

Modeli za analiziranje specifične mehaničke energije tijekom bušenja

Jagatić, Leonardo

Undergraduate thesis / Završni rad

2024

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:169:246309>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-17**



Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

RUDARSKO – GEOLOŠKO – NAFTNI FAKULTET

Prijediplomski studij naftnog rudarstva

MODELI ZA ANALIZIRANJE SPECIFIČNE MEHANIČKE ENERGIJE TIJEKOM BUŠENJA

Završni rad

Leonardo Jagatić

N4420

Zagreb, 2024.

MODELI ZA ANALIZIRANJE SPECIFIČNE MEHANIČKE ENERGIJE TIJEKOM BUŠENJA

Leonardo Jagatić

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

Sažetak

Cilj u naftnoj industriji, od svoga začetka pa sve do današnjeg vremena, je pronaći nove i efikasnije tehnike bušenja kako bi se ubrzala izrada bušotine te postigao maksimalni mogući iscrpak fluida iz određenog ležišta. Jedan od parametara koji utječe na brzinu bušenja i koji se sve više uzima u obzir pri odabiru režima bušenja je specifična mehanička energija koja predstavlja rad utrošen za razrušavanje određenog volumena stijene. U ovom završnom radu je pojašnjena definicija specifične mehaničke energije kao i modeli koji služe za proračun specifične mehaničke energije te njihove prednosti i nedostaci. Na kraju završnog rada dan je i primjer analize specifične mehaničke energije koja je utrošena tijekom izrade dionice kanala bušotine u Republici Hrvatskoj.

Ključne riječi: bušotina, mehanička energija, modeli, brzina bušenja, bušenje

Završni rad sadrži: 33 stranice, 6 tablica, 9 slika i 20 referenci

Jezik izvornika: Hrvatski

Pohrana rada: Knjižnica Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta, Pierottijeva 6, Zagreb

Mentori: Izvr. prof. dr. sc. Borivoje Pašić, RGNF

Komentor: Dr. sc. Petar Mijić

Ocjenjivači: Izvr. prof. dr. sc. Borivoje Pašić, RGNF
Prof. dr. sc. Zdenko Krištafor, RGNF
Prof. dr. sc. Katarina Simon, RGNF

SADRŽAJ

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| POPIS SLIKA | I |
| POPIS TABLICA | II |
| POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I PRIPADAJUĆIH SI JEDINICA | III |
| POPIS KORIŠTENIH KRATICA | IV |
| 1. UVOD | 1 |
| 2. BUŠENJE | 2 |
| 2.1. Razvoj bušenja kroz povijest | 2 |
| 2.2. Današnji napredak tehnike bušenja | 4 |
| 3. SPECIFIČNA MEHANIČKA ENERGIJA TIJEKOM BUŠENJA | 7 |
| 4. MODELI ZA ANALIZIRANJE SPECIFIČNE MEHANIČKE ENERGIJE | 8 |
| 4.1. Prvi modeli specifične mehaničke energije | 8 |
| 4.1.1. Tealov model..... | 8 |
| 4.1.2. Rabia model..... | 10 |
| 4.1.3. Pessier i Fear model | 10 |
| 4.1.4. Dupriest i Koederitz model | 11 |
| 4.1.5. Armentov model..... | 12 |
| 4.1.6. Mohanov i dr. model | 13 |
| 4.1.7. Minghui i dr. model..... | 14 |
| 4.1.8. Chen i dr. model..... | 15 |
| 4.2. Usporedba prvih modela za izračun MSE | 16 |
| 4.3. MSE modeli „vođeni podacima“ (na principu umjetne inteligencije) | 19 |
| 5. PRIMJER IZ PRAKSE | 21 |
| 5.1. Tealov model | 22 |
| 5.2. Rabia model | 24 |
| 5.3. Pessier & Fear model | 26 |
| 5.4. Usporedba dobivenih specifičnih mehaničkih energija po različitim modelima | 28 |
| 6. ZAKLJUČAK | 31 |
| 7. LITERATURA | 32 |

POPIS SLIKA:

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Slika 2-1. Trožrvanjsko dlijeto..... | 4 |
| Slika 2-2. Nakupljeni materijali unutar rezne strukture dlijeta. | 6 |
| Slika 5-1. Promjena vrijednosti parametara mehaničke brzine bušenja - ROP, brzine rotacije dlijeta– RPM i zaokretnog momenta na dlijetu – TORQ s promjenom dubine..... | 23 |
| Slika 5-2. Promjena vrijednosti MSE prema Teal modelu i opterećenja na dlijeto s promjenom dubine kanala bušotine..... | 24 |
| Slika 5-3. Promjena vrijednosti MSE i opterećenja na dlijeto – WOB s promjenom dubine prema Rabia modelu..... | 25 |
| Slika 5-4. Promjena vrijednosti parametara mehaničke brzine bušenja – ROP i MSE prema Rabinom modelu s promjenom dubine..... | 26 |
| Slika 5-5. Promjena vrijednosti MSE i opterećenja na dlijeto – WOB s promjenom dubine prema P&F modelu..... | 27 |
| Slika 5-6. Vrijednosti parametra mehaničke brzine bušenja – ROP i MSE prema P&F modelu s promjenom dubine | 28 |
| Slika 5-7. Usporedba različitih MSE dobivene pomoću različitih modela za razmatrani interval..... | 30 |

POPIS TABLICA

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tablica 4-1. Usporedba empirijskih modela za izračun MSE tijekom bušenja..... | 18 |
| Tablica 5-1. Mjereni podaci tijekom bušenja intervala duljine 40 metara (580-620 m dubine) | 21 |
| Tablica 5-2. Dobivena vrijednost MSE pomoću Tealovog modela za razmatrani interval | 22 |
| Tablica 5-3. Dobivene vrijednosti MSE prema Rabia modelu za razmatrani interval kanala bušotine..... | 24 |
| Tablica 5-4. Dobivene vrijednosti koeficijenta μ_b te MSE prema P&F modelu za razmatrani interval kanala bušotine | 26 |
| Tablica 5-5. Usporedba dobivenih vrijednosti MSE pomoću različitih modela..... | 28 |

POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I PRIPADAJUĆIH SI JEDINICA

A_b – površina lica dlijeta (m^2)

c_1 i c_2 – koeficijenti koji se smanjuju sa smanjenjem ograničavajućeg tlaka (–)

CS (engl. *Compression Strength*) – tlačna čvrstoća, čvrstoća na tlak (bar/psi)

D_b – promjer dlijeta (m)

DB Depth – dubina do koje se došlo bušenjem u tom trenutku (m)

E_m – mehanička učinkovitost novog dlijeta (%)

ES – specifična energija = MSE (MPa)

HP_b (engl. *High Pressure*) – hidraulička snaga dlijeta (W/Nm/s)

T – zaokretni moment na dlijetu, torzija (Nm)

ΔP_b – pad tlaka na dlijetu (Pa)

β (engl. *Coefficient Of Hydraulic Horsepower*) – koeficijent hidrauličkih konjskih snaga (–)

γ_b (engl. *Bottom Hole Inclination*) – nagib dna bušotine (°)

μ_b – specifični koeficijent trenja klizanja dlijeta (–)

Q (engl. *Flow Rate*) – protok (m^3/h)

η_1 – (engl. *Dummy Factor*) „lažni faktor“, faktor koji koristimo da korigiramo jednadžbu kada dolazi do smanjenje energije (–)

η – učinkovitost PDM motora (%)

λ (engl. *Bit-Hydraulics Factor*) – hidraulički faktor za dlijeto (–)

ΔP_m – pad tlak pri korištenju PDM motora (Pa)

μ_s (engl. *Coefficient Of The Friction Of Drill String*) – koef. trenja između niza bušaćih alatki i stijenki kanala bušotine (–)

POPIS KORIŠTENIH KRATICA

AI (engl. *Artificial Intelligence*) – umjetna inteligencija

ANN (engl. *Artificial Neural Network*) – umjetna neuronska mreža

CCS (engl. *Confined Compressive Strength Of Rock*) – ograničena tlačna čvrstoća stijene (MPa)

DOT (engl. *Drill-Off Test*) – test podatljivosti bušenju

HP (engl. *High Pressure*) – područja povišenog tlaka (Pa)

HMSE (engl. *Hydraulic Mechanical Specific Energy*) – specifična hidrauličko–mehanička energija (MPa)

MNLR (engl. *Multiple Nonlinear Regression*) – višestruka nelinearna regresija

MLE (engl. *Multilayer Feed-Forward Network, Multilayer Perceptron*) – višeslojne neuronske mreže bez povratnih veza

MSE (engl. *Mechanical Specific Energy*) – specifična mehanička energija (MPa)

MWD (engl. *Measurements While Drilling*) – mjerenja tijekom bušenja

PDM (engl. *Positive-Displacement Motors*) – dubinski volumetrijski motori

PSPM (engl. *Pump Speed, Pump Pressure*) – brzina i tlak isplachnih pumpi (bar)

ROP (engl. *Rate Of Penetration*) – mehanička brzina bušenja (m/h)

RPM (engl. *Revolution Per Minute*) – brzina rotacije dlijeta (okr/min)

TORQ (engl. *Torque*) – zaokretni moment na dlijetu (ft-lbf ili Nm)

UCS (engl. *Unconfined Compressive Strength Of The Rock*) – neograničena tlačna čvrstoća stijene (MPa)

WOB (engl. *Weight On Bit*) – opterećenje na dlijeto izmjereno na površini (N ili tona)

P&F – Pessier i Fear (autori jednog od modela za analiziranje MSE)

1. UVOD

Danas je fokus industrije usmjeren s masovne industrijske proizvodnje različitih proizvoda, na proizvodnju uz što nižu jediničnu cijenu proizvoda koju je moguće postići nižom cijenom utrošene energije. Trenutno je najčešća metoda u naftnoj industriji za optimiranje procesa bušenja i procjenu njegove učinkovitosti metoda ispitivanja bušivosti stijena (engl. *Drill-Off Test - DOT*). Manjkavost ove metode je da dobiveni rezultati postaju manje pouzdani s povećanjem dubine bušotine uslijed različitih utjecaja (npr. promjene sastava stijene). U 60-ima godinama prošlog stoljeća Teale (1965) je uveo pojam specifična mehanička energija (engl. *Mechanical Specific Energy – MSE*) kao mjeru učinkovitosti bušenja. MSE se definira kao omjer između ulazne energije i volumena uklonjene stijene u procesu bušenja. Praćenjem i podešavanjem parametara režima bušenja, direktno se utječe na specifičnu mehaničku energiju koja se koristi za razrušavanje stijene čime se povećava učinkovitost i sigurnost procesa bušenja. Velik broj tvrtki provodio je ispitivanja vezana uz specifičnu mehaničku energiju koja se troši tijekom bušenja, od kojih su mnoge dobile obećavajuće rezultate, međutim velik broj kompanija nije još upoznat toliko s konceptom MSE te nisu sigurni koliko ga isplativo koristiti. Glavni nedostatak trenutnih modela koji se koriste za proračun specifične mehaničke energije je nedostatak evaluacije modela, tj. evaluacije s obzirom na specifičnu hidrauličku energiju, tvrdoću stijene, gubitak zakretnog momenta te trenje koje se javlja uzduž niza bušaćih alatki. S obzirom na veliki utjecaj koji MSE ima na proces bušenja, zadatak ovog završnog rada će biti detaljnije objasniti koncept specifične mehaničke energije, njezin značaj za proces bušenja te pojasniti modele koji se koriste za njeno proračunavanje.

2. BUŠENJE

Bušenje u naftnom rudarstvu je proces izrade kanala bušotine u Zemljinoj kori s ciljem pronalaženja i iskorištavanje ležišta nafte, prirodnog plina i geotermalne vode.

