



**MINISTERUL EDUCAȚIEI ȘI CERCETĂRII
UNIVERSITATEA PETROL-GAZE DIN PLOIEȘTI**

B-dul. București nr. 39, 100680, Ploiești, România, www.upg-ploiesti.ro

Telefon +40 244 573 171

Fax +40 244 575 847



TEZĂ DE ABILITARE

**Abordări integrate material–proces–mediu în ingineria petrolului
și gazelor: contribuții metodologice avansate în înmagazinarea
gazelor și formularea fluidelor de foraj**

Dr. Ing. Rami A. Doukeh

Ploiești 2026

CUPRINS

1. PERFORMANȚE ȘTIINȚIFICE ȘI PROFESIONALE.....	1
1.1. Formarea academică	1
1.2. Experiența profesională	3
1.3. Contribuții științifice și vizibilitate națională și internațională.....	6
1.4. Îndeplinirea standardelor minimale pentru abilitare	14
2. INVESTIGAȚII EXPERIMENTALE ȘI INTERPRETARE MULTI-SCARĂ A INTERACȚIUNILOR HIDROGEN–ROCĂ ÎN CONTEXTUL STOCĂRII SUBTERANE	15
2.1. Cadru științific, motivația cercetării și structura capitolului 2.....	15
2.2. Interacțiuni hidrogen–rocă în rezervoare carbonatice și silicioase: o perspectivă petrofizică.....	17
2.2.1. Metodologia experimentală pentru studiul interacțiunilor hidrogen–rocă	18
2.2.2. Analiza prin difracție de raze X (XRD).....	20
2.2.3. Porozitate, permeabilitate și caracteristici texturale	26
2.2.4. Analiza SEM–EDS	32
2.2.5. Implicații mineralogice și petrofizice pentru selecția formațiunilor destinate UHS.....	39
2.3. Modelarea termodinamică și a transportului difuziv în sisteme H ₂ –CH ₄ pentru UHS	41
2.3.1. Evaluarea performanței ecuațiilor de stare SRK și PR în modelarea termodinamică a amestecurilor H ₂ –CH ₄	41
2.3.2. Difuzia hidrogenului prin caprock: investigație experimentală și implicații pentru siguranța stocării subterane	52
2.3.3. Pierderi de hidrogen prin difuzie în stratul de acoperire (caprock)	58
2.4. Contribuțiile originale ale autorului în Capitolul 2.....	60
3. SIMULARE NUMERICĂ PENTRU OPTIMIZAREA STOCĂRII SUBTERANE A GAZELOR ÎN ZĂCĂMINTE DEPLETATE (CH ₄ , CO ₂ , H ₂).....	62
3.1. Cadru științific, motivația cercetării și structura capitolului 3.....	62
3.2. Metodologia integrată de modelare numerică și simulare pentru optimizarea stocării subterane a gazelor (CH ₄ , CO ₂ și H ₂) în zăcăminte depletate.....	63
3.3. Structura modelului numeric și ipoteze de calcul.....	65
3.4. Rezultate și discuții asupra optimizării procesului de înmagazinare subterană a gazului natural în zăcăminte depletate	68
3.5. Simularea numerică a stocării CO ₂ în zăcăminte de gaze naturale: rezultate și discuții integrate....	74
3.6. Analiza numerică a comportamentului H ₂ în procesele de înmagazinare subterană	83
3.7. Abordare comparativă a proceselor de înmagazinare subterană a gazelor prin simulare numerică .	88

