# Samopodešavajuća PDC dlijeta

**Vedriš, Karlo**

**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:169:349101

*Rights / Prava:* In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-03-28**



*Repository / Repozitorij:*

Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering Repository, University of Zagreb









SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

RUDARSKO-GEOLOŠKO-NAFTNI FAKULTET

Preddiplomski studij naftnog rudarstva

# SAMOPODEŠAVAJUĆA PDC DLIJETA

Završni rad

Karlo Vedriš

N - 4101

Zagreb, 2020.

Sveučilište u Zagrebu
Rudarsko-geološko-naftni fakultet

Završni rad

# SAMOPODEŠAVAJUĆA PDC DLIJETA

KARLO VEDRIŠ

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

Sažetak

Otkako su se pojavila na tržištu PDC dlijeta prošla su kroz brojne promjene i nadogradnje, a jedno takvo unapređenje je i tehnologija samopodešavanja dubine prodiranja reznih elemenata (engl. *Self-Adjusting Depth Of Cut Control*). Ovo tehnološko rješenje razvila je 2016. godine kompanija Baker Hughes. Svoju primjenu pronalazi u potrebi industrije za efikasnijim bušenjem kroz heterogene stijene gdje dolazi do štetnih utjecaja na bušaći alat, osobito dlijeto kao njegov najizloženiji dio. U radu je opisana konstrukcija samopodešavajućih PDC dlijeta, način djelovanja te radne karakteristike. Pojašnjena je tehnologija kontrole dubine prodiranja reznih elemenata te su prikazani rezultati različitih testiranja samopodešavajućih PDC dlijeta.

Ključne riječi: samopodešavajuće PDC dlijeto, kontrola dubine prodiranja, bušenje.

Završni rad sadrži: 38 stranica, 32 slike i 12 referenci.

Jezik izvornika: hrvatski

Završni rad pohranjen: Knjižnica Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta,
Pierottijeva 6, Zagreb

Mentor: Dr. sc. Borivoje Pašić, docent RGNF

Ocjenjivači: 1. Dr. sc. Borivoje Pašić, docent RGNF-a
2. Dr. sc. Nediljka Gaurina-Međimurec, redovita profesorica RGNF-a
3. Dr. sc. Zdenko Krištafor, redoviti profesor RGNF-a

Datum obrane: 15.5.2020., Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Sveučilište u Zagrebu

**SADRŽAJ**

**POPIS SLIKA** ..... I

**POPIS KRATICA** ..... III

**1. UVOD** ..... 1

**2. PDC DLIJETA** ..... 2

**2.1. Konstrukcija PDC dlijeta** ..... 3

**2.2. Bušenje PDC dlijetom** ..... 6

**2.3. Kontrola dubine prodiranja reznih elemenata kod konvencionanlih PDC dlijeta** ..... 8

2.3.1. Fiksni kontrolni elementi ..... 9

**3. SAMOPODEŠAVAJUĆA PDC DLIJETA** ..... 11

**3.1. Konstrukcija samopodešavajućih PDC dlijeta** ..... 12

**3.2. Samopodešavajuća kontrola dubine prodiranja reznih elemenata** ..... 13

3.2.1. Princip rada samopodešavajućeg sustava za kontrolu dubine prodiranja reznih elemenata ..... 14

**3.3. Ispitivanje samopodešavajućeg PDC dlijeta u kontroliranim uvjetima** ..... 18

**3.4. Ispitivanje samopodešavajućeg PDC dlijeta u terenskim uvjetima** ..... 20

**4. REZULTATI PRIMJENE SAMOPODEŠAVAJUĆIH PDC DLIJETA U REALNIM UVJETIMA BUŠENJA** ..... 27

**4.1. Primjena samopodešavajućih PDC dlijeta tijekom bušenja u Meksičkom zaljevu** ..... 27

**4.2. Primjena samopodešavajućih PDC dlijeta tijekom bušenja u Egiptu** ..... 30

**4.3. Primjena samopodešavajućih PDC dlijeta tijekom bušenja u Južnom Texasu** ..... 32

**5. ZAKLJUČAK** ..... 36

**6. LITERATURA** ..... 37

**POPIS SLIKA**

Slika 2-1. Glavni dijelovi PDC dlijeta ..... 3
Slika 2-2. Konstrukcijske karakteristike PDC dlijeta ..... 4
Slika 2-3. Rezni element PDC dlijeta ..... 5
Slika 2-4. Vibracije u nizu bušaćih alatki ..... 7
Slika 2-5. Područja rada dlijeta ovisno o opterećenju i broju okretaja ..... 9
Slika 2-6. PDC dlijeto s fiksnom kontrolom dubine prodiranja reznih elemenata u stijenu 10
Slika 3-1. Smještaj kontrolnih mehanizama za podešavanje dubina prodiranja reznih elemenata ..... 12
Slika 3-2. Čahure prve generacije (lijevo) i druge generacije (desno) ..... 14
Slika 3-3. Operativno područje kontrolnog mehanizma za podešavanje dubine prodiranja reznih elemenata u stijenu ..... 15
Slika 3-4. Koncept rada kontrolnog mehanizma na samopodešavajućem PDC dlijetu tijekom bušenja tri različita sloja ..... 16
Slika 3-5. Pojednostavljen prikaz interakcije dlijeta i stijene u tri različita sloja ..... 17
Slika 3-6. Intenzitet djelovanja kontrolnog sustava na samopodešavajućim PDC dlijetima s obzirom na dubinu prodiranja reznih elemenata u stijenu ..... 18
Slika 3-7. Promjena opterećenja na dlijeto prilikom izvođenja ispitivanja ..... 19
Slika 3-8. Kretanje vrijednosti dubine prodiranja reznih elemenata prilikom izvođenja ispitivanja ..... 20
Slika 3-9. Intervali identificirani u ispitnoj bušotini za ispitivanje zapinjanja/proklizavanja dlijeta (a), PDC dlijeto s fiksnom kontrolom dubine prodiranja reznih elemenata (b) i samopodešavajuće PDC dlijeto (c) ..... 21
Slika 3-10. Dijagram stabilnosti samopodešavajućeg PDC dlijeta (a) i PDC dlijeta s fiksnom kontrolom dubine prodiranja (b) prilikom bušenja kroz pješčenjak Wilcox ..... 22
Slika 3-11. Dijagram stabilnosti konvencionalnog PDC dlijeta (a), PDC dlijeta s fiksnom kontrolom dubine prodiranja reznih elemenata (b) prilikom bušenja u Arbuckle dolomitu ..... 23
Slika 3-12. Dijagram stabilnosti samopodešavajućeg PDC dlijeta prilikom bušenja u Arbuckle dolomitu ..... 24
Slika 3-13. Broj okretaja samopodešavajućeg PDC dlijeta na dnu bušotine pri konstantnim površinskim parametrima režima bušenja ..... 25

Slika 3-14. Broj okretaja konvencionalnog PDC dlijeta na dnu bušotine pri konstantnim površinskim parametrima režima bušenja ..... 26
Slika 3-15. Broj okretaja PDC dlijeta s fiksnim kontrolnim elementima na dnu bušotine pri konstantnim površinskim parametrima režima bušenja ..... 26
Slika 4-1. Analiza rezultata primjene samopodešavajućih PDC dlijeta tijekom bušenja u Meksičkom zaljevu ..... 28
Slika 4-2. Usporedba ROP-a ostvarenog različitim PDC dlijetima za bušenje istog sloja . 28
Slika 4-3. Analiza pojave lateralnih i aksijalnih vibracija i pojave zapinjanja/proklizavanjadlijeta tijekom bušenja samopodešavajućim PDC dlijetom dionice kanala druge bušotine ..... 29
Slika 4-4. Analiza pojave lateralnih i aksijalnih vibracija i pojave zapinjanja/proklizavanja dlijeta tijekom bušenja samopodešavajućim PDC dlijetom dionice kanala treće bušotine. 30
Slika 4-5. Samopodešavajuće PDC dlijeto korišteno za bušenje u Egiptu ..... 31
Slika 4-6. Usporedba primjenjenog opterećenja na dlijeta prilikom bušenja istog sloja različitim tipovima dlijeta ..... 32
Slika 4-7. Samopodešavajuće PDC dlijeto nakon bušenja prve bušotine s izvađenim kontrolnim mehanizmima ..... 33
Slika 4-8. Dijagram promjene broja okretaja u vremenu tijekom izrade dionice kanala bušotine u Južnom Texasu ..... 34
Slika 4-9. Dijagram promjene broja okretaja u vremenu konvencionalnog PDC dlijeta tijekom izrade dionice kanala bušotine u Južnom Texasu ..... 34
Slika 4-10. Stanje samopodešavajućeg PDC dlijeta nakon bušenja druge bušotine u Južnom Texasu ..... 35
Slika 4-11. Dijagram promjene broja okretaja u vremenu tijekom bušenja druge bušotine u Južnom Texasu ..... 35

**POPIS KRATICA**

| Kratica | Opis |
|---|---|
| PDC (engl. *Polycrystalline Diamond Compact*) | polikristalinska dijamantna dlijeta |
| DOC (engl. *Depth Of Cut*) | dubina prodiranja |
| WOB (engl. *Weight On Bit*) | opterećenje na dlijeto |
| MWD (engl. *Measurement While Drilling*) | mjerenja tijekom bušenja |
| ROP (engl. *Rate Of Penetration*) | brzina napretka dlijeta |

# 1. UVOD

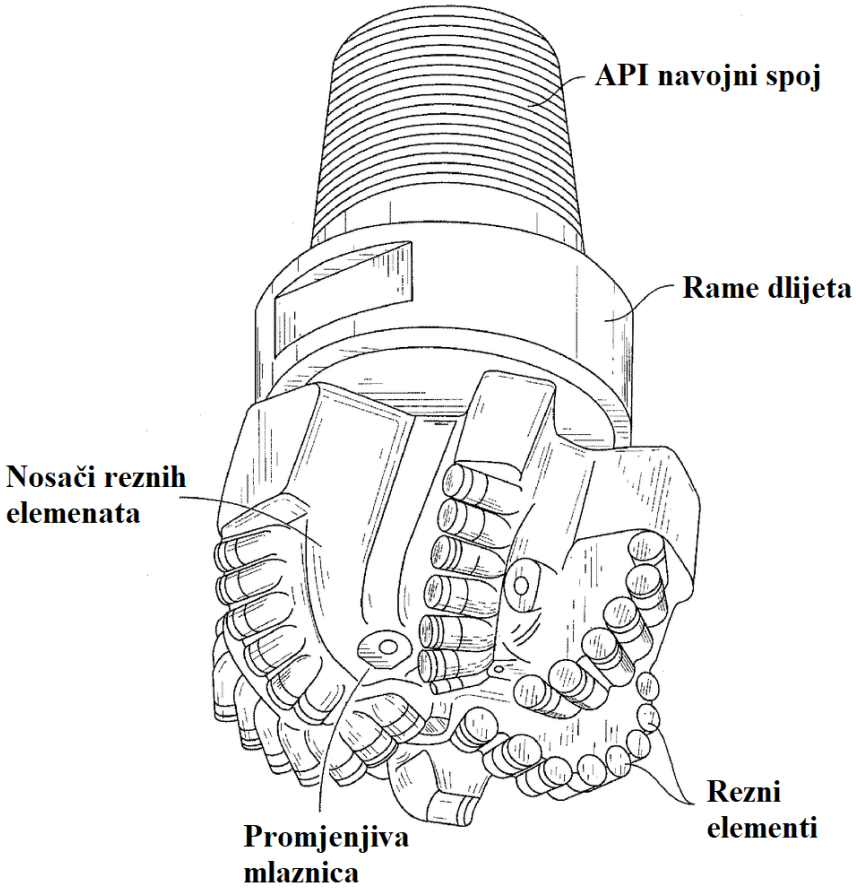
Razvojem naftne industrije povećava se potreba za kvalitetnijim i dugotrajnijim dijelovima različitih sustava pa tako i bušaćeg postrojenja i različitih alatki koje se koriste kod bušenja. Visoki troškovi kao posljedica neefikasnog bušenja predstavljaju prepreku, ali i zadaću inženjerima kako bi osmislili način da skrate vrijeme provedeno u fazi bušenja i ograniče trošenje i potencijalno oštećenje opreme ili alatki na minimum. U tom pogledu jedan od važnih segmenata je dlijeto. Iako tek samo jedan dio u velikom i kompleksnom sustavu, ono ima velik utjecaj na učinkovitost operacija bušenja i proizvođači su u stalnom traganju za novim tehnologijama s kojima će bušenje biti jeftinije, jednostavnije i brže. Dizajn dlijeta i njegove mogućnosti (karakteristike), uz ostale parametre bušenja poput opterećenja na dlijeto i broja okretaja, bitan su čimbenik koji utječe na brzinu izrade kanala bušotine. Zato postoje različiti podtipovi dlijeta od kojih je svaki izrađen za stijene određenih karakteristika, npr. PDC dlijeta za meke stijene neće davati dobre rezultate bušeći u tvrdim stijenama kao PDC dlijeta za tvrde stijene, i obratno. Kako se kanal bušotine od ušća do ležišta proteže kroz stijene različitih svojstava, jedno dlijeto neće moći ostvariti optimalne uvjete bušenja u svim stijenama. Posljedično, nekoliko dlijeta će se izmijeniti prilikom bušenja što stvara dodatne troškove. Proizvođači dlijeta počeli su s primjenom novih tehnologija u dizajniranju dlijeta kao i dodavanjem dodatnih dijelova u dlijeta s ciljem da se dobije trajnije i učinkovitije dlijeto koje će moći ostvariti zadovoljavajuće rezultate u potpuno različitim uvjetima rada.

U ovom radu biti će opisana posebna vrsta PDC dlijeta s mogućnošću samopodešavanja dubine prodiranja reznih elemenata. Ona su još uvijek u razvojnoj fazi, no i kao takva pokazala su se vrlo uspješnima pri otklanjanju problema koji se pojavljuju kod bušenja konvencionalnim PDC dlijetima kroz različite stijene. Ta dlijeta mogu samostalno prepoznati promjenu u litološkom sastavu te se prilagoditi bušenju nove stijene drugačijih karakteristika smanjujući tako štetna djelovanja ne samo na dlijeto već i na cijeli niz bušaćih alatki. Najprije će biti opisana konvencionalna PDC dlijeta koja su građom i načinom rada gotovo jednaka samopodešavajućim PDC dlijetima, a zatim će biti objašnjeni princip rada kontrolnih elemenata te prednosti samopodešavajućih PDC dlijeta u odnosu na konvencionalna dlijeta.

## 2. PDC DLIJETA

U zadnje vrijeme sve se više koriste PDC (engl. *Polycrystalline Diamond Compact*) dlijeta, odnosno polikristalinska dijamantna dlijeta. To im omogućuje njihova građa i djelotvornost. PDC dlijeta se najviše oštećuju abrazijom zbog načina razrušavanja stijena koje se odvija posmičnim djelovanjem dlijeta, odnosno reznih elemenata na samu stijenu. Zato su dva glavna parametra za definiranje kvalitete PDC dlijeta otpornost na trošenje materijala i učinkovitost razrušavanja stijene. Sukladno tome materijali od kojih se izrađuju PDC dlijeta su velike otpornosti na eroziju, abraziju i tlačna opterećenja, te se primjenjuju za bušenje stijena svih čvrstoća.