2.1. Razvoj bušenja kroz povijest

Prvi počeci bušenja pojavljuju se već u 17. stoljeću. Veliki je problem u to vrijeme bio što se bušenje obavljalo ručno, upotrebom primitivnih alatki kako bi se razrušilo stijene za koje se smatralo da su zasićene ugljikovodicima. Povijesno gledano, za izradu bušotine (otvora) u tlu stijeni korištene su tri tehnike bušenja;

1. **Ručno udarno bušenje** – koristilo se u tvrdim stijenama; radnici bi postavljali alatku za bušenje uz odabranu stijenu, a s druge strane bi teškim čekićem udarali po dljetu kako bi otkrhnuli male komade stijene (prilikom svakog udarca, alatku bi zakretali).
2. **Udarno bušenje sa zamahom** – ovaj postupak se koristio u tvrdim i srednje tvrdim stijenama; alatka za bušenje zadigla bi se s dna bušotine i ponovo spuštala na dno pomoću jakog zamaha iskorištavajući utjecaj sile teže. Pri svakom podizanju alatke za bušenje s dna, alatka bi se zakretala kako bi se dobio značajni napredak bušenja.
3. **Rotacijsko bušenje** – metoda koja je najviše zastupljena u sadašnje vrijeme pri izradi bušotina, a u prošlosti se najčešće koristi u mekim stijenama i eventualno u ležištima ugljena. U početku se postupak izvodio pomoću spiralnog dljeta na koje se ostvarivalo opterećenje i na taj način prodiralo kroz slojeve stijene.

Tijekom bušenja, vrlo je važno da se krhotine (čvrste čestice) nabušeni stijena kontinuirano iznose iz kanala bušotine na površinu, jer bez toga nije moguće učinkovito razrušavati stijenu i izrađivati kanal bušotine odnosno ostvarivati napredak u bušenju. Prilikom udarnog bušenja, tehnici bušenja kakva se koristila u počecima razvoja bušenja, morala se koristiti posebna alatka zvana „žlica“ kojom su se iznosile izbušene čestice stijene, dok je prilikom rotacijskog bušenja taj dio obavljalo spiralno dljeto te nije bilo potrebno imati dodatnu posebnu opremu (Kralj, 1982). Korištenje ovih postupaka bušenja zahtijevalo je dosta vremena za iznošenje krhotina i bilo je veoma iscrpljujuće, što je potaklo razvoj prvih bušilica. U počecima su te bušilice bile pogonjene pomoću same ljudske snage, a napredak se dogodio nastankom parnog stroja te razvojem automatskog bušačkog čekića koji je uvelike ubrzao postupak bušenja. Razvoj bušačkog čekića je bio polazna točka iz koje su

se razvile bušilice (uređaji) koji počinju koristiti vodenu paru te komprimirani zrak kao pogonsko sredstvo. Veliki napredak u tehnici i tehnologiji bušenja počeo je pojavom i razvojem drugih oblika pogonske energije te njihovom primjenom prilikom bušenja, također upotreba hidrauličke i električne energije te motora s unutrašnjim izgaranjem su imali ogroman značaj. Prvi izumljeni strojevi za udarno bušenje zahtijevali su poprilično malu količinu energije jer su se oni u počecima koristili za bušenje bušotina koje su bile relativno malih promjera i dubina. Za izradu prve naftne bušotine uzima se godina 1859., kada je Edwin L. Drake izbušio bušotinu dubine 21 m u SAD-u (Kujundžić, 2006). Prva bušilica pokretana isključivo na hidraulički pogon bila je izumljena 1878. godine od strane Andreasa von Brandta, a osim njezine primjene u Austriji i Njemačkoj također se pojavljuje u Istri, u Labinskom ugljenokopu gdje je ostvarila vrlo dobre rezultate (Stack, 1982). Hidrauličke bušilice su se vrlo slabo razvijale od njihovog nastanka pa sve do sredine 20-og stoljeća. Jedna od većih prekretnica u razvoju bušenja i početka masovne proizvodnje nafte bila je uvođenje isplake, odnosno sustava za ispiranje bušotine tijekom bušenja, a njezin začetnik bio je Antun Lučić, koji je uz razvoj isplake imao ogroman utjecaj na naftnu industriju i njezin razvoj. Sve navedene tehnike bušenja, kao i njihov razvoj omogućile su i razvoj postrojenja koja se danas koriste prilikom izrade bušotina za eksploataciju ležišta ugljikovodika i geotermalne vode.

2.2. Današnji napredak tehnike bušenja

Operacija bušenja smatra se sastavnim dijelom svakog inženjerskog posla povezanog sa tlom i podzemljem, odnosno bušenje se iz različitih razloga primjenjuje u građevinarstvu, rudarstvu i naftnom rudarstvu. Ovisno o njihovoj namjeni, dubine bušotina mogu biti različite od nekoliko desetina metara kao u građevinarstvu, nekoliko stotina metara u npr. rudarstvu pa sve do nekoliko tisuća metara u naftnom rudarstvu. Današnja podjela metoda bušenja temelji se na načinu razrušavanja stijenske mase, pa tako postoji:

- a) udarno bušenje,
- b) rotacijsko bušenje,
- c) udarno – rotacijsko bušenje.

Pri bušenju stijena, osim šta je potrebno izabrati odgovarajuću metodu bušenja također je vrlo važno izabrati pravi tip dlijeta za što efikasnije razrušavanje stijena. Jedno od danas najčešće korištenih dlijeta prilikom izrade dubokih bušotina je trožrvanjsko dlijeto prikazano na Slici 2-1.



Slika 2-1. Trožrvanjsko dlijeto (Rocksmith, 2021)

Većina spomenutih metoda bušenja koje se danas koriste u praksi su samo unaprijeđene metode bušenja iz prošlosti koje su poboljšane i unaprijeđene temeljem različitih testova i istraživanja. Pojava tehnike hidrauličkog frakturiranja stijena zajedno s

razvojem tehnologije izrade horizontalnih bušotina velikog dosega značajno su pridonijeli povećanju efikasnosti iskorištavanja ležišta ugljikovodika i geotermalne vode. Kontinuiranim razvojem tehnike i tehnologije bušenja, želi se postići najveća moguća brzina bušenja i zbog toga se ulazi u sveobuhvatnije i dublje analize korištenja energije tijekom bušenja kojom se nastoji ubrzati i poboljšati izrada bušotine. Povećanje učinkovitosti tijekom bušenja važan je dio mjera smanjenja troškova bušenja, tj. izrade bušotine za pridobivanje ugljikovodika ili geotermalne vode. Bušenje u naftnom rudarstvu složen je proces koji ovisi o više različitih čimbenika kao što su promjer dlijeta, učinkovitost dlijeta u razrušavanju stijene, ostvareni zaokretni moment, ostvareno opterećenje na dlijeto (engl. *Weight On Bit - WOB*), brzina rotacije dlijeta (engl. *Revolution Per Minute*), protok isplake tijekom bušenja, reološka svojstva isplake, tvrdoća stijene, itd. Jedan od stalnih ciljeva istraživača je maksimalno povećanje mehaničke brzine bušenja dlijeta u stijenu (engl. *Rate Of Penetration - ROP*) koja će omogućiti smanjenje troškova bušenja u razradi naftnih, plinskih i geotermalnih ležišta te povećati rentabilnost eksploatacije ugljikovodika ili geotermalne vode na određenom eksploatacijskom polju. Mehanička brzina bušenja predstavlja brzinu prodora dlijeta u stijenu na toj određenoj dubini, pa samim tim, što je bolje optimiran režim bušenja, konačna vrijednost ROP-a na toj određenoj dubini će biti veća. Postizanje i održavanje visokog ROP-a pokazalo se izazovnim zadatkom, koji zahtijeva više od pukog opskrbliivanja bušačeg niza dovoljnom hidrauličkom i mehaničkom snagom za razrušavanje stijene. Najčešća metoda koja se danas primjenjuje u naftnoj industriji za postizanje što učinkovitijeg ROP-a je test podatljivosti stijene bušenju. Ova se metoda provodi primjenom više različitih opterećenja na dlijeto i brzine rotacije bušačeg niza, kako bi se utvrdilo koji režim bušenja je najpogodniji za bušenje određenog tipa stijene. Ovisno o uvjetima, postoje dvije različite vrste DOT-a, odnosno aktivna i pasivna metoda (Guerrero, 2007). Aktivnu metodu najbolje je koristiti u uvjetima bušenja s velikom brzinom prodora dlijeta kroz stijensku masu, a provodi se pokretanjem bušenja s minimalnim preporučenim opterećenjem na dlijeto. Opterećenje na dlijeto se tada povećava u koracima od 1000 kg dok ROP više ne reagira „pozitivno“ na dodatno opterećenje na dlijeto tj. kada dođe do trenutka da se ROP ne povećava linearno s dodatnim povećanjem opterećenja na dlijeto. Ovaj test se provedi za različiti broj okretaja niza bušačih alatki i uz konstantan protok isplake. Test pasivnog DOT-a najbolje je koristiti tijekom bušenja s malim napretkom. Ovdje test započinje sa 80 % maksimalne vrijednosti WOB-a (podatci dobiveni od proizvođača dlijeta). Na 80 % maksimalno preporučenog opterećenja na dlijeto, kretanje niza bušačih alatki se zadržava pomoću kočnice bušaće dizalice i koloturnog sustava, što će uzrokovati postepeno smanjenje

opterećenja na dlijeto. Tijekom nastavka bušenja broj okretaja na dlijeto će se početi povećavati, a test je dovršen kada, zbog istežanja niza bušaćih alatki vrijednost opterećenja na dlijeto padne na nulu. Ovaj test se provodi za različiti broj okretaja u minuti, što rezultira kontinuiranom krivuljom za ROP u odnosu na WOB, te se prema tome određuje najbolji i najučinkovitiji režim bušenja za bušenje ispitivane stijene u odabranoj bušotini (Dupriest i Koederitz 2005).

Tijekom bušenja često dolazi do situacija kada više nije moguće povećati mehaničku brzinu bušenja, te tada bušač ima dvije opcije; zadržati dosegnutu mehaničku brzinu bušenja i nastaviti bušiti tim režimom bez povećanja ulazne energije ili identificirati uzrok nemogućnosti daljnjeg povećanja mehaničke energije bušenja, te napraviti korektivne radnje. Najčešći problemi koji uzrokuju nemogućnost daljnjeg povećanja mehaničke brzine bušenja su obljepljivanje dlijeta i obljepljivanje dna bušotine (Dupriest i Koederitz 2005). Na Slici 2-2 prikazano je obljepljeno dlijeto izvučeno iz bušotine.



Slika 2-2. Nakupljeni nabušeni stijenski materijali unutar rezne strukture dlijeta (Drilling formulas, 2014).

Slabost ove metode ispitivanja podatljivosti stijene bušenju se pojavljuje povećanjem dubine, teže dolazimo do točnih podataka tijekom bušenja (sastav stijene, povećanje temperature i tlaka i sl.) i samim time proračun testa nije točan. Zbog tog razloga konstantno se istražuju i uvode nove metode kojima će se povećati učinkovitost i sigurnost procesa bušenja.

3. SPECIFIČNA MEHANIČKA ENERGIJA TIJEKOM BUŠENJA

Proces optimizacije parametara režima bušenja ne bi trebao biti specifičan samo za proces bušenja, već i za vrstu stijene koja se buši, upravo radi toga su razvijene brojne metode za optimiziranje parametara režima bušenja kako bi se maksimizirala mehanička brzina bušenja. Jedna od metoda kojom se nastojao postići maksimalni ROP uvedena je oko 60-ih godina kada je Teale (1965) uveo pojam specifične mehaničke energije kao mjeru učinkovitosti bušenja. Specifična mehanička energija je definirana kao mehanički rad obavljen za razrušavanje jediničnog volumena stijene. Na ovaj način moguće je procijeniti učinkovitost procesa bušenja u konkretnom slučaju i objektivan je alat za identifikaciju prikladnog dlijeta za bušenje određene stijene. Na mehaničku brzinu bušenja najveći utjecaj imaju šupljikavost i jednoosna tlačna čvrstoća stijene, dok najmanji utjecaj ima gustoća korištene isplake. Iako je od razvoja ove metode za procjenu efikasnosti procesa bušenja bilo dosta istraživanja na tu temu, koncept nije pravilno implementiran u praksu sve dok ExxonMobil nije proveo probna ispitivanja 2005. godine kako bi povećao učinkovitost procesa bušenja (Dupriest i Koederitz 2005). Ishod istraživanja premašio je sva njihova očekivanja. Upotrebom koncepta specifične mehaničke energije na šest svojih platformi tijekom razdoblja od tri mjeseca, ROP je povećan za 133 %, a novi terenski rekordi ostvareni su na 10 od 11 bušotina. Tijekom sljedeće godine kompanija je izvijestila da je uštedjela 54 milijuna dolara, te postavila je 50 novih rekorda u bušenju (Hamrick, 2011). Specifična mehanička energija izračunava se pomoću različitih modela za analiziranje specifične mehaničke energije pri bušenju koji će biti detaljnije pojašnjeni u nastavku rada.

