

INSTITUȚIA ORGANIZATOARE DE STUDII UNIVERSITARE DE DOCTORAT
UNIVERSITATEA PETROL-GAZE DIN PLOIEȘTI
DOMENIUL FUNDAMENTAL – ȘTIINȚE INGINEREȘTI
DOMENIUL DE DOCTORAT – MINE, PETROL SI GAZE

TEZĂ DE DOCTORAT

OPTIMIZAREA OPERAȚIILOR DE CONSOLIDARE A SONDELOR MARINE DIN ZONA LIBANEZĂ

Autor: Drd. Ing. ALI EL DILBANI

Conducător științific: Prof.univ.habil.dr.ing. Mihai Adrian ALBULESCU

Ploiești 2024

INSTITUȚIA ORGANIZATOARE DE STUDII UNIVERSITARE DE DOCTORAT
UNIVERSITATEA PETROL-GAZE DIN PLOIEȘTI
DOMENIUL FUNDAMENTAL – ȘTIINȚE INGINEREȘTI
DOMENIUL DE DOCTORAT – MINE, PETROL SI GAZE

TEZĂ DE DOCTORAT
OPTIMIZAREA OPERAȚIILOR DE
CONSOLIDARE A SONDELOR MARINE DIN
ZONA LIBANEZĂ
OPTIMIZATION OF CONSOLIDATION
OPERATIONS FOR MARINE WELLS IN THE
LEBANESE ZONE

Autor: Drd. Ing. ALI EL DILBANI

Conducător științific: Prof.univ.habil.dr.ing. Mihai Adrian ALBULESCU

Nr. Decizie 716 din 27.09.2024

Comisia de doctorat:

Președinte	Conf.univ.dr.ing. Cristian EPARU	de la	Universitatea Petrol-Gaze din Ploiești
Conducător științific	Prof.univ.habil.dr.ing. Mihai Adrian ALBULESCU	de la	Universitatea Petrol-Gaze din Ploiești
Referent oficial	Prof.univ.habil.dr.ing. Dumitru Florin POPESCU	de la	Universitatea din Petroșani;
Referent oficial	Prof.univ.habil.dr.ing. Andrei ANDRAȘ	de la	Universitatea din Petroșani;
Referent oficial	Prof.univ.dr.ing. Lazăr AVRAM	de la	Universitatea Petrol-Gaze din Ploiești

Ploiești 2024

CUPRINS

1 Introducere	4
2 Optimizarea forajului	4
2.1 Pierderea circulației	5
2.2 Devierea sondei de la traiect	6
2.3 Instabilitatea găurii de sondă	7
2.4 Prinderea sapei sau garniturii de foraj.....	8
2.5 Inteligența artificială în industria petrolieră	8
2.6 Rețeaua neuronală artificială	9
3 Geologia Libanului.....	10
3.1 Optimizarea parametrilor de foraj cu ajutorul programului landmark	12
3.2 Torsiunea și forțele generate în timpul manevrării garniturii	12
3.2 Modelarea Hidraulică	14
3.3 Efectul de pistonare „Swab & Surge”	16
4 Optimizarea ratei de avansare mecanică cu ajutorul inteligenței artificiale. Metoda neuronală de învățare automată	17
4.1 Metodologie și rezultate	17
5 Concluzie și Contribuții personale.....	20
BIBLIOGRAFIE	23

1 Introducere

Dezvoltarea câmpurilor cu resurse naturale (petrol și gaze) trebuie să se realizeze într-o manieră rentabilă. Din acest motiv, viitoarea gestionare a sondelor petroliere se va confrunta cu noi obstacole pentru a reduce costurile totale, a îmbunătăți performanța și a reduce potențialele probleme legate de foraj, cu atât mai mult cu cât forajul sondelor pentru explorarea hidrocarburilor a prezentat progrese tehnologice semnificative în ultimii ani.

În figura 1.1 se ilustrează cele mai importante aspecte legate de foraj, în vederea optimizării acestuia. Cei mai importanți factori sunt: hidraulica, modelarea torsiunii și tracțiunii, optimizarea ratei de avansare, dinamica forajului, curățarea găurii de sonda și efectele de pistonare.

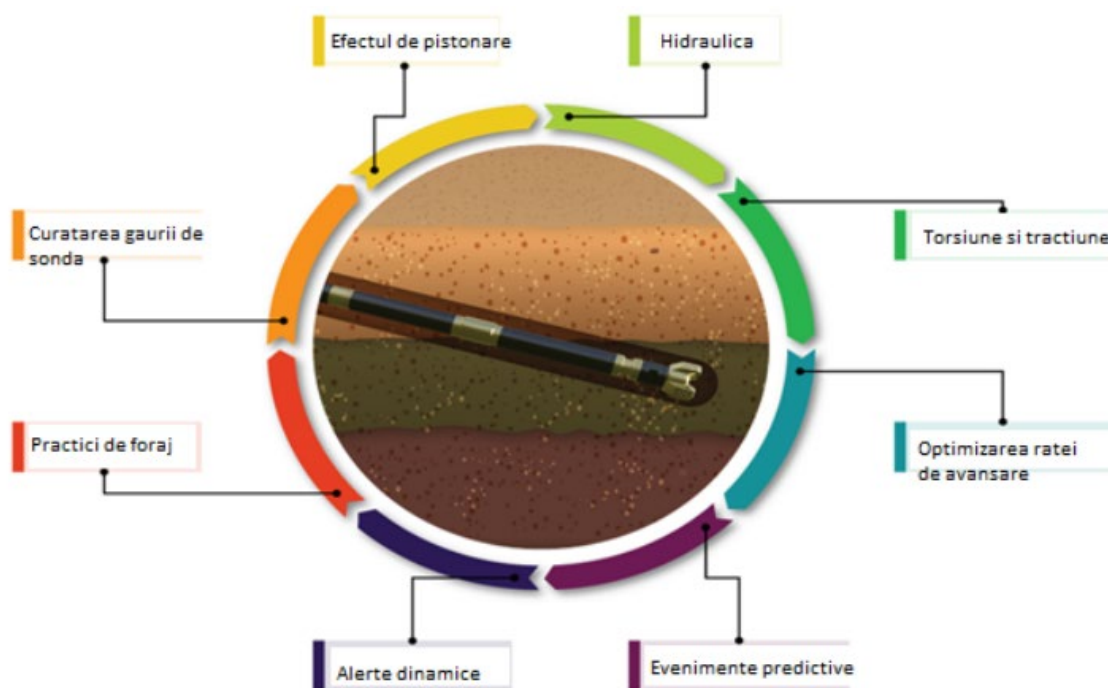


Fig. 1.1. Elemente de optimizare a forajului.

2 Optimizarea forajului

Până la ora actuală au fost elaborate mai multe studii cu scopul de a stabili efectele fiecărui parametru de foraj în vederea optimizării procesului de foraj în sine. Desigur, s-a acordat mai multă atenție unor parametri care au efecte semnificative, precum apăsarea pe sapă (WOB), rotația garniturii de foraj, hidraulica și proprietățile noroiului ș.a. Efectul acestora și-a pus amprenta mai ales pe unul dintre cei mai importanți indicatori de eficiență ai forajului: viteza de avansare (ROP). Factorii care afectează ROP sunt multipli, și pot fi împărțiți în două categorii: factori controlabili și factori necontrolabili.

Din punct de vedere matematic, variabilele parametrilor de foraj pot fi clasificate în *alterabile* și *nealterabile* (tabelul 2.1). Această clasificare nu este strictă, deoarece unii dintre parametrii nealterabili

potfi schimbați printr-o modificare a parametrilor alterabili. De exemplu, fluidul de foraj și sapa pot fi modificate pentru a schimba proprietățile formațiunii geologice traversate. Rezistențele la compresiune și tracțiune ale rocii forate rămân aceleași, pe când proprietățile rocii au fost alterate cu scopul de a avea o viteză de avansare mai mare.

Tabel.2.1. Variabile de foraj alterabile și nealterabile

Variabile de foraj	
Alterabile	Nealterabile
Proprietățile fluidului de foraj (tip, densitate, vâscozitate, conținutul de solide etc.)	Vremea, locația, condițiile sondei, sonde HP/HT
Hidraulica (debitul pompat, viteză în spațiul inelar, presiunea pompelor de noroi etc.)	Proprietățile rocii săpate; anomalii de presiune
Apăsarea pe sapă (WOB), rotația garniturii de foraj (RPM), cursele pompelor de noroi etc.	Gaze periculoase (de exemplu H ₂ S).

Scopul optimizării este acela de a putea reprezenta obiectivul ca o funcție matematică între parametrii controlabili și necontrolabili. În acest sens, este important ca în procesul de optimizare a forajului să se ia în considerare cât mai mulți factori controlabili, pentru a avea rezultate precise.

De cele mai multe ori, în timpul forajului vor apărea probleme oricât de bine a fost realizată planificarea forajului. De exemplu, în regiunile unde se utilizează metode de foraj similare, pot să apară probleme noi sau diferite decât cele raportate și întâlnite anterior. Ca urmare, două sonde apropiate una de cealaltă, pot avea condiții geologice diferite sau pot avea probleme total diferite. Unele dintre cele mai des întâlnite probleme din timpul forajului sunt [9, 10]: pierderea circulației; devierea sondei de pe traiectul planificat; instabilitatea găurii de sondă; prinderea sapei sau garniturii de foraj (*Stuck pipe*).

2.1 Pierderea circulației

Pierderea circulației poate fi definită, simplist, ca o pătrundere a fluidului de foraj în formațiunile necontrolabile. Există două tipuri de pierderi de circulație: parțială și totală. Pierderea parțială este atunci când o parte din fluidul de foraj pătrunde în formațiune, iar pierderea totală este atunci când fluidul de foraj pătrunde complet în formațiune.

Multe probleme care apar în timpul forajului sunt legate în mod direct de pierderea circulației, iar una din cele mai importante consecințe o reprezintă instabilitatea găurii de sondă. Există multiple situații care duc la pierderea parțială sau totală a circulației în timpul forajului:

- formațiuni fracturată, cavernoasă sau cu permeabilitate mare;
- condiții de foraj necorespunzătoare;
- fracturi induse, cauzate de presiuni excesive.

