



MINISTERUL EDUCAȚIEI ȘI CERCETĂRII
UNIVERSITATEA PETROL-GAZE DIN PLOIESTI

B-dul. București nr. 39, 100680 Ploiești - România
www.upg-ploiesti.ro
Telefon +40 244 573 171 Fax +40 244 575 847



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

TEZĂ DE DOCTORAT
CONTRIBUȚII PRIVIND STUDIUL
STABILITĂȚII GĂURILOR DE SONDĂ ȘI AL
COMPORTAMENTULUI ELASTO-PLASTIC AL
ROCILOR IN DOMENIUL OFFSHORE

Autor: Drd. Ing. EL GINDY MOHAMED HALAFAWI YEHIA MOHAMED

Conducător științific: Prof. Dr. Ing. AVRAM LAZĂR

Ploiești 2021



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

TEZĂ DE DOCTORAT
CONTRIBUȚII PRIVIND STUDIUL
STABILITĂȚII GĂURILOR DE SONDĂ ȘI AL
COMPORTAMENTULUI ELASTO-PLASTIC AL
ROCILOR IN DOMENIUL OFFSHORE

CONTRIBUTIONS REGARDING THE STUDY OF
WELLBORE STABILITY AND ELASTO-PLASTIC
BEHAVIOR OF ROCKS IN THE OFFSHORE
FIELDS

Autor: Drd. Ing. EL GINDY MOHAMED HALAFAWI YEHIA MOHAMED

Conducător științific: Prof. Dr. Ing. AVRAM LAZĂR

Nr. Decizie 881 din 18.12.2020

Comisia de doctorat:

Președinte	Prof.univ.habil.dr.ing. PANĂ Ion	de la	Universitatea Petrol-Gaze din Ploiești
Conducător științific	Prof.univ.dr.ing. AVRAM Lazăr	de la	Universitatea Petrol-Gaze din Ploiești
Referent oficial	Prof.univ.dr.ing. DINU Florinel	de la	Universitatea Petrol-Gaze din Ploiești
Referent oficial	Prof.univ.dr.ing. NEUNER Johan	de la	Universitatea Tehnică de Construcții București
Referent oficial	Prof.univ.dr.ing. PETRESCU Valentin	de la	Universitatea Lucian Blaga din Sibiu

Ploiești 2021

FISA DE PREZENTARE A DOCTORANDULUI**1. Datele personale ale doctorandului**

1.1.Nume:	ELGINDY
1.2.Prenume:	MOHAMED HALAFAWI YEHIA MOHAMED
1.3. Anul absolvirii Universității Din Cairo	2011

2. Date referitoare la programul de doctorat

2.1.Anul admiterii la doctorat	2018
2.2.Forma de invatamant	Cu frecvență
2.3.Titlul lucrării de doctorat	Contribuții Privind Studiul Stabilității Găurilor de Sondă și al Comportamentului Elasto-Plastic al Rocilor în Domeniul Offshore
2.4.Facultatea	Ingineria Petrolului și Gazelor
2.5.Domeniul fundamental	Științe ingineresti
2.6.Domeniul de doctorat	Mine, Petrol și Gaze
2.7.Coordonatorul de doctorat	Prof. univ. dr. ing. AVRAM Lazăr

3. Rezultatele programului de pregătire universitară avansată*3.1.Disciplin de pregătire avansată*

Nr. crt.	DISCIPLINA	Nota examen
1.	Mecanica fluidelor	10.00
2.	Forajul sondelor	10.00
3.	Învestigații geofizice și hidrodinamice	10.00

3.2.Disciplin de pregătire complementară

Nr. crt.	DISCIPLINA	Nota examen
1.	Managementul proiectelor de exploatare a zăcămintelor	10.00
2.	etică și integritate academică	10.00

REZUMAT

Forarea unei găuri stabilizate în câmpurile de petrol și gaze, ca și utilizarea fluidelor de foraj într-o zonă stabilă trebuie să ia în considerare atât principalele surse de instabilitate ale găurii de sondă, cât și problemele legate de deformarea coloanei, în speță turtirea acesteia. Aceste probleme de instabilitate apar atât în timpul operațiunilor de foraj cât și a celor de producție. Finalmente, ele duc la creșterea timpului neproductiv (TNP) și a costului neproductiv, în timp ce se forează în formațiuni stresate tectonic și instabile. În acest context, simularea analitică și numerică a stabilității și optimizării găurii de sondă a fost dezvoltată și prezentată în capitolul II.