Dijelovi PDC dlijeta su muški navojni spoj, tijelo na kojem se nalaze nosači reznih elemenata (oštrice) s reznim elementina (rezačima) te promjenjive mlaznice, ali nemaju pomične elemente poput ležajeva i žrvnjeva. Sukladno tome nema potrebe niti za spremnicima maziva, tako da su izvedbe PDC dlijeta manjih dimenzija i jednostavnije u odnosu na žrvanjska dlijeta istog promjera. PDC dlijeto shematski je prikazano slikom 2-1 s označenim glavnim dijelovima.



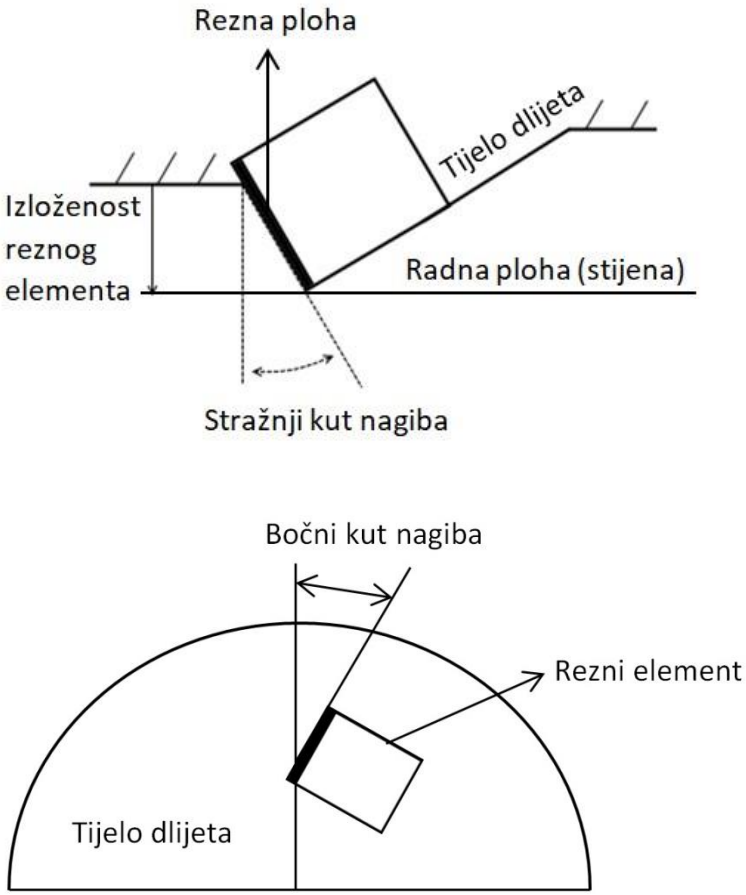

**Slika 2-1.** Glavni dijelovi PDC dlijeta (www.patentsencyclopedia.com, 9.8.2019.)

## 2.1. Konstrukcija PDC dlijeta

PDC dlijeta sastoje se od čeličnog ili matričnog tijela u obliku konusa. Matrična tijela su od impregniranog volframovog karbida i kao takva imaju veću otpornost na abraziju i eroziju od čeličnih, dok čelična imaju veću otpornost na opterećenja (Matanović, 2007). Oblik dlijeta, tj. konusa ovisi o stijenama koje se buše. Nagib konusa tijela se smanjuje s povećanjem tvrdoće stijena, odnosno PDC dlijeta za meke stijene imat će veći nagib konusa nego PDC dlijeta za tvrde stijene. Visina konusa također igra bitnu ulogu u radu PDC dlijeta, odnosno viši konus dlijeta osigurava pravocrtnost, tj. zadržavanje trajektorije kanala bušotine, dok kraći konus omogućuje bolje kontroliranje kuta otklona, tj. skretanje trajektorije kanala bušotine. Na tijelu se nalaze i otvori za promjenjive mlaznice. One također imaju važnu ulogu tijekom bušenja kao dio sustava optoka isplake za čišćenje kanala bušotine. Utječu na djelotvornost bušenja preko isplake koja čisti dno bušotine, hladi dlijeto te obavlja čitav niz drugih funkcija koje utječu na proces bušenja. U tijelu dlijeta zadržane su osiguračima ili u novije vrijeme navojem kako ne bi došlo do

njihovog ispadanja. Rezni elementi kod ove vrste dlijeta su nepomični, a nalaze se na istaknutim nosačima u obliku rebara. Gustoća postavljenih reznih elemenata ovisi o tvrdoći stijene koja se buši. Za tvrde stijene potrebna je veća gustoća raspoređenih reznih elemenata nego za meke stijene.

PDC dlijeta imaju tri osnovne konstrukcijske karatkeristike (slika 2-2) s obzirom na rezne elementa: izloženost reznih elemenata, stražnji kut nagiba te bočni kut nagiba reznih elemenata (Bourgoyne Jr., A. T. et al., 1986). Izloženost (engl. *Exposure*) reznih elemenata je ustvari visina reznih elemenata kojom se oni utiskuju u stijenu. Stražnji kut nagiba (engl. *Back rake angle*) je kut reznih elemenata koji je određen stijenama koje se buše dlijetom. PDC dlijeta s većim kutom nagiba reznih elemenata u odnosu na okomitu os namijenjena su za bušenje tvrdih stijena, a ona s manjim kutom za bušenje mekih stijena. Bočni kut nagiba (engl. *Side rake angle*) reznih elemenata omogućuje razrušavanje i odstranjivanje krhotina prema obodu, tj. krhotine se prilikom bušenja potiskuju u stranu kako se ne bi dalje usitnjavale i smetale normalnom radu dlijeta.




**Slika 2-2.** Konstrukcijske karakteristike PDC dlijeta

Za razliku od žrvanjskih dlijeta koja razrušavaju stijenu drobljenjem i odlamanjem te dijamantnih dlijeta koja istiru stijenu, PDC dlijeta razrušavaju stijenu posmičnim djelovanjem (engl. *Drag Bits*). Rezni elementi PDC dlijeta (slika 2-3) sastavljeni su od cilindra volframova karbida na kojem se nalazi prevlaka od dijamantnog praha podvrgnutog sinteriranju. Sinteriranje je toplinska obrada stlačenog praha prilikom koje se postižu željena fizikalna svojstva poput čvrstoće i tvrdoće. Rezni elementi također su prikazani i na slici 2-1. Rezni elementi se razlikuju po veličini što isto tako ovisi o svojstvima stijene koju se buši. Veći rezni elementi su namjenjeni za meke stijene, a manji rezni elementi za tvrde, no povećanje dimenzija reznih elemenata može doprinijeti većem kolebanju torzije tijekom bušenja. Orijentacija reznih elemenata mora osigurati ravnomjerno prenošenje i raspodjelu tlačne sile prilikom interakcije reznih elemenata sa stijenom (www.petrowiki.org, 15.8.2019.).



**Slika 2-3.** Rezni element PDC dlijeta (www.pdccutters.com, 5.3.2020.)

Pokraj reznih elemenata na dlijetu se mogu nalaziti i elementi koji kontroliraju i ograničavaju dubinu prodiranja reznih elemenata u stijenu. Oni su važni u pogledu eliminiranja torzije i vibracija u alatkama, te promjena u brzini bušenja kao posljedica smanjenja štetnog djelovanja spomenutih vibracija. Njihova izraženost u odnosu na tijelo

dlijeta je to što olakšava i omogućuje stabilniji rad dlijeta te izbjegavanje spomenutih vibracija.

Konvencionalna PDC dlijeta imaju fiksne kontrolne elemente i zato nisu pogodna za bušenje stijena različitih čvrstoća. Nove tehnologije omogućile su razvoj podešavajućih kontrolnih elemenata. To je važno sa stajališta postizanja stabilnog bušenja kroz stijene različite čvrstoće, na način da se dlijeto prilagođava promjenama te se eliminira potreba za zamjenom trenutno korištenog dlijeta drugim dlijetom.

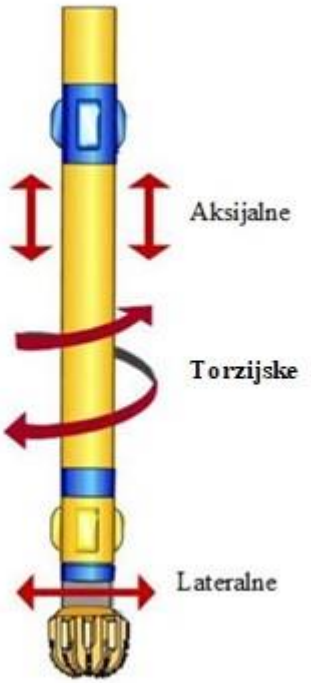
## 2.2. Bušenje PDC dlijetom

PDC dlijeta razrušavaju stijenu struganjem. Uslijed opterećenja na dlijeto i njegove rotacije, rezni elementi se utiskuju određenom visinom u stijenu te posljedično dolazi do pojave smičnog naprezanja i razrušavanja stijene. Površina reznih elemenata koja aktivno sudjeluje u razrušavanju stijene ovisi o dubini prodiranja reznih elemenata. Dubina prodiranja u vezi je s parametrima poput broja okretaja i opterećenja na dlijeto, ali i s vrstom stijene te kontrolnim elementima na samom dlijetu. Bušenje se odvija prijenosom vertikalne sile ostvarene dijelom težine teških šipki (opterećenja na dlijeto) i horizontalne sile, uslijed rotacije vrtaćeg stola ili drugog izvora rotacije, na dlijeto. Kako bi se dobila optimalna brzina bušenja svi parametri moraju biti uzeti u obzir, a rezultat je pravilno odabran režim bušenja. Ovisno o stijeni, primat će imati ili broj okretaja za meke stijene ili opterećenje na dlijeto za tvrde stijene.

Glavna prednost bušenja ovim dlijetima je mogućnost bušenja pri visokom broju okretaja dlijeta što pogoduje radu u mekim stijenama, no daljnjim razvojem postala su superiornija i u bušenju tvrdih i srednje tvrdih stijena u odnosu na žrvanjska dlijeta. U tom pogledu važnu ulogu igra čvrstoća reznih elemenata, odnosno oni moraju biti što otporniji na abraziju i ostati što dulje efikasni u razrušavanju stijene. Kako su dlijeta ovog tipa prilikom bušenja najviše izložena abraziji, najveći problem što se tiče samog dlijeta je trošenje materijala. To se može vremenski odgoditi korištenjem otpornijih materijala za izradu reznih elemenata.

Vibracije prilikom bušenja mogu se svrstati u tri kategorije: aksijalne, lateralne i torzijske vibracije (slika 2-4). Aksijalne ili osne vibracije paralelne su s osi niza bušaćih alatki i uglavnom se pojavljuju kod žrvanjskih dlijeta gdje se dlijeto trenutačno izdigne s dna bušotine. To se ogleda u oscilacijama opterećenja na dlijeto i torzije promatranih na površini ili mjernom alatu unutar niza bušaćih alatki. Za PDC dlijeto važnije je razumjeti lateralne i torzijske vibracije. Lateralne su okomite na os niza bušaćih alatki i imaju velik

utjecaj na rezne elemente. Kako bi se izbjeglo štetno djelovanje lateralnih vibracija postoje različiti razmještaji reznih elemenata po oštricama dlijeta ili se na dlijeto postavljaju elementi koji ograničavaju lateralno kretanje dlijeta te rezervni rezni elementi koji su aktivni, odnosno razrušavaju stijenu tangencijalno u odnosu na dlijeto. Torzijske vibracije su karakterizirane promjenama u kutnoj brzini rotacije dlijeta. PDC dlijeta najviše su podložna takvoj vrsti vibracija zbog smičnog načina razrušavanja stijene (Rodrigue et al., 2019).




**Slika 2-4.** Vibracije u nizu bušaćih alatki (Rodrigue et al., 2019)

U vezi brzine bušenja najveći problem kod PDC dlijeta je prevelik zakretni moment. To se učestalo događa pri prijelazima između stijena različitih čvrstoća, gdje dolazi do pojave aksijalnih i torzijskih vibracija koje negativno utječu na cijeli niz bušaćih alatki. Kako bi se to izbjeglo potrebno je promijeniti parametre režima bušenja, odnosno promijeniti broj okretaja ili opterećenje na dlijeto. Time se svjesno mijenja i brzina bušenja, odnosno smanjuje napredak dlijeta. Spomenute vibracije su posljedica promjene dubine prodiranja reznih elemenata u stijenu. Kada se tijekom bušenja naiđe na stijene različitih tlačnih čvrstoća, na dlijeto počinju djelovati drugačije sile nakon čega dolazi do velikih kolebanja u broju okretaja dlijeta na dnu bušotine. Oni se mogu smanjiti s visokih vrijednosti na nulu u vrlo kratkom periodu. Takve cikličke promjene u kutnoj brzini dlijeta

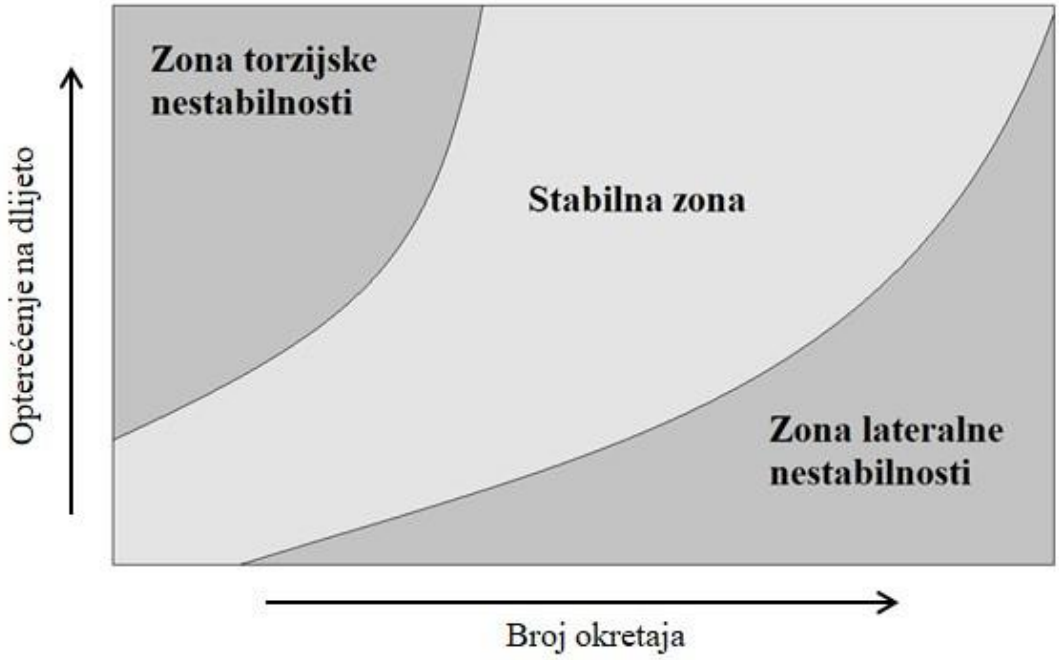
gdje dolazi do potpunog zaustavljanja dlijeta na dnu bušotine nazivaju se efektom zapinjanja/proklizavanja dlijeta (engl. *stick/slip effect*), tj. dolazi do zapinjanja (engl. *stick*) dlijeta na dnu bušotine te zatim naglog proklizavanja (engl. *slip*) nakon što se dlijeto oslobodi. Unatoč tome što se dlijeto zaustavi, ostatak niza bušaćih alatki i dalje rotira i dolazi do vibracija duž cijelog niza bušaćih alatki. Navedene cikličke promjene često dovode do oštećenja cijelokupnog alata u bušotini. Ako se očekuje zapinjanje/proklizavanje dlijeta bušač mora smanjiti opterećenje na dlijeto ili povećati broj okretaja. Drugi način izbjegavanja spomenutih problema je da se na dlijeto postavljaju kontrolni elementi koji osiguravaju odgovarajuću dubinu prodiranja reznih elemenata u stijenu.