4. MODELI ZA ANALIZIRANJE SPECIFIČNE MEHANIČKE ENERGIJE

U ovom poglavlju završnog rada objašnjeni su modeli za proračun specifične mehaničke energije tijekom bušenja.

4.1. Prvi modeli specifične mehaničke energije

Modeli za izračunavanje specifične mehaničke energije tijekom bušenja mogu se klasificirati u tri kategorije. Prva kategorija uključuje osnovni model za proračun specifične mehaničke energije tijekom bušenja koji je uglavnom primjenjiv za vertikalno bušenje. Nadalje, postoje modeli za proračun specifične mehaničke energije koji se mogu koristiti kod horizontalnog i usmjerenog bušenja, kao i modeli koji su prikladni za primjenu na bušotinama za čiju izradu se koriste dubinski volumetrijski isplačni motori (engl. *Positive-Displacement Motors-PDM*).

4.1.1. Tealov model

Teal (1965) predložio je prvi model za izračun specifične mehaničke energije tijekom bušenja, a MSE prema njemu kvantificira kao omjer između ulazne mehaničke energije i odgovarajućeg ROP-a.

$$\text{Specifična mehanička energija (MSE)} = \frac{\text{ulazna energija (Input energy)}}{\text{rezultirajući ROP (Output ROP)}} \quad (4-1.)$$

Iz jednadžbe 4-1 može se zaključiti da je poželjna niska vrijednost MSE, jer to znači da se veliki volumen stijene uklanja s manjim unosom energije u sustav, što svakako povećava efikasnost procesa bušenja. Mehanička ulazna energija rezultat je djelovanja dviju sila, aksijalne sile i rotacijske sile. Po definiciji, rotacijski rad je dan kao moment, pomnožen s kutem rotacije, dok je aksijalni rad dan kao umnožak primijenjene sile i prijedene udaljenosti. Za proces bušenja, aksijalna sila je dana kao opterećenje na dlijeto koji potiskuje rezne elemente dlijeta u stijenu, i rotacijska sila koja stvara kružno gibanje koje oslobađa fragmente stijena različitih veličina (Hamrick, 2011):

$$MSE = \frac{\text{Vertikalna sila}}{\text{Volumen iznešenih čestica}} + \frac{\text{Rotacijska sila}}{\text{Volumen iznešenih čestica}} \quad (4-2.)$$

Teale (1965) je zatim izveo sljedeću jednadžbu za izračun specifične mehaničke energije na temelju podataka dostupnih tijekom bušenja :

$$MSE = \frac{WOB}{A_b} + \frac{120\pi \cdot RPM \cdot T}{A_b \cdot ROP} \quad (\text{MPa}) \quad (4-3.)$$

Gdje su:

MSE (engl. *Mechanical Specific Energy*) – specifična mehanička energija (MPa)

WOB (engl. *Weight On Bit*) – opterećenje na dlijeto registrirano na površini (N)

A_b – površina lica dlijeta (m^2)

RPM (engl. *Revolution Per Minute*) – brzina rotacije dlijeta (okr/min)

T – zaokretni moment na dlijetu, torzija (Nm)

ROP (engl. *Rate Of Penetration*) – mehanička brzina bušenja (m/h)

U gornjem modelu, zaokretni moment (torzija) na dlijetu je glavna varijabla. Iako se zaokretni moment na dlijetu može lako izmjeriti u laboratoriju ili pomoću sustava za mjerenje tijekom bušenja (engl. *Measurements while drilling-MWD*) na terenu, treba imati u vidu da je većina terenskih podataka izmjerena uređajima na površini te izračun MSE temeljen na ovom modelu može imati veliku pogrešku. Stoga se Tealov model koristi samo kvalitativno kao polazni alat za daljnje razvoje modela. Brojni istraživači poput Rabie (1985), Pessier i Feara (1992), Dupriesta i Koederitza (2005), Armente (2008), Mohana i dr. (2009), razvili su točnije modele koji će moći brže i preciznije odrediti MSE tijekom bušenja. Ti modeli naširoko su korišteni u odabiru dlijeta, kvantifikaciji učinkovitosti bušenja, praćenju napretka bušenja, optimizaciji procesa bušenja, poboljšanju ROP-a i tako dalje. MSE dobiven pomoću ovih modela može se koristiti za optimiranje procesa bušenja u vertikalnim bušotinama, dok je optimiranje procesa bušenja u usmjerenim i horizontalnim bušotinama pomoću MSE teže upravo zbog toga što je većina terenskih podataka dobivena površinskim mjerenjima. Unatoč tome postoji nekoliko učinkovitih MSE modela za precizno modeliranje stvarnog bušenja u usmjerenim ili horizontalnim bušotinama poput modela Chena i dr. (2018).

4.1.2. Rabia model

Rabia (1985) je predstavio jednostavan model pomoću kojeg se odabire dlijeto za bušenje određene formacije na temelju specifične mehaničke energije kao:

$$MSE = \frac{0.24 \cdot WOB \cdot RPM}{D_b \cdot ROP} \quad (\text{MPa}) \quad (4-4.)$$

Gdje su:

MSE (engl. *Mechanical Specific Energy*) – specifična mehanička energija (MPa)

RPM (engl. *Revolution Per Minute*) – brzina rotacije dlijeta (okr/min)

D_b – promjer dlijeta (m)

ROP (engl. *Rate Of Penetration*) – mehanička brzina bušenja (m/h)

WOB (engl. *Weight On Bit*) – opterećenje na dlijeto registrirano na površini (N)

4.1.3. Pessier i Fear model

Pessier i Fear (1992) predložili su novi model za izračun specifične mehaničke energije tijekom bušenja koji za izračun koristi specifični koeficijent trenja klizanja dlijeta:

$$MSE = WOB \cdot \left(\frac{1}{A_b} + \frac{120\pi \cdot \mu b \cdot RPM}{D_b \cdot ROP} \right) \quad (\text{MPa}) \quad (4-5.)$$

$$\mu b = \frac{T}{D_b \cdot WOB} \quad (-) \quad (4-6.)$$

Gdje su:

MSE (engl. *Mechanical Specific Energy*) – specifična mehanička energija (MPa)

WOB (engl. *Weight On Bit*) – opterećenje na dlijeto registrirano na površini (N)

A_b – površina lica dlijeta (m^2)

ROP (engl. *Rate Of Penetration*) – mehanička brzina bušenja (m/h)

μ_b – specifični koeficijent trenja klizanja dlijeta (–)

D_b – promjer dlijeta (m)

RPM (engl. *Revolution Per Minute*) – brzina rotacije dlijeta (okr/min)

T – zaokretni moment na dlijetu, torzija (Nm)

Parametri gornjeg modela lako se mogu dobiti na terenu, a njegova preciznost izračuna je poboljšana u odnosu na prijašnje modele, te zbog toga ima učestaliju upotrebu u optimiranju procesa bušenja. U ovom modelu, zaokretni moment na dlijetu izračunava se preko WOB-a. Međutim, opterećenje na dlijeto se uvijek očitava na temelju mjerenja na površini, što ne odražava opterećenje na dlijeto na dnu bušotine. Ovo je posebno bitno kod usmjerenog i horizontalnog bušenja gdje postoji velika razlika između stvarnog WOB-a na dnu bušotine i WOB-a registriranog na površini (Chen i dr., 2018). Također, svako dlijeto ima određenu mehaničku učinkovitost u bušenju, stoga Pessierov i Fearov model ima ograničenu primjenu i također postoji određena pogreška u izračunavanju MSE.

4.1.4. Dupriest i Koederitz model

Mnogi su istraživači povezali vrijednosti MSE s ograničenom tlačnom čvrstoćom stijene (engl. *Confined Compressive Strength Of Rock - CCS*) kako bi se procijenila učinkovitost procesa bušenja. Empirijska korelacija između MSE i CCS stijene može se prikazati i kroz sljedeći izraz (Minghui i dr., 2016):

$$Em = \frac{CCS}{MSE} \times 100 \quad (\%) \quad (4-7.)$$

Gdje je:

MSE (engl. *Mechanical Specific Energy*) – specifična mehanička energija (MPa)

E_m – mehanička učinkovitost novog dlijeta (%)

CCS (engl. *Confined Compressive Strength Of Rock*) – ograničena tlačna čvrstoća stijene (MPa)

S obzirom da u teoriji svako dlijeto ima određenu mehaničku učinkovitost, a u stvarnom procesu bušenja ponešto izmijenjenu, Dupriest i Koederitz (2005) definirali su mehaničku učinkovitost dlijeta odnosno specifičnu mehaničku energiju tijekom bušenja na

sljedeći način, koristeći se također kao bazom Tealeovim modelom uključujući parametar mehaničke učinkovitosti novog dlijeta (E_m) :

$$MSE = E_m \cdot \left(\frac{WOB}{A_b} + \frac{120 \cdot \pi \cdot RPM}{A_b \cdot ROP} \right) \quad (\text{MPa}) \quad (4-8.)$$

Gdje su:

MSE (engl. *Mechanical Specific Energy*) – specifična mehanička energija (MPa)

WOB (engl. *Weight On Bit*) – opterećenje na dlijeto registrirano na površini (N)

A_b – površina lica dlijeta (m^2)

RPM (engl. *Revolution Per Minute*) – brzina rotacije dlijeta (okr/min)

ROP (engl. *Rate Of Penetration*) – mehanička brzina bušenja (m/h)

E_m – mehanička učinkovitost novog dlijeta (%)

Dupriest i Koederitz (2005) su smatrali da su vršne učinkovitosti dlijeta uvijek u rasponu od 30-40 %, iz čega su zaključili da je njegova mehanička učinkovitost 35 %. Međutim ovo je upitno zbog mehaničke učinkovitosti dlijeta koja ovisi o nizu čimbenika, a može uvelike varirati od pretpostavljenih 35 %. Cherif (2012) je u svom radu ustvrdio da je mehanička učinkovitost dlijeta 26-64 % umjesto ranije spomenutih 35 %. Zapravo, mehanička učinkovitost nije specifična samo za dlijeto, već i za stijenu koja se buši, i može jako varirati s obzirom na tip dlijeta koje se koristi kao i vrstu stijene koja se buši, tako da se mora odrediti prema stvarnim uvjetima bušenja. Stoga ovaj model također ima određena ograničenja.

4.1.5. Armentov model

Armenta (2008) je primijetio da korištenje neograničene tlačne čvrstoće (engl. *Unconfined Compressive Strength Of The Rock - UCS*) stijene nije prikladan pristup za procjenu MSE ili mehaničke učinkovitosti procesa bušenja. Postoje dva glavna nedostatka korištenja UCS-a kao usporednog alata s MSE vrijednostima, za predviđanje učinkovitosti bušenja. Prvo, pronalaženje konkretne korelacije između MSE i UCS je težak zadatak jer je vrijednost MSE uglavnom mnogo veća od UCS vrijednosti. Drugo, svojstva stijena iznimno su bitna za njihov mehanički odgovor na proces razrušavanja stijene (Knez i Mazur, 2019).