3.8. Contribuțiile originale ale autorului în Capitolul 3.....	90
4. STRATEGII INTEGRATE DE SINTEZĂ, CARACTERIZARE ȘI VALIDARE FUNCȚIONALĂ A ADITIVILOR AVANSAȚI PENTRU INHIBAREA ȘISTURILOR ÎN FLUIDE DE FORAJ PE BAZĂ DE APĂ	92
4.1. Cadru științific, motivația cercetării și structura capitolului.....	92
4.2. Dezvoltarea și evaluarea funcțională a inhibitorilor de șist pe bază de imidazolină pentru aplicații WBM.....	93
4.2.1. Sinteza și formularea metodologiei de obținere a inhibitorilor bazați pe compuși cu nucleu de imidazolină	94
4.2.2. Caracterizarea integrată și evaluarea funcțională a aditivilor anti-umflare pe bază de imidazolină	96
4.2.3. Analiza FTIR (legătura structural–funcțională a inhibitorilor pe bază de imidazolină).....	99
4.2.4. Analiza stabilității termice (TGA–DTG) și traducerea rezultatelor în fereastră operațională...	101
4.2.5. Analiza XRD a șistului X Rosetti ca „etalon de reactivitate” pentru comparația cu repere comerciale.....	102
4.2.6. Analiza proprietăților fluidelor de foraj și performanța la umflare – comparație directă cu repere comerciale.....	104
4.2.7. Sinteza decizională: reguli de formulare și criterii de selecție industrială pentru inhibitori pe bază de imidazolină.....	106
4.3. Dezvoltarea și integrarea oxizilor metalici nanocristalini ca inhibitori funcționali ai șisturilor în fluide de foraj pe bază de apă	108
4.3.1. Sinteza oxizilor metalici nanocristalini – fundament metodologic și criterii de control	109
4.3.2. Caracterizarea oxizilor metalici nanocristalini și evaluarea funcțională a fluidelor de foraj modificate	111
4.3.3. Analiza prin difracție de raze X (XRD) a oxizilor metalici nanocristalini.....	113
4.3.4. Analiza distribuției dimensionale prin Dynamic Light Scattering (DLS)	116
4.3.5. Caracterizarea morfologică prin microscopie electronică de baleiaj (SEM).....	119
4.3.6. Analiza izotermelor BET și a proprietăților texturale	123
4.3.7. Analiza termogravimetrică (TGA–DTG) și implicațiile funcționale	126
4.3.8. Performance Evaluation of Nanocrystalline Metal Oxides-Based WBDFs	128
4.3.9. Sinteza decizională integrată: corelarea sinteză–structură–textură–stabilitate–funcție în formularea fluidelor de foraj pe bază de apă	133
4.4. Contribuțiile originale ale autorului în Capitolul 4.....	135
5. VIZIUNE INTEGRATOARE, LEADERSHIP ACADEMIC ȘI CONSTRUCȚIA UNEI DIRECȚII DOCTORALE MODERNE ÎN INGINERIA PETROLULUI ȘI GAZELOR	137
BIBLIOGRAFIE.....	141

INVESTIGAȚII EXPERIMENTALE ȘI INTERPRETARE MULTI-SCARĂ A INTERACȚIUNILOR HIDROGEN–ROCĂ ÎN CONTEXTUL STOCĂRII SUBTERANE

Înmagazinarea subterană a hidrogenului în formațiuni geologice poroase reprezintă una dintre direcțiile strategice majore ale tranziției energetice europene, având un rol esențial în integrarea surselor regenerabile intermitente și în decarbonizarea sistemelor energetice bazate pe gaze naturale. Spre deosebire de soluțiile clasice de stocare în caverne saline, utilizarea zăcămintelor de gaze naturale depletate implică o complexitate științifică mult mai ridicată, determinată de interacțiuni simultane între gaz, matricea mineralogică a rocii, fluidele din pori și stratul de acoperire (caprock). În acest context, prezentul capitol reflectă contribuția originală a autorului în dezvoltarea unui cadru metodologic integrat, care corelează analiza experimentală multi-tehnică a rocii cu modelarea termodinamică a amestecurilor H_2-CH_4 și cu evaluarea transportului difuziv prin caprock, în condiții relevante de presiune și temperatură (HPHT).

Demersul științific adoptat pornește de la premisa că evaluarea fezabilității stocării subterane a hidrogenului nu poate fi realizată prin abordări fragmentate. Literatura internațională tratează adesea separat interacțiunile geochimice hidrogen–rocă, comportamentul termodinamic al amestecurilor gazoase sau difuzia prin caprock, fără o integrare coerentă a acestor procese. În contrast, contribuția autorului constă în construirea unei secvențe logice și sistemice: caracterizarea modificărilor mineralogice și microstructurale induse de hidrogen, corelarea acestora cu evoluția proprietăților texturale și petrofizice, validarea comportamentului gazelor reale prin măsurători experimentale de densitate și, ulterior, cuantificarea pierderilor potențiale prin mecanisme difuzive.