Este mai ușor și mai puțin costisitor să prevenim pierderea circulației în timpul forajului, decât să o *vindecăm*. În absența zonelor cu anomalii de presiuni și straturi fisurate, pierderea circulației poate fi prevenită prin îmbunătățirea proprietăților reologice ale fluidului de foraj. Este importantă optimizarea proprietăților fluidelor de foraj și pentru a îmbunătăți curățarea găurilor de sondă prin evitarea densității de circulație echivalentă (ECD) ridicată. Este obligatorie menținerea presiunii hidrostatice și a celei de la talpa sondei cu valori mai mari decât cele ale formațiunii, și mai mici decât cele de fisurare.

2.2 Devierea sondei de la traiect

Deviația sondei de pe traiect reprezintă abaterea neintenționată a sapei de pe ruta prestabilită în cadrul programului de foraj. Indiferent dacă implică forajul unei secțiuni drepte (verticale) sau forajul curbat (dirijat), uneori sapa are tendința de a devia de pe traiectul propus, ceea ce duce la probleme de foraj complicate.

Nu se știu exact motivele pentru care sapa deviază de la traiectul programat. Cu toate acestea, este presupus că unul sau mai mulți dintre următorii factori pot fi responsabili pentru devierea sapei de pe traiect:

- Natura eterogenă a formațiunii;
- Caracteristicile garniturii de foraj, în special BHA (*bottom hole assembly*);
- Stabilizatorii (poziția și numărul lor);
- Apăsarea pe sapă (WOB);
- Unghiul de înclinare al găurii de sondă;
- Tipul sapei și caracteristicile mecanice ale acestuia;
- Hidraulica sapei;
- Curățirea necorespunzătoare a găurii de sondă.

2.3 Instabilitatea găurii de sondă

Instabilitatea găurii de sondă poate fi considerată condiția nedorită a unui interval de gaură liberă, care nu își menține dimensiunea, forma gabaritului și/ sau integritatea structurală a acestuia. Cauzele care duc la instabilitatea găurii de sondă pot fi grupate în trei categorii, și anume:

- Mecanice, datorate tensiunilor *in-situ*;
- Eroziune, datorată circulației fluidului de foraj;
- Chimice, datorate interacțiunii fluidului de foraj cu formațiunea.

Pe de altă parte, pot exista patru tipuri diferite de probleme asociate cu instabilitatea găurii de sondă:

- a) Îngustarea găurii de sondă;
- b) Lărgirea găurii;
- c) Fracturarea formațiunii;
- d) Dărâmarea găurii

Îngustarea găurii de sondă este un proces dependent de timp, care cauzează instabilitatea găurii de sondă. În general, aceste probleme apar în zonele cu formațiuni plastice și săruri. Problemele asociate cu îngustarea găurilor de sondă sunt: creșterea torsiunii și tracțiunii, creșterea potențialului aferent fenomenului numit "*pipe sticking*" și creșterea dificultății de introducere a burlanelor.

Lărgirea găurii de sondă este un fenomen periculos în foraj, deoarece gaura sondei devine cumult mai mare decât cea proiectată. Sunt mulți factori care duc la lărgirea găurii de sondă: eroziune hidraulică, abraziunile mecanice cauzate de garnitura de foraj. Bineînțeles, aceasta duce la multe dificultăți în cadrul operațiunilor de foraj, și anume: creșterea dificultăților aferente cimentării; creșterea potențialului sapei de a devia de pe traiectul propus; creșterea cerințelor hidraulice pentru o curățare efectivă a spațiului inelar, creșterea potențialelor probleme din timpul carotajului etc.

Fracturarea formațiunii: acest fenomen are loc atunci când presiunea fluidului de foraj din sondă depășește presiunea de fisurare a formațiunii. Acest fenomen are legătură directă cu pierderea parțială sau totală a circulației.

Dărâmarea găurii de sondă are loc atunci când presiunea fluidului de foraj este prea mică pentru a menține integritatea găurii de sondă. Este una dintre cele mai periculoase cazuri, deoarece nuse pierde doar gaura de sondă, ci și garnitura de foraj, inclusiv ansamblul de fund care sunt, de regulă, foarte scumpe.

Înainte de începerea forajului, la o anumită adâncime rezistența rocii este în echilibru cu

solicitările *in-situ* ale rocii. În timpul forajului, echilibrul dintre solicitările *in-situ* și rezistența rocii este deranjat. În plus, datorită circulației, fluidul de foraj începe un proces de interacțiune cu formațiunea și fluidul din spațiul inelar. Rezultatul imediat al acestei interacțiuni duce la un potențial de probleme legate de instabilitatea găurii de sonda, mai ales dacă fluidul de foraj nu este ales atent și corect.

Problemele mecanice al găurii de sondă apar atunci când tensiunile care acționează asupra rocii depășesc rezistența la tracțiune sau compresiune a rocii. Eșecul la compresiune este cauzat de solicitările de forfecare datorate greutatea mică a noroiului de foraj, în timp ce eșecurile la tracțiune sunt cauzate de solicitările normale datorate greutatea excesive a noroiului.

2.4 Prinderea sapei sau garniturii de foraj

În timpul operațiunilor de foraj, orice porțiune din garnitura de foraj este considerată blocată dacă nu poate fi eliberată din gaură sondei fără deteriorarea acesteia și fără a depăși încărcătura maximă admisă în cârligul instalației de foraj. Lipirea garniturilor de țevi poate fi clasificată în două categorii: presiune diferențială (*differential pressure pipe sticking*) și mecanică (*mechanical pipe sticking*).

Problemele legate de prinderea sapei sau garniturii de foraj pot reprezenta aproape jumătate din costul total al forajului unei sonde. Prinderea garniturii de foraj este adesea asociată cu controlul sondei (*Well Control*) și în cazul pierderii circulației. Riscul este mai ridicat la sondele deviate cu înclinări mari și la sondele orizontale.

Atunci când se forează în zone depletate, unde presiunea din spațiul inelar o depășește pe cea din formațiune, uneori acest fenomen poate provoca împingerea garniturii înspre peretele sondei și încorporarea ei în filtratul depus pe pereții sondei. În acest caz, presiunea interioară a turtei scade în punctul de contact cu garnitura de foraj. La forarea sondelor cu unghi mare de înclinare sau a sondelor orizontale, forța gravitațională contribuie la contactul extins între prăjinile de foraj și formațiune. Gestionarea corectă a lubrifiantei fluidului de foraj și a calității turtei de filtrare de-a lungul formațiunii permeabile poate ajuta la prevenirea și evitarea unor astfel de situații.

2.5 Inteligența artificială în industria petrolieră

În anii din urmă a existat o creștere rapidă a numărului de aplicații și instrumente de inteligență artificială în industria petrolieră, ca urmare a disponibilității mai mari a experților umaniși a numeroaselor publicații de studii de caz și aplicații de succes. Rețelele neuronale artificiale (ANN), logica *fuzzy* și algoritmi evolutivi sunt cele mai utilizate tehnici AI în cadrul diferitelor aplicații din ingineria petrolieră, simulare, producție, foraj, optimizarea rezervoarelor de petrol și gaze, automatizarea forajului, controlul

proceselor etc.

Odată cu rezultatele recente de succes ale inteligenței artificiale, ca instrument de sisteme inteligente în industria petrolieră, devine clar faptul că această industrie a realizat importanța aplicabilității modelului inteligent, rezolvându-se probleme dintre cele mai diverse. Există un mare potențial pentru aceste instrumente în explorare, producție, gestionarea hidrocarburilor și optimizarea forajului.

Activitățile și operațiunile de foraj bazate pe inteligența artificială, au evoluat de-a lungul anilor, oferind flexibilitate în selecție, monitorizare, diagnosticare și optimizare, influențând, de multe ori definitiv, eficiența generală și profitabilitatea.

2.6 Rețeaua neuronală artificială

Rețeaua neuronală artificială este cea mai răspândită tehnică de AI, cu creștere rapidă, utilizată atât în instituțiile de învățământ, cât și în varii industrii în perioada ultimilor ani. Rețelele ANN au capacitatea de a imita atributele umane de rezolvare a problemelor complexe, folosindu-se tehnicile logice și analitice ale sistemului expert. Acest algoritm este o compilație de unități minore de procesare interconectate individual, care au anumite caracteristici de performanță comune cu rețelele neuronale biologice.

Informațiile sunt transmise prin aceste unități de procesare de-a lungul interconectărilor. Conexiunea de intrare este asociată cu două valori: o valoare de intrare și o greutate. Ieșirea unității este o funcție a valorii însumate: intrarea și greutatea. Odată ce ANN este implementat pe calculatoare, acestea sunt *instruite* în ceea ce privește seturile de date, până când învață tiparele utilizate ca intrări și, odată instruite, pot fi prezentate noi modele pentru predicție sau clasificare. Această tehnică are capacitatea de a gestiona multe intrări și de a produce rezultate adecvate. Ideea principală din spatele creării unei ANN este aceea de a dovedi un model simplu de creier uman pentru a rezolva probleme științifice și industriale complexe.

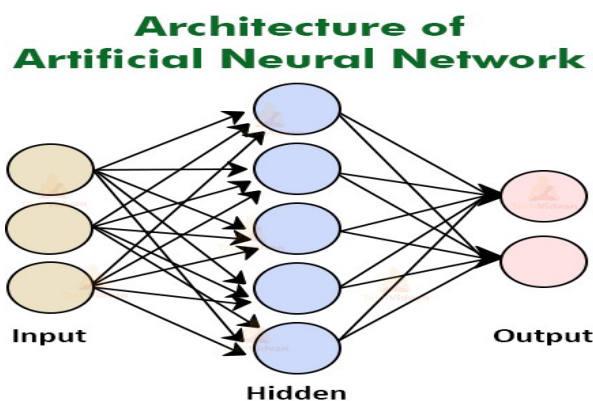


Fig. 2.1. Arhitectura ANN

3 Geologia Libanului

Bazinul Levantului Mediteranei de Est devine o provincie petrolieră importantă ca urmare a descoperirii a peste 70 TCF de rezerve dovedite de gaze naturale, între 2006 și 2015. Câmpurile includ Tamar, Leviathan, Afrodita și Zohr. Libanul, parte a celei mai mari Regiuni Levant, este situată pe marginea activă de NV a plăcii arabe, marginea fiind, în mare măsură, definită de sistemul de fracturi Levant-lateral stânga. La est se află centura petroliferă Palmyride de pliere și împingere, iar la vest antelantul stabil al Bazinului Levantului. Pe uscat, în Siria, rezervele recuperabile sunt estimate la aproximativ 2,5 miliarde (B) baril de petrol și aproximativ 8,5 TCF de gaze, cu zăcămintele situate în Palmyrides, Eufrat graben și Sinjar high. Prin urmare, Libanul și *offshore*-ul adiacent sunt considerate a avea un potențial de explorare semnificativ.