## 2.3. Kontrola dubine prodiranja reznih elemenata kod konvencionanlih PDC dlijeta

Dubina prodiranja (engl. *Depth-of-cut – DOC*) glavni je parametar koji utječe na razrušavanje stijena korištenjem PDC dlijeta. Ona označava dubinu kojom rezni element prodre u stijenu nakon jednog okretaja dlijeta. Izloženost reznih elemenata (slika 2-2) određuje moguću dubinu prodiranja reznih elemenata, a veća izloženost omogućuje veću dubinu prodiranja. Optimalna dubina prodiranja reznih elemenata ovisi o vrsti stijene. U mekim stijenama rezni elementi mogu podnijeti relativno velike dubine prodiranja. U tvrđim stijenama, takva velika dubina prodiranja rezultira povećanim silama na reznim elementima zbog kojih dolazi do njihovog ubrzanog trošenja i lomova istih.

Kako dlijeto rotira na dnu bušotine i razrušava stijenu, neodgovarajuća dubina prodiranja reznih elemenata dovodi do njegovog zapinjanja ili proklizavanja. Dolazi do potpunog prestanka rotacije dlijeta na neko vrijeme dok ostatak alata rotira konstantnim brojem okretaja. Time dolazi do povećanja torzijskih naprezanja i vibracija duž niza bušaćih alatki. Cikličkim ponavljanjem tih poremećaja povećava se štetno djelovanje prekomjernog zakretnog momenta na bušaći alat. Ujedno može doći i do poskakivanja dlijeta i aksijalnog naprezanja, koje zajedno s torzijskim naprezanjem dovodi do oštećenja niza bušaćih alatki. Da bi se to izbjeglo bez smanjenja brzine bušenja uvode se elementi koji kontroliraju dubinu prodiranja reznih elemenata u stijenu. Ta je tehnologija predstavljena na početku 2000.-ih godina, a podrazumijeva ugradnju kontrolnih elemenata koji ograničavaju dubinu prodiranja reznih elemenata u stijenu i otklanjaju velik dio problema s prekomjernom torzijom i vibracijama. Konvencionalna PDC dlijeta koriste

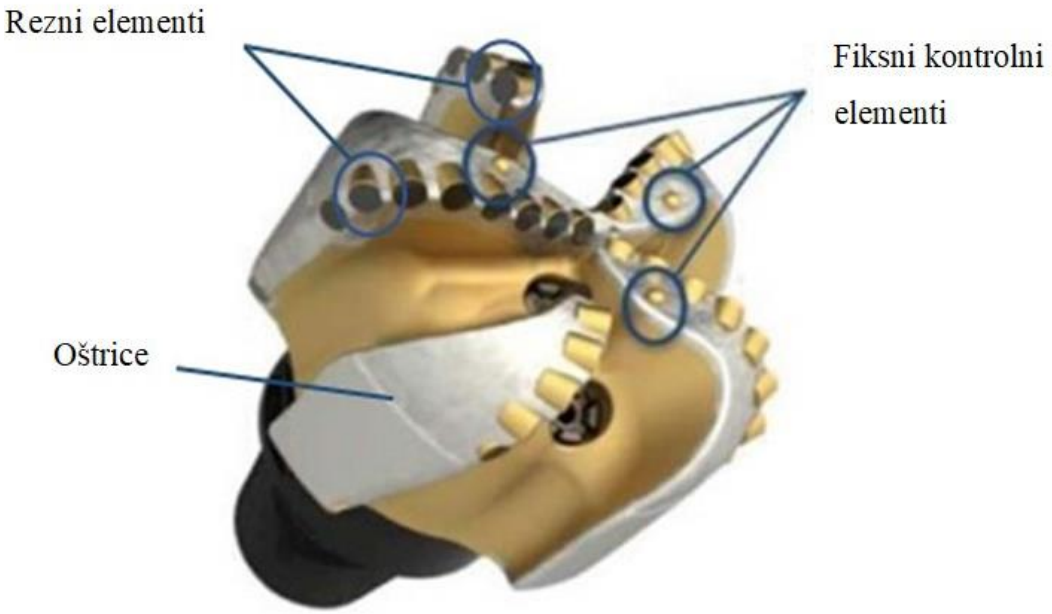
fiksne kontrolne elemente u tu svrhu. Slika 2-5 prikazuje kako se područje stabilnog rada dlijeta mijenja s promjenom opterećenja na dlijeto i broja okretaja.




**Slika 2-5.** Područja rada dlijeta ovisno o opterećenju i broju okretaja (Rodrigue et al., 2019)

### 2.3.1. Fiksni kontrolni elementi

Kao što ime kaže, fiksni kontrolni elementi fiksirani su na oštricama dlijeta, iza reznih elemenata. Ti dijelovi dlijeta nisu pomični niti imaju pomične dijelove, te se nalaze odmah pokraj reznih elemenata na oštricama. Njihovo djelovanje je jednostavno, odnosno oni svojom izloženošću određuju dubinu prodiranja reznih elemenata u stijenu. Tako ne dopuštaju da dođe do prevelike dubine prodiranja čime za određen stupanj smanjuju učestalost nastanka zapinjanja, odnosno proklizavanja dlijeta na dnu bušotine. Dlijeto s fiksnim kontrolnim elementima prikazano je na slici 2-6.




**Slika 2-6.** PDC dlijeto s fiksnom kontrolom dubine prodiranja reznih elemenata u stijenu (Rodrigue et al., 2019)

Problem kod fiksne kontrole dubine prodiranja reznih elemenata u stijenu je nemogućnost prilagodbe drugačijim uvjetima bušenja. Elementi su podešeni da smanjuju vibracije i naprezanja samo u određenim sekcijama bušotine, odnosno u stijenama određenih karakteristika. Kada se uvjeti promjene, tj. kada se naiđe na potpuno drugačije naslage stijena, potrebno je koristiti novo dlijeto s fiksnim elementima koji odgovaraju karakteristikama tih stijena. Takva kontrola zahtjeva više vremena i skuplja je jer se troši nekoliko dlijeta za bušenje jednog dijela kanala bušotine.

Drugi problem se javlja kada se istroše rezni elementi. Kao posljedica istrošenja reznih elemenata dolazi do smanjenja njihove visine do te mjere da postanu jednaki kao i kontrolni elementi. Oni tada postaju nedjelotvorni jer i tijekom stabilnog bušenja postoji interakcija kontrolnih elemenata sa stijenom (https://patents.justia.com/patent/5558170, 10.8.2019.).

Alternativa spomenutoj kontroli je tehnologija prilagodljive kontrole koja se koristi u novim samopodešavajućim PDC dlijetima.

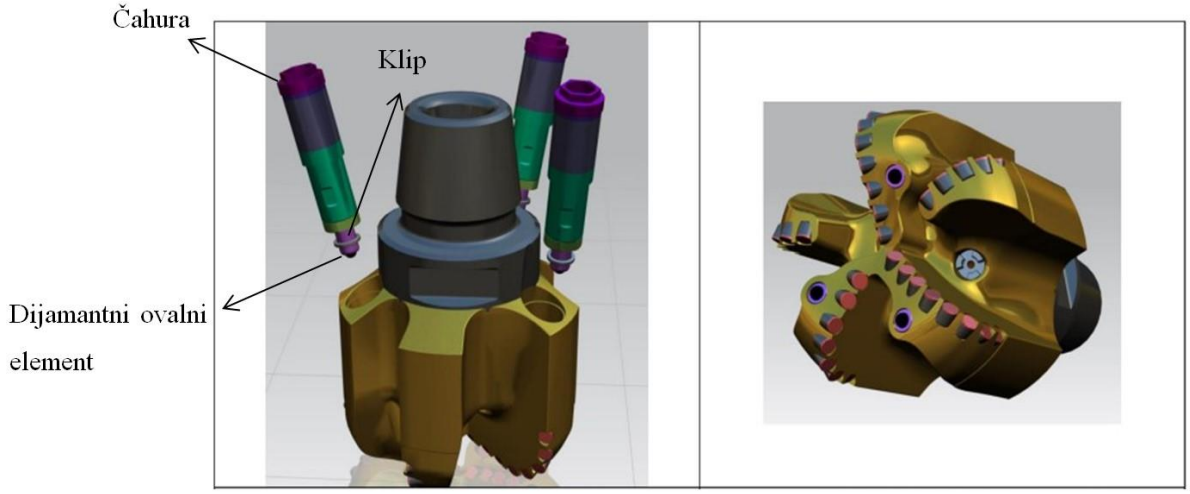
# 3. SAMOPODEŠAVAJUĆA PDC DLIJETA

Kada je god moguće operatori na bušaćim postrojenjima cijelu sekciju kanala bušotine žele izbušiti jednim dlijetom. Za to dlijeta moraju biti izdržljivija i otpornija. Konvencionalnim PDC dlijetima takav pothvat nije moguć prvenstveno zbog predodređenosti dlijeta da buši pojedine stijene s obzirom na njihovu tvrdoću**.** Bušenje neadekvatnim PDC dlijetom određene sekcije kanala bušotine uzrokuje često zapinjanje/proklizavanje dlijeta, a njihovu pojavu nije lako dokazati osim ako se tijekom bušenja ne koristi sustav za mjerenje tijekom bušenja (engl. *Measurement While Drilling – MWD*). Smatra se da je učestalost veća nego što je to dosad izmjereno, pogotovo kako se povećavaju brzine vrtnje i snage motora korištenih za bušenje. Posljedice su spomenute vibracije i udarne sile koje predstavljaju izazov za konvencionalna PDC dlijeta. Ove pojave uzrokuju oštećenja i dodatna trošenja bušaćeg niza i njegovih elemenata i tako smanjuju napredak dlijeta i brzinu bušenja. Kako bi se izbjegli spomenuti štetni utjecaji zapinjanja/proklizavanja dlijeta, industrija je napravila velike korake prema unapređenju dlijeta, no svejedno je morala balansirati između smanjenja vibracija i učinkovitosti bušenja. Da bi se uklonila ta negativna povezanost razvijaju se samopodešavajuća PDC dlijeta koja osiguravaju mirnije bušenje uz poboljšan napredak dlijeta (engl. *Rate Of Penetration – ROP*). Prvo takvo dlijeto 2016. godine izradio je poznati proizvođač dlijeta Baker Hughes, te je dobilo komercijalni naziv TerrAdapt™ prilagodljivo dlijeto. Tehnologija samopodešavajuće dubine prodiranja reznih elemenata omogućava automatsku prilagodbu dlijeta promjenama u dinamičkim uvjetima prilikom bušenja. Preko zamjenjivih samopodešavajućih mehanizama ugrađenih u samo tijelo, dlijeta brzo ublažuju vibracije čime se povećava brzina bušenja i dopušta primjena većeg opterećenja na dlijeto. Time se ujedno ostvaruje i dodatna vrijednost u obliku dužeg vremenskog trajanja alatki.

Srž ovog tehničkog rješenja na PDC dlijetu čini hidromehanički povratni mehanizam (engl. *hydro-mechanical feedback mechanism*) (u nastavku se koristi izraz kontrolni mehanizam) koji regulira dubinu prodiranja reznih elemenata u stijenu. Sastoji se od klipa u zamjenjivim čahurama koje su ispunjene fluidom. Na radnom dijelu kontrolnog mehanizma, odnosno na dnu klipnjače nalazi se dijamantni element ovalnog oblika. On reagira usporedno s promjenom kontaktne sile sa stijenom te regulira dubinu prodiranja. Mehanizam se ujedno ponaša i kao amortizer kako bi osigurao optimalno opterećenje na

dlijeto, te preuzima na sebe dio opterećenja kako bi rasteretio rezne elemente. Jedno dlijeto ima ugrađeno nekoliko mehanizama, raspoređenih u nosačima reznih elemenata. Na slici 3-1 prikazan je smještaj kontrolnih mehanizama u tijelu PDC dlijeta. Ovakva vrsta samopodešavanja ne koristi električne senzore niti je kontrolirana od strane bušača s površine, već je samostalna jedinica neovisna o vanjskom izvoru energije za pokretanje i podešavanje.

Operativne mogućnosti samopodešavajućih PDC dlijeta najprije su demonstrirane kroz laboratorijska ispitivanja, a kasnije su ispitivanja proširena i na konkretnu primjenu u praksi. Ispitivana dlijeta uspoređivana su s konvencionalnim PDC dlijetima preko grafova područja stabilnog rada dlijeta te se pokazalo kako samopodešavajuća dlijeta povećavaju područje stabilnog rada dlijeta, ali i nadvladavaju druga ograničenja koja imaju konvencionalna PDC dlijeta.




**Slika 3-1.** Smještaj kontrolnih mehanizama za podešavanje dubina prodiranja reznih elemenata u stijenu (Jain et al., 2016)

## 3.1. Konstrukcija samopodešavajućih PDC dlijeta

Konstrukcija samopodešavajućeg dlijeta je ostala gotovo jednaka opisanoj konstrukciji konvencionalnih PDC dlijeta. Tijela su konusna i materijali izvedbe su ostali isti. Rezni elementi od volframova karbida s dijamantnim prahom također, kao i promjenjive mlaznice. Bušenje se i dalje ostvaruje smičnim djelovanjem reznih elemenata na površinu stijene. Jedina razlika od konvencionalnih PDC dlijeta je prostor unutar tijela dlijeta koji je namjenjen ugradnji kontrolnih mehanizama. Oni se postavljaju unutar nosača

reznih elemenata i nemaju vanjskih dijelova osim dijamantnog ovalnog elementa na kraju klipnjače. Kod izrade ovog tipa dlijeta glavni zadatak bio je da se stabilnost strukture dlijeta ne naruši dodatnim šupljinama u koje se ugrađuju kontrolni mehanizmi. U tu svrhu provođena su dodatna ispitivanja naprezanja kako bi se osiguralo da samopodešavajuća dlijeta podnose jednaka opterećenja kao i konvencionalna PDC dlijeta istog promjera.

### 3.2. Samopodešavajuća dubina prodiranja reznih elemenata

Relativno nova tehnologija samopodešavanja dubine prodiranja reznih elemenata dlijeta u stijenu proširila je područje primjene PDC dlijeta u naftnoj industriji. Ona eliminira neželjene promjene u dubini prodiranja tijekom bušenja različitih tipova stijena istim tipom dlijeta, koje rezultira vibracijama. Mehanizam je u primjeni samo onda kada postoje štetne vibracije, a u slučaju stabilnog rada dlijeta kontrolni elementi nisu aktivni.

Mehanizam se sastoji od čahure u kojoj su cilindar i klip. Unutar cilindra nalazi se hidraulični fluid. Čahure služe za izolaciju mehanizma od djelovanja isplake te ujedno i za izjednačavanje tlaka. One su u tijelu dlijeta osigurane prstenima kako ne bi ispale, te se lako vade i mjenjaju ukoliko je to potrebno. Slika 3-2 prikazuje čahure mehanizma za samopodešavanje dubine prodiranja reznih elemenata u stijenu, a na kraju klipnjače vidljiv je ovalni kontaktni element. Kako je on stalno u kontaktu sa stijenom, obložen je dijamantnim prahom. Preko njega samopodešavajući mehanizam dobiva informacije o jačini kontaktne sile nakon čega počinje prilagođavanje novonastalim uvjetima.



