazite tvrdoće i abrazivnosti pokazalo je da su žrvanjska dlijeta konstrukcijski neprikladna i da za zadovoljenje ekonomskih ograničenja zahtijevaju poboljšanja u području konfiguracije inserata, održavanja kalibra i smanjenja vibracija. Za PDC dlijeta kritičnim su se pokazali torzija i vibracije, a dodatna poboljšanja potrebna su i u području maksimalnog primjenjivog opterećenja na dlijeto koje neće dovesti do savijanja navojnih spojeva dlijeta. Vijčani motori, u usporedbi s turbinskim bušilicama, nisu našli širu primjenu zbog nestabilnosti elastomernih elemenata na visokim temperaturama i zbog značajno većih vibracija pri bušenju izrazito tvrdih slojeva.

Također, i odabrani način bušenja pokazao je određene nedostatke. Oni se uglavnom odnose na veliku početnu cijenu, nemogućnost ekonomski prihvatljive primjene u ostalim stijenama, osjetljivost na udarce i čvrste čestice u isplaci i potrebu za sisaljka koje mogu ostvariti velike dobave. Buduća poboljšanja prvenstveno su moguća u vidu povećanja efikasnosti (trenutno između 60 i 70 %) i otpornosti ležajeva turbinskih bušilica ili profila i dizajna dlijeta što bi dodatno unaprijedilo efikasnost i radne karakteristike bušenja primjenom turbinskih bušilica i impregniranih dlijeta.

## 6. LITERATURA

1. CARRILLO G., FARID U., ALBRECHT M., COOK P., FEROZE N., NEVLUD K., 2009. Innovative Solution for Drilling Pre-Khuff Formations in Saudi Arabia Utilizing Turbodrill and Impregnated Bits, SPE 120367, SPE Middle East Oil & Gas Show and Conference, Bahrain International Exhibition Centre, Kingdom of Bahrain, 15-18 March 2009, str. 1-8
2. FIERRO M., ATENCIO N., SOLANO R., VARELA R., ITURRIZAGA F., TORIBIO L., TUFANO A, GUZMAN F., 2015. Finding the Breakeven Point of Diamond Impregnated Bit Wear in Turbodrill Applications, OTC-26302-MS, Offshore Technology Conference Brazil, Rio de Janeiro, Brazil, 27-29 October 2015., str. 1-5
3. GRETIĆ Z., OMRČEN B., PETROVIĆ M., KARANJAC I., BORZATTI J., GRDEŠIĆ D., BASARIĆ M., PULJIZ J., PLAVEC R., HRELJAK T., 1973. Priručnik za duboko bušenje. Zagreb: INA-Naftaplin
4. HUUSGARD P., CAYCEDO A., CAI M., 2015. Diamond-Impregnated Drillbit Performance in the Lower Basalt Series Offshore the Faroe Islands. A Case Study Based on Basalt Outcrop Testing, SPE-175880-MS, SPE North Africa Technical Conference and Exhibition, Cairo, Egypt, 14-16 September 2015., str. 1-21
5. INGLIS T. A., 1987. Directional Drilling. London, Dordrecht, Boston: Graham & Trotman
6. JONES S., FEDDEMA C., SUGIURA J. 2016. A Gear-Reduced Drilling Turbine Provides Game Changing Results: An Alternative to Downhole Positive Displacement Motor, IADC/SPE-178851-MS, IADC/SPE Drilling Conference and Exhibition, Fort Worth, Texas, 1-3 March 2016., str.1-10
7. KOSTAREV S. N., SEREDA T. G., 2017. Development of software and hardware models of monitoring, control, and data transfer to improve safety of downhole motor during drilling, IOP Conference Series: Earth and Environmental Science 87 032016, str. 2-6
8. LANGILLE P., DEEN A., KLASSEN J., 2009. Minimizing Risks, Maximizing On-Bottom Drilling Time: Turbodrilling with Impregnated Bits Improves Efficiency and Circumvents Trouble Time, Southern Oklahoma, SPE/IADC 119230, SPE/IADC Drilling Conference and Exhibition, Amsterdam, The Netherlands, 17-19 March 2009., str 1-22