În ultimul deceniu, s-au făcut progrese majore în înțelegerea subsolului libanez și apotențialului său petrolifer. Acest lucru a fost posibil ca urmare a disponibilității setului de date de reflexie seismică 2D și 3D de înaltă calitate care acoperă întreaga zonă de exclusivitate libaneză, zona economică și primele date seismice 2D, deși limitate, pe malul Libanului. Aceste date au furnizat o mulțime de informații relevante pentru explorarea nordului Bazinului Levantului, atrăgând mari companii petroliere internaționale, precum și un interes academic internațional. Acordurile de explorare au fost semnate cu guvernul libanez în februarie 2018, o dată anticipată pentru prima sondă în larg în 2019.

Libanul se întinde de-a lungul coastei de est a Mării Mediterane („marginea levantină”) și acoperă o suprafață de 10450 km². Libanul de la mal se află în aceeași zonă bazinală mezozoică încare s-au găsit zăcămintele majore de petrol și gaze în estul Mediteranei și nordul Arabiei; în timp ce Marea Mediterană de Est a fost vizată pentru rezervoarele de gaze din Cenozoic (fig. 3.1).

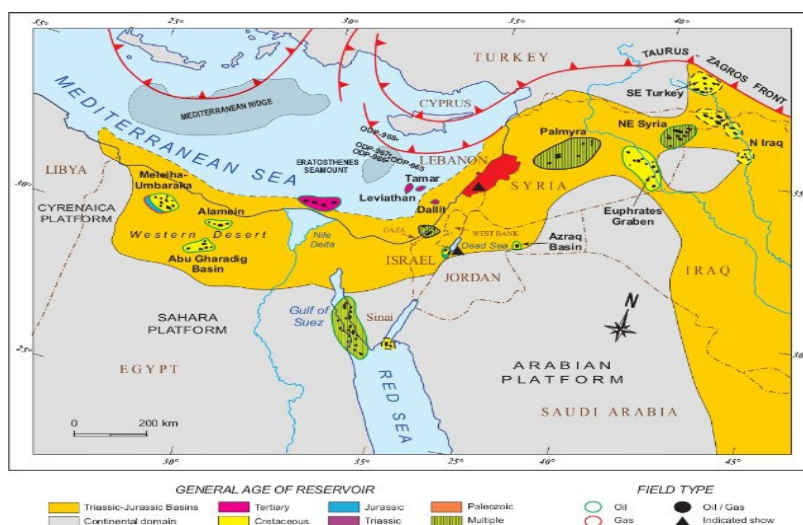


Fig.3.1. Forajul de explorare în Blocul 4, Sonda Block-4 Well 16-1

În februarie 2019, companiile Total, Eni și Novatech au început activitatea de foraj în blocul nr.4, în Marea Mediteraneană, la 22 km de coasta Libanului (fig. 3.4). Operatorul Total a fost singurul prezent pe durata operațiilor de foraj. Nava de foraj (*Drillship*) Tungsten Explorer, o navă de ultimă generație care poate foră

Infomatii generale asupra sondei:

- Coordonatele sondei: 34° 02'28.790"N / 35° 19'47.493'E; X = 715075m E/Y: 3779187 m;
- Adâncimea apei: 1517.03 m MSL / 1548.53 MD/RT;
- Adâncimea totală a sondei: 4191 m MD;
- *Riser Marin*: 1544 MD/RT, OD: 21" ID: 19 ¼ in;

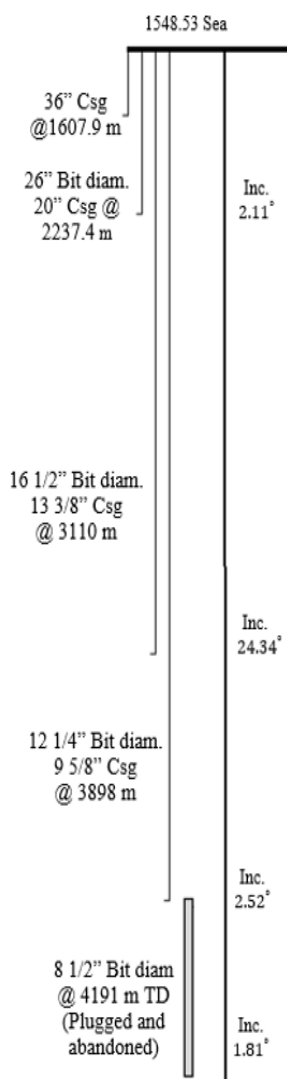


Fig.3.2. Schematica Sondei

3.1 Optimizarea parametrilor de foraj cu ajutorul programului landmark

Landmark este un program dezvoltat de Halliburton, utilizat pe scară largă în industria petrolieră pentru optimizarea parametrilor regimului de foraj. Acest *software* avansat furnizează soluții integrate pentru gestionarea datelor, modelarea subterană și simularea operațiunilor de foraj. Prin utilizarea Landmark-ului, companiile petoliere pot analiza și interpreta date complexe, îmbunătățind astfel precizia și eficiența proceselor de foraj.

3.2 Torsiunea și forțele generate în timpul manevrării garniturii

Torsiunea și forțele generate în timpul mișcării garniturii de foraj au fost modelate în timpul diferitelor operații. Au fost determinați diferiți parametri, reprezentați în diferite grafice, foarte importanți pentru evitarea problemelor de foraj sau a deteriorării oricărei componente a garniturii de foraj (sau a altor materiale tubulare).

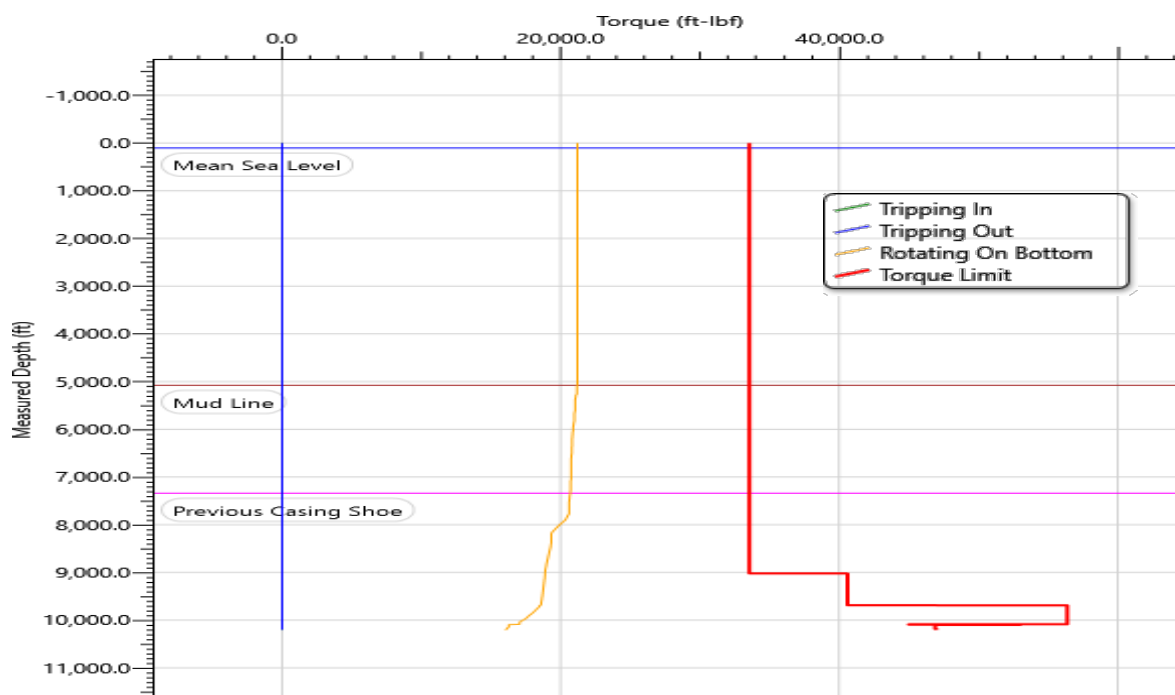


Fig.3.3. Torsiunea

Este foarte clar că, în cazul celor trei tipuri de operațiuni, putem observa o creștere la adâncimea de aproximativ 8000 ft, și una foarte mare în jurul adâncimii de 10.000 ft. Aceste forșelaterale sunt serios afectate de deviația sondei. Mai exact spus, în aceste intervale am avut niște grade ridicate, mai *agresive* pentru unghiul de construcție al înclinării sondei de 100 ft (*build up rate*). Forțele laterale apar și în zona

ansamblului de fund, ca urmare a diametrului și rigidității acestora.