**Slika 3-2.** Čahure prve generacije (lijevo) i druge generacije (desno) (Jain et al., 2017)

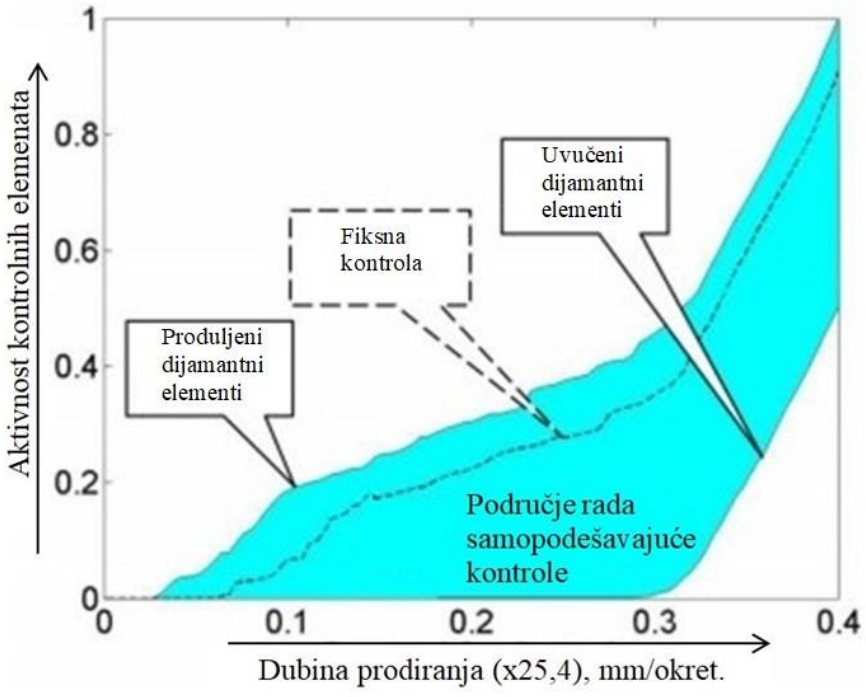
Konstrukcija samopodešavajeg kontrolnog sustava na PDC dlijetu koji se sastoji od jednostavnih mehaničkih elemenata osigurava pouzdanost sustava. Ako dođe do kvara brtvenog dijela kontrolnog sustava, to će uzrokovati uvlačenje kontrolnog elementa unutar tijela dlijeta i tako će samopodešavajuće PDC dlijeto jednostavno nastaviti bušiti poput konvencionalnog PDC dlijeta bez kontrole dubine prodiranja.

Mehanizam je ujedno i dizajniran na način da osigura nesmetani rad i kod visokih tlakova i temperatura na dnu bušotine. Zato mora postojati kompenzacija za promjenu volumena fluida unutar cilindra kontrolnog mehanizma uvjetovanu promjenom vrijednosti tlaka i temperature. Svojstva hidrauličkog fluida unutar cilindra kontrolnog mehanizma i svojstva apsorbcije opterećenja samog mehanizma odabrana su tako da osiguraju reakciju mehanizma unutar željenog područja i prilikom promjene vrijednosti tlaka i temperature u kanalu bušotine.

### 3.2.1. Princip rada samopodešavajućeg sustava za kontrolu dubine prodiranja reznih elemenata u stijenu

Jedini dio samopodešavajućeg sustava za kontrolu dubine prodiranja reznih elemenata koji je u stalnom dodiru sa stijenom je dijamantni ovalni element. Može biti uvučen unutar mehanizma ili u produljenom stanju pa je izložen u odnosu na tijelo dlijeta.

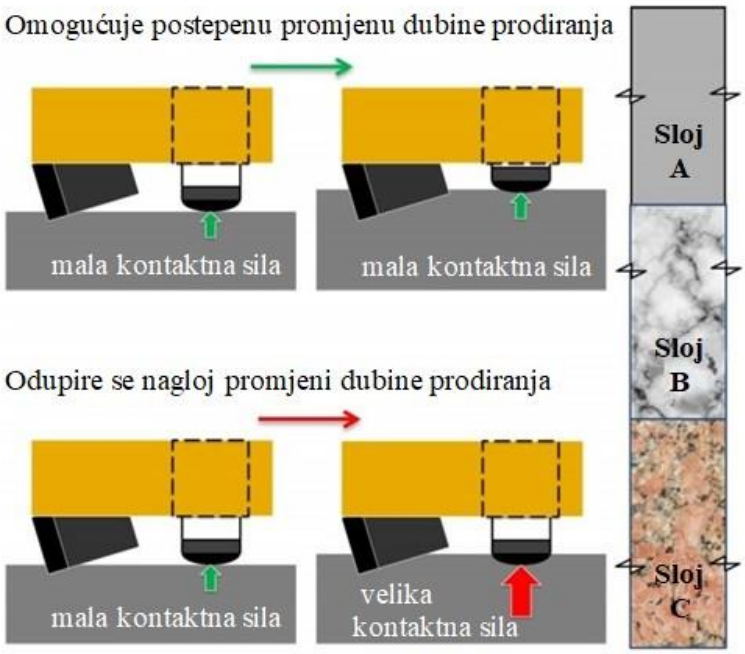
On određuje kontaknu silu sa stijenom te se prilagođava različitim uvjetima u kanalu bušotine tijekom bušenja. Na početku, odnosno prije nego se dlijeto osloni na dno kanala bušotine i na njega prenese opterećenje, kontrolni elementi su u produljenom stanju. Kada počne bušenje i poveća se kontaktna sila između ovalnog dijamantnog elementa i stijene, element se počinje povlačiti u tijelo dlijeta. To traje dok se ne dostigne minimalna kontaktna sila na određenoj dubini prodiranja. Promjena kontaktne sile ukazuje na promjenu dubine prodiranja. Povećanje sile znači i povećanje dubine prodiranja, i samopodešavajući kontrolni mehanizam odgovara na takvu promjenu naglim produljenjem kontrolnog elementa i apsorbiranjem dijela opterećenja, što traje manje od sekunde. Kada se sile uravnoteže započinje lagano uvlačenje kontrolnog elementa. To može trajati i do nekoliko minuta dok se ne uspostavi stabilno bušenje. Na slici 3-3 prikazana je ovisnost dubine prodiranja reznih elemenata u stijenu o izvlačenju (produljenje) i uvlačenju (skraćenje) ovalnog dijamantnog elementa čime se osigurava široko područje unutar kojeg je moguće kontrolirati dubinu prodiranja elemenata za razrušavanje u stijenu u odnosu na ranije spomenutu fiksnu kontrolu.




**Slika 3-3.** Operativno područje kontrolnog mehanizma za podešavanje dubine prodiranja reznih elemenata u stijenu (Jain et al., 2017)

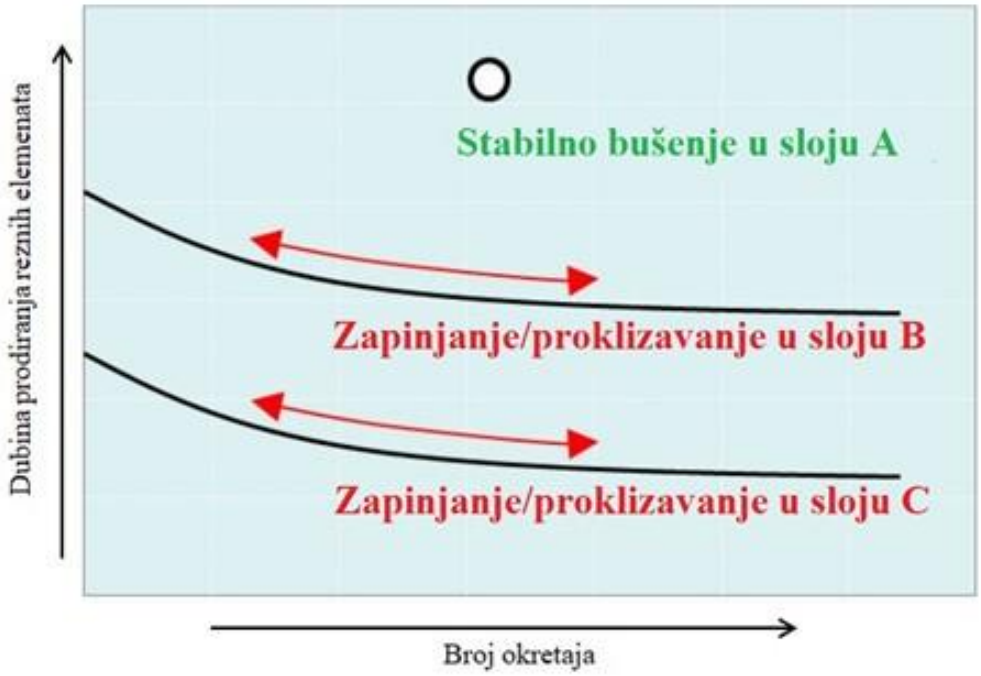
Za demonstraciju rada sustava, pretpostavljena je bušotina s tri različita sloja stijena: A, B i C sloj (slika 3-4). Prvi sloj kroz koji se buši, sloj A je meka stijena te se tijekom

bušenja kroz nju ne očekuje pojava zapinjanja/proklizavanja dlijeta. Stijene slojeva B i C također su različitih svojstava, no tijekom bušenja kroz oba sloja očekuje se pojava zapinjanja/proklizavanja dlijeta. Bušenje kroz sloj A započinje produljenim kontrolnim elementom s velikom kontaktnom silom. Radi vanjskog opterećenja (opterećenja na dlijeto) kontrolni se element nakon nekoliko minuta postupno uvuče i tako smanji kontaktnu silu. Rezultat je brže bušenje za zadano opterećenje na dlijeto. Bušenjem kroz slojeve B i C, dlijeto se odupire pojavi zapinjanja/proklizavanja regulirajući dubinu prodiranja reznih elemenata preko samopodešavajućeg kontrolnog mehanizma. Kako se dubina prodiranja reznih elemenata u sloju C počela naglo povećavati, kontrolni mehanizam pružio je otpor povlačenju ovalnog elementa smještenog na vrhu samopodešavajućeg kontrolnog mehanizma i potaknuo izvlačenje kontrolnih elemenata stvarajući tako veliku kontaktnu silu. Posljedica ovakvog djelovanja kontrolnog mehanizma je izbjegavanje zapinjanja/proklizavanja dlijeta. Ako ipak dođe do zapinjanja/proklizavanja dlijeta spomenuti proces se ponavlja za svaki ciklus dok se skroz ne eliminira ili ublaži.



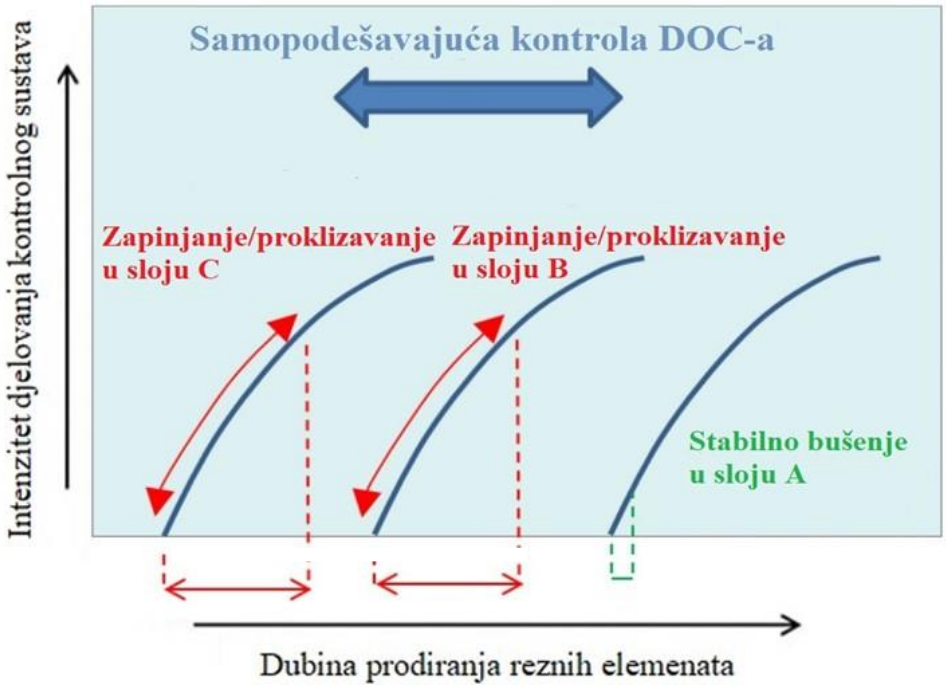

**Slika 3-4.** Koncept rada kontrolnog mehanizma na samopodešavajućem PDC dlijetu tijekom bušenja tri različita sloja (Jain et al., 2016)

Rezultati ispitivanja pokazuju da se dubina prodiranja reznih elemenata značajno povećava kada se dlijeto približava fazi zapinjanja/proklizavanja. To se može vidjeti na slici 3-5 koja prikazuje vezu dubine prodiranja reznih elemenata i broja okretaja dlijeta u ranije spomenutoj hipotetskoj bušotini. Crvene strelice u slojevima B i C prikazuju područje u kojem dolazi do zapinjanja/proklizavanja dlijeta (slika 3-5).




**Slika 3-5.** Pojednostavljen prikaz interakcije dlijeta i stijene u tri različita sloja (Jain et al., 2016)

Promjenom dubine prodiranja reznih elemenata mijenja se i intenzitet djelovanja kontrolnog sustava. Ta je veza prikazana slikom 3-6. Naglim povećanjem dubine prodiranja reznih elemenata u stijenu aktivira se kontrolni sustav na samopodešavajućim PDC dlijetima koji se odupire daljnjem rastu dubine prodiranja i zapinjanju/proklizavanju dlijeta.



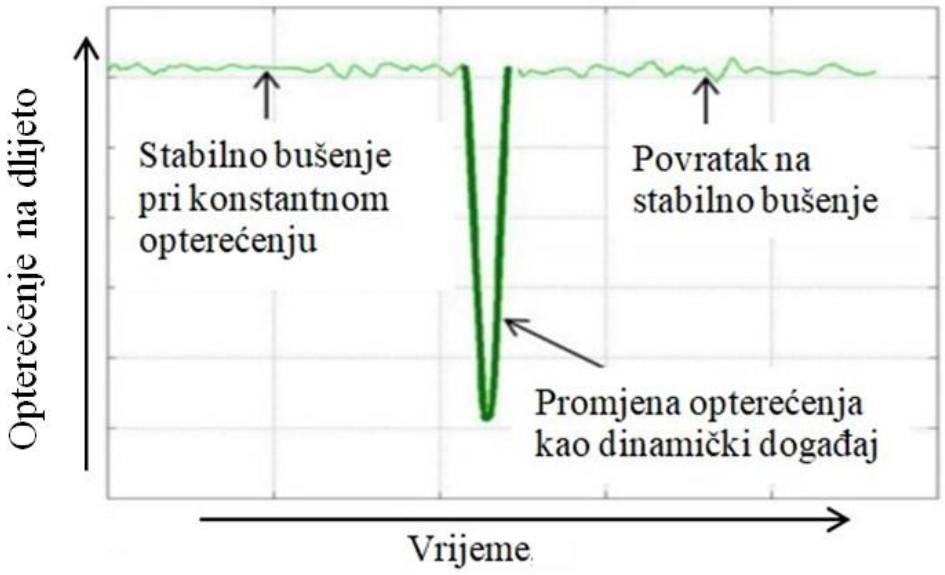

**Slika 3-6.** Intenzitet djelovanja kontrolnog sustava na samopodešavajućim PDC dlijetima s obzirom na dubinu prodiranja reznih elemenata u stijenu (Jain et al., 2016)

### 3.3. Ispitivanje samopodešavajućeg PDC dlijeta u kontroliranim uvjetima

Ispitivanje je provedeno u laboratoriju oponašajući uvjete dna kanala bušotine (Jain et al., 2016). Za ispitivanje su korištena tri dlijeta promjera 0,22 m (8 ¾ in): samopodešavajuće PDC dlijeto, konvencionalno PDC dlijeto i PDC dlijeto s fiksnom kontrolom dubine prodiranja reznih elemenata u stijenu. Sva dlijeta izrađena su isključivo za ovo ispitivanje, od istog materijala te s identičnim reznim elementima. Jedno PDC dlijeto bilo je konvencionalno odnosno bez kontrole dubine prodiranja reznih elemenata, drugo je imalo tri fiksna ovalna dijamantna elementa dok je treće dlijeto posjedovalo trodijelni samopodešavajući sustav za kontrolu dubine prodiranja reznih elemenata. Cilj ispitivanja bio je ispitati reagiranje samopodešavajućeg PDC dlijeta na nagle i postepene promjene u opterećenjima na dlijeto. Ispitivanja su se provela tijekom bušenja kroz vapnenačku stijeni pri tlačnom opterećenju od 20,68 MPa (3000 PSI).