Pentru precizarea comportamentului zonelor de instabilitate și stabilirea traiectoriei optime a găurii de sondă cu cea mai sigură fereastră de noroi, s-a dezvoltat un model de stabilitate al găurii de sondă. Astfel, modelul geo-mecanic al pământului (MEM) a fost combinat cu criteriul de eșec, utilizându-se înregistrările prin cablu din timpul forării cu ajutorul sistemelor LWD și MWD. Modelul dezvoltat este generat iterativ pentru a prezice variațiile optime de traiectorie și cele ale fluidului de foraj, în timp.

Solicitările radiale și tangențiale din jurul sondei sunt determinate utilizându-se modelul constitutiv poro-elastic. Acest model permite să se ia în considerare efectul structurii porilor din rocă. De asemenea, criteriul Lade modificat este utilizat drept criteriu de eșec la solicitarea la forfecare. În plus, modelul oferă soluții mai precise pentru optimizarea fluidelor de foraj în această zonă cu tectonică înaltă. Modelul este aplicat și verificat în cazul unui puț deviat (RBS-91), în care există solicitări mecanice excesive ale sondei atunci când se traversează secțiunea găurii de sondă de 8 1/2 in.

În plus, optimizarea traiectoriei sondei în condițiile rezolvării tuturor problemelor de instabilitate ale acesteia reprezintă, actualmente, cel mai important factor în planificarea și proiectarea sondelor. În acest sens a fost dezvoltată o nouă metodă pentru proiectarea și optimizarea traiectoriilor direcționale și orizontale ale puțurilor bazate pe tehnica algoritmului de optimizare numerică a particulelor (PSO). Scopul principal al acestei metode este acela de descriere și optimizare a proiectării traiectoriei găurii de sondă la cel mai mic cost la care se poate atinge obiectivul-țintă. Modelul de proiectare se referă la o traiectorie reală a puțului, forată pe baza datelor geologice din teren. Traiectoriile selectate sunt profile de tip S și o traiectorie orizontală dublă bazată pe analiza datelor de teren.

Profilul de tip S a fost proiectat folosindu-se calcule explicite, iar traiectoria orizontală cu dublă construcție a fost proiectată și optimizată utilizându-se tehnica de optimizare numerică (algoritmul PSO). Mai mult, relația dintre optimizarea traiectoriei și stabilitatea găurii de sondă a fost studiată și verificată printr-o sondă orizontală reală care trece prin cinci ținte. Traiectoria unei sonde orizontale cu rază lungă de acțiune a fost optimizată prin selectarea profilului orizontal, punctului de demarare al înclinării (KOP), traiectoriei orizontale a virajului, determinării virajului vertical și densităților noroiului. După aceea, pentru a proiecta profilul 3D a fost utilizată metoda curburii minime (MCM). De asemenea, cea mai bună orientare a puțului a fost selectată pe baza mecanicii rocii și a stabilității sondei, astfel încât traiectoria optimă să poată fi forată fără probleme de instabilitate. Sonda orizontală reală care a trecut, așa cum am mai amintit, prin cinci ținte (NRQ 255 6H-1, NRQ 255 6H-2, NRQ 255 6H-3, NRQ 255 6H-4 și NRQ 255 6H-5) a fost studiată pentru a verifica tehnica de optimizare. În plus, traiectoria găurii de sondă a fost reproiectată și selectată după construirea unor noi modele de stabilitate ale găurii de sondă și de stresuri geomecanice, folosindu-se datele de înregistrare din timpul forării (LWD).

Așa cum s-a prezentat anterior, toate tehnicile și metodele de mai sus sunt realizate pe baza nivelului în sine al sondei. Cu toate acestea, există trei studii privitoare la stabilitatea găurii de sondă care au fost implementate pe baza nivelului de câmp. În primul rând, tehnica de inversare a fost utilizată pentru a realiza un model de stres *in situ* și o evaluare a stabilității pentru nouă găuri de sondă din câmpul RBS-9, care are o lipsă acută de date. Apoi, tehnica de inversare a fost utilizată pentru a găsi tensiunile orizontale, maxime și minime. Tensiunile au fost, de asemenea, determinate pentru întregul puț și pentru zonele din jurul fiecărui șiu de coloană. În al doilea rând, au fost implementate mai multe studii de teren pentru a arăta influența problemelor de foraj, a problemelor geologice, a analizei sondelor compensate (offset), a anticoliziunii sondelor și a ansamblurilor de fund (BHA) ș.a. asupra stabilității găurii de sondă.