Slično tome, veza između svojstava stijena i dlijeta ima izniman utjecaj na vrijednost specifične mehaničke energije. Armenta (2008) je primijetio da se utjecaj hidrauličkih parametara na dlijetu mora uzeti u obzir kod određivanja specifične energije bušenja (MSE). Prema Armenti, terenska promatranja pokazuju da pravilan dizajn hidrauličkih parametara dlijeta može dramatično poboljšati MSE. Stoga je MSE definirao kao potrebnu specifičnu energiju za fragmentaciju kao i za uklanjanje jedinice volumena izbušene stijene, te je također razvio MSE na temelju Tealeovog modela dodavanjem pojma koji sadrži hidrauličke parametre dlijeta:

$$MSE = \frac{WOB}{A_b} + \frac{120 \cdot \pi \cdot RPM}{A_b \cdot ROP} - \left(\frac{\lambda}{ROP} \cdot \frac{HP_b}{A_b} \right) \quad (\text{MPa}) \quad (4-9.)$$

Gdje su:

MSE (engl. *Mechanical Specific Energy*) – specifična mehanička energija (MPa)

WOB (engl. *Weight On Bit*) – opterećenje na dlijeto registrirano na površini (N)

A_b – površina lica dlijeta (m^2)

RPM (engl. *Revolution Per Minute*) – brzina rotacije dlijeta (okr/min)

ROP (engl. *Rate Of Penetration*) – mehanička brzina bušenja (m/h)

HP_b (engl. *High Pressure*) – hidraulička snaga dlijeta (W ili Nm/s)

λ (engl. *Bit-Hydraulics Factor*) – hidraulički faktor za dlijeto, ovisi o promjeru dlijeta (–)

4.1.6. Mohanov i dr. model

Mohan i dr. (2009) uključili su hidrauličke parametre u izračun specifične mehaničke energije i predstavili novi model na temelju Tealeovog modela. Novi model korišten je za izračun specifične hidrauličko-mehaničke energije (HMSE), a ne specifične mehaničke energije bušenja kao u slučaju Armentova modela. Autori su definirali model za izračun HMSE kao specifičnu hidrauličku i mehaničku energiju potrebnu za razrušavanje stijene i uklanjanje krhotina ispod lica dlijeta. Napomenuli su da njihov HMSE model uključuje torzijsku, aksijalnu i hidrauličku energiju dok pojedinačni MSE ne uzima u obzir te parametre. Predstavili su svoj novi model HMSE kao :

$$HMSE = \frac{WOB \cdot ROP + (120\pi \cdot RPM) + \eta_1 \cdot \Delta P_b \cdot Q}{A_b \cdot ROP} \quad (\text{MPa}) \quad (4-10.)$$

Gdje su:

HMSE (engl. *Hydraulic Mechanical Specific Energy*) – specifična hidraulička – mehanička energija (MPa)

WOB (engl. *Weight On Bit*) – opterećenje na dlijeto registrirano na površini (N)

A_b – površina lica dlijeta (m^2)

RPM (engl. *Revolution Per Minute*) – brzina rotacije dlijeta (okr/min)

ROP (engl. *Rate Of Penetration*) – mehanička brzina bušenja (m/h)

ΔP_b – pad tlaka na dlijetu (Pa)

Q (engl. *Flow Rate*) – protok (m^3/h)

η_1 – (engl. *Dummy Factor*) „lažni faktor“, faktor koji koristimo da korigiramo jednadžbu kada dolazi do smanjenje energije (–)

4.1.7. Minghui i dr. model

Minghui i suradnici uključili su u razvoj svog modela za izračun specifične mehaničke energije dodatne parametre kojima se karakterizira proces mlaznog bušenja (engl. *Jett Drilling*). Pomoću ovog modela moguće je procijeniti MSE kod mlaznog bušenja. Njihov predloženi model definiran je kao (Pessier i Fear, 1992):

$$MSE = \frac{WOB}{A_b} + \frac{120\pi \cdot RPM \cdot c_1 \cdot WOB \cdot Db}{A_b \cdot ROP} + \frac{120\pi \cdot c_2 \cdot WOB \cdot \sqrt{RPM \cdot Db}}{A_b \sqrt{ROP}} + \frac{\beta \cdot HP_b}{A_b \cdot ROP} \quad (\text{MPa}) \quad (4-11.)$$

Gdje su:

MSE (engl. *Mechanical Specific Energy*) – specifična mehanička energija (MPa)

WOB (engl. *Weight On Bit*) – opterećenje na dlijeto registrirano na površini (N)

A_b – površina lica dlijeta (m^2)

RPM (engl. *Revolution Per Minute*) – brzina rotacije dlijeta (okr/min)

ROP (engl. *Rate Of Penetration*) – mehanička brzina bušenja (m/h)

c_1 i c_2 – koeficijenti koji se smanjuju sa smanjenjem ograničavajućeg tlaka (–)

β (engl. *Coefficient Of Hydraulic Horsepower*) – koeficijent hidrauličkih konjskih snaga (–)

D_b – promjer dlijeta (m)

HP_b (engl. *High Pressure*) – hidraulička snaga dlijeta (W ili Nm/s)

4.1.8. Chen i dr. model

Postoji velika razlika između površinski mjenog opterećenja na dlijeto i stvarnog koji djeluje na stijenu na dnu kanala bušotine. Smjer bušenja također ima veliki utjecaj na naprezanja koja djeluju na dlijeto koje prodire u stijenu. Stoga su Chen i dr. (2018) razvili još jedan model za potrebe procjene MSE kod usmjerenog i horizontalnog bušenja. Prema njihovom modelu, za ovaj model treba uzeti u obzir dva važna faktora, WOB i zaokretni moment na dlijetu, te su svoj model definirali kako slijedi :

$$MSE = Em \cdot WOB \cdot \left(\frac{1}{A_b} + \frac{\mu_b \cdot RPM}{D_b \cdot ROP} \right) \quad (\text{MPa}) \quad (4-12.)$$

Gdje su:

MSE (engl. *Mechanical Specific Energy*) – specifična mehanička energija (MPa)

WOB (engl. *Weight On Bit*) – opterećenje na dlijeto (N ili tona)

A_b – površina lica dlijeta (m^2)

RPM (engl. *Revolution Per Minute*) – brzina rotacije dlijeta (okr/min)

ROP (engl. *Rate Of Penetration*) – mehanička brzina bušenja (m/h)

E_m – mehanička učinkovitost novog dlijeta (%)

μ_b – specifični koeficijent trenja klizanja dlijeta (–)

Također su napravili novi model za izračun MSE koji je primjenjiv za bušenje s PDM-om:

$$MSE = E_m \cdot \left(WOB \cdot e^{-\mu_s \gamma_b} \frac{1}{A_b} + \frac{\eta \cdot \Delta P_m Q}{A_b \cdot ROP} \right) \quad (\text{MPa}) \quad (4-13.)$$

Gdje su:

MSE (engl. *Mechanical Specific Energy*) – specifična mehanička energija (MPa)

WOB (engl. *Weight On Bit*) – opterećenje na dlijeto (N ili tona)

A_b – površina lica dlijeta (m^2)

ROP (engl. *Rate Of Penetration*) – mehanička brzina bušenja (m/h)

E_m – mehanička učinkovitost novog dlijeta (%)

γ_b (engl. *Bottom Hole Inclination*) – nagib dna bušotine ($^\circ$)

e – eulerova konstanta ($e = 2,718$)

ΔP_m – pad tlak pri korištenju PDM motora (Pa)

η – učinkovitost PDM motora (%)

Q (engl. *Flow Rate*) – protok (m^3/h)

μ_s (engl. *Coefficient Of The Friction Of Drill String*) – koef. trenja između niza bušaćih alatki i stijenki kanala bušotine (–)

4.2. Usporedba prvih modela za izračun MSE

Prethodno navedeni empirijski modeli predstavljaju najvažnije modele za procjenu MSE vrijednosti koji se trenutno koriste u naftnoj industriji. Ti modeli su znatno poboljšavani tijekom posljednjih desetljeća, međutim još uvijek postoje neke nepoznanice koje nisu dovoljno istražene i uključene u proračun. Općenito, parametri u gore navedenim MSE modelima povezani su s tri izvora podataka: mjerenja na površini, mjerenja na razini dlijeta te podaci o svojstvima stijene. Bolje rečeno, dostupni MSE modeli sadrže različit broj parametara za koji su potrebni podaci iz različitih izvora. Na primjer, Tealeov i Rabijin model uglavnom uključuju parametre koji se dobivaju mjerenjima na površini. Nadalje, uzeli su u obzir samo učinak promjera dlijeta na vrijednosti specifične mehaničke energije, a

zanemarili su učinak hidrauličkih parametara dlijeta, kao što su promjer mlaznice, vrsta fluida za bušenje itd. Nadalje, ni Tealeov niti Rabijin model ne uključuju parametre koji se odnose na izbušene stijene, što je dovelo do značajne pogreške u izračunu specifične mehaničke energije. Tek početkom 2000-ih drugi su istraživači nastojali dodatno uključiti svojstva stijena koje se buši u izračun vrijednosti MSE. Za primjer se može uzeti model za proračun vrijednosti MSE koji su predložili Dupriest i Koederitz (2005), koji je uključio CCS stijene za procjenu mehaničke učinkovitosti proces bušenja. Iako je ovo bio uočljiv napredak u razvoju modela za procjenu MSE, čini se da je vrlo neadekvatan budući da se CCS uvelike razlikuje od MSE i ne može u potpunosti prikazati utjecaj stijene na vrijednost specifične mehaničke energije tijekom bušenja. U stvari, mogućnost razrušavanja stijene ovisi o mnogim parametrima, kao što su tip stijene (magmatska, sedimentna i metamorfna), njena tvrdoća, abrazivnost, poroznost, tip pornog/slojnog fluida, tlak fluida u pornom prostoru itd. CCS je pokazatelj tvrdoće stijene, te stoga ne uključuje sva ranije spomenuta svojstva stijene. Novi MSE modeli također pate od sličnih problema koji se odnose na svojstva stijene koju se buši. Stoga se pojavila potreba za razmatranjem više svojstava stijene koji bi bili uključeni u budućim MSE modelima. Ti parametri svakako trebaju uključivati abrazivnost stijena, čvrstoću na smicanje, te poroznost i propusnost kao hidrauličko svojstvo stijene. Od kasnih 2000-ih do danas, istraživači su se usredotočili na uključivanje hidrauličkih parametara na dlijetu u svoje modele za izračunavanje MSE (Armenta, 2008, Mohan i dr. 2009 te Minghui i dr., 2016). Iako su ti modeli uzeli u obzir hidrauličke parametre dlijeta, utjecaj svojstava stijene nije dovoljno valoriziran. Zapravo, u svima njima koristi se samo CCS. MSE model koji su razvili Chen i dr. (2018) imao je mnoge prednosti u odnosu na prethodno navedene modele. Prvo, učinak smjera bušenja odnosno s njime povezana promjene svojstava stijena, uključen je u izračun MSE. Nadalje, može se primijeniti za bušači niz koji uključuje dubinski volumetrijski isplačni motor. Međutim, ovaj se model može poboljšati uključivanjem više parametara povezanih sa svojstvima stijene. Osim parametara koji se odnose na tri gore navedena izvora podataka, čini se da postoje i drugi čimbenici koje je potrebno uključiti u determiniranje specifične mehaničke energije tijekom bušenja. Kako se dubina bušotina povećava kao rezultat iscrpljivanja konvencionalnih plićih ležišta nafte i plina, javlja se potreba za razvojem sofisticiranijih MSE modela koji bi pokrivali nova područja poput bušenja u uvjetima visokih tlakova i temperatura, izradu bušotina velikog dosega ili razradu nekonvencionalnih ležišta, i dr. U dubokim formacijama, neki vanjski čimbenici, kao što su temperatura i tlak imaju uvelike važniji utjecaj nego kod plićih formacija. Prekomjerna toplina zbog trenja između niza

bušaćih alatki i okolnih stijena može imati značajan utjecaj na predviđeni MSE, budući da utječe na varijable uključene u MSE modele. Nadalje, udio utrošene MSE povezan je s toplinom stvorenom na kontaktu dlijeta i stijena koje ono buši. Stoga, u prijenosu topline između niza bušaćih alatki i stijena dominira utjecaj temperature stijene, karakteristike dlijeta i isplake koja se koristi tijekom bušenja. Da bi se što preciznije i točnije odredila MSE, potrebno je uzeti u obzir sastav niza bušaćih alatki kojim se buši određena stijena, vrstu fluida, sposobnost hlađenja fluida, kvalitetu ravnomjerne raspodjele topline uzduž niza bušaćih alatki te utjecaj različitih fizikalnih parametara na protok fluida. U sljedećoj Tablici 4-1. prikazana je usporedba ranije opisanih empirijskih MSE modela.