Investigațiile experimentale asupra interacțiunilor hidrogen–rocă au fost realizate pe trei tipuri reprezentative de litologii: dolomit, calcar bogat în calcit și vaterit, respectiv rocă silicioasă dominată de cuarț. Probele au fost expuse la hidrogen la 100 bar și 70 °C timp de 100 de zile, simulând condiții realiste de rezervor. Strategia analitică a combinat difracția de raze X (XRD), microscopie electronică de baleiaj cu analiză EDS, determinări de porozitate și permeabilitate, precum și caracterizare texturală prin izoterme de adsorbție–desorbție a azotului (BET–BJH). Această integrare metodologică permite depășirea analizei descriptive și oferă o interpretare mecanistică a transformărilor induse de hidrogen.

Rezultatele evidențiază un comportament diferențiat în funcție de natura mineralogică a rocii. În cazul dolomitului, expunerea la hidrogen conduce la o reorganizare favorabilă a rețelei mezoporoase, reflectată prin creșterea suprafeței specifice BET, a volumului total al porilor și a diametrului mediu al porilor, concomitent cu o ușoară creștere a permeabilității. Analiza XRD indică diminuarea intensității unor reflexii caracteristice dolomitului și apariția indiciilor de transformări secundare, iar SEM–EDS evidențiază redistribuiri elementare compatibile cu procese de substituție cationică Fe–Mg și formarea fazelor carbonatice feruginoase. Interpretarea propusă de autor susține un mecanism de tip dizolvare–reprecipitare controlată, care conduce la îmbunătățirea conectivității porilor fără pierderea porozității globale. Această evoluție sugerează că formațiunile dolomitice pot deveni chiar mai favorabile injectivității în anumite condiții, cu condiția monitorizării evoluției geochimice pe termen lung.

În contrast, formațiunile calcitice manifestă un comportament nefavorabil. Reducerea capacității de adsorbție a azotului, scăderea suprafeței BET și a volumului de pori, diminuarea porozității și a permeabilității, precum și dispariția unor reflexii XRD indică dizolvare selectivă urmată de reprecipitare carbonatică secundară și colmatare a gâturilor de pori. Observațiile SEM confirmă fragmentarea suprafețelor cristaline și apariția microzonelor obturate. Din perspectivă operațională, acest comportament implică riscul reducerii injectivității și al degradării performanței pe termen lung în regimuri ciclice de injecție–extracție, sugerând că formațiunile predominant calcitice pot prezenta vulnerabilități în contextul UHS.

Rocile silicioase dominate de cuarț prezintă modificări minime după expunerea la hidrogen. Parametrii texturali și petrofizici rămân practic constanți, iar analizele XRD și SEM–EDS confirmă stabilitatea structurală și chimică a cuarțului. Această inertitate pronunțată recomandă formațiunile bogate în cuarț drept matrice gazdă robuste pentru stocarea subterană a hidrogenului, în special atunci când prioritatea este siguranța și predictibilitatea comportamentului pe termen lung.

Pe baza acestor rezultate, autorul formulează un criteriu esențial pentru selecția formațiunilor destinate UHS: evaluarea compatibilității nu trebuie fundamentată exclusiv pe parametri petrofizici inițiali, ci trebuie să includă direcția transformărilor induse de hidrogen asupra structurii și conectivității porilor. Astfel, litologia devine un factor determinant în performanța și stabilitatea depozitului subteran.

Extinderea analizei către comportamentul fazei gazoase a implicat măsurători experimentale de densitate pentru amestecuri gaz natural–hidrogen cu 5%, 15% și 30% H₂, în intervalul 10–180 bar și la temperaturi între 298,15 și 338,15 K. Datele obținute au fost utilizate pentru validarea a două ecuații de stare cubice consacrate: Soave–Redlich–Kwong (SRK) și Peng–Robinson (PR). Compararea valorilor experimentale cu predicțiile teoretice a arătat că modelul SRK oferă o concordanță superioară, în special pentru compoziția intermediară de 15% H₂, unde abaterile relative medii absolute sunt sub 0,3%. Acest rezultat sugerează existența unui echilibru favorabil între interacțiunile atractive și repulsive în această compoziție, indicând o stabilitate termodinamică optimă pentru amestecuri intermediare. Din perspectivă aplicativă, această validare experimentală oferă o bază solidă pentru simulări numerice de rezervor și pentru optimizarea compozițională a amestecurilor injectate.