Pentru a îmbunătăți stabilitatea sondelor și a implementa practici speciale de foraj și de curățare a găurilor de sondă pe baza datelor compensate (offset), au fost studiate câmpurile Zubair și Colibași în condițiile forării unor noi puțuri de dezvoltare. Sunt astfel analizate, în totalitate, datele aferente sondelor compensate (offset). Analiza statistică a performanțelor a fost implementată pentru sonde orizontale compensate (offset) pentru a crea *benchmarking* de performanță, pentru a îmbunătăți planificarea și proiectarea noilor sonde și pentru a spori performanța viitoare a operațiunilor. Pierderile de circulație și materialele utilizate pentru combaterea lor (tipuri, concentrații etc.) au fost determinate pe baza analizei datelor și cu ajutorul lucrărilor de laborator.

În al treilea rând, a fost dezvoltat un sistem anti-coliziune atât pentru câmpurile Zubair, cât și pentru câmpurile Colibași, pe baza datelor compensate (offset), iar acest sistem a fost gestionat pentru forarea a trei noi puțuri de dezvoltare în câmpul Zubair și unul pentru câmpul Colibași. Amplasarea puțurilor a fost selectată de așa manieră încât să se evite și să se reducă riscul de coliziune al acestora. Mai mult, după prezentarea metodelor-anticoliziune a fost construită o *pânză de păianjen* pentru toate puțurile, pe baza acestor metode și a calculului de inspecție direcțională pentru ambele câmpuri.

Pe de altă parte, a fost acordată o atenție specială rolului echipamentelor în menținerea stabilității sondei. Creșterea complexității găurii de sondă și a ansamblurilor BHA stabilește noi praguri pentru modelarea matematică specifică, avansată și complexă, în special în aplicațiile aferente sondelor orizontale. Mai nou, aplicațiile sistemelor complexe BHA în forajul direcțional și orizontal sunt utilizate pe scară largă. Prin urmare, a fost construit un model dezvoltat pentru precizarea analizei de performanță și a mecanicii sistemelor BHA direcționale complexe, care conțin

sapa, PDC, motoare cu carcasă îndoită, stabilizatori, plăcuțe de uzură, componente ale garniturilor de foraj etc. Se efectuează, de asemenea, o analiză de sensibilitate a vârtejului BHA, astfel că frecvențele naturale ale BHA și formele modului de vibrație laterală, viteza de rotație și apăsările corespunzătoare pe sapă pot fi calculate și prezise. Pentru a realiza optimizarea traiectoriei sondei și stabilitatea găurii de sondă, sunt selectate și optimizate, pe baza datelor de teren, componentele sondei orizontale cu rază lungă, componentele complexe BHA și mecanica acestora.

În capitolul III au fost stabilite noi soluții de stabilitate ale găurii de sondă folosindu-se un comportament neliniar de rocă elastică, cu modurile de eșec Mohr-Coulomb și Hoek-Brown. S-a realizat o comparație între domeniul liniar și cel neliniar. Apoi, folosindu-se datele experimentale, a fost realizat și verificat un studiu elasto-plastic cu privire la determinarea tensiunilor aferente sondei și a stabilității găurilor de sondă. Prin urmare, scopul acestei secțiuni este acela de a simula tensiunile reale din jurul găurii de sondă folosindu-se comportamentul rocii elasto-plastice pentru a descrie cazuri reale de instabilitate ale sondei. Este prezentată descrierea stării de stres din jurul găurii de sondă și, de asemenea, criteriile comune de eșec.

Utilizându-se comportamentul rocii elasto-plastice, s-au selectat cele mai semnificative ecuații pentru descrierea stării de solicitare. Datele experimentale sunt utilizate pentru a calcula tensiunile radiale și tangențiale din jurul peretelui sondei, la diferite diametre. O analiză de sensibilitate a fost realizată pentru a arăta efectul diametrului secțiunii forate asupra stabilității găurilor de sondă. Analiza stabilității găurii de sondă s-a realizat, de asemenea, utilizându-se metoda elementului finit (FEM). Modelul a fost construit folosindu-se *software*-ul ANSYS atât pentru sondele înclinate, cât și pentru cele verticale. Au fost prezentate tensiunile eficiente din jurul găurii de sondă, s-a generat deformarea rocilor ș.a. Modelul găurii de sondă verticale în sistem 3D este creat tot în această secțiune, utilizându-se pachetul *software* ANSYS cu element finit pentru a examina contururile de distribuție ale tensiunilor și graficelor de deplasare. Apoi, s-a stabilit o metodă cuprinzătoare pentru a transforma modelul vertical în orice model orientat, ca și un model de sondă 3D deviat. Acest aspect permite ca ambele modele de sondă să fie utilizate în mod repetat pentru a investiga stabilitatea, distribuția tensiunii și deformarea în jurul găurilor de sondă, la orice orientare folosindu-se elasticitatea izotropă a comportamentului rocii și ecuațiile Von Mises. Schimbarea direcției și magnitudinii stresului normal, ca și a forței de forfecare care acționează asupra modelului vertical al găurii de sondă se face, de asemenea, pentru a arăta efectul înclinației asupra stabilității găurii de sondă.