Tablica 4-1. Usporedba empirijskih modela za izračun MSE tijekom bušenja

| Model | Autor | Uzet u obzir utjecaj stijene | Uzet u obzir utjecaj hidrauličkih parametara na dlijetu | Tip bušotine | Više detalja |
|--------------|-----------------------------|-------------------------------------|----------------------------------------------------------------|---------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| MSE model | Teale (1965) | Ne | Ne | Vertikalna bušotina | Polazni model za izračun MSE |
| MSE model | Rabia (1985) | Ne | Ne | Vertikalna bušotina | Model korišten kod odabira dlijeta na temelju specifične energije. |
| MSE model | Pessier i Fear (1992) | Ne | Ne | Vertikalna bušotina | Uveden koeficijent trenja klizanja dlijeta. |
| MSE model | Dupriest i Koederitz (2005) | Da | Ne | Vertikalna bušotina | Baziran na temelju Tealovog modela uz koji je uključen pojam mehaničke učinkovitosti. |
| MSE model | Armenta (2008) | Ne | Da | Vertikalna bušotina | Uključen utjecaj hidrauličkih parametara dlijeta |

| | | | | | |
|------------|----------------------|----|----|-----------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| HMSE model | Mohan i dr. (2009) | | Da | Vertikalna bušotina | Ovaj model uključuje torzijsku aksijalnu i hidrauličku energiju, dok pojedinačni MSE ne uzima u obzir te parametre. |
| MSE model | Minghui i dr. (2016) | Ne | Da | Vertikalna bušotina | Bušenje mlazom fluida |
| MSE model | Chen i dr. (2018) | Da | Da | Horizontalna i usmjerena bušotina | Uključuje dva nova parametra za WOB i moment na dnu bušotine za usmjereno i horizontalno bušenje. |
| MSE model | Chen i dr. (2018) | Da | Da | Bušenje s PDM motorom | Napravljen MSE model za slučaj upotrebe PDM motora. |

4.3. MSE modeli „vođeni podacima“ (na principu umjetne inteligencije)

Tijekom operacija bušenja velika količina podataka iz različitih izvora (vezanih uz površinsku opremu, dlijeto, niz bušaćih alatki, okolnu stijenu i isplaku) bilježi se u stvarnom vremenu. Klasične matematičke ili empirijske metode nisu u stanju otkriti prikrivene odnose između takvih parametara. U ovoj situaciji, MSE model vođen podacima može se učinkovito upotrijebiti za prepoznavanje takvih skrivenih korelacija između različitih parametara. Danas se sve više razvijaju MSE modeli vođeni na podacima zbog njihove sposobnosti uključivanja u proračun velikog broja parametara bušenja na vremenski učinkovit način. U ovom odjeljku predstavljeni su neki od takvih modela vođenih podacima dobivenih u stvarnom vremenu. Anemangely i dr. (2019) razvili su MSE model koji se temelji na dobivenim podacima na naftnom polju u južnom dijelu Irana kojim se predviđaju svojstva stijena. Ta svojstva stijene uključivala su Poissonov omjer, kut unutarnjeg trenja, UCS i CCS formacije koja se buši. Za dobivanje tih podataka korištena je metoda višeslojne neuronske mreže bez povratnih veza (engl. *Multilayer Feed-forward Network, Multilayer*

Perceptron – MLE). Njezini rezultati potvrdili su mogućnost primjene AI metoda u točnom predviđanju svojstava stijena. Nadalje, neke druge metode koje također uključuju umjetnu inteligenciju, kao što su metoda višestruke nelinearne regresije (engl. *Multiple Nonlinear Regression – MNL*R), primijenjene su kako bi se ocjenila točnost i pouzdanost dobivenih podataka. Zaključili su da priroda vrste ulaznih podataka može utjecati na konačne rezultate dobivene pojedinom od spomenutih modela. Zapravo, primijetili su da korištenje umjetne inteligencije daje točne rezultate kada je cilj predviđanje kuta unutarnjeg trenja, UCS i CCS. Međutim, predviđanje Poissonovog omjera nije bilo tako uspješno kao predviđanje drugih parametara. Hegde i Gray (2018) razvili su MSE model koristeći algoritam „slučajne šume“. Koristili su podatke s bušenja u stvarnom vremenu, kao što su WOB, brzinu protoka isplake i brzinu rotacije dlijeta, kako bi uspostavili svoj MSE model vođen podacima u realnom vremenu. Na taj način bilo je moguće pomoću njihova modela optimirati parametre režima bušenja. Izvijestili su da se pomoću novog MSE modela može povećati ROP do 20 % i smanjiti zaokretni moment na dlijetu do 7 %. Stoga su zaključili da je MSE model koji se temelji na podacima dobivenim u realnom vremenu pridonio duljem vijeku trajanja dlijeta, kao i smanjenju neproduktivnog vremena. U sličnoj studiji, Hassan i dr. (2018) razvili su model temeljen na podacima u realnom vremenu kako bi utvrdili promjene u učinkovitosti procesa bušenja s promjenom različitih parametara. Prema njima učinkovitost bušenja definirana je kao omjer ROP-a i MSE-a. Kako bi to učinili, stvorili su sedam ROP modela temeljenih na umjetnoj neuronskoj mreži (engl. *Artificial Neural Network-ANN*). Ulazni podaci obuhvaćali su velike setove terenskih podataka dobivenih tijekom bušenja mjerenjem brzine rotacije, WOB-a, ROP-a, momenta torzije i protoka isplake u stvarnom vremenu. Razvijeni modeli uspješno su predvidjeli točne vrijednosti ROP-a tijekom bušenja. Zatim su kombinirali rezultate dobivenih vrijednosti ROP-a s izračunatim vrijednostima MSE-a kako bi maksimizirali učinkovitost bušenja. Na taj su način definirali omjer ROP/MSE kao pokazatelj učinkovitosti bušenja.

5. PRIMJER IZ PRAKSE

U nastavku rada bit će analizirana specifična mehanička energija tijekom bušenja intervala duljine 40 m (od 580 do 620 m) koji je bušen dlijetom promjera 0,3112 m (12 ¼') na jednom eksploatacijskom polju ugljikovodika u Republici Hrvatskoj. Proračun specifične mehaničke energije bit će proveden pomoću prva tri modela (Teal, Rabia te Pessier i Fear), na temelju podataka prikupljenih tijekom bušenja koje je ustupila kompanija INA d.d. prikazanih u Tablici 5-1.:

Tablica 5-1. Mjereni podaci tijekom bušenja intervala duljine 40 metara (580-620 m dubine)

| DUBINA (m) | DATUM (D/M/G) | VRIJEME (h) | BRZINA BUŠENJA , ROP (m/h) | OPTEREĆENJE NA DLIJETO REGISTRIRANO NA POVRŠINI , WOB (ton) | STVARNI WOB , WOBb (ton) | TLAK NA ISPLAČNOJ PUMPI, PSPM (bar) | BRZINA ROTACIJE DLIJETA, RPM (okr/min) | ZAOKRETNI MOMENT NA DLIJETU, TORQ (Nm) |
|------------|---------------|-------------|----------------------------|-------------------------------------------------------------|--------------------------|-------------------------------------|----------------------------------------|----------------------------------------|
| 580 | 23.4.2022 | 12:59:29 | 34,6 | 0,5 | 45,2 | 61,1 | 99 | 1401 |
| 581 | 23.4.2022 | 13:21:28 | 21,4 | 0,9 | 44,9 | 60,8 | 96 | 1135 |
| 582 | 23.4.2022 | 13:24:31 | 11,6 | 0,4 | 45,8 | 58,8 | 96 | 1002 |
| 583 | 23.4.2022 | 13:25:41 | 73,9 | 0,8 | 45,4 | 59 | 95 | 2649 |
| 584 | 23.4.2022 | 13:27:08 | 40,6 | 0,8 | 45,4 | 58,6 | 96 | 1669 |
| 585 | 23.4.2022 | 13:28:32 | 31,4 | 0,5 | 45,7 | 58,8 | 96 | 1004 |
| 586 | 23.4.2022 | 13:30:20 | 34,9 | 0,7 | 45,5 | 58,6 | 99 | 1513 |
| 587 | 23.4.2022 | 13:33:04 | 36,7 | 1,5 | 44,7 | 58,4 | 99 | 7806 |
| 588 | 23.4.2022 | 13:35:25 | 28,5 | 1,4 | 44,8 | 58,7 | 79 | 5189 |
| 589 | 23.4.2022 | 13:38:05 | 25,8 | 1,3 | 44,9 | 58,7 | 79 | 4769 |
| 590 | 23.4.2022 | 13:39:58 | 34,2 | 1,5 | 44,7 | 58,6 | 79 | 9720 |
| 591 | 23.4.2022 | 13:41:21 | 48,6 | 1,8 | 44,4 | 58,6 | 79 | 6895 |
| 592 | 23.4.2022 | 13:42:55 | 39,7 | 1,1 | 45,1 | 58,7 | 79 | 6697 |
| 593 | 23.4.2022 | 13:44:59 | 19,4 | 1 | 45,2 | 58,5 | 79 | 5001 |
| 594 | 23.4.2022 | 13:47:48 | 19,2 | 1,1 | 45,1 | 58,6 | 79 | 4951 |
| 595 | 23.4.2022 | 13:50:48 | 20,9 | 1,4 | 44,8 | 58,7 | 79 | 5451 |
| 596 | 23.4.2022 | 13:53:02 | 62,4 | 1,8 | 44,4 | 58,8 | 79 | 5388 |
| 597 | 23.4.2022 | 13:55:22 | 20,5 | 1 | 45,2 | 58,6 | 79 | 8512 |
| 598 | 23.4.2022 | 13:58:30 | 21,9 | 0,6 | 45,6 | 58,6 | 77 | 10443 |
| 599 | 23.4.2022 | 14:03:47 | 15,2 | 0,3 | 45,9 | 58,3 | 53 | 8038 |
| 600 | 23.4.2022 | 14:42:26 | 20,8 | 0,6 | 45,6 | 58,1 | 53 | 3803 |
| 601 | 23.4.2022 | 14:44:24 | 30,9 | 1,5 | 45,2 | 68,9 | 88 | 2874 |
| 602 | 23.4.2022 | 14:47:17 | 31,7 | 1,2 | 45,5 | 68,3 | 99 | 2857 |
| 603 | 23.4.2022 | 14:48:49 | 51,7 | 1 | 45,7 | 68,9 | 99 | 2413 |
| 604 | 23.4.2022 | 14:50:00 | 73 | 0,6 | 46,1 | 69 | 99 | 1878 |
| 605 | 23.4.2022 | 14:51:36 | 30,3 | 0,6 | 46,1 | 68,8 | 99 | 1292 |
| 606 | 23.4.2022 | 14:52:58 | 43 | 0,9 | 45,8 | 68,4 | 99 | 1889 |
| 607 | 23.4.2022 | 14:54:31 | 38,6 | 1 | 45,7 | 69,1 | 99 | 2213 |

| | | | | | | | | |
|-----|-----------|----------|------|-----|------|------|----|------|
| 608 | 23.4.2022 | 14:55:59 | 34,4 | 1,1 | 45,6 | 68,7 | 99 | 2411 |
| 609 | 23.4.2022 | 14:57:52 | 27,4 | 0,6 | 46,1 | 68,6 | 99 | 1710 |
| 610 | 23.4.2022 | 15:01:14 | 13,2 | 0,6 | 46,1 | 69 | 99 | 1385 |
| 611 | 23.4.2022 | 15:03:02 | 31,5 | 0,6 | 46,1 | 68,7 | 99 | 1898 |
| 612 | 23.4.2022 | 15:04:30 | 33,4 | 0,7 | 46 | 69,3 | 99 | 1688 |
| 613 | 23.4.2022 | 15:06:16 | 35,6 | 1 | 45,7 | 68,9 | 99 | 2018 |
| 614 | 23.4.2022 | 15:07:56 | 29,1 | 1 | 45,7 | 68,8 | 99 | 2037 |
| 615 | 23.4.2022 | 15:09:21 | 48,7 | 0,7 | 46 | 69,4 | 99 | 1660 |
| 616 | 23.4.2022 | 15:11:12 | 34 | 1 | 45,7 | 68,9 | 99 | 2108 |
| 617 | 23.4.2022 | 15:13:40 | 29,6 | 0,9 | 45,8 | 68,8 | 99 | 1857 |
| 618 | 23.4.2022 | 15:15:30 | 45 | 1,2 | 45,5 | 69,2 | 99 | 2380 |
| 619 | 23.4.2022 | 15:17:51 | 28 | 0,7 | 46 | 69 | 99 | 1581 |
| 620 | 23.4.2022 | 15:44:07 | 31,3 | 1,1 | 46,1 | 58,5 | 99 | 2030 |