Prilikom ispitivanja opterećenje na dlijeto se u prvotnom periodu održavalo konstantnim. Zatim se opterećenje naglo smanjilo na kraće vrijeme i vratilo na početnu vrijednost. Naglo snižavanje opterećenja predstavlja dinamički događaj gdje se dubina

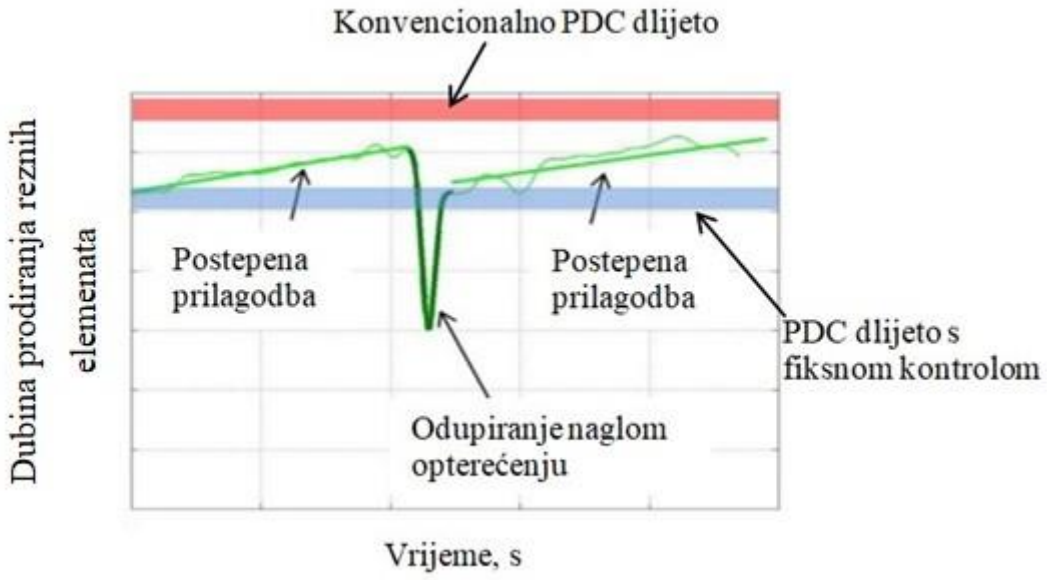
prodiranja reznih elemenata dlijeta u stijenu trenutačno promjeni. Slika 3-7 prikazuje spomenute promjene opterećenja na dlijeto tijekom ispitivanja.




**Slika 3-7.** Promjena opterećenja na dlijeto prilikom izvođenja ispitivanja (Jain et al., 2016)

Na početku ispitivanja, samopodešavajuće PDC dlijeto pokazuje slične radne karakteristike kao i PDC dlijeto s fiksnom kontrolom dubine prodiranja. Dubina prodiranja reznih elemenata PDC dlijeta s fiksnom kontrolom konstantna je prilikom bušenja i prikazana je plavim pojasom na slici 3-8. U stabilnim uvjetima bušenja, vrijednost dubine prodiranja reznih elemenata samopodešavajućeg PDC dlijeta raste prema vrijednosti dubine prodiranja reznih elemenata koju ima konvencionalno PDC dlijeto, što ukazuje na postepeno uvlačenje dijamantnog ovalnog elementa u tijelo dlijeta. Dubina prodiranja reznih elemenata konvencionalnog PDC dlijeta prikazana je crvenim pojasom na slici 3-8. Ona je također konstantna kao i kod PDC dlijeta s fiksnom kontrolom, ali je veće vrijednosti radi odsutnosti kontrolnih elemenata dubine prodiranja. Prilikom naglog smanjenja opterećenja, dubina prodiranja reznih elemenata samopodešavajućeg PDC dlijeta padne na vrijednost dubine prodiranja PDC dlijeta s fiksnom kontrolom. Uzrok tome je naglo produljenje kontrolnog elementa (klipnjače s dijamantnim ovalnim elementom na njenom vrhu). Vraćanjem prvotnog opterećenja kontrolni elementi su ostali u produljenom stanju i tako spriječili posljedično povećanje dubine prodiranja reznih elemenata. Daljnjim održavanjem konstantnog opterećenja dlijeto je ponovo pokazivalo rast vrijednosti dubine prodiranja reznih elemenata prema onoj koju pokazuje

konvencionalno PDC dlijeto. Slika 3-8 može se promatrati usporedno sa slikom 3-7 kako bi se povezale promjene opterećenja na dlijeto i dubine prodiranja reznih elemenata u stijenu.



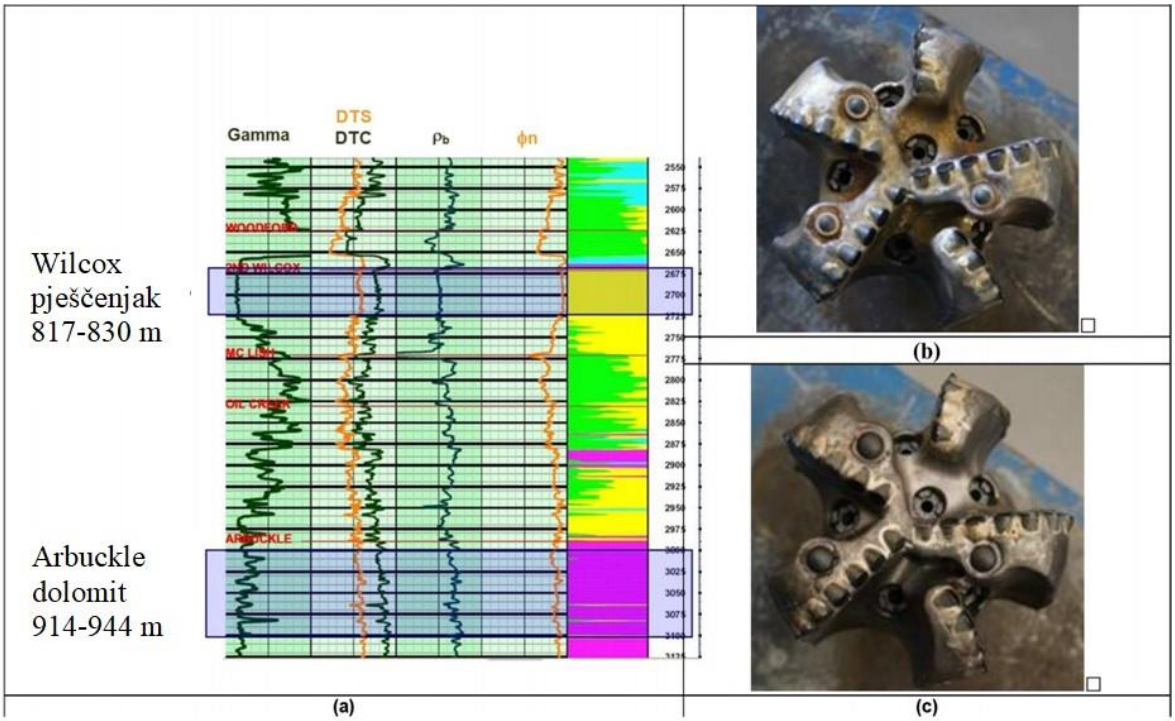

**Slika 3-8** Kretanje vrijednosti dubine prodiranja reznih elemenata prilikom izvođenja ispitivanja (Jain et al., 2016)

### 3.4. Ispitivanje samopodešavajućeg PDC dlijeta u terenskim uvjetima

Osim laboratorijskih ispitivanja samopodešavajućih PDC dlijeta, postoje podaci i o njihovoj primjeni u terenskim uvjetima. Terenska ispitivanja daju pouzdanije informacije o efikasnosti i djelovanju samopodešavajućih PDC dlijeta, no svejedno ne prikazuju potpunu sliku realnog djelovanja dlijeta zbog raznih ograničenja koji se moraju uzeti u obzir kod pripreme i izvođenja ispitivanja.

Terensko ispitivanje provedeno je s ista tri dlijeta kao i laboratorijsko ispitivanje. Dva najtvrđa sloja (Wilcox pješčenjak i Arbuckle dolomit) kroz koja prolazi kanal bušotine izabrana su kao ispitne sekcije. Njihov položaj u litološkom profilu kanala bušotine može se vidjeti na slici 3-9, zajedno s dlijetima koja su korištena. Prilikom bušenja minimalizirani su utjecaji trenja podzemnog alata o stijenke kanala bušotine na tendenciju zapinjanja/proklizavanja dlijeta. Niz bušaćeg alata bio je opremljen i mjernim uređajima u sklopu MWD-a, koji su bili programirani za prikupljanje informacija o broju okretaja dlijeta na dnu i oscilacijama u mjerenoj torziji koji ukazuju na jačinu zapinjanja/proklizavanja dlijeta. Ostali bušaći parametri poput svojstava isplake i dobave također su optimirani kako ne bi imali utjecaja na pojavu zapinjanja/proklizavanja dlijeta.

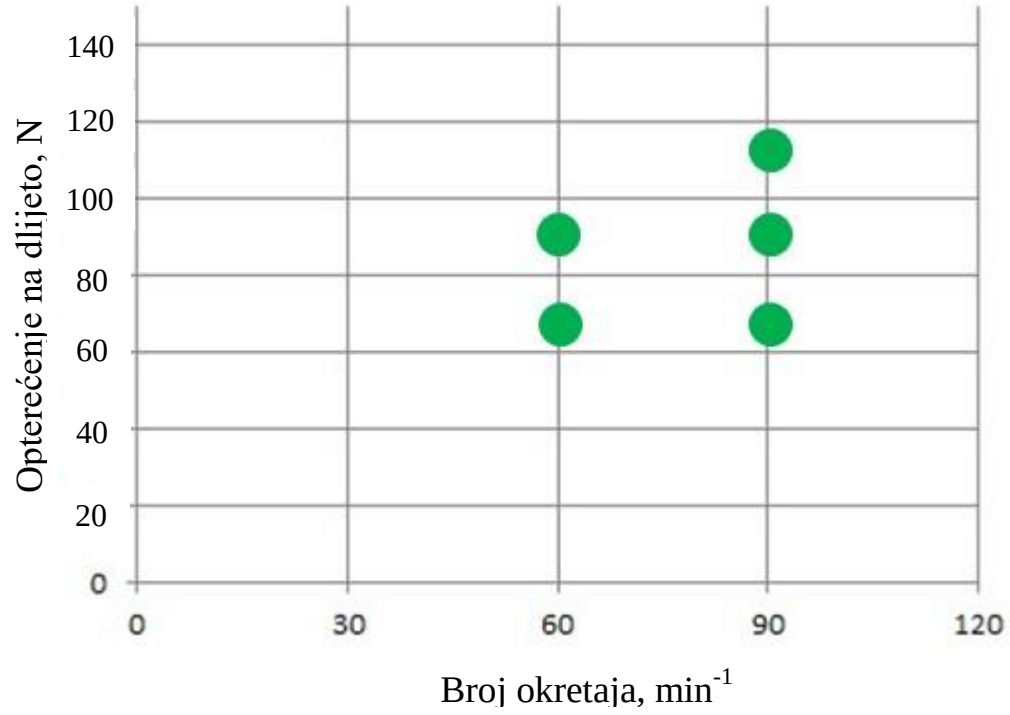
Cilj ispitivanja bio je određivanje graničnog područja opterećenja na dlijeto i broja okretaja u kojem dolazi do nastanka poremećaja vezanih za zapinjanje/proklizavanje dlijeta, te efektivnost samopodešavajućeg PDC dlijeta u eliminiranju takvih pojava.



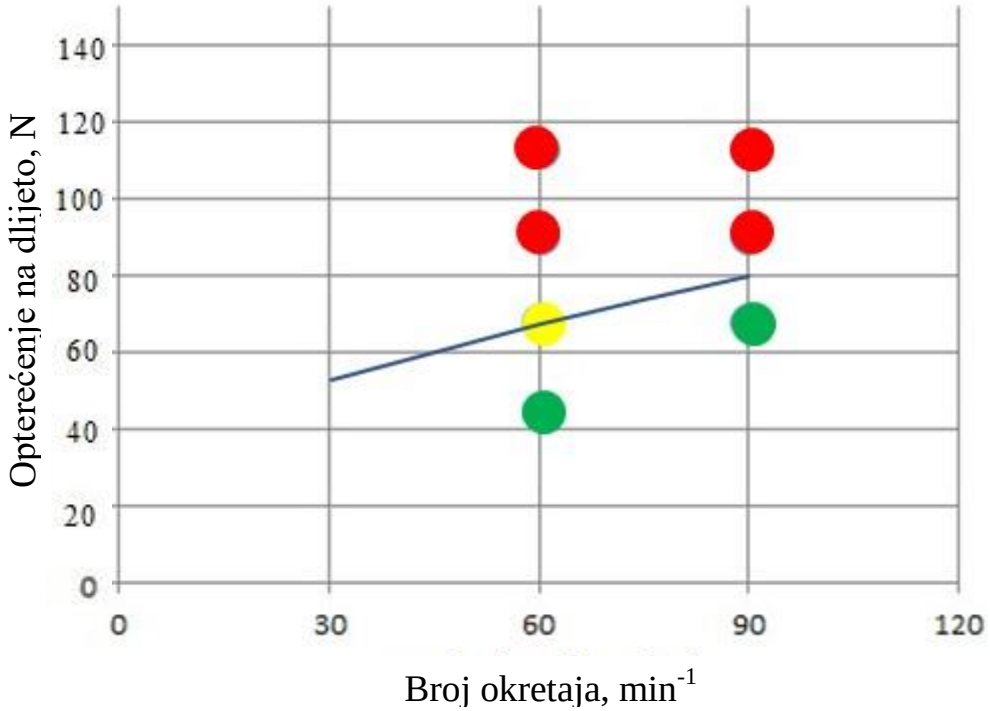

**Slika 3-9.** Intervali identificirani u ispitnoj bušotini za ispitivanje zapinjanja/proklizavanja dlijeta (a), PDC dlijeto s fiksnom kontrolom dubine prodiranja reznih elemenata (b) i samopodešavajuće PDC dlijeto (c) (Jain et al., 2016)