În capitolul IV s-au dezvoltat modele *offshore* pentru a studia stabilitatea și optimizarea unităților *offshore*. Au fost realizate două studii diferite. Primul privește impactul mediului marin asupra stabilității unei platforme *jack-up*. Schimbarea condițiilor de mediu *offshore* influențează stabilitatea acestora. În acest context, a fost implementat un studiu al impactului mediului marin asupra unei platforme *jack-up*. În primul rând, sunt revizuite procedurile de plecare, tranzit și amplasare pe orice locație de urgență / locație *stand-by*. După aceea, diferite condiții de prognoză a vremii au fost prezise și calculate: amplitudinile valurilor și vântului, viteza, înălțimile ș.a. Au fost trasate hărți ale condițiilor de schimbare ale vântului și valurilor. Au fost utilizate metode de topografie pentru a determina locația finală a platformei *jack-up* și au fost construite hărți de poziționare ale platformei *jack-up*. În plus, au fost calculate și forțele de impact asupra turlei.

Rezultatele dezvoltate prevăd, în mod eficient, condițiile de siguranță și optimizează condițiile de poziționare ale platformei. Pe de altă parte, platformele *offshore* sunt necesare și proiectate pentru a implementa explorarea și producția în câmpurile petrolifere *offshore*. Aceste platforme sunt echipate cu o mulțime de echipamente și vase de procesare care sunt utilizate pentru tratarea țițeiului pentru a atinge criteriile specifice sau de export. În consecință, un model de rețea a navelor și platformelor a fost dezvoltat pentru a prezice condițiile de performanță și comportamentul platformelor atunci când platforma de tratament (COTP) este în afara serviciului. Scenariile optime au fost determinate pentru a preveni oprirea producției a șase platforme *offshore* atunci când COTP nu funcționează corespunzător. Modelul a fost folosit pentru a investiga unele alternative de proces și pentru a selecta varianta optimă (mai mult, o simulare autonomă a fost implementată pentru fiecare alternativă pentru a identifica valoarea optimă). Modelul de predicție a fost dezvoltat pe baza datelor primite de la o firmă *offshore*, ca parte a activităților de instalare a proiectelor reale desfășurate în momente diferite de-a lungul platformelor *offshore* (WP-A, WP-B, WP-C, WP-T, COTP), și principala întreprindere de realizare a instalațiilor terestre (MOPF). Ulterior, acesta a fost revizuit pe baza noului set suplimentar de date obținute de la alte companii. În consecință, *OnSpec* a modificat studiul pe baza datelor suplimentare. Două scenarii cu descrieri complete și analize de costuri sunt recomandate ca metode optime pentru operarea rețelelor platformelor în cazurile în care COTP nu funcționează corect. Finalmente, sunt prezentate avantajele și dezavantajele pentru fiecare scenariu.

În capitolul V sunt prezentate studii reale privind evaluarea riscurilor și integritatea puțurilor de foraj. Diferite cazuri de teren au fost utilizate pentru a arăta procesul de analiză al riscului și relația acestuia cu sondele, integritatea echipamentelor și stabilitatea sondei. Pentru a arăta aceste tehnici și aplicarea lor au fost folosite datele de la două sonde reale ale câmpului Colibasi. Dezvoltarea de noi corelații a fost necesară pentru optimizarea parametrilor de foraj utilizându-se rețeaua neuronală artificială (ANN). De asemenea, s-a utilizat un model statistic prin dezvoltarea SPSS-ului multivariant, pentru a crea noi corelații pe baza datelor măsurate, de compensare a forajului. Amândouă metodele au contribuit la selectarea valorilor ROP optime. În plus, au fost utilizate studii de teren pentru a verifica relația dintre uzura coloanei și verificarea stresului și integritatea sondelor. Prin urmare, datele sondei orizontale WP1A au fost utilizate pentru a prezice reducerea cantității de metal din peretele coloanei pentru cazul sondelor orizontale. A fost explicată legătura dintre proiectarea puțului de hidrocarburi (traseul puțului, severitatea *dogleg*-ului, proiectarea coloanei, sarcinile în garnitura de foraj) și uzura coloanei, cu consecințele aferente care rezultă din acest fenomen nedorit.