5.1. Tealov model

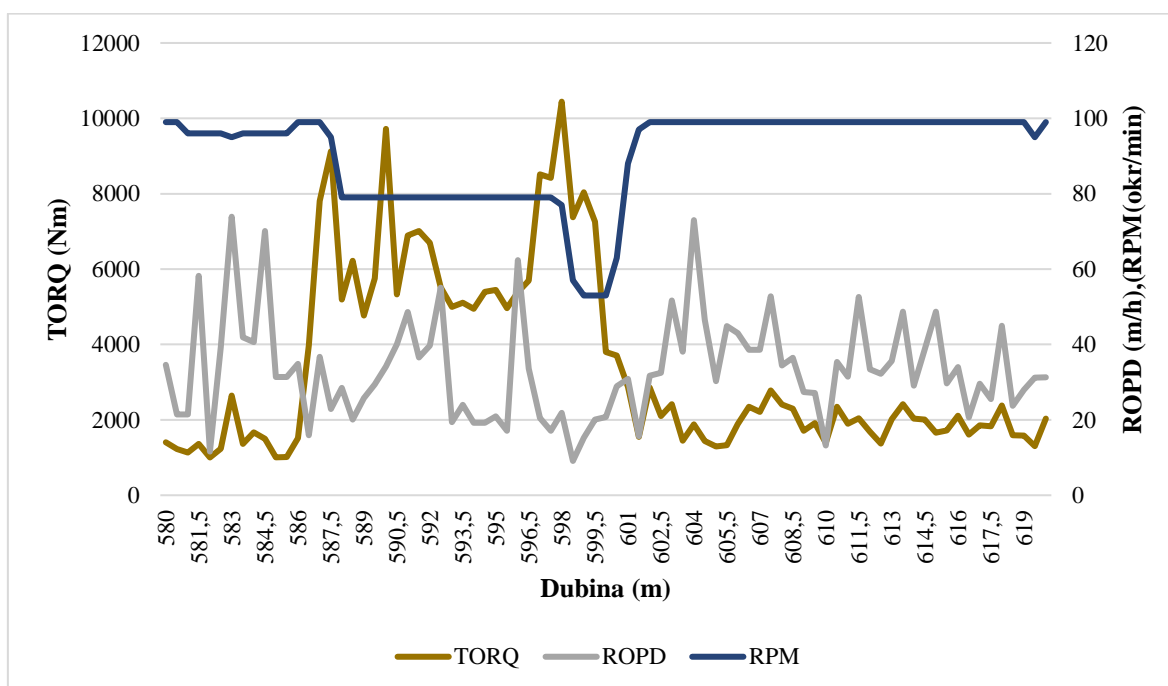
Pomoću vrijednosti parametara iz prethodne tablice izračunata je vrijednost MSE na zadanom intervalu pomoću Tealovog modela, a dobiveni rezultati dani su u Tablici 5-2.

Tablica 5-2. Dobivena vrijednost MSE pomoću Tealovog modela za razmatrani interval

| Dubina (m) | MSE (Tealov model) (MPa) | Dubina (m) | MSE (Tealov model) (MPa) |
|------------|--------------------------|------------|--------------------------|
| 580 | 25,7008 | 601 | 46,3996 |
| 581 | 31,0295 | 602 | 50,0943 |
| 582 | 47,0101 | 603 | 28,7986 |
| 583 | 22,7364 | 604 | 18,5719 |
| 584 | 25,4181 | 605 | 26,8714 |
| 585 | 21,1109 | 606 | 27,4656 |
| 586 | 27,1434 | 607 | 34,0285 |
| 587 | 110,1342 | 608 | 40,2745 |
| 588 | 77,0708 | 609 | 36,5713 |
| 589 | 78,1702 | 610 | 57,4328 |
| 590 | 117,0512 | 611 | 35,5140 |
| 591 | 61,2797 | 612 | 30,7342 |
| 592 | 71,8706 | 613 | 33,7114 |
| 593 | 106,7681 | 614 | 40,2446 |
| 594 | 106,7870 | 615 | 22,6612 |
| 595 | 107,9029 | 616 | 36,3192 |
| 596 | 39,5383 | 617 | 36,6934 |
| 597 | 168,4125 | 618 | 31,8227 |
| 598 | 187,8685 | 619 | 33,6416 |

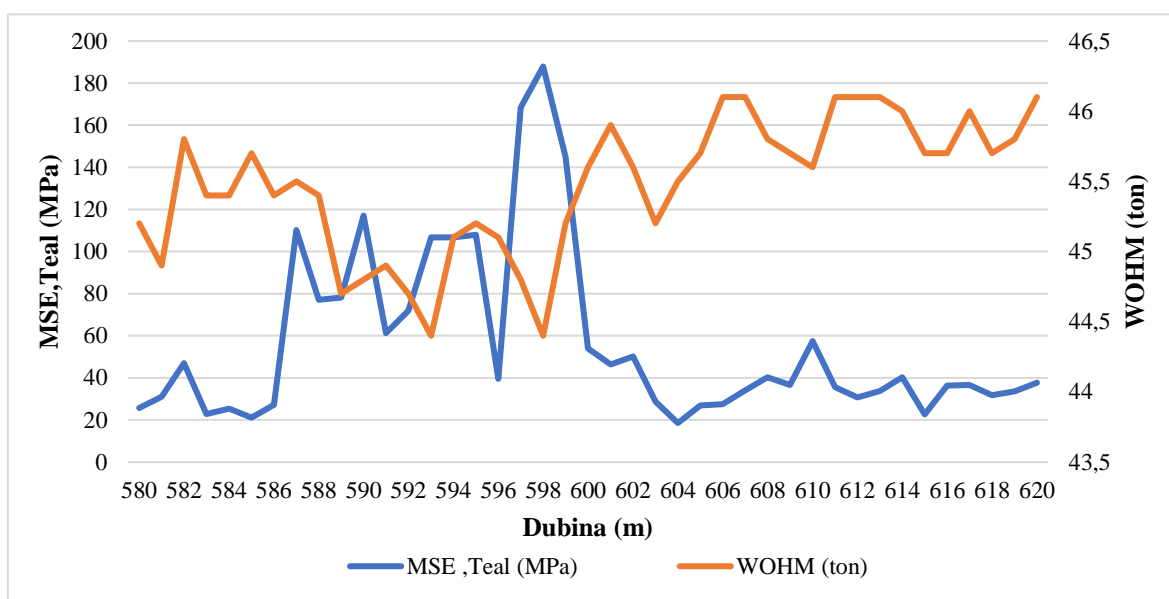
| | | | |
|-----|----------|-----|---------|
| 599 | 144,8357 | 620 | 37,7723 |
| 600 | 53,9129 | | |

Sljedeće slike prikazuju promjenu MSE ovisno o promjeni pojedinih izdvojenih parametara s promjenom dubine kanala bušotine. Slika 5-1. prikazuje promjenu zaokretnog momenta na dlijetu, brzinu rotacije dlijeta i promjenu vrijednosti mehaničke brzine bušenja s promjenom dubine izrade kanala bušotine:



Slika 5-1. Promjena vrijednosti parametara mehaničke brzine bušenja - ROP, brzine rotacije dlijeta– RPM i zaokretnog momenta na dlijetu – TORQ s promjenom dubine

Slika 5-2. prikazuje promjenu MSE s promjenom dubine izrade bušotine i opterećenje na dlijetu :



Slika 5-2. Promjena vrijednosti MSE prema Teal modelu i opterećenja na dlijeto s promjenom dubine kanala bušotine.

5.2. Rabia model

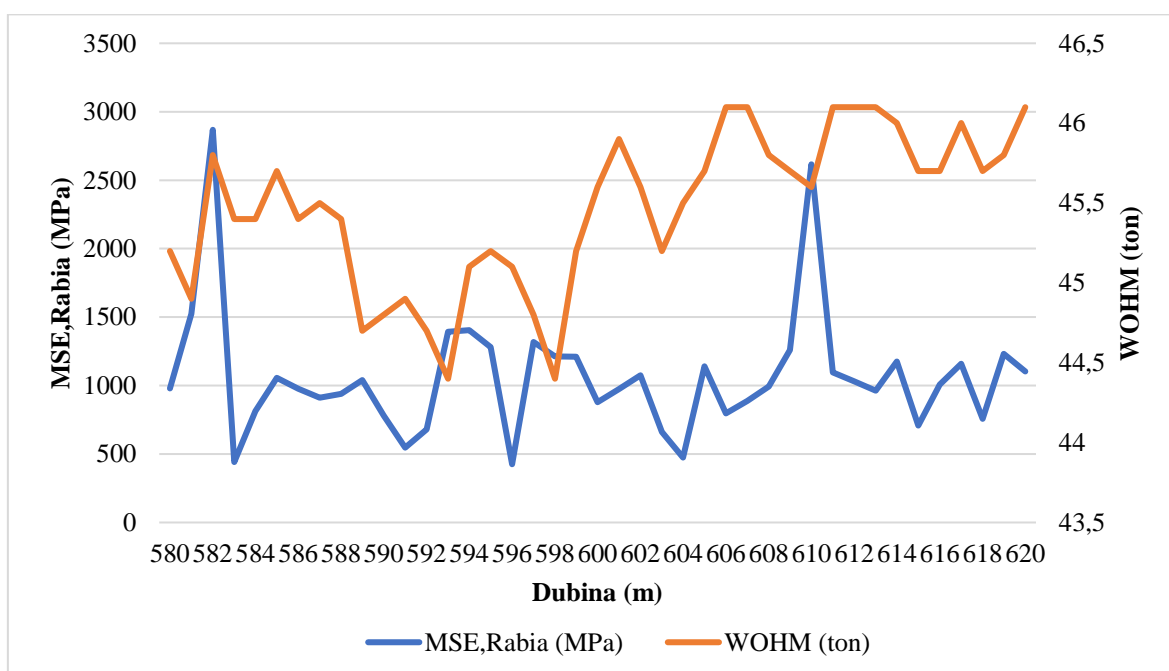
U Tablici 5-3. prikazane su vrijednost MSE dobivene pomoću Rabia modela.

Tablica 5-3. Dobivene vrijednost MSE prema Rabia modelu za razmatrani interval kanala bušotine

| Dubina (m) | MSE (Rabia model) (MPa) | Dubina (m) | MSE (Rabia model) (MPa) |
|------------|-------------------------|------------|-------------------------|
| 580 | 978,606 | 601 | 974,032 |
| 581 | 1524,103 | 602 | 1075,221 |
| 582 | 2868,066 | 603 | 662,173 |
| 583 | 441,617 | 604 | 473,068 |
| 584 | 812,291 | 605 | 1139,735 |
| 585 | 1057,227 | 606 | 797,889 |
| 586 | 976,633 | 607 | 886,900 |
| 587 | 912,404 | 608 | 993,006 |
| 588 | 939,660 | 609 | 1260,364 |
| 589 | 1040,313 | 610 | 2616,210 |

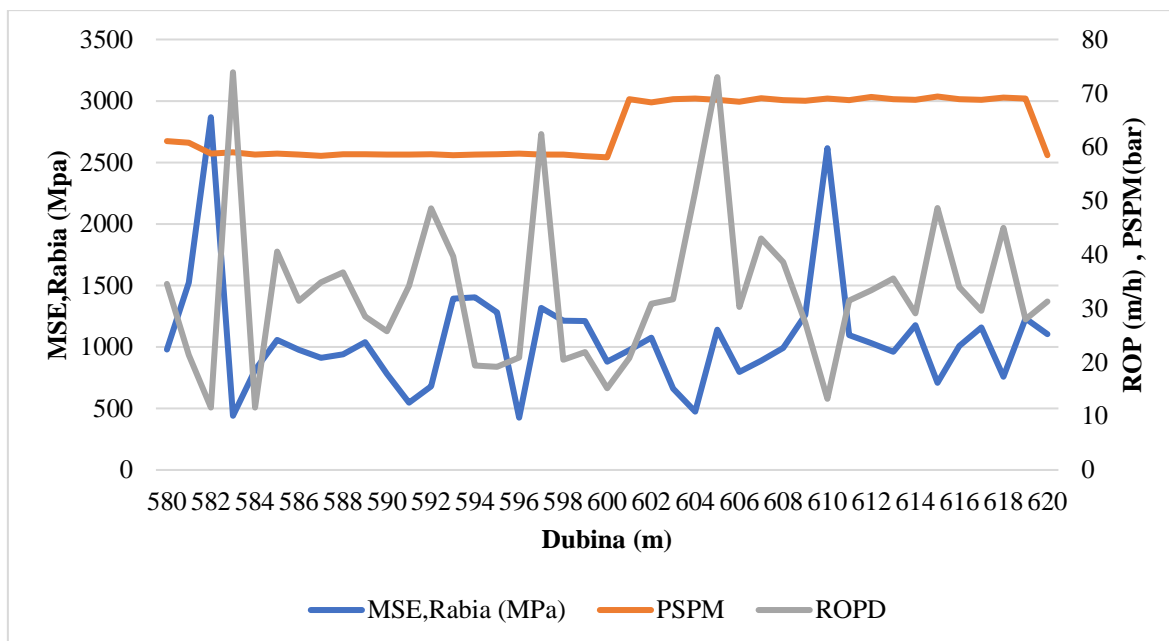
| | | | |
|-----|----------|-----|----------|
| 590 | 781,302 | 611 | 1096,317 |
| 591 | 546,115 | 612 | 1031,708 |
| 592 | 679,084 | 613 | 961,638 |
| 593 | 1392,753 | 614 | 1176,437 |
| 594 | 1404,148 | 615 | 707,578 |
| 595 | 1281,354 | 616 | 1006,892 |
| 596 | 425,340 | 617 | 1159,096 |
| 597 | 1318,020 | 618 | 757,434 |
| 598 | 1213,171 | 619 | 1230,681 |
| 599 | 1211,031 | 620 | 1103,322 |
| 600 | 879,200 | | |

Sljedeća slika (Slika 5-3.) prikazuje promjenu vrijednosti MSE i opterećenja na dlijeto prema Rabia modelu s obzirom na promjenu dubine.