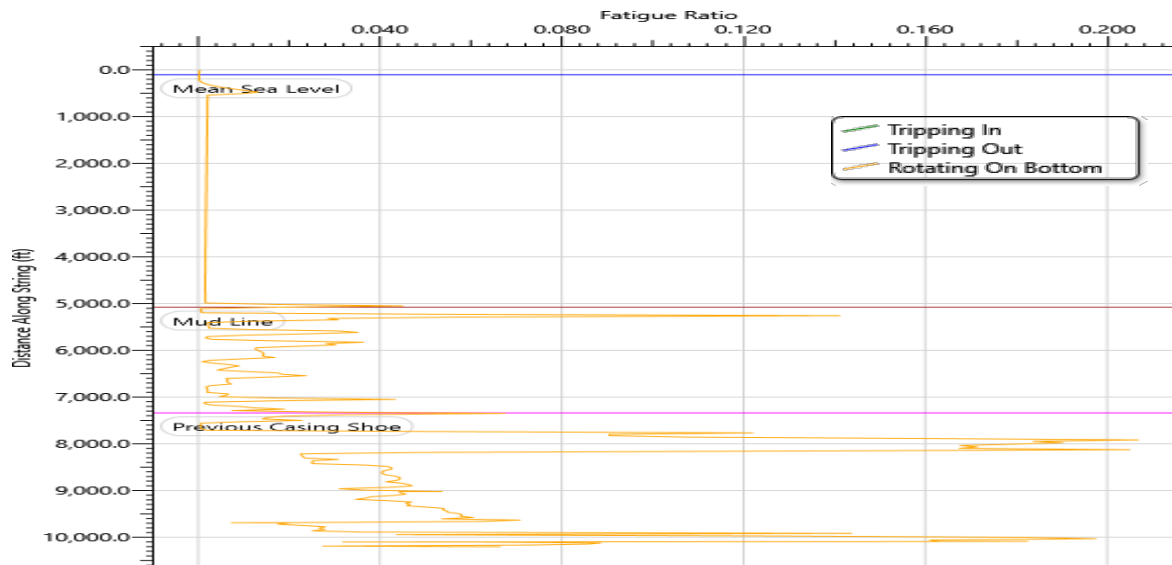


Fig.3.4. Forte laterale

Elementul cheie al acestei figuri este acela de a detecta flambajul elicoidal al garniturii de foraj, pe baza greutății din carlig. Greutățile teoretice pentru fiecare operațiune în parte sunt ilustrate în figura, împreună cu greutatea la care flambajul elicoidal începe. Greutatea în carlig trebuie monitorizată continuu, pentru a preveni depășirea acestor limite. De exemplu, dacă greutatea în carlig este de circa 400 kip (1kip = 0.45 tone), iar această greutate scade fără ca sapa fie pe talpă, aceasta indică transmiterea unei părți din greutate undeva, cel mai probabil pe pereții sondei.

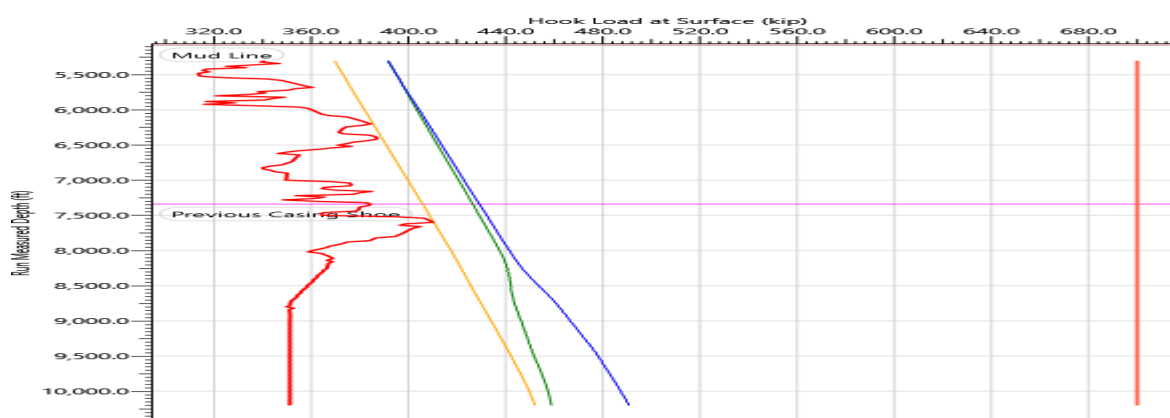


Fig.3.5. Greutatea in carlig

În figura 3.6. sunt prezentate cele două tipuri de flambaj (sinusoidal și elicoidal) ale garniturii, în timpul forajului, în regim de rotație sau *sliding* (fără rotație de la suprafață, doar rotația la talpă obținută cu motorul de fund). Se poate observa că, pentru regimul de săpare în regim de rotație, apăsarea pe sapă nu trebuie să depășească aproximativ 98 kip pentru flambajul sinusoidal, respectiv 110 kip pentru flambajul elicoidal. În regim de *sliding*, apăsarea pe sapă trebuie să fie până la 92 kip pentru flambaj sinusoidal și 100 kip pentru flambajul elicoidal. Pentru a evita acest fenomen, se recomandă păstrarea unei limite de

siguranță de minimum 10%.

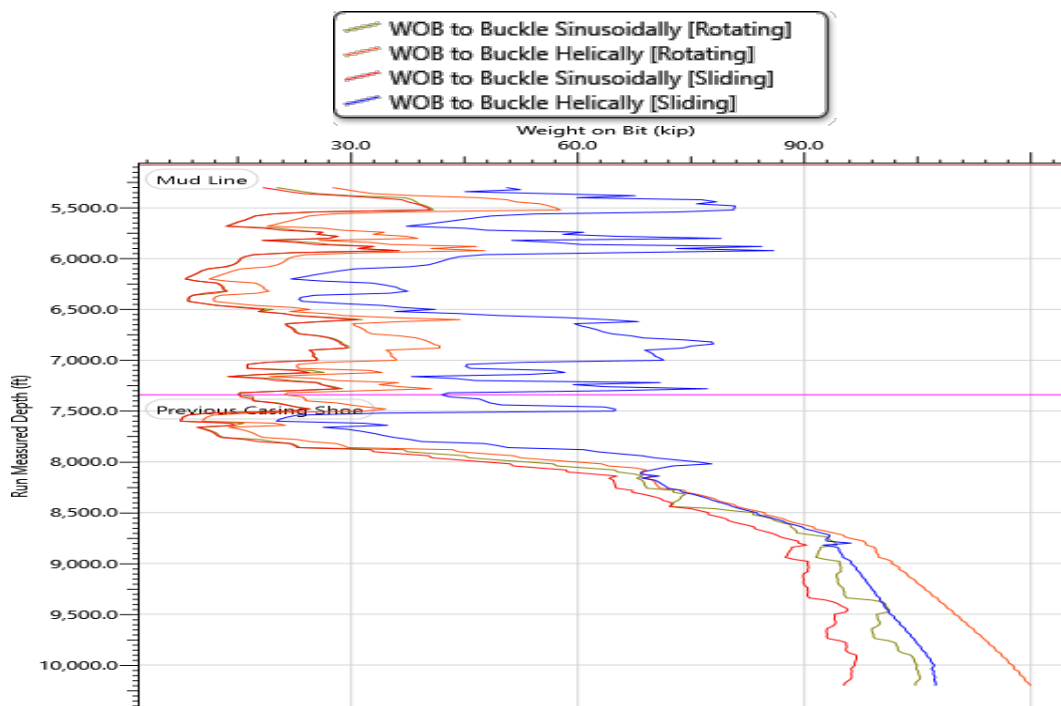


Fig.3.6. Apasarea pe sapa minima pentru agravare

3.2 Modelarea Hidraulica

Modulul hidraulic poate fi utilizat pentru a modela pierderile dinamice de presiune în sistemul de circulație al instalației, precum și pentru a oferi instrumente analitice pentru optimizare hidraulică. Există mai multe modele reologice disponibile, inclusiv Newtonian, Bingham Plastic, Power Law, Generalized Herschel-Bulkley și Herschel-Bulkley.

În figura 3.7. se ilustrează debitul minim recomandat care trebuie pompat în funcție de rată de avansare. Cu cât rata de avansare este mai mare, debitul pompat trebuie crescut întrucât volumul de rocă dislocată crește.

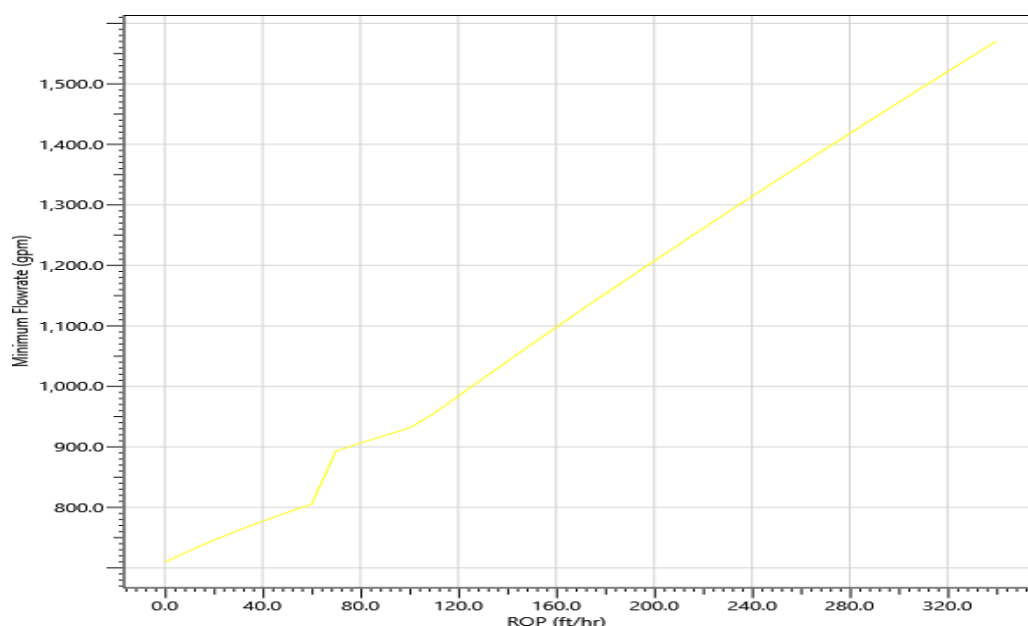


Fig.3.7. Viteza de avansare contra debitul minim

Este important să menționăm valoarea presiunii din spațiul inelar (cuprinsă între presiunea din pori și presiunea de fisurare), pentru a evita problemele care pot apărea în timpul forajului. În figura 3.23 se reprezintă valoarea presiunii de circulație necesară în spațiul inelar pentru a menține echilibrul între presiunea din pori și presiunea de fisurare, ECD vs Lungimea garniturii de foraj. Dacă presiunea din spațiul inelar scade sub valoarea presiunii din pori, vom avea o invazie a fluidului din pori în spațiul inelar, ceea ce ar duce la fenomenul de „Kick”, iar sonda ar trebui omorâtă. În caz contrar, dacă presiunea din spațiul inelar este mai mare decât presiunea de fisurare, vom avea pierderi parțiale ale fluidului de foraj.