Na početku testa, bušenje se odvija konstantnim brojem okretaja i dovoljno niskim opterećenjem na dlijeto da se ne uzrokuje njegovo zapinjanje/proklizavanje. Osim zapinjanja/proklizavanja dlijeta, postoje i oscilacije torzije tijekom bušenja kod kojih ne dolazi do zapinjanja/proklizavanja dlijeta (Jain et al., 2016). Zapinjanje/proklizavanje dlijeta prati se promatranjem kolebanja mjerene torzije na površini i podataka prikupljenih na razini MWD sustava. Zatim se postepeno povećava opterećenje na dlijeto dok ne dođe do zapinjanja/proklizavanja dlijeta konstantnih vrijednosti. Svaki korak traje nekoliko minuta prije nego se opterećenje poveća na sljedeću vrijednost. Opisani postupak mijenjanja opterećenja na dlijeto ponavlja se na nekoliko različitih broja okretaja. Podaci prikupljeni nakon ispitivanja se upisuju na graf opterećenja na dlijeto i broja okretaja, što se još naziva i dijagram stabilnosti. Dijagrami stabilnosti za spomenuta terenska ispitivanja prikazani su slikama od 3-10 do 3-12.

a)

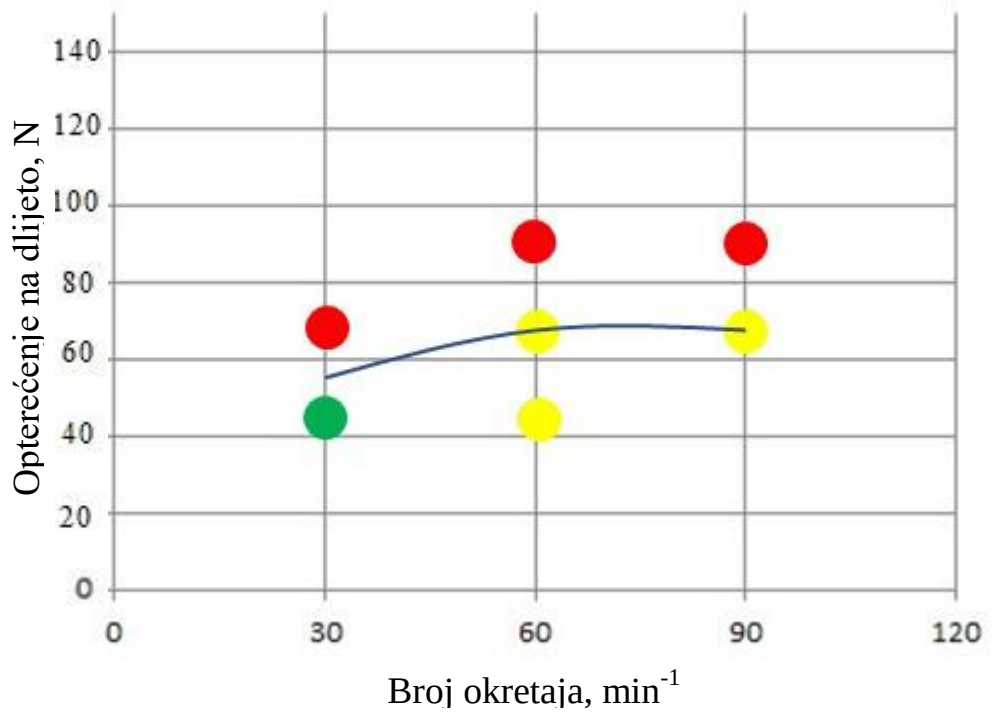



b)

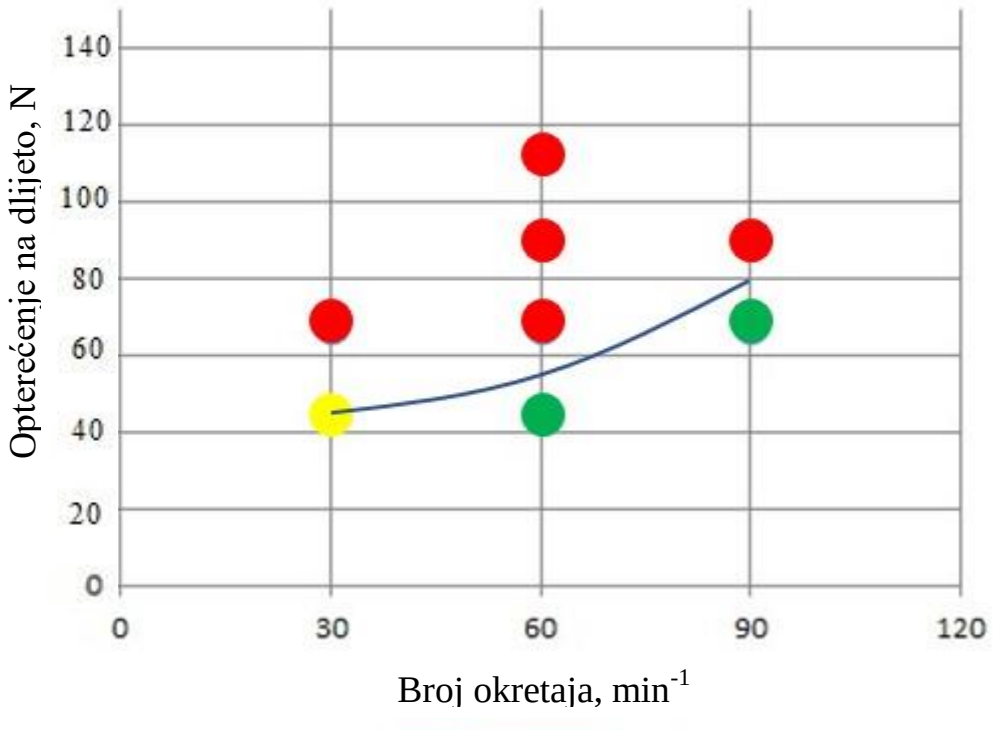



**Slika 3-10.** Dijagram stabilnosti samopodešavajućeg PDC dlijeta (a) i PDC dlijeta s fiksnom kontrolom dubine prodiranja (b) prilikom bušenja kroz pješčenjak Wilcox (Jain et al., 2016)

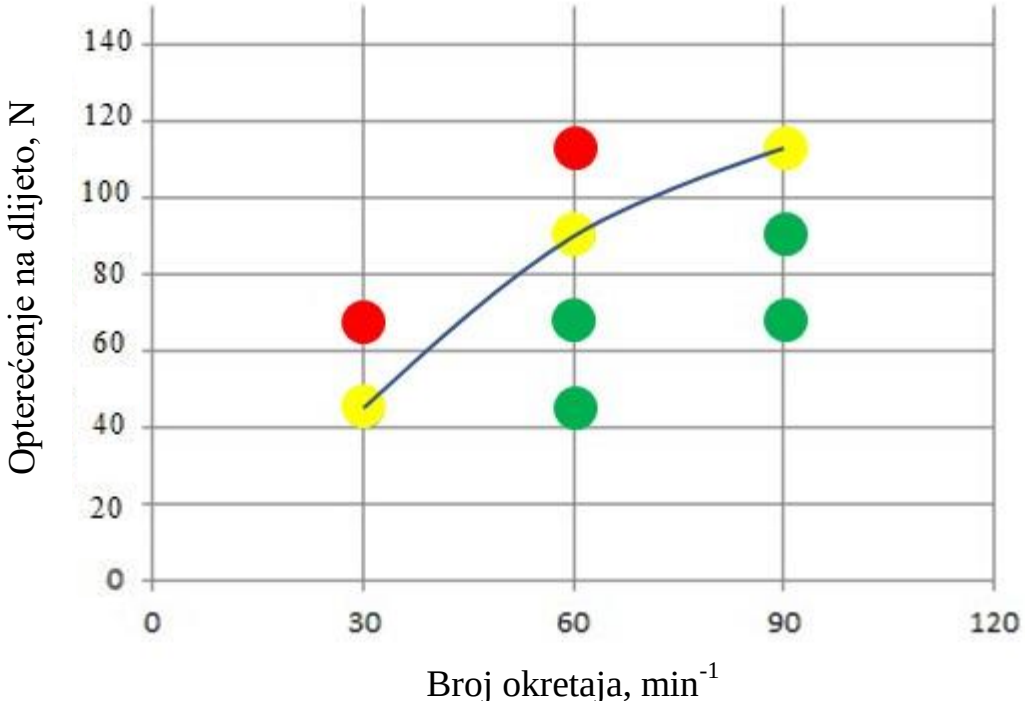
a)




b)




**Slika 3-11.** Dijagram stabilnosti konvencionalnog dlijeta (a) i PDC dlijeta s fiksnom kontrolom dubine prodiranja reznih elemenata (b) prilikom bušenja u Arbuckle dolomitu (Jain et al., 2016)



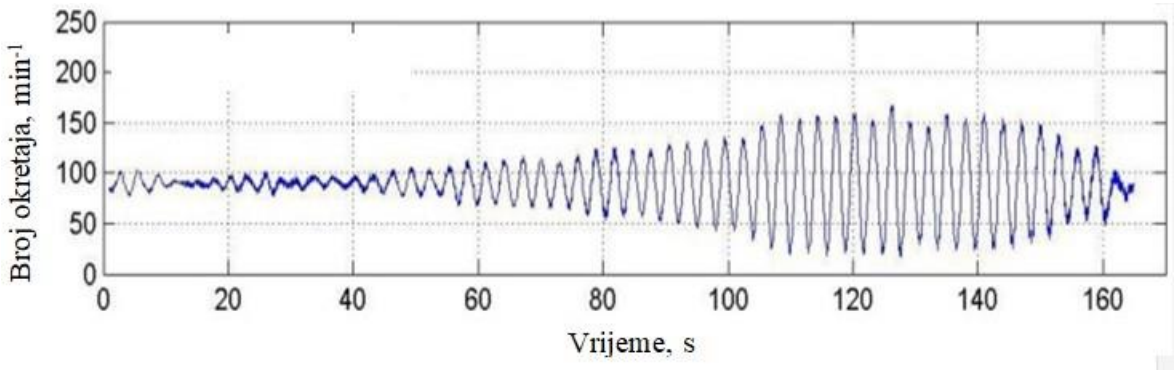

**Slika 3-12.** Dijagram stabilnosti samopodešavajućeg PDC dlijeta prilikom bušenja u Arbuckle dolomitu (Jain et al., 2016)

Zelene točke na dijagramu stabilnosti označavaju izostanak zapinjanja/proklizavanja dlijeta pri određenim parametrima režima bušenja, odnosno prilikom testiranja nije došlo do cikličkih kolebanja torzije i zastoja dlijeta na dnu bušotine i to se smatra stabilnim područjem. Žute točke predstavljaju zonu gdje je došlo do pojave slabijih oscilacija torzije. Na nekim dijelovima ispitivanja došlo je do zapinjanja/proklizavanja dlijeta, ali se intenzitet smanjivao. Na to se gleda kao tranzicijsku zonu između stabilnog i nestabilnog područja na dijagramu. Nestabilno područje označeno je crvenim točkama. One znače prisutnost zapinjanja/proklizavanja dlijeta za vrijeme cijelog trajanja ispitivanja pri određenim parametrima režima bušenja, odnosno opterećenju na dlijeto i broju okretaja. Kao što se može vidjeti na slikama, samopodešavajuće PDC dlijeto pokazuje najveće stabilno područje bušenja u oba sloja prilikom provođenja terenskih testiranja.

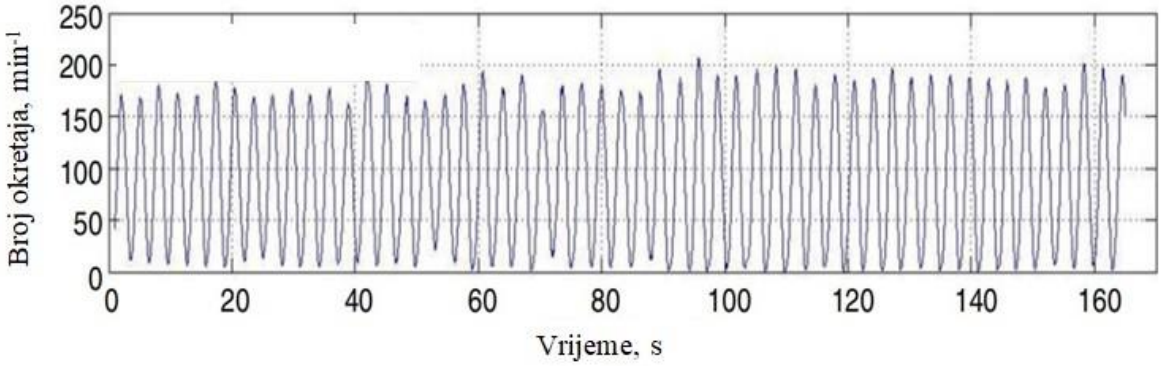
Konvencionalno PDC dlijeto pokazuje vrlo malo stabilnosti prilikom bušenja razmatranih slojeva, osim pri niskim vrijednostima opterećenja na dlijeto i broja okretaja, te dolazi do zapinjanja/proklizavanja dlijeta kod skoro svih vrijednosti ispitanih parametara. Dlijeto s fiksnom kontrolom dubine prodiranja reznih elemenata ima vidljivo

bolje rezultate u odnosu na konvencionalno PDC dlijeto bez kontrole dubine prodiranja reznih elemenata. Stabilno područje postoji i kod većeg broja okretaja, no opterećenje na dlijeto unatoč tome mora biti malo ako se želi bušiti bez zapinjanja/proklizavanja dlijeta. Sa samopodešavajućim PDC dlijetom moguće je dosegnuti velike vrijednosti broja okretaja i opterećenja na dlijeto bez zapinjanja/proklizavanja dlijeta tijekom bušenja u pješčenjaku. Tijekom bušenja u dolomitu, samopodešavajuće PDC dlijeto također pokazuje najveće stabilno područje u odnosu na ostala ispitana dlijeta. Povećavanjem broja okretaja može se povećati i opterećenje na dlijeto bez bojazni da dođe do pojave oscilacija u torziji.

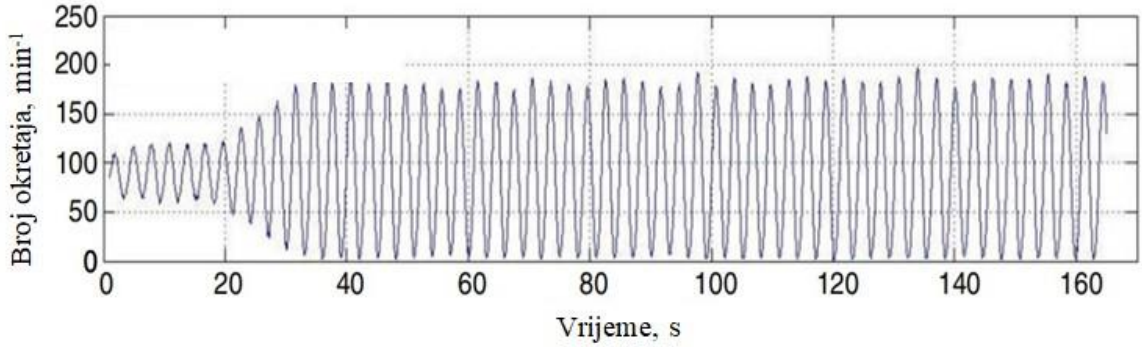
Iz ispitivanja može se zaključiti kako je samopodešavajuće PDC dlijeto uspješno eliminiralo zapinjanje/proklizavanje dlijeta te je povećalo djelotvornost bušenja pri većim opterećenjima, što se ogleda i u napretku bušenja. Slike od 3-13 do 3-15 prikazuju podatke prikupljene MWD-om prilikom provođenja terenskih ispitivanja samopodešavajućim, konvencionalnim i PDC dlijetom s fiksnim kontrolnim elementima. Površinski parametri režima bušenja, odnosno broj okretaja i opterećenje na dlijeto su bili konstantni i iznosili 90 okretaja u minuti uz približno 90 kN opterećenja na dlijeto. Na slikama je prikazana promjena broja okretaja dlijeta na dnu bušotine s vremenom. Kod samopodešavajućeg PDC dlijeta (slika 3-13) vidi se kako dolazi do tendencije zapinjanja/proklizavanja dlijeta, no dlijeto se odupire oscilacijama torzije samopodešavajućim mehanizmom i sprječava tu pojavu. Broj okretaja postepeno raste, te se zatim snižava do kraja ispitivanja što je znak završetka prilagodbe na nove uvjete. Kod ostala dva dlijeta uočava se prisutnost zapinjanja/proklizavanja dlijeta.