Slika 5-3. Promjena vrijednosti MSE i opterećenja na dlijeto – WOHM s promjenom dubine prema Rabia modelu

Na Slici 5-4. je prikazana promjena vrijednosti MSE, vrijednosti parametra mehaničke brzine bušenja i vrijednosti tlaka izmjenog na isplačnoj pumpi.



Slika 5-4. Promjena vrijednosti parametara mehaničke brzine bušenja – ROP i MSE prema Rabinom modelu s promjenom dubine

5.3. Pessier & Fear model

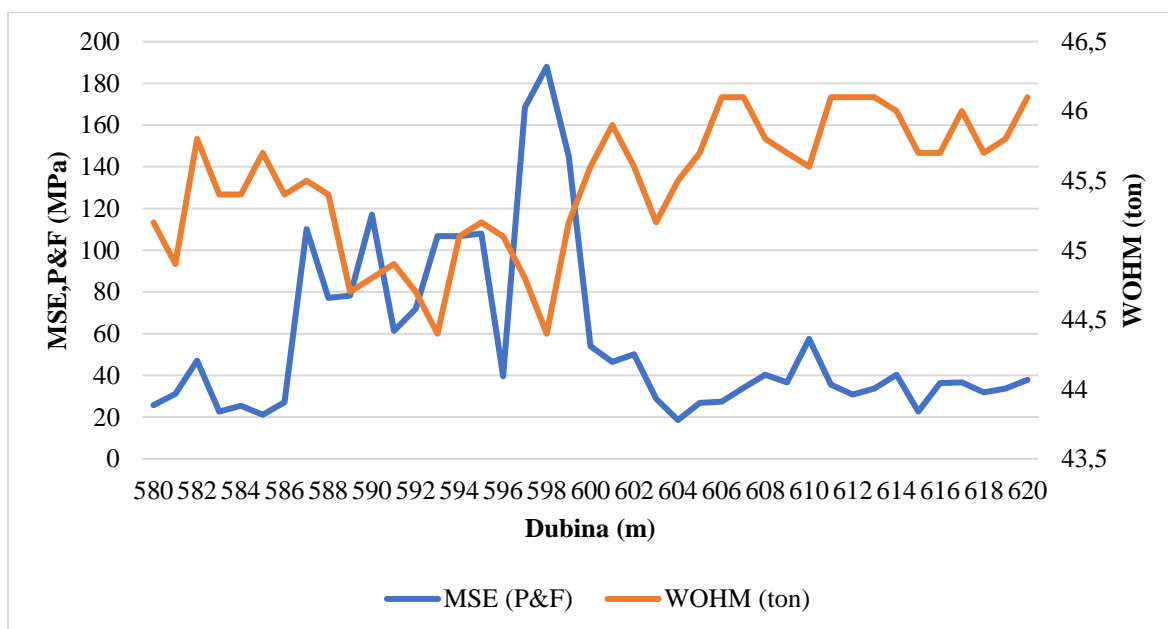
Zadnji proračun MSE prikazan u ovom završnom radu dobiven je pomoću Pessier & Fear modela. U Tablici 5-4. prikazana je promjena MSE te vrijednost koeficijenta μ_b s promjenom dubine kanala bušotine.

| Dubina (m) | MSE (Pessier i Fear) (MPa) | μ_b | Dubina (m) | MSE (Pessier i Fear) (MPa) | μ_b |
|------------|----------------------------|---------|------------|----------------------------|---------|
| 580 | 25,709 | 0,010 | 601 | 46,414 | 0,021 |
| 581 | 31,040 | 0,008 | 602 | 50,110 | 0,021 |
| 582 | 47,025 | 0,007 | 603 | 28,808 | 0,017 |
| 583 | 22,744 | 0,019 | 604 | 18,578 | 0,013 |
| 584 | 25,426 | 0,012 | 605 | 26,880 | 0,009 |
| 585 | 21,118 | 0,007 | 606 | 27,474 | 0,014 |
| 586 | 27,152 | 0,011 | 607 | 34,039 | 0,016 |
| 587 | 110,170 | 0,057 | 608 | 40,287 | 0,017 |
| 588 | 77,096 | 0,038 | 609 | 36,583 | 0,012 |
| 589 | 78,195 | 0,035 | 610 | 57,451 | 0,010 |
| 590 | 117,089 | 0,071 | 611 | 35,525 | 0,013 |
| 591 | 61,299 | 0,051 | 612 | 30,744 | 0,012 |
| 592 | 71,894 | 0,049 | 613 | 33,722 | 0,014 |
| 593 | 106,802 | 0,036 | 614 | 40,258 | 0,015 |
| 594 | 106,821 | 0,036 | 615 | 22,668 | 0,012 |
| 595 | 107,938 | 0,040 | 616 | 36,331 | 0,015 |

| | | | | | |
|-----|---------|-------|-----|--------|-------|
| 596 | 39,551 | 0,040 | 617 | 36,705 | 0,013 |
| 597 | 168,467 | 0,062 | 618 | 31,833 | 0,017 |
| 598 | 187,929 | 0,075 | 619 | 33,652 | 0,011 |
| 599 | 144,882 | 0,057 | 620 | 37,784 | 0,014 |
| 600 | 53,930 | 0,027 | | | |

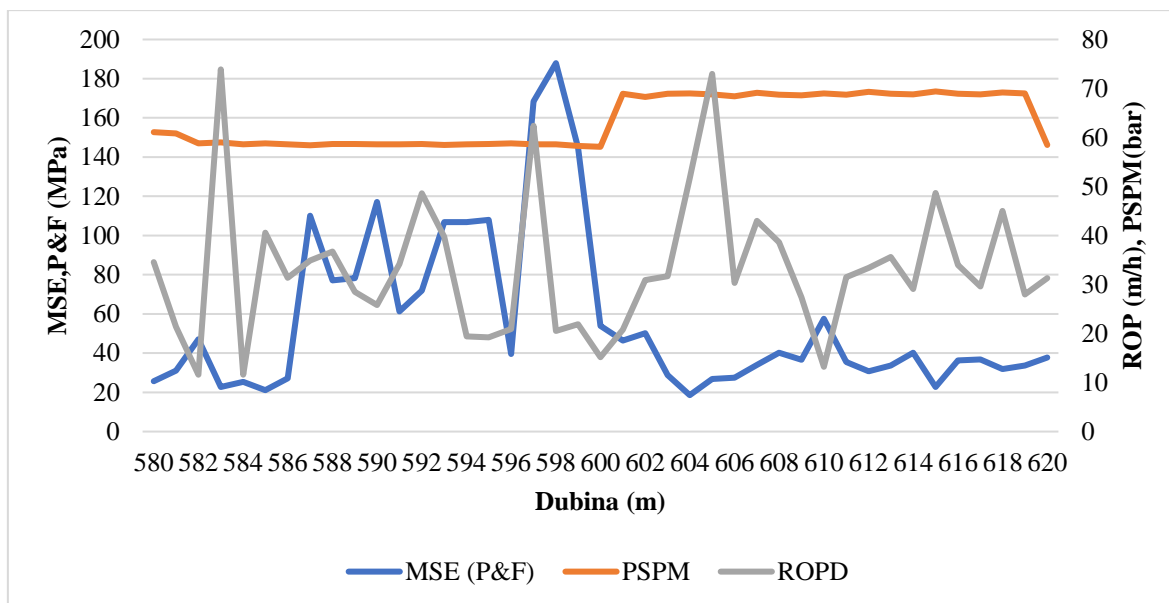
Tablica 5-4. Dobivene vrijednosti koeficijenta μ_b te MSE prema P&F (P&F – Pessier i Fear, autori jednog od modela za analiziranje MSE) modelu za razmatrani interval kanala bušotine

Sljedeća Slika 5-5. prikazuje nam promjenu vrijednosti MSE i opterećenja na dlijeto prema P&F modelu s obzirom na promjenu dubine.



Slika 5-5. Promjena vrijednosti MSE i opterećenja na dlijeto – WOHM s promjenom dubine prema P&F modelu

Na Slici 5-6. prikazana je vrijednost MSE prema P&F, vrijednosti RPM-a i PSPM-a kako se mijenjaju s obzirom na promjenu dubine kanala bušotine.



Slika 5-6. Vrijednosti parametra mehaničke brzine bušenja – ROP i MSE prema P&F modelu s promjenom dubine

5.4. Usporedba dobivenih specifičnih mehaničkih energija po različitim modelima

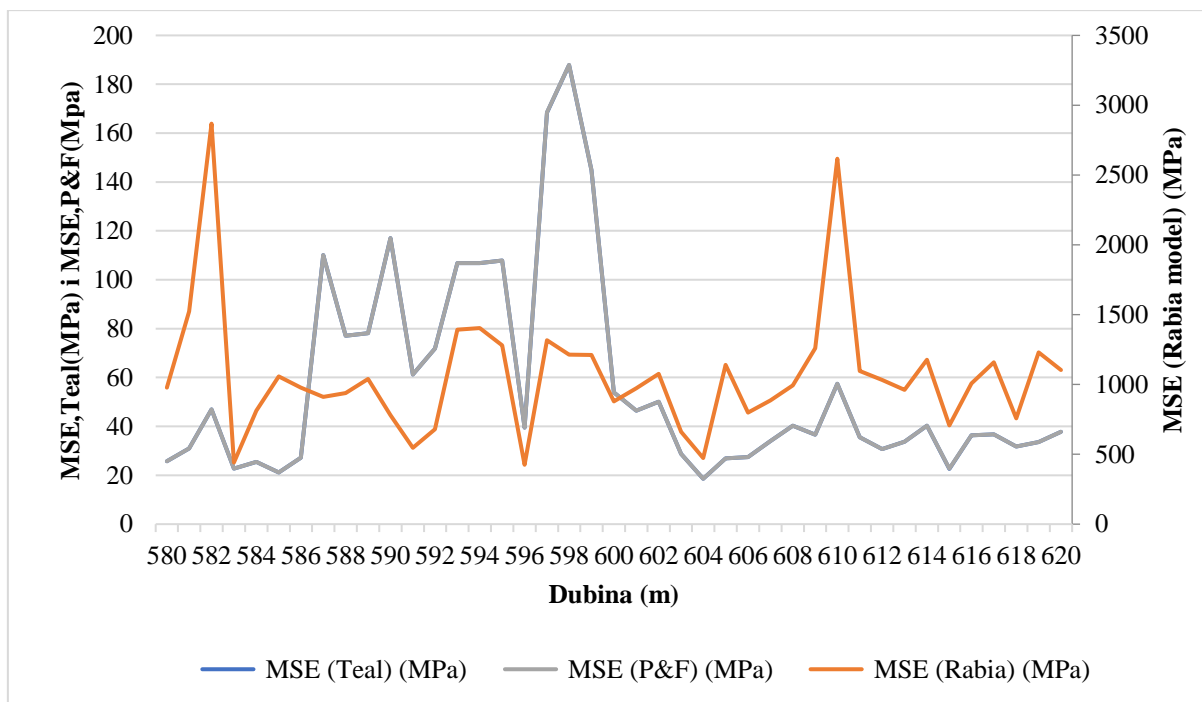
Sljedeća Tablica 5-5. prikazuje usporedbu dobivenih vrijednosti MSE koje su dobivene proračunima pomoću ranije spomenutih modela.