Ultima etapă a capitolului este dedicată investigării difuziei hidrogenului prin caprock, considerată un mecanism critic pentru integritatea pe termen lung a depozitului. Experimentele realizate pe carote argiloase cu porozitate redusă și permeabilitate extrem de mică au evidențiat coeficienți de difuzie aparentă sub 10⁻¹² m²/s la presiuni ridicate. Analiza a fost fundamentată pe un model bazat pe legile lui Fick, extins prin integrarea potențialului chimic și a fugacității, pentru a surprinde comportamentul neideal al gazelor în regim HPHT. Rezultatele indică faptul că, deși hidrogenul are mobilitate moleculară ridicată, creșterea presiunii conduce la diminuarea semnificativă a difuzivității, iar pierderile cumulative pe intervale de timp de ordinul anilor sau deceniilor rămân reduse în condiții geologice adecvate. Această abordare, care corelează date experimentale cu un cadru teoretic avansat, permite estimarea realistă a riscurilor asociate etanșeității caprock-ului.

În ansamblu, capitolul demonstrează capacitatea autorului de a concepe și coordona un program de cercetare complex, integrând caracterizare mineralogică, analiză texturală, modelare termodinamică și evaluare a transportului difuziv într-un cadru unitar. Contribuția originală nu constă doar în obținerea unor rezultate experimentale noi, ci în construirea unei viziuni sistemice asupra stocării subterane a hidrogenului, în care structura rocii, comportamentul gazului și mecanismele de transport sunt analizate simultan și interpretate coerent. Această abordare multi-scară oferă criterii operaționale pentru selecția formațiunilor, pentru optimizarea compozițională a amestecurilor și pentru evaluarea riscurilor pe termen lung, consolidând relevanța academică și

industrială a cercetării și evidențiind maturitatea științifică necesară pentru coordonarea viitoare a unor direcții doctorale în domeniul ingineriei petrolului și gazelor.

Extinderea rezultatelor obținute în cadrul acestui capitol depășește nivelul unei contribuții experimentale punctuale și poziționează cercetarea autorului în contextul internațional actual al dezvoltării infrastructurilor pentru economia hidrogenului. În ultimii ani, înmagazinarea subterană a hidrogenului a devenit un subiect prioritar în agenda energetică europeană, fiind integrată în strategii naționale și în programe de cercetare finanțate la nivelul Uniunii Europene. În acest cadru, contribuțiile prezentate în acest capitol se aliniază direct cu direcțiile emergente privind evaluarea integrității geologice, modelarea comportamentului gazelor reale și cuantificarea pierderilor pe termen lung în sisteme UHS.

Publicarea rezultatelor privind interacțiunile hidrogen–rocă într-o revistă internațională indexată și dezvoltarea unui manuscris complementar dedicat modelării termodinamice și difuzive confirmă vizibilitatea și relevanța internațională a cercetării. În mod particular, abordarea experimentală HPHT combinată cu validarea ecuațiilor de stare și integrarea transportului difuziv într-un cadru bazat pe potențial chimic poziționează autorul într-o zonă de expertiză interdisciplinară, aflată la intersecția dintre geochimie, inginerie de rezervor și termodinamică aplicată.

Poziționarea personală a autorului în acest domeniu se bazează pe trei elemente definitorii. În primul rând, capacitatea de a dezvolta infrastructură experimentală adecvată regimurilor HPHT și de a genera date primare, esențiale pentru validarea modelelor teoretice. În al doilea rând, competența în integrarea modelării termodinamice cu interpretarea experimentală, evitând utilizarea necritică a modelelor standard și fundamentând alegerea ecuațiilor de stare pe baze statistice și fizice. În al treilea rând, abordarea sistemică adoptată, care corelează comportamentul rocii cu dinamica gazului și cu mecanismele de transport prin caprock, oferind o perspectivă coerentă asupra performanței globale a sistemului de stocare.

Această poziționare permite dezvoltarea unei direcții doctorale moderne în cadrul ingineriei petrolului și gazelor, centrată pe tema stocării subterane a gazelor energetice și pe integrarea metodelor experimentale avansate cu modelarea numerică și analiza de risc. Capitolul demonstrează nu doar capacitatea autorului de a conduce cercetări complexe, ci și potențialul de a coordona proiecte interdisciplinare și de a forma cercetători capabili să opereze simultan la nivel mineralogic, petrofizic și termodinamic.