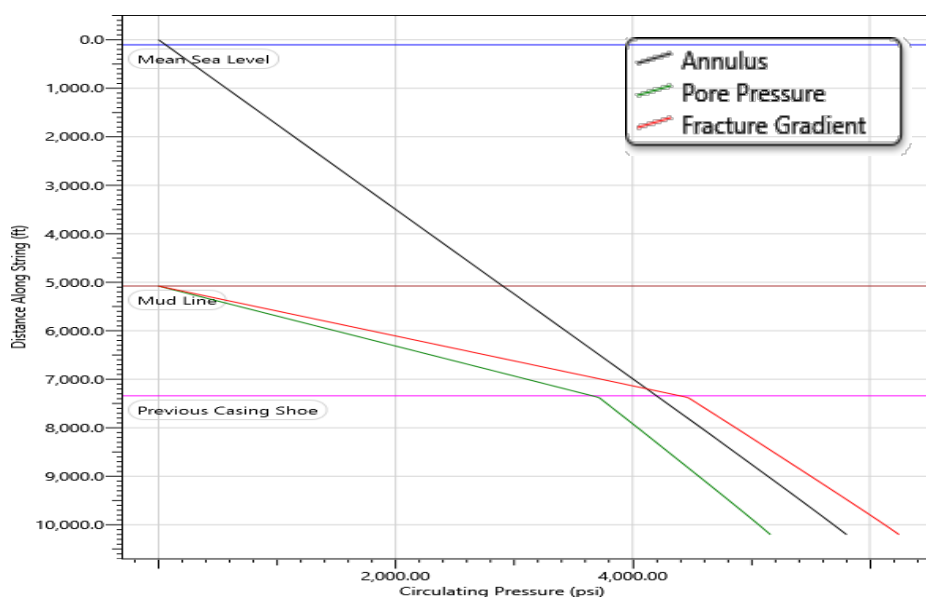


Fig.3.8. Presiunea de circulație pe lungimea garniturii de foraj

3.3 Efectul de pistonare „Swab & Surge”

Calcululele *Swab & Surge* sunt împărțite în două regiuni: intervalul de la suprafață până la sapă, și intervalul de la sapă până la talpa sondei. În regiunea superioară, presiunile garniturii de foraj sunt cuplate la presiunile spațiului annular prin elasticitatea radială a garniturii. Metoda interpolată a caracteristicilor este utilizată pentru a rezolva curgerea fluidului și dinamica garniturii de foraj. Au fost efectuate simulări și studii de modelare pentru a prezice și analiza comportamentul noroiului în timpul introducerii sau extragerii garniturii de foraj din sonda aflată în Block 4 din Liban. De asemenea, au fost determinate și analizate strategiile de calcul ale presiunii.

În figura 3.8. s-a ilustrat și optimizat viteza de retragere a garniturii de foraj la aproximativ 150 ft/min, pentru a preveni fenomenul de pistonare (*swab*). Acest fenomen apare sub forma unei forțe negative creată în interiorul sondei de foraj atunci, când un dispozitiv de foraj este retras rapid. Acest fenomen poate avea implicații semnificative asupra operațiunilor de foraj. Motiv pentru care, a fost studiat cu atenție și acest fenomen.

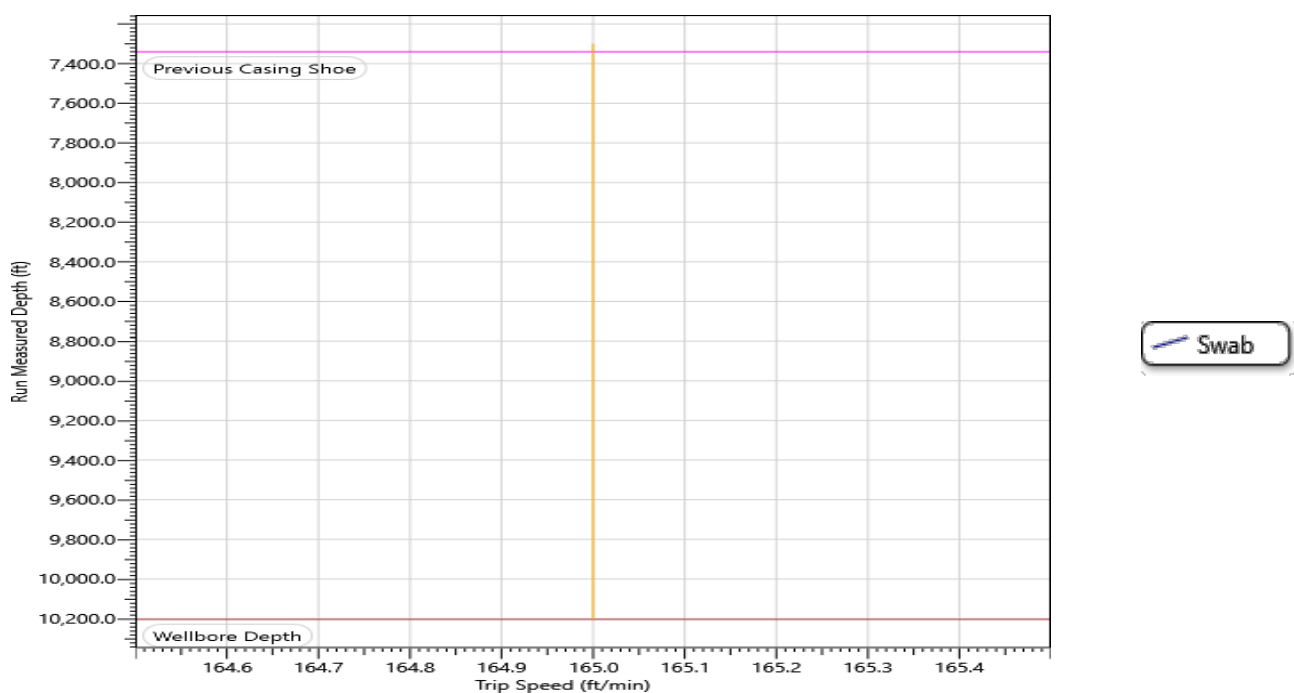


Fig. 3.8. Optimizarea marșului (*extragere*)

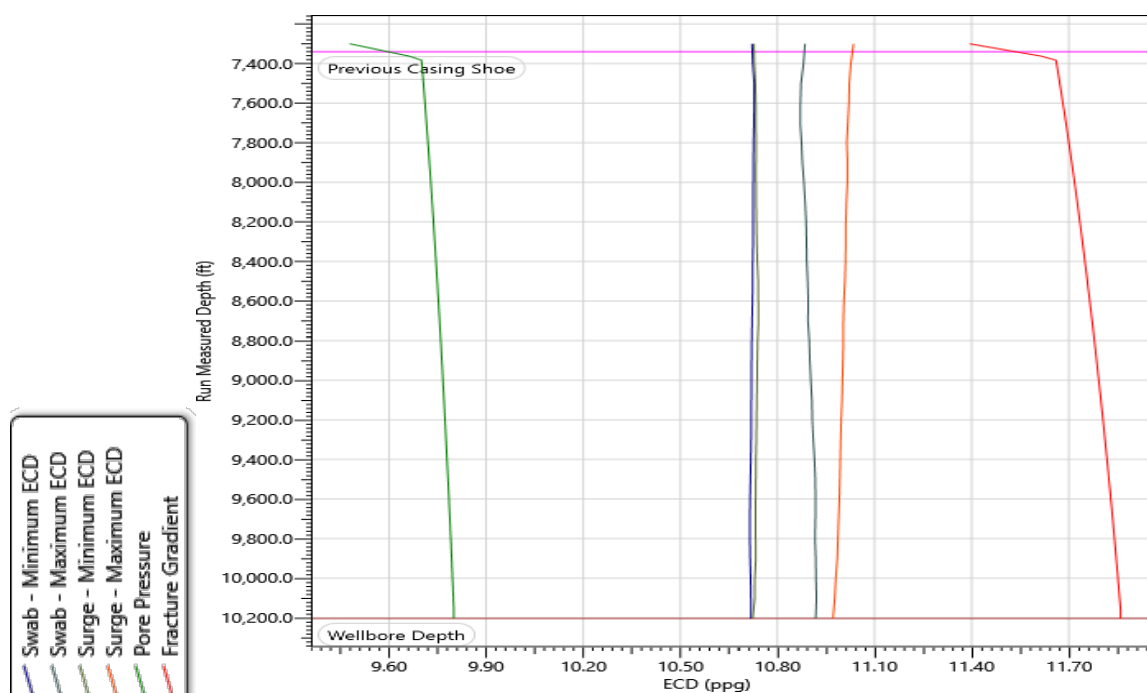


Fig.3.10. ECD contra adancimea

4 Optimizarea ratei de avansare mecanica cu ajutorul inteligentei artificiale. Metoda neuronală de invatare automata

Rata de avansare în foraj (ROP) reprezintă viteza sau progresul sapei în timpul forajului. De obicei, această rata de avansare este exprimată în ft/h (imperial) sau m/h (unități SI). O mare parte din investiția totală a unui proiect este alocată operațiunilor de foraj, astfel că optimizarea ROP este esențială pentru reducerea costurilor totale ale proiectului. Modelarea ROP prezintă dificultăți deoarece aceasta este influențată de mulți factori interdependenți, ceea ce face dificilă determinarea efectului fiecărui parametru în parte. Din acest motiv, numeroase companii de petrol și gaze păstrează datele despre sondele din același zăcământ și stabilesc indicatori cheie de performanță pentru a evalua ROP pentru fiecare sondă nou forată.