Tablica 5-5. Usporedba dobivenih vrijednosti MSE pomoću različitih modela

| Dubina(m) | MSE (Teal) (MPa) | MSE (Rabia) (MPa) | MSE (P&F) (MPa) |
|-----------|------------------|-------------------|-----------------|
| 580 | 25,7008 | 978,606 | 25,7090 |
| 581 | 31,0295 | 1524,103 | 31,0395 |
| 582 | 47,0101 | 2868,066 | 47,0252 |
| 583 | 22,7364 | 441,617 | 22,7438 |
| 584 | 25,4181 | 812,291 | 25,4263 |
| 585 | 21,1109 | 1057,227 | 21,1176 |
| 586 | 27,1434 | 976,633 | 27,1521 |
| 587 | 110,1342 | 912,404 | 110,1696 |
| 588 | 77,0708 | 939,660 | 77,0956 |
| 589 | 78,1702 | 1040,313 | 78,1953 |
| 590 | 117,0512 | 781,302 | 117,0888 |
| 591 | 61,2797 | 546,115 | 61,2994 |
| 592 | 71,8706 | 679,084 | 71,8937 |
| 593 | 106,7681 | 1392,753 | 106,8024 |
| 594 | 106,7870 | 1404,148 | 106,8213 |
| 595 | 107,9029 | 1281,354 | 107,9376 |

| | | | |
|-----|----------|----------|----------|
| 596 | 39,5383 | 425,340 | 39,5510 |
| 597 | 168,4125 | 1318,020 | 168,4666 |
| 598 | 187,8685 | 1213,171 | 187,9289 |
| 599 | 144,8357 | 1211,031 | 144,8823 |
| 600 | 53,9129 | 879,200 | 53,9302 |
| 601 | 46,3996 | 974,032 | 46,4145 |
| 602 | 50,0943 | 1075,221 | 50,1104 |
| 603 | 28,7986 | 662,173 | 28,8078 |
| 604 | 18,5719 | 473,068 | 18,5779 |
| 605 | 26,8714 | 1139,735 | 26,8800 |
| 606 | 27,4656 | 797,889 | 27,4744 |
| 607 | 34,0285 | 886,900 | 34,0394 |
| 608 | 40,2745 | 993,006 | 40,2874 |
| 609 | 36,5713 | 1260,364 | 36,5831 |
| 610 | 57,4328 | 2616,210 | 57,4512 |
| 611 | 35,5140 | 1096,317 | 35,5254 |
| 612 | 30,7342 | 1031,708 | 30,7440 |
| 613 | 33,7114 | 961,638 | 33,7222 |
| 614 | 40,2446 | 1176,437 | 40,2575 |
| 615 | 22,6612 | 707,578 | 22,6685 |
| 616 | 36,3192 | 1006,892 | 36,3308 |
| 617 | 36,6934 | 1159,096 | 36,7052 |
| 618 | 31,8227 | 757,434 | 31,8329 |
| 619 | 33,6416 | 1230,681 | 33,6524 |
| 620 | 37,7723 | 1103,322 | 37,7844 |

Radi lakše usporedbe podaci iz Tablice 5-5. prikazani su i na grafu na sljedećoj Slici 5-7. u nastavku završnog rada.



Slika 5-7. Usporedba različitih MSE dobivene pomoću različitih modela za razmatrani interval

Koristili smo prva tri modela u proračunima iz jednostavnog razloga; za njih smo dobili najtočniji proračun jer ih je najlakše bilo za izračunati i samo za njih smo imali sve potrebne podatke koje je ustupila kompanija INA. Zaključak sva tri proračuna vidimo upravo na Slici 5-7., iz koje možemo zaključiti da se krivulje MSE prema Tealu te Pessieru i Fearu preklapaju tj. vrijednosti MSE prema njihovima modelima su gotovo identične i zbog toga ne vidimo razliku između njih dvije na slici. Nasuprot njih dobili smo vrijednost prema Rabia modelu koja uvelike odskače od prethodne dvije i to nam pokazuje koliko MSE ovisi o točnosti podataka koje koristimo i koliko se ona zapravo mijenja od modela do modela te koliko to može utjecati na odabir našeg režima bušenja.

6. ZAKLJUČAK

Specifična mehanička energija je definirana kao mehanički rad obavljen za razrušavanje jediničnog volumena stijene. Prvi put se spominje 60-ih godina 20og. stoljeća kao mjera učinkovitosti bušenja. Pomoću nje moguće je procijeniti učinkovitost procesa bušenja u konkretnom slučaju i objektivan je alat za identifikaciju prikladnog dlijeta za bušenje određene stijene. Najveći utjecaj na brzinu bušenja imaju šupljikavost i jednoosna tlačna čvrstoća stijene dok gustoća korištene isplake ima najmanji utjecaj. Specifičnu mehaničku energiju izračunava se pomoću modela za analiziranje MSE koji se mogu klasificirati u tri kategorije. Prva kategorija uključuje osnovni model za proračun specifične mehaničke energije tijekom bušenja koje je uglavnom primjenjiv za vertikalno bušenje. Nadalje, postoje modeli za proračun specifične mehaničke energije koji se mogu koristiti kod horizontalnog i usmjerenog bušenja, kao i modeli koji su prikladani za primjenu na bušotinama za čiju izradu se koriste dubinski volumetrijski isplačni motori (PDM). U sklopu rada je prikazan proračun specifične mehaničke energije proveden pomoću odabranih ranije spomenutih modela, a na temelju podataka prikupljenih tijekom bušenja koje je ustupila kompanija INA d.d. Na temelju dobivenih podataka i proračuna vidi se utjecaj i promjena različitih parametara koji se pojavljuju tijekom bušenja na određenim intervalima dubine, a koji ovise o vrsti stijene kroz koju se buši. Rezultati proračuna pomoću prva tri modela (Teal, Rabia te Pessier i Fear) najbolje su prikazani u Tablici 5-5. kao i na Slici 5-7. i upravo iz njih vidimo neke sličnosti kao i razlike koje nam prikazuju koliko je zapravo važno koje parametre koristimo u našim proračuna te koliko to može utjecati na naš režim bušenja i općenito na efektivnost brzine izrade naše bušotine.

7. LITERATURA

1. Anemangely, M.; Ramezanzadeh, A.; Behboud, M.M., 2019. Geomechanical parameter estimation from mechanical specific energy using artificial intelligence. *J. Pet. Sci. Eng.* 175, 407–429.
2. Armenta, M., 2008. Identifying Inefficient Drilling Conditions Using Drilling-Specific Energy. In Proceedings of the SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Denver, CO, USA, SPE-116667-MS.
3. Chen, X.; Yang, J.; Gao, D., 2018. *Drilling Performance Optimization Based on Mechanical Specific Energy Technologies*; Intechopen Limited: London, UK; ISBN 978-1-78984-303-3
4. Cherif, H., 2012. FEA modeled MSE/UCS values optimize PDC design for entire hole section. In Proceedings of the North Africa Technical Conference and Exhibition, Cairo, Egypt, 20–22; pp. 1–11.
5. Dupriest, F.E.; Koederitz, W.L., 2005. Maximizing Drill Rates with Real-Time Surveillance of Mechanical Specific Energy. In Proceedings of the SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Amsterdam, The Netherlands; p. SPE-92194-MS.
6. Guerrero CA. Deployment of an SeROP predictor tool for real-time bit optimization. In: SPE/IADC Drilling Conference; 20–22 February, 2007, Amsterdam, The Netherlands. DOI: 10.2118/105201-MSGuerrero CA. Deployment of an SeROP predictor tool for real-time bit optimization. In: SPE/IADC Drilling Conference; 20–22 February, 2007, Amsterdam, The Netherlands. DOI: 10.2118/105201-MS
7. Hamrick, 2011. Optimization of Operating Parameters for Minimum Mechanical Specific Energy in Drilling
URL: <https://www.osti.gov/servlets/purl/1060223> (20.08.2023)
8. Hassan, A.; Al-Majed, A.; Elkatatny, S.; Mahmoud, M.; Abdulraheem, A.; Nader, M.; Abughaban, M.; Khamis, M., 2018. Developing an efficient drilling system by coupling torque modelling with mechanical specific energy. In Proceedings of the SPE Kingdom of Saudi Arabia Annual Technical Symposium and Exhibition, Dammam, Saudi Arabia, 23–26
9. Knez, D.; Mazur, S., 2019. Simulation of Fracture Conductivity Changes Due to Proppant Composition and Stress Cycles. *J. Pol. Miner. Eng. Soc.* 2, 231–234


10. Kralj, V., 1982. Osnove rudarstva. RSIZ, Zagreb
11. Kujundžić, T., 2006. Bušenje, Interna skripta, Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Zagreb.
12. Minghui, W.; Gensheng, L.; Huaizhong, S.; Shuaishuai, S.; Zhaokun, L.; Yi, Z., 2016. Theories and Applications of Pulsed-Jet Drilling With Mechanical Specific Energy. *SPE J.* 21, 303–310
13. Mohan, K.; Adil, F.; Samuel, R., 2009 Tracking Drilling Efficiency Using Hydro-Mechanical Specific Energy. In Proceedings of the SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Amsterdam, The Netherlands,; p. SPE-119421-MS.
14. Pessier, R.C.; Fear, M.J., 1992. Quantifying Common Drilling Problems with Mechanical Specific Energy and a Bit-Specific Coefficient of Sliding Friction. In Proceedings of the SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Washington, DC, USA; p. SPE-24584-MS.
15. Rabia, H., 1985. Specific Energy as a Criterion for Bit Selection. *J. Pet. Technol*, 37, 1225–1229.
16. Stack, B., 1982. Handbook of mining and tunnelling machinery, Wiley, New York
17. Teale R., 1965. "The Concept of Specific Energy in Rock Drilling." *International Journal of Rock Mechanics* . 2.: 57-73. Print.

WEB IZVORI

18. Drilling formulas, 2014. Drilling bit bailing up
URL: <https://www.drillingformulas.com/what-you-need-to-know-about-drilling-bit-balling-up-and-how-to-troubleshooting-it/> (20.08.2023.)
19. Hegde and Gray, 2018. Use of machine learning and data analytics to increase drilling efficiency for nearby wells
URL:<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1875510017300641>
(20.08.2023)
20. Rocksmith, 2021. Tricone Bits.
URL: <https://rocksmith.com.au/triconebits.php> (20.08.2023.)

IZJAVA

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


Ime Prezime (potpis)



KLASA: 602-01/24-01/117
URBROJ: 251-70-12-24-2
U Zagrebu, 1.7. 2024.

Leonardo Jagatić, student

RJEŠENJE O ODOBRENJU TEME

Na temelju vašeg zahtjeva primljenog pod KLASOM 602-01/24-01/117, URBROJ: 251-70-12-24-1 od 27.06.2024. priopćujemo vam temu završnog rada koja glasi:

MODELI ZA ANALIZIRANJE SPECIFIČNE MEHANIČKE ENERGIJE TIJEKOM BUŠENJA

Za mentora ovog završnog rada imenuje se u smislu Pravilnika o izradi i ocjeni završnog rada Izv. prof. dr. sc. Borivoje Pašić nastavnik Rudarsko-geološko-naftnog-fakulteta Sveučilišta u Zagrebu Dr. sc. Petar Mijić.

Mentor

(potpis)

Izv. prof. dr. sc. Borivoje Pašić

(titula, ime i prezime)

Predsjednica povjerenstva za
završne i diplomske ispite:

(potpis)

Izv. prof. dr. sc. Karolina
Novak Mavar

(titula, ime i prezime)

(potpis)

Dr. sc. Petar Mijić

(titula, ime i prezime)

Prodekan za nastavu i studente:

(potpis)

Izv. prof. dr. sc. Borivoje
Pašić

(titula, ime i prezime)