**Slika 3-13.** Broj okretaja samopodešavajućeg PDC dlijeta na dnu bušotine pri konstantnim površinskim parametrima režima bušenja (Jain et al., 2016)




**Slika 3-14.** Broj okretaja konvencionalnog PDC dlijeta na dnu bušotine pri konstantnim površinskim parametrima režima bušenja (Jain et al., 2016)




**Slika 3-15.** Broj okretaja PDC dlijeta s fiksnim kontrolnim elementima na dnu bušotine pri konstantnim površinskim parametrima režima bušenja (Jain et al., 2016)

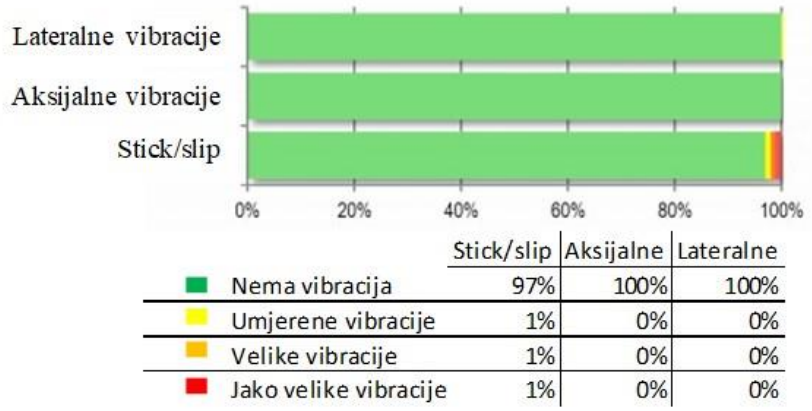
# 4. REZULTATI PRIMJENE SAMOPODEŠAVAJUĆIH PDC DLIJETA U REALNIM UVJETIMA BUŠENJA

Prethodno opisani rezultati laboratorijskih i terenskih ispitivanja provedeni su u djelomično ili potpuno kontroliranim uvjetima. Prilikom korištenja samopodešavajućih PDC dlijeta za bušenje istražnih ili razradnih bušotina dobiveni rezultati su također mnogostruko bolji u odnosu na ostala ranije korištena dlijeta na razmatranom području. Bušenje je stabilno s obzirom na moguće pojave lateralnih, aksijalnih i torzijskih vibracija kao i s obzirom na eliminaciju ili ublažavanje zapinjanja/proklizavanja dlijeta. U daljem radu biti će dani podaci o bušenju samopodešavajućim PDC dlijetom na nekoliko različitih lokacija.

## 4.1. Primjena samopodešavajućih PDC dlijeta tijekom bušenja u Meksičkom zaljevu

Prezentirani podaci odnose se na bušotine smještene na području Walker Ridge-a u Meksičkom zaljevu. Bušenje prve bušotine se odvijalo u odobalnom području dubine mora od 2900 m (9500 ft). Uz dubinu problem je predstavljala i tangencijalna sekcija bušotine koja prolazi kroz proslojke pješčenjaka i škriljavca. Iz spomenutih razloga bilo je očekivano zapinjanje/proklizavanje dlijeta zbog oscilacija torzijskih naprezanja te je odlučeno korištenje samopodešavajućeg PDC dlijeta sa sedam oštrica s reznim elementina promjera 16 mm.

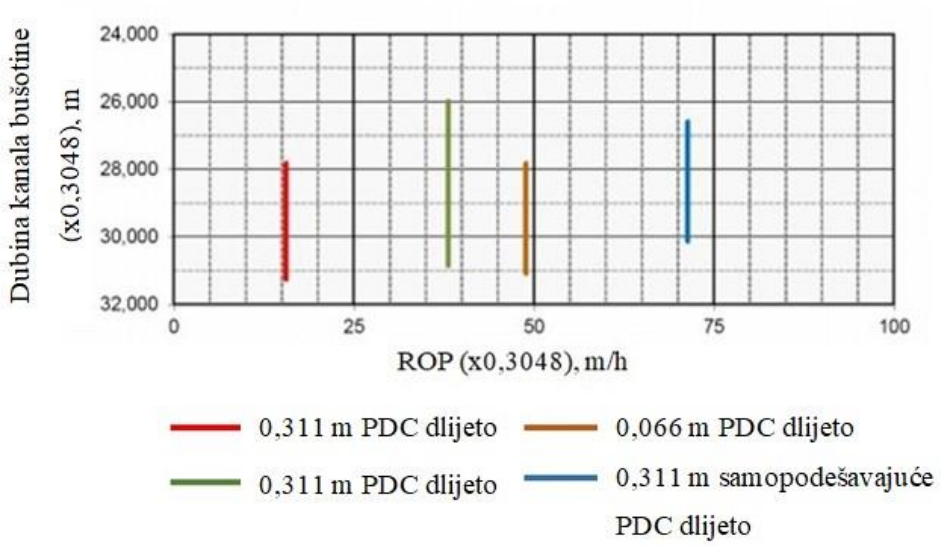
Analiza podataka o jačini vibracija tijekom rada dlijeta ukazala je na odsutnost zapinjanja/proklizavanja dlijeta u 97% vremena koje je dlijeto provelo bušeći spomenute proslojke. Također odsutne su bile i lateralne i aksijalne vibracije što se može iščitati iz slike 4-1.




| | Stick/slip | Aksijalne | Lateralne |
|---|---|---|---|
| Nema vibracija | 97% | 100% | 100% |
| Umjerene vibracije | 1% | 0% | 0% |
| Velike vibracije | 1% | 0% | 0% |
| Jako velike vibracije | 1% | 0% | 0% |

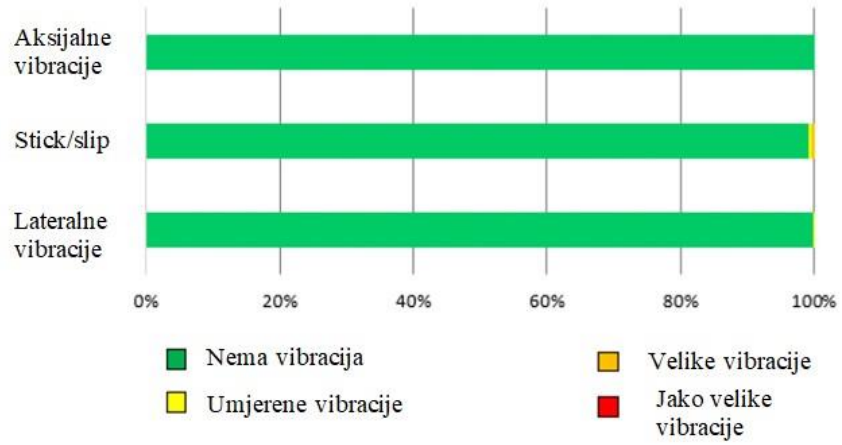
**Slika 4-1.** Analiza rezultata primjene samopodešavajućih PDC dlijeta tijekom bušenja u Meksičkom zaljevu (Rodrigue et al., 2019)

Stabilnije vrijednosti torzije omogućile su veći ROP (slika 4-2). Sekcija je izbušena jednim dlijetom i 46% većim ROP-om od prije korištenog konvencionalnog PDC dlijeta na susjednoj bušotini što je rezlturalo skraćenjem vremena za izradu ove dionice kanala bušotine za 23 sata. Važno je napomenuti da su kontrolni mehanizmi nakon završetka bušenja bili u ispravnom u stanju, bez obzira na veliku dubinu i tlak kojem je cijeli sustav bio podvrgnut. Ocjena istrošenosti dlijeta nakon vađenja bila je 1-1-WT-A-X-I-NO-TD. Iz istrošenosti dlijeta vidi se da je dlijeto izvađeno jer je dostignuta ciljana dubina dionice kanala bušotine, a istrošenost unutarnjih i vanjskih reznih elemenata je minimalna i iznosi 1.



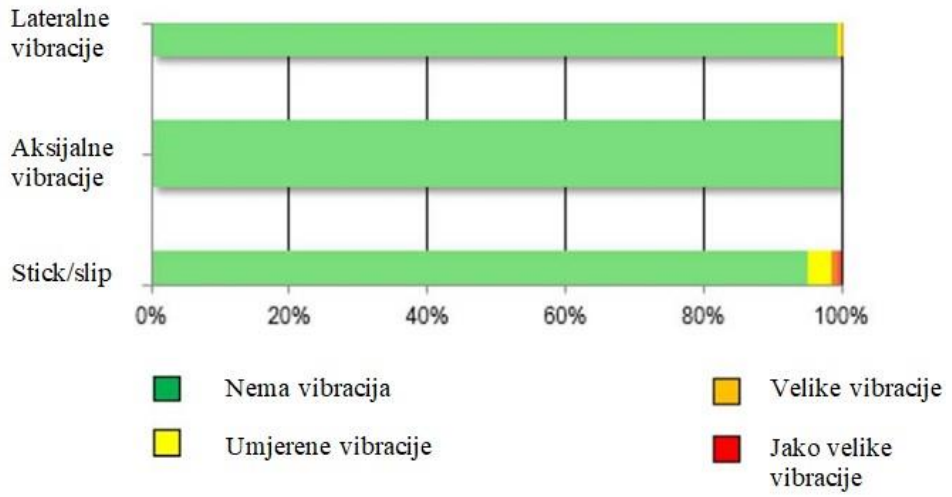

**Slika 4-2.** Usporedba ROP-a ostvarenog različitim PDC dlijetima za bušenje istog sloja (Rodrigue et al., 2019)

Druga bušotina se nalazila pod morem dubine 823 m (2700 ft). Prolazila je kroz glinovite slojeve s nekoliko proslojaka pješčenjaka. Za bušenje je korišteno samopodešavajuće PDC dlijeto istih karakteristika kao i za prvu bušotinu. Analiza intenziteta vibracija (slika 4-3) pokazala je izostanak zapinjanja/proklizavanja dlijeta tijekom 99% vremena bušenja, lateralne vibracije su također minimalne, što ukazuje na efikasnost samopodešavajuće kontrole dubine prodiranja reznih elemenata. Dionica duga 1418 m (4652 ft) izbušena je brzinom od 35 m/h, što je za 57% bolje od konvencionalnog PDC dlijeta koje je dionicu dugu 1372 m (4500 ft) izbušilo brzinom od 20 m/h.




**Slika 4-3.** Analiza pojave lateralnih i aksijalnih vibracija i pojave zapinjanja/proklizavanja dlijeta tijekom bušenja samopodešavajućim PDC dlijetom dionice kanala druge bušotine (Rodrigue et al., 2019)

Treća bušotina bušena je pod morem dubine 2591 m (8500 ft). Prolazila je uglavnom kroz slojeve pješčenjaka s proslojcima glinastog škriljavca. U planu je bilo i jezgrovanje na tri različite dubine čime bi dlijeto sva tri puta bilo izloženo različitim profilima dna bušotine, što može uzrokovat oštećenje dlijeta. Samopodešavajuće PDC dlijeto spuštano je nakon svakog jezgrovanja kako bi svojim samopodešavajućim elementima lakše započinjalo bušenje. Analiza rezultata bušenja ove bušotine prikazana je na slici 4-4. Može se vidjeti da u 97% vremena tijekom bušenja nije došlo do zapinjanja/proklizavanja dlijeta, a lateralne i aksijalne vibracije su potpuno izostale. Ocjena istrošenosti ovog dlijeta jednaka je istrošenosti dlijeta nakon bušenja prve bušotine.




**Slika 4-4.** Analiza pojave lateralnih i aksijalnih vibracija i pojave pojave zapinjanja/proklizavanja dlijeta tijekom bušenja samopodešavajućim PDC dlijetom dionice kanala treće bušotine (Rodrigue et al., 2019)

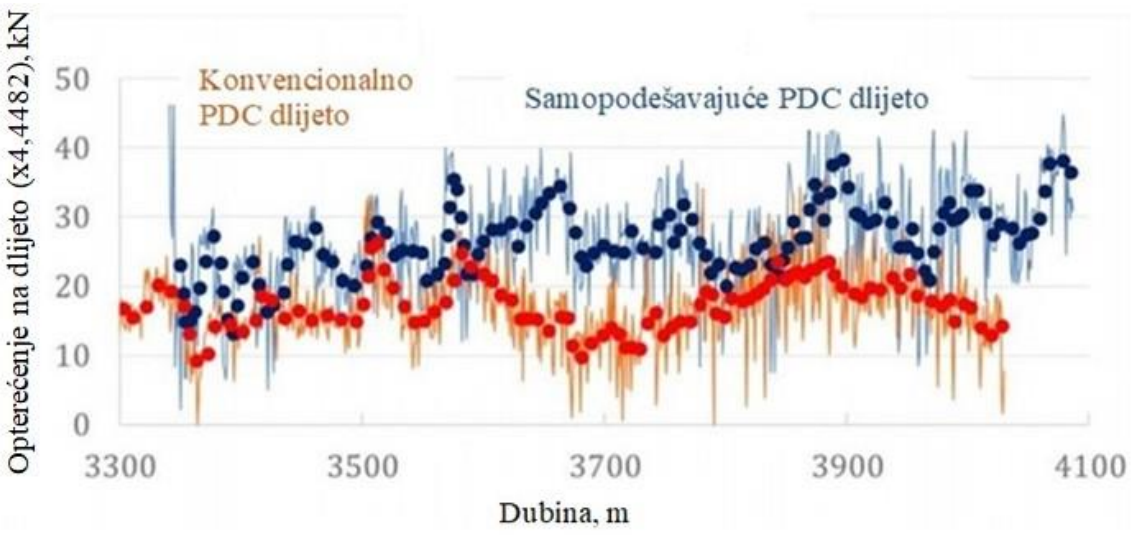
### 4.2. Primjena samopodešavajućih PDC dlijeta tijekom bušenja u Egiptu

Razmatrana bušotina se nalazi u zapadnoj pustinji u Egiptu, a prolazi kroz proslojke karbonata i škriljavca koji potiču nastanak lateralnih i torzijskih vibracija. U obližnjim (susjednim) bušotinama uočene su visoke vrijednosti torzije, veće od 23 kNm, i posljedične nestabilnosti u radu dlijeta koje djeluju štetno na ROP i životni vijek alatki. U nekim bušotinama došlo je i do odvrtanja pojedinih alatki u nizu bušaćih alatki. Zbog navedenih problema odlučeno je da će se na dubini od 3500 m početi koristiti samopodešavajuće PDC dlijeto kakvo je prikazano na slici 4-5.