4.1 Metodologie si rezultate

1. În primul rând, avem nevoie de o bază de date de la prima sonda de explorare din marea maritimă libaneză (Sonda "Block 4 Well 16/1"). Aceasta este o bază de date de adâncime, compusă din diferiți parametri și anume: adâncimea, rata de avansare (ROP), rotația garniturii de foraj (RPM), torsiunea la

suprafață (*Torque*), apăsarea pe sapă (WOB), presiunea la încărcător (SPP) și debitul pompat (Q) la adâncimi diferite, cu o densitate de date din 0.25 cm în 0,25 cm, sau 0.82 ft.

2. Această bază de date este punctul de intrare în rețeaua neuronală construită. Așadar, pentru a avea un model valid datele de intrare trebuie filtrate pentru a minimiza erorile datelor de ieșire. De

exemplu, în timpul forajului, după efectuarea unei conexiuni, odată ce sapa ajunge la talpa sondei vom avea o apăsare pe sapa mare, cu o rată de avansare mare. Aceste date sunt invalide deoarece, în acest moment, odată ce sapa ajunge pe talpă, garnitura de foraj este comprimată puțin, iar sistemul de achiziție va înregistra aceste date în baza de date. Ca urmare a densității mari, parametrii acestei baze de date nu pot fi prelucrați manual datorită complexității lor și faptului că diferiții parametri trebuie comparați între ei.

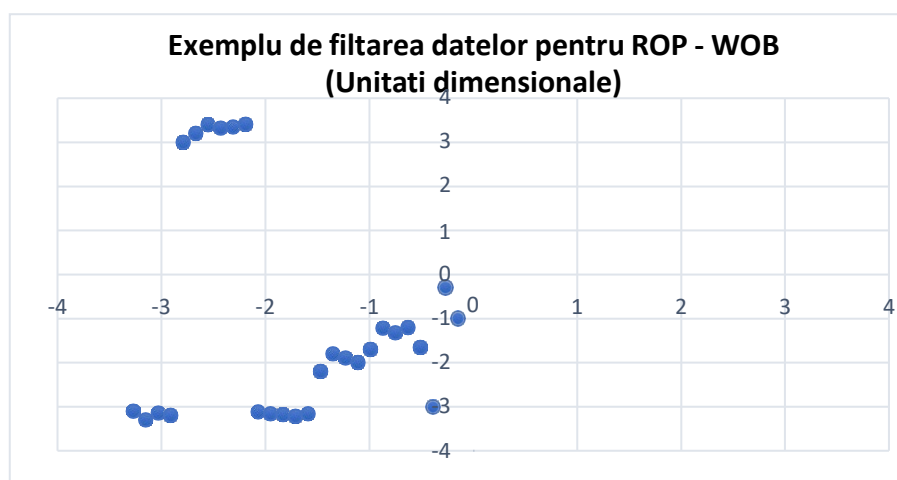


Fig. 4.1. Exemplu de filtrare a datelor

Construirea modelului “ROP” folosind rețeaua neuronală “ANN” cu cei 7 parametrii discutați în etapa 1 ca date de intrare. Acest model de inteligență artificială ANN constă din 12 neuroni ascunși, așa cum se poate observa în figura 4.2.

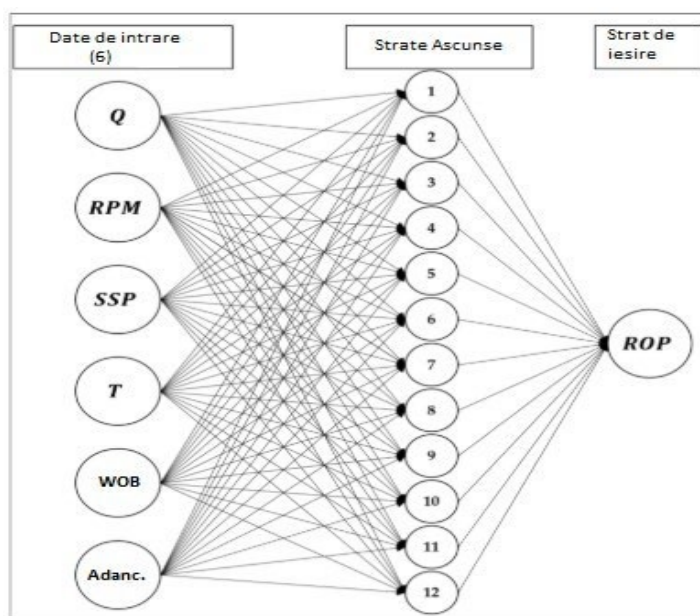


Fig. 4.2. Date de intrare și iesire

Scopul antrenării este acela de a stabili numărul optim de neuroni ascunși pentru a avea o eroare cat mai mică atunci când modelul va învăța autonom. Modelul se va antrena cu neuroni diferiți, între 6 și 20, cum am discutat în etapa 2, iar numărul neuronilor cu cea mai mică eroare se va dezvolta mai departe, pentru învățarea autonomă.

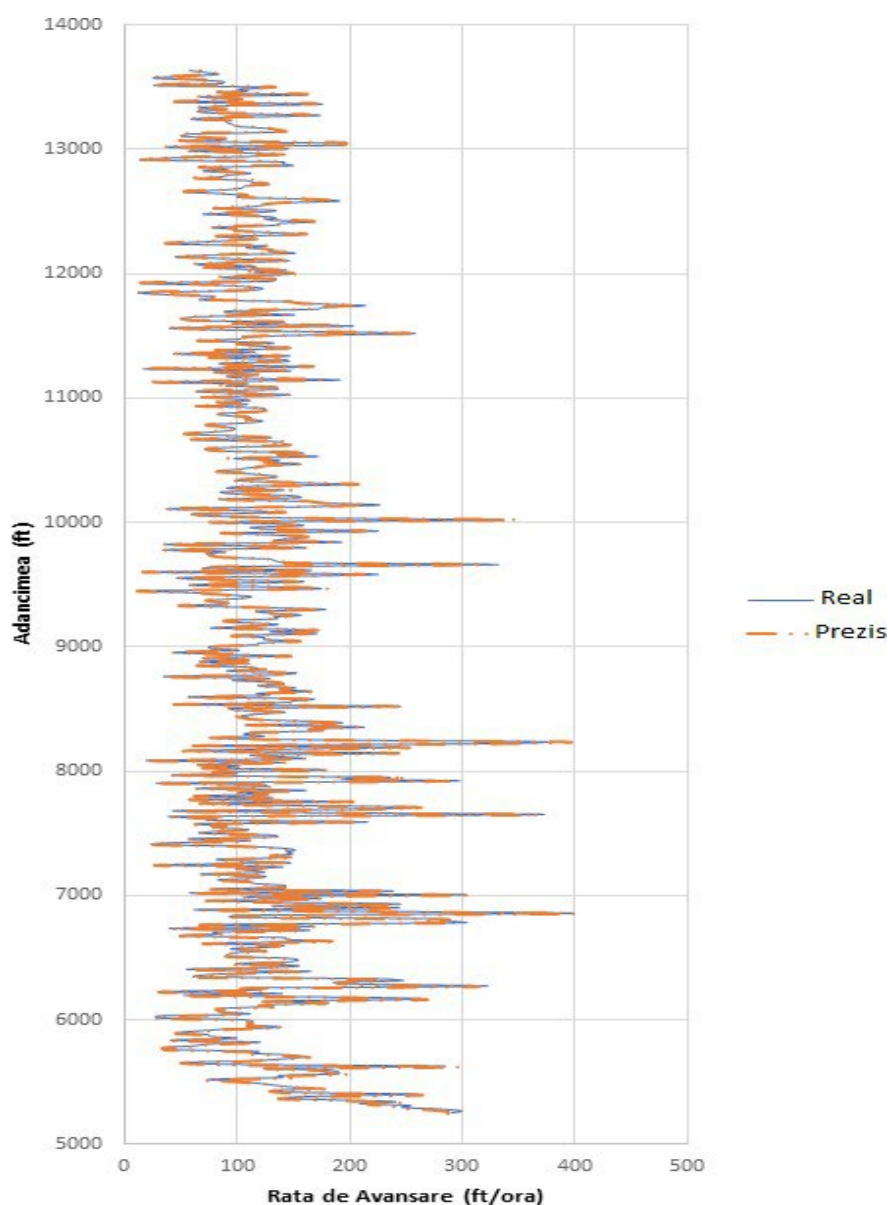


Fig.4.3. Viteza de avansa reala si cea prezisa

Corelațiile empirice sunt instrumente vitale pentru prezicerea ROP în cadrul operațiunilor de foraj. Aceste corelații, dezvoltate pe baza unor date extensive din teren și observații din lumea reală, oferă o metodă simplă, dar eficientă, pentru estimarea ROP în diverse condiții de foraj. Corelațiile empirice sunt,

de asemenea, extrem de adaptabile. Pe măsură ce noi tehnologii și tehnici de foraj sunt dezvoltate, aceste modele pot fi actualizate și rafinate cu date noi pentru a asigura relevanța și acuratețea lor continuă.

Această îmbunătățire continuă ne asigură că aceste corelații empirice rămân instrumente esențiale pentru predicția ROP în diverse medii de foraj. În plus, integrarea acestor corelații în sistemele de monitorizare în timp real permite ajustări dinamice ale parametrilor regimului de foraj, îmbunătățindu-se receptivitatea și eficiența operațională.

$$ROP = [((-0.48807) \times Adancime) + ((-0.059794) \times RPM) + ((0.06271964) \times Torsiune) + ((0.02489283) \times WOB) + ((-0.01760142) \times Debit) + ((0.29008993) \times SPP) + (-4.67710812e - 15)] \quad (4.1)$$

5 Concluzie si Contributii personale

Optimizarea practicilor și performanțelor în foraj reprezintă o parte esențială a efectuării operațiunilor de foraj în mod eficient și sigur. În acest context, această lucrare prezintă contribuțiile proprii ale penru rezolvarea unor probleme stringente din regiunea libaneză, și anume: dificultăți și accidente tehnice de foraj; optimizarea forajului; consolidarea găurii de sondă;

Prin urmare, această teză oferă o analiză cuprinzătoare a operațiunilor de foraj din sectorul maritim libanez, abordând atât provocările tehnice cât și cele tehnologice, întâlnite în această zonă. Prin integrarea tehnologiilor avansate, cum ar fi inteligența artificială și analiza datelor, lucrarea aduce contribuții și informații valoroase în ceea ce privește optimizarea performanțelor de foraj și asigurarea stabilității sondei. Dezvoltarea modelelor empirice și aplicarea studiilor geologice au contribuit și mai mult la înțelegerea caracteristicilor subterane ale regiunii. Mai mult, studiul a propus soluții inovatoare pentru a atenua riscurile operaționale și pentru a minimiza impactul asupra mediului.