Mai mult, traiectoria sondei a fost optimizată iar severitatea *dogleg*-ului a fost calculată pentru a determina uzura carcasei. Se determină, de asemenea, distribuția sarcinilor aferente forajului. O analiză de sensibilitate a fost

implementată pentru a arăta impactul apăsării pe sapa (WOB), rotației garnituri de foraj (RPM), rata de penetrare (ROP) și factorul de uzură (WF) asupra predicției uzurii coloanei. În plus, analiza și evaluarea integrității conductelor s-au realizat folosindu-se instrumentul de imagistică cu mai multe degete (MIT), pentru două studii de teren. Analiza datelor înregistrate de către MIT ajută la selectarea imediată a unui plan de acțiune de remediere care duce la creșterea producției cu mai puține probleme. MIT a fost folosit pentru a investiga 148 de coloane de producție în două câmpuri românești, pentru o gamă largă de adâncimi de la 2,80 m la 1181,46 m. Mai mult, câmpurile de petrol și puțurile de producție cu CO₂ au fost testate folosindu-se modelul de integritate, modelul de evaluare a riscurilor și modelul de analiză a costurilor pentru a identifica puțurile riscante și a propune metodele adecvate de atenuare. A fost dezvoltat un model de analiză al riscului de cost în integritate (WIRCA) pentru câmpurile petrolifere producătoare de CO₂. Toate măsurătorile privind integritatea sondelor au contribuit la integrarea acestora într-o perspectivă a ciclului de viață. Ele au fost efectuate pentru a investiga posibilele mecanisme ale provocărilor de integritate ale puțurilor, acum și în viitor, la diferite tipuri ale acestora, răspunzând unor întrebări acute: de ce apar și cum se pot diminua ori cum pot fi împiedicate a se produce? Studiul de analiză al costurilor a fost realizat pentru unul dintre puțurile riscante W13. Trei tratamente diferite au fost testate pentru a face față severității CO₂, pentru a preveni eșecul integrității sondei: utilizarea tubului Cr13, a loturilor chimice și a injecției continue a inhibitorului de coroziune. În cele din urmă, instalația de gaze naturale lichefiate (GNL) a fost, de asemenea, studiată, astfel ca unitățile riscante să poată fi identificate.

În cele din urmă, în capitolul VI se prezintă optimizarea și abordarea problemelor specifice sondelor de producție. În primul rând, s-au efectuat experimente fizico-chimice pentru a determina cele mai bune condiții de reabilitare a puțurilor de gaze în perioadele de iarnă în România prin utilizarea spumei și a dispozitivelor automate. Au fost efectuate mai multe cercetări de laborator folosindu-se dispozitivele Julabo FP 50 Chiller și Petrotest privind introducerea substanțelor lichide de spumare în puțurile de gaze, folosindu-se dispozitive automate în timpul iernii, atunci când temperaturile sunt scăzute, pentru a determina cea mai potrivită soluție de apă + amestec de spumare necesar pentru a evita înghețarea fluidelor. Prin urmare, punctele de îngheț ale unei game largi de amestecuri și spumarea lor necesară au fost determinate pentru a evacua lichidele din fundul puțurilor pe baza determinărilor fizico-chimice de laborator. În al doilea rând, a fost realizată o simulare compozițională a puțurilor cu condens de gaze din câmpul Țintea – ASTRA, pentru a simula performanța acestora și pentru a studia modul în care modificările compozițiilor componentelor grele ale unui astfel de sistem afectează puțurile producătoare în timpul epuizării, ca și modul în care rata variației compoziției influențează proprietățile termodinamice ale fluidului și, prin urmare, definirea diagramei de fază dinamică a fluidului din rezervor. Această lucrare este esențială pentru a investiga modalitățile de optimizare a productivității sondelor prin controlul compoziției lichide din apropierea sondelor și prin optimizarea strategiei de presiune de producție pentru a evita condensarea unui lichid mai ușor în rezervor și, în consecință, pierderea productivității.