**Slika 4-5**. Samopodešavajuće PDC dlijeto korišteno za bušenje u Egiptu (Hafez et al., 2019)

Dlijeto se sastojalo od šest oštrica s reznim elementima promjera 19 mm. Bušenje samopodešavajućim PDC dlijetom je počelo na dubini od 3500 m. Kako bi se osigurala aktivacija kontrolnog mehanizma samopodešavajućeg sustava, na dlijeto je primijenjeno opterećenje jednako maksimalnom opterećenju korištenom u toj sekciji u ranije izbušenim bušotinama, dok je prosječno primijenjeno opterećenje na dlijeto iznosilo više od 60% vrijednosti opterećenja korištenog s konvencionalnim PDC dlijetom. Usporedba opterećenja na dlijeto tijekom bušenja razmatrane dionice kanala bušotine konvencionalnim PDC dlijetom i samopodešavajućim PDC dlijetom prikazana je slikom 4-6.




**Slika 4-6.** Usporedba primijenjenog opterećenja na dlijeta prilikom bušenja istog sloja različitim tipovima dlijeta (Hafez et al., 2019)

Broj okretaja samopodešavajućeg PDC dlijeta na površini bio je konzistentniji nego kod primjene konvencionalnog PDC dlijeta. Bez obzira na veće vrijednosti opterećenja i broja okretaja koje su primijenjene kod samopodešavajućeg PDC dlijeta, vrijednosti torzije bile su manje za 15%. Samopodešavajuće PDC dlijeto pokazalo je i poboljšan ROP u odnosu na konvencionalno PDC dlijeto, a sveukupni napredak dlijeta bio je veći i do 40% kao posljedica samopodešavanja dubine prodiranja reznih elemenata s promjenom sloja te smanjenja trošenja reznih elemenata. Iz navedenih rezultata vidi se veća djelotvornost samopodešavajućeg PDC dlijeta. Bušenje je bilo kraće za 57% od prosječnih trajanja bušenja kroz tu sekciju u tom području, ušteđen je novac te je dlijeto također nakon završetka bušenja ostalo neoštećeno.

### 4.3. Primjena samopodešavajućih PDC dlijeta tijekom bušenja u Južnom Texasu

Bušenjem kroz slojeve Eagle Ford i Austin Chalk u Južnom Texasu, dolazilo je do pojava ozbiljnih vibracije. Iz tog razloga operator se odlučio za korištenje samopodešavajućeg PDC dlijeta s ciljem izrade zakrivljene i lateralne dionice kanala bušotine jednim dlijetom. Za bušenje se koristio dubinski motor. Na ovaj način izbušene su dvije sekcije skretanja u dvije različite bušotine, istim dlijetom.

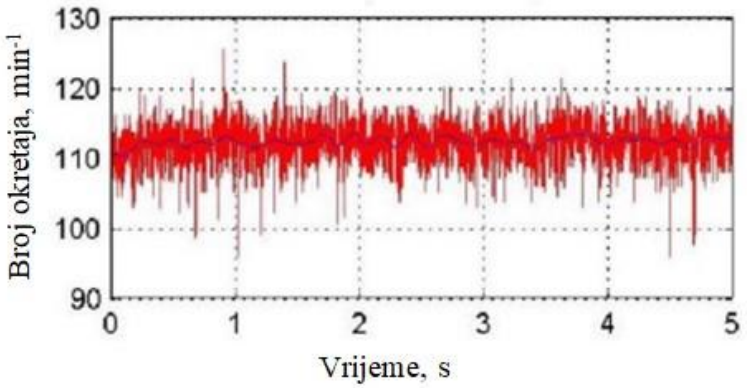
U prvoj bušotini samopodešavajuće PDC dlijeto počelo je s bušenjem na dubini od 3525 m (11565 ft). Zakrivljena dionica je izbušena nakon 27,5 sati uključujući dodavanje bušaćih šipki. Praćenjem broja okretaja i lateralnih vibracija zabilježeno je mirno bušenje s obzirom na oscilacije u torziji. Lateralna sekcija izbušena nakon skretanja kanala bušotine

iznosila je 1193 m (3914 ft) gdje je došlo do kvara motora što je rezultiralo potrebom za vađenjem niza bušaćih alatki i skoro dvostruko manjim vremenom potrebnim za bušenje lateralne dionice slične duljine u tom području. Stanje dlijeta nakon vađenja prikazano je slikom 4-7.

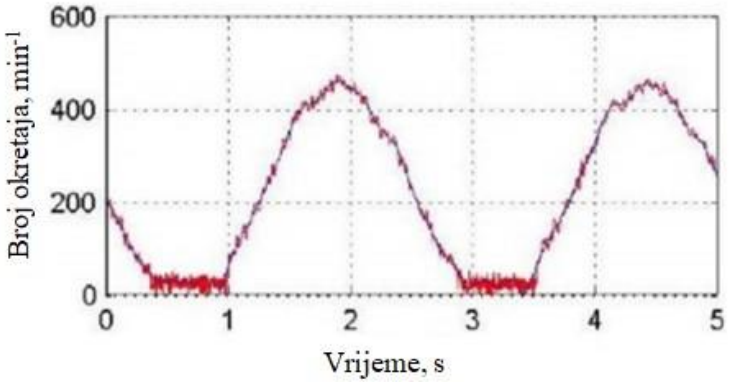


**Slika 4-7**. Samopodešavajuće PDC dlijeto nakon bušenja prve bušotine s izvađenim kontrolnim mehanizmima (Phillips i Stefanik, 2017)

Krajnja brzina bušenja prve bušotine bila je 19,3 m/h (63,4 ft/h), odnosno duljina kanala bušotine od 1500 m (4949 ft) izbušena je za 78 sati. Uspoređujući dobivene podatke s podacima koja su postignuta konvencionalnim PDC dlijetima na tom području, uštađeno je oko 150 sati prilikom bušenja cijelog kanala bušotine. Praćenjem mjerenih podataka tijekom bušenja dobiven je dijagram promjene broja okretaja u vremenu koji je prikazan slikom 4-8. Uspoređujući taj dijagram s dijagramom na slici 4-9 može se uočiti konzistentnija vrijednost broja okretaja što je posljedica uspješnog eliminiranja zapinjanja/proklizavanja dlijeta.




**Slika 4-8.** Dijagram promjene broja okretaja u vremenu tijekom izrade dionice kanala bušotine u Južnom Texasu (Phillips i Stefanik, 2017)



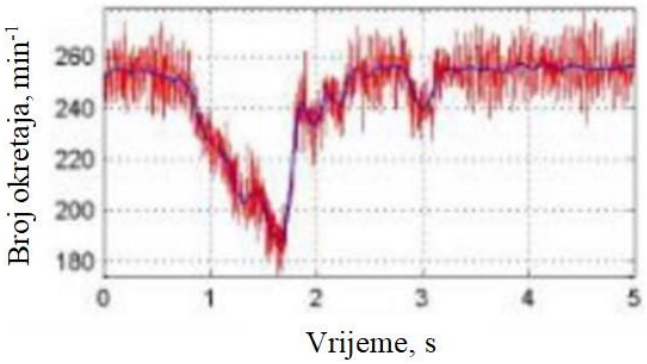

**Slika 4-9.** Dijagram promjene broja okretaja u vremenu konvencionalnog PDC dlijeta tijekom izrade dionice kanala bušotine u Južnom Texasu (Phillips i Stefanik, 2017)

Nakon uspješnog bušenja prve bušotine, dlijeto je popravljeno i odlučeno je iskoristiti ga tijekom bušenja još jedne bušotine udaljene 3,2 km (2 milje) od prve bušotine. Dlijeto je spušteno u kanal bušotine na dubinu od 3 623 m (11 888 ft) gdje započinje s bušenjem. Zakrivljena dionica kanala bušotine do 3 945 m (12 943 ft) izbušena je za 23,5 sati te je dlijeto nastavilo bušiti lateralno do ukupne duljine kanala bušotine od 5 277 m (17 315 ft) kada je niz izvađen zbog kvara motora. Stanje tog istog dlijeta nakon bušenja druge bušotine prikazano je slikom 4-10.



**Slika 4-10**. Stanje samopodešavajućeg PDC dlijeta nakon bušenja druge bušotine u Južnom Texasu (Phillips i Stefanik, 2017)

U drugoj bušotini dobiveni su slični rezultati kao i tijekom bušenja prva bušotine. Ukupna duljina kanala bušotine od 1650 m (5427 ft) izbušena je za 82 sata, što daje brzinu bušenja od 20,2 m/h (66,2 ft/h), dok je izbušena lateralna sekcija više nego dvostruko dulja (218%) nego kod bušenja konvencionalnim PDC dlijetom. Samopodešavajućim dlijetom u jednom spuštanju izbušeno je dva do četiri puta veća duljina kanala bušotine nego što je to moguće konvencionalnim PDC dlijetom. Pregledavanjem podataka dobivenih kroz mjerni sustav ugrađen u dlijeto zaključuje se da je prisutnost zapinjanja/proklizavanja dlijeta smanjena na minimum. Slika 4-11 pokazuje da je u jednom trenutku došlo do naglog smanjenja broja okretaja što je posljedica tendencije naglog povećanja dubine prodiranja reznog elementa u stijenu. U tom trenu aktivirao se samopodešavajući mehanizam kontrole dubine prodiranja, odupro se toj promjeni te je spriječio daljnje probleme koji se mogu pojaviti.




**Slika 4-11.** Dijagram promjene broja okretaja s vremenom tijekom bušenja druge bušotine u Južnom Texasu (Phillips i Stefanik, 2017)

# 5. ZAKLJUČAK

Kod izbora dlijeta za bušenje određenog dijela kanala bušotine važno je odabrati ono dlijeto koje će postići najveću efikasnost u postojećim uvjetima. Efikasnost se ogleda u brzini bušenja, odnosno najvećoj duljini izbušenog kanala bušotine u najkraćem mogućem vremenu. Izazov predstavlja izrada bušotina koje prolaze kroz proslojke različitih karakteristika. Kako bi se dostigla maksimalna učinkovitost u takvim uvjetima, mora se izraditi odgovarajući operativni raspored dlijeta koja će se koristiti. Unatoč ispravnom odabiru dlijeta i dalje će postojati neproduktivno vrijeme koje povećava cjelokupne troškove izrade određene bušotine. To se ponajviše odnosi na trošenje i oštećivanje alata kojeg je potrebno izvući na površinu i zamijeniti, ili promjenu dlijeta prilikom prijelaza u slojeve različitih svojstava. Da bi se u velikoj mjeri izbjeglo spomenuto, razvijena je tehnologija opisana u ovome radu.

Samopodešavajuća PDC dlijeta s aktivnim dinamičkim mehanizmom za kontroliranje dubine prodiranja reznih elemenata dinamički se prilagođavaju stalnim litološkim promjenama u kanalu bušotine. Mehanizam se temelji na prepoznavanju kontaktnih sila između dlijeta i stijene, odnosno kontrolni mehanizam odupire se nagloj promjeni dubine prodiranja reznih elemenata u stijenu kada osjeti da se kontaktna sila povećava ili smanjuje. Na taj način eliminira pojavu ili smanjuje intenzitet zapinjanja/proklizavanja dlijeta. Posljedično se zatim smanjuju i vibracije u nizu bušaćih alatki te se produljuje njihov životni vijek.

Na temelju podataka prikazanih u ovom radu može se zaključiti da samopodešavajuća PDC dlijeta daju bolje rezultate od ostalih konkurentnih dlijeta. Dopuštaju primjenu većih opterećenja i do 60% bez razvitka nestabilnog područja i rezultiraju većom mehaničkom brzinom bušenja. Sve navedeno se ogledava u smanjenim troškovima i uštedi, kako vremena tako i novaca.

## 6. LITERATURA


1. BOURGOYNE JR., A. T., MILLHEIM, K.K., CHENEVERT, M.E., YOUNG JR, F.S., 1986. *Applied Drilling Engineering*, SPE Textbook Series, Vol. 2

2. HAFEZ, M., ABD EL MONEIM, M., ABOULFOTOUH, M., 2019. *Case Study of Self-Adjusting PDC Bit Technology Reducing Drilling Dynamics, Improving Performance and Avoids NPT in the Western Desert of Egypt*, Abu Dhabi: SPE International Petroleum Exhibition & Conference, 11-14 November 2019., SPE-197905-MS.

3. INA – NAFTAPLIN, 1973. *Priručnik za duboko bušenje,* Zagreb

4. JAIN, J. R., RICKS, G., BAXTER, B., 2016. *A Step Change in Drill-Bit Technology With Self-Adjusting Polycrystalline-Diamond-Compact Bits*, Fort Worth: SPE Drilling Conference and Exhibition, 1-3 March 2016., IADC/SPE-178815-MS.

5. JAIN, J. R., RICKS, G., LEDGERWOOD, L. W., 2017. *Mitigating Drilling Dysfunctions and Enhancing Performance with Self-Adjusting Bit Technology: Analytical and Experimental Case Studies,* Haag: SPE Drilling Conference and Exhibition, 14-16 March 2017., SPE/IADC-184736-MS.

6. MATANOVIĆ, D., 2007. *Tehnika izrade bušotina*, Zagreb: Rudarsko-geološko-naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu.

7. PHILLIPS, A., STEFANIK, T. M., 2017. *Deployment of a Self-Adjusting Bit to Solve Todays Drilling Vibration Challenges and Optimize Performance*, San Antonio: SPE Annual Technical Conference and Exhibition, 9-11 October 2017., SPE-187370-MS.

8. RODRIGUE, W., CALLAIS, R., CHOWDHURY, A. R., 2019. *Self-Adjusting PDC Bits Reduce Drilling Dysfunction, Increase Drilling Efficiency in Gulf of Mexico Wells*, Haag: SPE International Drilling Conference and Exhibition, 5-7 March 2019., SPE/IADC-194128-MS.

Internet izvori:

9. BAROID TECHNOLOGY, 1994., Method and apparatus for improving drill bit stability, Houston, JUSTIA Patents 5558170 URL: https://patents.justia.com/patent/5558170 (10.8.2019.)

10. DIAFRONT, PDC cutters, URL: (http://www.pdccutters.com/ShowProducts.asp?id=39 (5.3.2020.)

11. PATENT APPLICATION PUBLICATION 2009. US 2009/0030658. URL: http://www.patentsencyclopedia.com/imgfull/20090030658_03 (9.8.2019.)
12. PETROWIKI 2016. PDC Bit Design. URL: https://petrowiki.org/PDC_bit_design (15.8.2019.)

**IZJAVA:**

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



Karlo Vedriš

KLASA: 402-04/20-01/38
URBROJ: 251-70-03-20-3
U Zagrebu, 07.04.2020.

**Karlo Vedriš, student**

# RJEŠENJE O ODOBRENJU TEME

Na temelju Vašeg zahtjeva primljenog pod KLASOM: 602-04/20-01/38, UR.BR. 251-70-12-20-1 od 26.02.2020.godine priopćujemo temu završnog rada koja glasi:

## SAMOPODEŠAVAJUĆA PDC DLIJETA

Za voditelja ovog završnog rada imenuje se u smislu Pravilnika o završnom ispitu dr. sc. Borivoje Pašić, docent Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu.

**Voditelj**

(potpis)

Doc. dr. sc. Borivoje Pašić

(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)