Aceste contribuții nu numai că îmbunătățesc practicile actuale de foraj, dar oferă și o bază pentru viitoarele activități de explorare în medii similare *offshore*. Următoarele secțiuni detaliază contribuțiile personale aduse în timpul acestor cercetări, ca și recomandările pentru lucrările în curs și viitoare din acest domeniu.

1. Optimizarea metodelor și a practicilor de foraj; sunt prezentate metode avansate pentru optimizarea operațiunilor de foraj din zona maritimă libaneză, sporind astfel eficiența și siguranța proceselor de foraj.

2. Folosirea inteligenței artificiale (AI) pentru construirea unor modele de

precizie aratei de avansare a forajului (ROP), a unor strategii de foraj mai precise și mai consistente folosindu-se datele istorice de foraj.

3. Dezvoltarea unor ecuații empirice pentru prezicerea cu acuratețe ridicată, de până la 94 - 95% a performanțelor forajului din marea maritimă libaneză și pentru stabilirea impactului parametrilor regimului de foraj în relație cu viteza de avansare a forajului.

4. Utilizarea programului „*Landmark - Halliburton*”, unul dintre cele mai performante și avansate programe din aria programelor de optimizare a forajului și de consolidare a găurii de sondă.

5. Stabilirea unor tehnici novative pentru consolidarea găurii de sondă, în urma unor analize amănunțite a provocărilor privitoare la instabilitatea găurii de sondă și pierderea fluidului în formațiune.

6. Au fost explorate efectele hidraulicii și a presiunilor din spațiul inelar pentru optimizarea circulației în condiții optime și eficiente, fără a cauza probleme în timpul forajului sau a marșurilor.

7. Analiza torsiunii și a tracțiunii, prin investigarea impactul acestora în timpul forajului, pentru a propune soluții viabile în vederea moderării acestor aspecte în ceea ce privește performanțele forajului.

8. Abordarea provocărilor datorate efectelor de pistonare, mai ales în timpul marșurilor, și stabilirea unor recomandări tehnice consistente, privitoare la minimizarea impactului acestora asupra integrității găurii de sondă.

9. Analiza dinamicii ansamblului de fund utilizat în timpul forajului pentru a îmbunătăți procesul de foraj și a reduce riscurile operaționale.

10. Aplicarea tehnicilor de fluorescență cu raze X (*XRF*) și difracție cu raze X (*XRD*) pentru analiza probelor de rocă, îmbunătățindu-se astfel înțelegerea litologiei și a compoziției minerale a formațiunilor geologice, cu implicații deosebite în ceea ce privește înțelegerea efectului acestora asupra performanțelor forajului.

11. Exploatarea tehnicilor *data mining* pentru optimizarea forajului prin folosirea posibilităților de extragere a datelor colectate în foraj în timp real.

12. Luarea deciziilor pe baza datelor extinse din teren, pentru a minimize termenele de luare a deciziilor, ceea ce va duce la strategii de foraj mai precise și mai eficiente

13. Evaluarea și reducerea evaluării amănunțite de risc pentru operațiunile de foraj și dezvoltarea unor planuri de urgență pentru gestionarea pericolelor potențiale din timpul forajului.

14. Optimizarea forajului pe baza tehnicilor aferente inteligenței artificiale, în special a rețelelor neuronale, prin prezicerea mai exactă a parametrilor regimului de foraj, și mai ales în ceea ce privește rata de avansare mecanică (aceasta va însemna, în fapt, creșterea spectaculoasă a eficienței forajului și reducerea substanțială a costurile operaționale).

15. Efectuarea unor studii geologice suplimentare mai detaliate avându-se în vedere descoperirea litologiilor carbonatice, complementar cu a celor siliciclastice.

16. Utilizarea analizei de date în timp real, în timpul operațiunilor de foraj, pentru a lua decizii mai corecte și mai rapide, evitându-se, astfel, întârzierile care pot duce la creșteri externe de mari ale forajului.

17. Recomandarea de a se efectua simulări intense în vederea alegerii ansamblului direcțional (motor de fund sau RSS), pentru a evita devierea de pe traiect.

18. Îmbunătățirea echipamentelor de foraj pentru a face față mai bine condițiilor specifice întâlnite în marea maritimă libaneză, cum ar fi mediile de înaltă presiune.

19. Implementarea unui ciclu de îmbunătățire continuă a strategiilor și modelelor viitoare de foraj, prin stabilirea unor tehnici în care datele de la fiecare operațiune a procesului de foraj sunt analizate și utilizate eficient.

20. Perfecționarea tehnicilor de gestionare a presiunii din spațiul inelar, asigurându-se astfel operațiuni de foraj mai sigure (de exemplu, utilizarea unei instalații de foraj cu abilitate MPD)

BIBLIOGRAFIE

- [1] Azar, J.J. and Samuel, G.R., *Drilling Engineering*. Tulsa, OK: PennWell Corporation, 2007.
- [2] IPIMS, 2021. *Practical Guidelines*. Petroleum Engineering, Drilling Engineering, Drilling Optimization.
- [3] Samuel, G.R. and Miska, S., *Optimization of Drilling Parameters with the Performance of Multilobe Positive Displacement Motor (PDM)*, SPE Asia Pacific Drilling Conference. Jakarta, Indonesia, September 1998. SPE 47791, 1998.
- [4] Short, J.A., *Introduction to Directional and Horizontal Drilling*. Tulsa, OK: PennWell Publishing Company, 1993.
- [5] Al-Mahasneh, M.A., Optimization Drilling Parameters Performance During Drilling in Gas Wells. *International Journal of Oil, Gas and Coal Engineering*, 5(2), pp.19-25, 2017.
- [6] Carden, R.S., Grace, R.D. and Shursen, J.L., *Drilling Practices*. Tulsa, OK: Petroskills-OGCI, 2006.
- [7] Lummus, J., 1969, *Factors to be Considered in Drilling Optimization*. *Journal of Canadian Petroleum Technology*, 8(04), pp.138-146, 1969.
- [8] Ozbayoglu, M.E., Miska, S.Z., Reed, T. and Takach, N., *Analysis of the Effects of Major Drilling Parameters on Cuttings Transport Efficiency for High-Angle Wells in Coiled Tubing Drilling Operations*. SPE/IcoTA CT Conf. and Exhb., Houston, TX, March 2004. SPE 89334, 2004.
- [9] PetroWiki, *PEH: Drilling Problems and Solutions*. [online] Available at: https://petrowiki.org/PEH:Drilling_Problems_and_Solutions, 2017.
- [10] Hassan, Z., *Common Drilling Well Problems (Reasons, Indications, Mitigation and Prevention)*. ResearchGate. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.19138.48327>, 2018.
- [11] Liétard, O. et al., 1999. Fracture Width Logging While Drilling and Drilling Mud/Loss-Circulation-Material Selection Guidelines in Naturally Fractured Reservoirs. *SPE Drilling & Completion*, 14(03), pp.168–177. <https://doi.org/10.2118/57713-pa>.
- [12] Magzoub, M.I. et al., 2020. Loss Circulation in Drilling and Well Construction: The Significance of Applications of Crosslinked Polymers in Wellbore Strengthening: A Review. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 185, p.106653. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2019.106653>.
- [13] PetroWiki, 2015. Lost Circulation. [online] Available at: https://petrowiki.spe.org/Lost_circulation.
- [14] PetroWiki, 2016. Hole Deviation. [online] Available at: https://petrowiki.spe.org/Hole_deviation.
- [15] Murphey, C.F. and Cheatham, J.B., 1966. Hole Deviation and Drill String Behavior. Society of
- [16] PetroWiki, 2016. Borehole Instability

- [17] Pasic, B., Gaurina, N. and Davo, M., 2012. Wellbore Instability: Causes and Consequences. ResearchGate.
- [18] Fjaer, E., 2008. Petroleum Related Rock Mechanics. Amsterdam: Elsevier.
- [19] PetroWiki, 2012. Stuck Pipe. [online] Available at: https://petrowiki.spe.org/Stuck_pipe#cite_note-r1-1
- [20] ScienceDirect, 2016. Stuck Pipe - an Overview. [online] Available at: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/stuck-pipe>
- [21] Mirhaj, S.A., Fazaelizadeh, M., Kaarstad, E. and Aadnøy, B.S., 2010. New Aspects of Torque-and-Drag Modeling in Extended-Reach Wells. SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Florence, Italy, September 2010. <https://doi.org/10.2118/135719-MS>.
- [22] McCormack, J.E., Evans, C.D., Le, J. and Chiu, T., 2011. The Practice and Evolution of Torque and Drag Reduction: Theory and Field Results. International Petroleum Technology Conference, Bangkok, Thailand, February 2012. <https://doi.org/10.2523/14863-MS>.
- [23] Aarrestad, T.V., 1994. Torque and Drag-Two Factors in Extended-Reach Drilling. Journal of Petroleum Technology, 46, pp.800–803. <https://doi.org/10.2118/27491-PA>.
- [24] Guo, B. and Liu, G., 2011. Mud Hydraulics Optimization. Applied Drilling Circulation Systems, pp.81-105. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-381957-4.00004-8>.
- [25] Drilling Manual, 2021. Drilling Hydraulics Course. [online] Available at: <https://www.drillingmanual.com/2020/02/introduction-drilling-hydraulics.html>
- [26] Smalling, D.A. and Key, T.A., 1979. Optimization Of Jet-Bit Hydraulics Using Impact Pressure. SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Las Vegas, Nevada, September 1979. <https://doi.org/10.2118/8440-MS>.
- [27] Bern, P., Hemphill, A., Marshall, D. and Philips, C., 2010. Field Monitoring of Weight-Material Sag. American Association of Drilling Engineers (AADE).
- [28] Abdelgawad, K., Elzenary, M., Elkatatny, S., Mahmoud, M., Abdulraheem, A. and Patil, S., 2018. New Approach to Evaluate the Equivalent Circulating Density (ECD) Using Artificial Intelligence Techniques. Journal of Petroleum Exploration and Production Technology, 9(2), pp.1569-1578.
- [29] Oilfield Team, 2021. Equivalent Circulating Density (ECD). [online] Available at: <https://oilfieldteam.com/en/a/learning/ecd>
- [30] Xiaofeng, S., Kelin, W., Tie, Y., Yhang, Z., Shuai, S. and Shizhu, L., 2013. Review of Hole Cleaning in Complex Structural Wells. The Open Petroleum Engineering Journal, 6, pp.25-32.
- [31] Busahmin, B., Saeid, N.H., Alusta, G. and Zahran, M.M., 2017. Review of Hole Cleaning in Horizontal Wells. Journal of Engineering and Applied Sciences, 12(16), pp.4554-4565.
- [32] Chen, W., Shen, Y., Harmer, R., Rawlins, S., Dong, Y. and Chen, R., 2015. Defining Design and Optimization Method: Dynamic Simulation Model Produces Integrated BHA Solutions for Efficient Wellbore Delivery. SPE/IADC Drilling Conference and Exhibition, London, England, UK, March 2015. <https://doi.org/10.2118/173008-MS>.