Din perspectivă industrială, rezultatele oferă criterii operaționale pentru selecția formațiunilor destinate UHS, pentru alegerea compoziției optime a amestecurilor H_2-CH_4 și pentru evaluarea integrității caprock-ului în condiții de presiune ridicată. Astfel, cercetarea are aplicabilitate directă pentru operatorii de depozite subterane și pentru companiile implicate în tranziția către amestecuri de gaze cu conținut de hidrogen, contribuind la fundamentarea deciziilor tehnice pe baze experimentale solide.

În contextul european actual, în care securitatea energetică și reducerea emisiilor de carbon reprezintă priorități strategice, dezvoltarea unor metodologii validate experimental pentru evaluarea stocării subterane a hidrogenului capătă o importanță critică. Prin contribuțiile prezentate în acest capitol, autorul demonstrează capacitatea de a participa activ la această tranziție, furnizând rezultate care reduc incertitudinile asociate comportamentului hidrogenului în medii geologice complexe.

În concluzie, impactul internațional al cercetării nu derivă exclusiv din publicarea rezultatelor, ci din valoarea metodologică a cadrului propus. Integrarea coerentă a analizei mineralogice, a caracterizării texturale, a modelării gazelor reale și a evaluării transportului difuziv constituie o contribuție științifică originală, care consolidează poziționarea autorului ca specialist în domeniul stocării subterane a gazelor energetice și justifică pe deplin capacitatea sa de a coordona activități doctorale și proiecte de cercetare avansate în acest domeniu.

SIMULARE NUMERICĂ PENTRU OPTIMIZAREA STOCĂRII SUBTERANE A GAZELOR ÎN ZĂCĂMINTE DEPLETATE (CH_4 , CO_2 , H_2)

Modelarea numerică avansată a proceselor de înmagazinare subterană a gazelor în zăcăminte depletate reprezintă un instrument esențial pentru fundamentarea deciziilor operaționale în contextul tranziției energetice. Spre deosebire de abordările clasice, limitate la analiza unui singur tip de gaz sau la simulări orientate exclusiv către evoluția presiunii, contribuția autorului în cadrul acestui capitol constă în dezvoltarea unui cadru unitar de simulare comparativă aplicat simultan metanului (CH_4), dioxidului de carbon (CO_2) și hidrogenului (H_2), în condiții identice de geometrie, parametri petrofizici și constrângeri operaționale. Această strategie metodologică permite separarea clară a efectului proprietăților fizice ale gazului de influența infrastructurii și a regimului de operare.

Demersul științific este fundamentat pe utilizarea datelor reale furnizate de operatorii depozitelor subterane, ceea ce conferă modelării un caracter aplicativ direct. Rezervorul analizat

este tratat ca unitate hidrodinamică unică, cu geometrie de tip dom alungit, discretizat într-o rețea numerică bidimensională de aproximativ 16.000 de celule. Alegerea unei reprezentări 2D nu constituie o simplificare arbitrară, ci o opțiune metodologică asumată, menită să permită comparații robuste între scenarii și între gaze, menținând în același timp ancorarea în realitatea geologică și operațională. În acest cadru, toate simulările utilizează aceleași condiții inițiale, aceleași condiții la limită și aceleași valori medii de porozitate și permeabilitate, astfel încât diferențele observate să fie atribuite exclusiv comportamentului gazului și strategiei de injecție.

Formularea matematică integrează ecuația de continuitate, legea lui Darcy pentru gaz real și ecuații de stare adecvate, implementate prin scheme numerice stabile și eficiente. Modelul include actualizarea compozițională la nivel de celulă, permițând analiza redistribuirii volumetrică a gazelor în regim de injecție continuă și în regim ciclic (injecție–repaus–reinjecție). Această integrare depășește nivelul simulărilor descriptive și introduce o dimensiune „decision-oriented”, în care rezultatele sunt utilizate pentru optimizarea amplasării sondelor, a debitelor și a duratei fazelor operaționale.

În cazul stocării gazului natural (CH_4), simulările evidențiază caracterul predominant convectiv al procesului. Distribuția presiunii în rezervor este puternic influențată de poziționarea sondelor și de viteza redusă de filtrare în mediul poros. În configurația inițială, acumularea gazului este neuniformă, iar perioadele de repaus nu sunt suficiente pentru a compensa zonele deficitare. Introducerea strategică a sondelor suplimentare în ariile slab încărcate conduce la o uniformizare progresivă a câmpului de presiune și la o creștere semnificativă a volumului total injectat. Diferența de presiune medie între rezervor și sonde se reduce, iar volumul cumulativ injectat crește considerabil, demonstrând că pentru CH_4 performanța este controlată preponderent de infrastructura de injecție și de geometria rețelei de sonde.