9. MATANOVIĆ D., 2007. Tehnika izrade bušotina. Zagreb: Rudarsko-geološko-naftni fakultet
10. PANTOJA R., BRITTO G., BUZZA J., VIEIRA A.M., LAROCA F., APPELSHAEUSER G., 2015. Pioneer Turbodrilling With 16 ½" Impregnated Bit in Deep Pre-Salt Well in Santos Basin, SPE/IADC-173125-MS, SPE/IADC Drilling Conference and Exhibition, London, United Kingdom, 17-19 March 2015., str 1-12
11. LI S., XIANG H., ZHANG L., 2013. The Wear Mechanisms of Diamond Impregnated Bit Matrix, Applied Mechanics and Materials Vol. 441 pp 15-18, Trans Tech Publications, Switzerland, str 1-5
12. SONGCHENG T., XIAOHONG F., KAIHUA Y., LONGCHEN D., 2013. A new composite impregnated diamond bit for extra-hard, compact and nonabrasive rock formation. Int. Journal of Refractory Metals and Hard Materials 43 (2014), str. 186–192
13. WANG Z., ZHANG Z., SUN Y., GAO K., LIANG Y., LI X., REN L., 2015. Wear behavior of bionic impregnated diamond bits. Tribology International 94 (2016), str. 217-222
14. WU C., FAN C., WEN G., 2019. Self-Powered Speed Sensor for Turbodrills Based on Triboelectric Nanogenerator. Sensors 2019, 19, 4889, str. 1-8
15. XUEFENG T., SHIFENG T., 1994. The wear mechanisms of impregnated diamond bits, Wear 177 (1994), str. 81-91

WEB:

16. BAKER HUGHES, IRev Impregnated Diamond Bits. URL:  
<https://www.bhge.com/upstream/drilling/drill-bits/impregnated-drillbits>  
(28.5.2020.)
17. NGT., 2018. Product Catalogue. URL:  
[http://www.turbodrill.com/pdf/eng/ngt\\_catalogue\\_eng\\_160318\\_inch.pdf](http://www.turbodrill.com/pdf/eng/ngt_catalogue_eng_160318_inch.pdf)  
(23.5.2020.)
18. VAN DEN BOS M., 2017. History of Turbodrills in the Oil and Gas Industry  
URL: <https://drillers.com/history-turbodrills-oil-gas-industry/> (20.5.2020.)
19. URL: <http://www.drillingformulas.com/what-are-turbine-drilling-motors/>  
(22.5.2020)

**IZJAVA:**

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

A rectangular box containing a handwritten signature in blue ink. The signature is written in a cursive style and appears to read 'Ivan Čagalj'.

Ivan Čagalj



KLASA: 402-04/20-01/114  
URBROJ: 251-70-03-20-3  
U Zagrebu, 31.08.2020.


Ivan Čagalj, student

## RJEŠENJE O ODOBRENJU TEME


Na temelju Vašeg zahtjeva primljenog pod KLASOM: 602-04/20-01/114, UR.BROJ: 251-70-12-20-1 od 28.04.2020. godine priopćujemo temu završnog rada koja glasi:

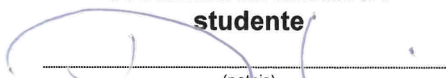
### PRIMJENA TURBINSKIH BUŠILICA I IMPREGNIRANIH DLIJETA ZA BUŠENJE SLOJEVA IZRAZITE TVRDOĆE

Za voditelja ovog završnog rada imenuje se u smislu Pravilnika o završnom ispitu dr. sc. Zdenko Krištafor, redoviti profesor Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu.

  
Voditelj  
(potpis)  
Prof. dr. sc. Zdenko Krištafor  
(titula, ime i prezime)

Predsjednik povjerenstva za  
završne i diplomske ispite

  
(potpis)  
Doc. dr. sc. Vladislav Brkić  
(titula, ime i prezime)

Prodekan za nastavu i  
studente  
  
(potpis)  
Izv. prof. dr. sc. Dalibor Kuhinek  
(titula, ime i prezime)