[33] Santos, J., Priimenko, V. and Sugiura, J., 2013. Modeling of BHA Dynamic Behaviors. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 4(1), pp.97-104.

[34] Crespo, F., Ahmed, R., Enfis, M., Saasen, A. and Amani, M., 2012. Surge-and-Swab Pressure Predictions for Yield-Power-Law Drilling Fluids. *SPE Drilling & Completion*, 27, pp.574-585.

[35] Karlsen, A.G., 2010. Surge and Swab Pressure Calculation. Master's Thesis, NTNU – Norwegian University of Science and Technology. Available at: https://ntnuopen.ntnu.no/ntnu-xmlui/bitstream/handle/11250/235064/632200_FULLTEXT01.pdf

[K] Halliburton Landmark Handbook. Copy mark reserved @ Halliburton. Free trial.

[36] Bahari, A. and Baradaran Seyed, A. (2009) 'Drilling cost optimization in a hydrocarbon field by combination of comparative and Mathematical Methods', *Petroleum Science*, 6(4), pp. 451–463. doi:10.1007/s12182-009-0069-x.

[37] Bratli, R.K. et al. (1997) 'Drilling optimization software verified in the North Sea', *All Days One Petro*. doi:10.2118/39007-ms.

[38] Hankins, D., Salehi, S. and Karbalaee Saleh, F. (2015) 'An integrated approach for drilling optimization using Advanced Drilling Optimizer', *Journal of Petroleum Engineering*, 2015, pp. 1–12. doi:10.1155/2015/281276.

[39] Hamoodi, A., Hamoudi, M.R. and Hannah, S. (2017) 'Drilling Optimization of a Selected Field in Kurdistan Region', *UKH Journal of Science and Engineering*, 1(1).

[40] Sui, D., Nybo, R. and Azizi, V. (2013) 'Real-time optimization of rate of penetration during drilling operation', 2013 10th IEEE International Conference on Control and Automation (ICCA). doi:10.1109/icca.2013.6564893.

[41] Kutas, D.T., Nascimento, A., Elmgerbi, A.M., Roohi, A., Prohaska, M., Thonhauser, G. and Mathias, M.H. (2015) 'A Study of the Applicability of Bourgoyne & Young ROP Model and Fitting Reliability through Regression', Paper presented at the International Petroleum Technology Conference, Doha, Qatar, December 2015. doi: <https://doi.org/10.2523/IPTC-18521-MS>.

[42] Bello, O., Teodoriu, C., Yaqoob, T., Oppelt, J., Holzmann, J. and Alisigwe, O. (2016) 'Application of Artificial Intelligence Techniques in Drilling System Design and Operations: A State of the Art Review and Future Research Pathways', Paper presented at the SPE Nigeria Annual International Conference and Exhibition, Lagos, Nigeria, August 2016. doi: <https://doi.org/10.2118/184320-MS>.

[44] Gowida, A., Elkatatny, S., Al-Afnan, S. and Abdulraheem, A. (2020) 'New Computational Artificial Intelligence Models for Generating Synthetic Formation Bulk Density Logs While Drilling', *Sustainability*, 12(686). doi: <https://doi.org/10.3390/su12020686>.

[45] Jeffery, C. and Creegan, A. (2020) 'Adaptive Drilling Application Uses AI To Enhance On-Bottom Drilling Performance', *Journal of Petroleum Technology*, 72, pp. 45–47. doi: <https://doi.org/10.2118/0820-0045-JPT>.

[46] Velez-Langs, O. (2005) 'Genetic algorithms in oil industry: An overview', *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 47, pp. 15-22. doi: 10.1016/j.petrol.2004.11.006.

- [47] Schuh, G., Reinhart, G., Prote, J.P., Sauermann, F., Horsthofer, J., Oppolzer, F. and Knoll, D. (2019) 'Data Mining Definitions and Applications for the Management of Production Complexity', *Procedia CIRP*, 81, pp. 874-879.
- [48] Bharati, M. and Ramageri, B. (2010) 'Data mining techniques and applications', *Indian Journal of Computer Science and Engineering*.
- [49] DUBERTRET, L. (1955) Carte géologique du Liban au 1/200000 avec notice explicative, Beirut: République Libanaise, Ministère des Travaux Publiques, 74 p.
- [50] UKLA, S. (1970) Subsurface geology and well correlation in north and central Lebanon. Master's thesis, American University of Beirut, Lebanon, 125 pp.
- [51] RENOUE, G. (1955) 'Oil Prospects of Lebanon', *AAPG Bulletin*, 39(11), pp. 2125-2169.
- [52] BEYDOUN, Z.R. (1977) 'Petroleum prospects of Lebanon: Re-evaluation', *AAPG Bulletin*, 61(1), pp. 43-64.
- [53] BEYDOUN, Z.R. (1981) 'Some open questions relating to the petroleum prospects of Lebanon', *Journal of Petroleum Geology*, 3(3), pp. 303-314.
- [54] AL HADDAD, S. (2007) Petrographic and geochemical characterization of the Hasbaya asphalt and related host rocks (Senonian Chekka Formation), South Lebanon. M.Sc thesis, American University of Beirut, Lebanon.
- [55] NADER, F.H., SWENNEN, R. and ELLAM, R. (2007) 'Field geometry, petrography and geochemistry of a dolomitization front (Late Jurassic, central Lebanon)', *Sedimentology*, 54, pp. 1093-1110.
- [56] NADER, F.H. (2003) Petrographic and Geochemical Study of the Kesrouane Formation (Jurassic), Mount Lebanon: Implications on Dolomitization and Petroleum Geology. Ph.D. thesis, Katholieke Universiteit Leuven, Belgium, 386 pp.
- [57] DOUMMAR, J. (2005) Sedimentology and diagenesis of the Albian rock sequence (Upper Hammana-Lower Sannine Formations), northern Lebanon. MSc thesis, American University of Beirut, Lebanon, 199 pp.
- [58] MÜLLER, C., HIGAZI, F., HAMDAN, W. and MROUEH, M. (2010) 'Revised stratigraphy of the Upper Cretaceous and Cenozoic series of Lebanon based on nannofossils', *Geological Society, London, Special Publication*, 341, pp. 287-303.
- [59] BREMAN, E. (2006) 'Oil and gas plays in the East Mediterranean', 5th Petroleum Exploration Society of Great Britain/ Houston Geological Society, African Conference, London.
- [60] Roberts, G. and Peace, D. (2007) 'Hydrocarbon plays and prospectivity of the Levantine Basin, offshore Lebanon and Syria from modern seismic data', *GeoArabia*, 12(3), pp. 99-124.
- [61] Velez-Langs, O. (2005) 'Genetic algorithms in oil industry: An overview', *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 47(1-2), pp. 15-22. doi: <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2004.11.006>.
- [62] Weiss, S.M., Indurkha, N., Zhang, T. and Damerau, F.J. (2004) The Text

Mining Handbook: Advanced Approaches in Analyzing Unstructured Data.
Cambridge: Cambridge University Press.

[63] Pandey, B. and Pal, S. (2011) 'Data Mining Approaches for Sentiment Analysis', *Artificial Intelligence Review*, 35(3), pp. 253–276. doi: <https://doi.org/10.1007/s10462-010-9180-z>.

[64] Mishra, R.K. and Zachariah, A.K. (2019) 'The Role of Nanotechnology in Wastewater Treatment: A Review', *Skyline University Journal*.

[65] Bani Mustafa, A., Abbas, A.K., Alsaba, M. and Alameen, M. (2021) 'Improving drilling performance through optimizing controllable drilling parameters', *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 11(3), pp. 1223–1232. doi: <https://doi.org/10.1007/s13202-021-01116-2>.

[66] Mishra, R.K., Zachariah, A.K. and Thomas, S. (2017) 'Energy-dispersive X-ray spectroscopy techniques for nanomaterial', in *Microscopy Methods in Nanomaterials Characterization*, pp. 383–405.

[67] Kumar, R.S. and Rajkumar, P. (2014) 'Characterization of minerals in air dust particles in the state of Tamilnadu, India through FTIR, XRD and SEM analyses', *Infrared Physics & Technology*, 67, pp. 30–41.

[68] Mishra, R.K., Zachariah, A.K. and Thomas, S. (2017) 'Energy-Dispersive X-ray Spectroscopy Techniques for Nanomaterial', in *Microscopy Methods in Nanomaterials Characterization*, pp. 383–405.

[69] Cardell, C. and Guerra, I. (2016) 'An overview of emerging hyphenated SEM-EDX and Raman spectroscopy systems: Applications in life, environmental and materials sciences', *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 77, pp. 156–166.