În cazul stocării CO_2 , comportamentul sistemului devine mai complex. Deși mecanismul convectiv rămâne dominant, se manifestă și o componentă difuzivă moderată, iar distribuția concentrației de CO_2 în rezervor evidențiază acumulări pronunțate în proximitatea sondelor. Simulările arată că injecția continuă conduce la supra-presiuni locale și la utilizarea ineficientă a unor volume semnificative ale zăcămintului. Introducerea perioadelor de repaus permite redistribuirea progresivă a presiunii și migrarea CO_2 către zonele adiacente, însă procesul este lent și dependent de proprietățile petrofizice ale formațiunii. Rezultatele confirmă că pentru CO_2 eficiența stocării nu este definită doar de volumul injectat, ci de distribuția spațială a gazului în

rezervor. Injecția intermitentă devine astfel o pârghie operațională reală, capabilă să îmbunătățească uniformitatea încărcării și să reducă riscurile asociate acumulărilor locale.

Pentru hidrogen (H_2), dinamica este fundamental diferită, datorită masei moleculare reduse și mobilității ridicate. Simulările arată că în regim de injecție continuă presiunea medie în rezervor crește stabil și progresiv, în timp ce presiunea la nivelul sondelor atinge rapid valori ridicate, indicând o rezistență locală la injecție. Diferența persistentă între presiunea în sonde și cea din rezervor devine un indicator critic al riscului de supra-presurizare. Introducerea perioadelor de relaxare modifică semnificativ comportamentul sistemului: relaxările scurte conduc la redistribuire limitată, menținând saturații ridicate în jurul sondelor, în timp ce relaxările de durată mai mare favorizează difuzia volumetrică și conduc la o distribuție mult mai uniformă a hidrogenului în masa rezervorului. Astfel, pentru H_2 , performanța este controlată simultan de mobilitatea moleculară și de regimul ciclic de operare, iar integrarea fazelor de repaus devine esențială pentru siguranță și eficiență.

Analiza comparativă a celor trei gaze permite formularea unor concluzii generale. Metanul este stabil și previzibil, iar optimizarea este predominant structurală. CO_2 necesită control operațional adaptativ pentru a preveni acumulările locale. Hidrogenul impune o abordare integrată convectiv-difuzivă și un control strict al ciclurilor de injecție-relaxare. În toate cazurile, modelarea numerică demonstrează că eficiența stocării este determinată de interacțiunea complexă dintre proprietățile gazului, parametrii petrofizici și strategia de operare.

Contribuția originală a autorului constă în dezvoltarea acestui cadru comparativ unificat și în utilizarea simulării numerice ca instrument de decizie operațională. Capitolul nu se limitează la prezentarea distribuțiilor de presiune și saturație, ci transformă rezultatele în criterii concrete pentru amplasarea sondelor, definirea debitelor optime și stabilirea duratei fazelor de repaus. Această abordare integrată conferă modelării un rol strategic în proiectarea și operarea depozitelor subterane, consolidând poziționarea autorului ca specialist în optimizarea numerică a sistemelor de înmagazinare a gazelor energetice.

Prin coerența metodologică, ancorarea în date reale și analiza comparativă multi-gaz, Capitolul 3 demonstrează maturitatea științifică a autorului și capacitatea acestuia de a coordona cercetări interdisciplinare la interfața dintre ingineria de rezervor, termodinamică aplicată și analiză numerică avansată.

Extinderea rezultatelor obținute în cadrul acestui capitol plasează cercetarea autorului în centrul dezbaterilor internaționale privind optimizarea stocării subterane a gazelor în contextul tranziției energetice și al decarbonizării. Publicarea rezultatelor în reviste internaționale indexate și participarea la dezvoltarea de instrumente software dedicate stocării CO₂ și modelării transportului hidrogenului confirmă vizibilitatea și relevanța științifică a activității desfășurate.

Poziționarea personală a autorului se bazează pe capacitatea de a integra modelarea numerică avansată cu date reale de exploatare și cu scenarii operaționale realiste, depășind nivelul simulărilor teoretice abstracte. Autorul propune o paradigmă „multi-gaz, un singur cadru numeric”, care permite evaluarea comparativă a CH₄, CO₂ și H₂ în condiții identice și fundamentarea deciziilor tehnice pe baze cantitative solide. Această abordare oferă un avantaj competitiv în dezvoltarea proiectelor interdisciplinare și în coordonarea temelor doctorale orientate spre optimizarea depozitelor subterane.

În context european, unde infrastructura existentă de stocare a gazelor naturale este analizată pentru adaptarea la amestecuri cu hidrogen și pentru integrarea proceselor CCUS, contribuțiile prezentate în acest capitol au aplicabilitate directă. Metodologia dezvoltată poate fi extinsă către modele tridimensionale, analize tehnico-economice și evaluări de risc integrate, deschizând direcții clare pentru cercetări viitoare și pentru consolidarea unui grup de cercetare dedicat simulării numerice a sistemelor energetice subterane.

Prin caracterul comparativ, orientarea spre decizie și integrarea coerentă a celor trei tipuri de gaze, Capitolul 3 consolidează poziționarea autorului ca expert în modelarea numerică aplicată înmagazinării subterane și justifică pe deplin capacitatea sa de a coordona cercetări doctorale și proiecte avansate în domeniul ingineriei petrolului și gazelor.

DEZVOLTAREA ȘI CARACTERIZAREA AVANSATĂ A NANOMATERIALELOR FUNCȚIONALE PENTRU FLUIDE DE FORAJ ȘI APLICAȚII ENERGETICE

Dezvoltarea nanomaterialelor funcționale pentru aplicații în ingineria petrolului și gazelor reprezintă o direcție strategică aflată la intersecția dintre știința materialelor, chimia aplicată și tehnologia fluidelor de foraj. În contextul exploatării formațiunilor argiloase reactive și al necesității reducerii impactului asupra mediului, optimizarea fluidelor de foraj pe bază de apă prin integrarea nanomaterialelor avansate devine o prioritate tehnologică. Capitolul de față reflectă contribuția originală a autorului în dezvoltarea, caracterizarea și evaluarea performanței unor

nanostructuri oxidice (ZnO, MgO, Fe₂O₃, CuO și sisteme compozite), integrate în fluide de foraj pentru îmbunătățirea stabilității șisturilor și controlul proprietăților reologice.

Abordarea metodologică adoptată este una integrată, pornind de la sinteza controlată a nanoparticulelor, continuând cu caracterizarea structurală și morfologică avansată și culminând cu evaluarea funcțională în sisteme reale de fluide de foraj. Spre deosebire de studiile care se limitează la evaluări empirice ale performanței, autorul a construit o secvență logică material–structură–proprietate–performanță, demonstrând că eficiența inhibiției șisturilor și stabilitatea reologică sunt direct dependente de dimensiunea particulelor, distribuția granulometrică, suprafața specifică și starea de agregare în suspensie.

Sinteza nanoparticulelor a fost realizată prin metode controlate, adaptate fiecărui tip de oxid, cu optimizarea parametrilor de precipitare, pH, temperatură și tratament termic. Analizele XRD au confirmat obținerea fazelor cristaline dorite, iar lărgirea maximelor de difracție a fost utilizată pentru estimarea dimensiunii cristalitelor la scară nanometrică. Corelarea dintre parametrii de sinteză și dimensiunea cristalitelor a permis ajustarea controlată a proprietăților structurale. Analizele SEM și TEM au evidențiat morfologii variabile – particule sferice, agregate poroase sau structuri tip „flower-like” – fiecare având impact diferit asupra interacțiunii cu particulele de argilă.

Caracterizarea în suspensie a fost realizată prin Dynamic Light Scattering (DLS), oferind informații asupra dimensiunii hidrodinamice și gradului de aglomerare. Această etapă este esențială, întrucât performanța nanoparticulelor în fluidele de foraj depinde de stabilitatea dispersiei și de capacitatea de a penetra micro- și nanoporozitățile șisturilor. Autorul a demonstrat că diferența dintre dimensiunea cristalitelor (XRD) și dimensiunea hidrodinamică (DLS) poate influența direct comportamentul reologic și eficiența inhibiției.

Integrarea nanoparticulelor în fluide de foraj pe bază de apă a fost realizată conform standardelor API pentru testarea fluidelor. Parametrii reologici – vâscozitate aparentă, vâscozitate plastică, yield point – au fost determinați înainte și după introducerea nanomaterialelor. Rezultatele arată că anumite concentrații optime conduc la stabilizarea structurii coloidale, reducerea filtrării și îmbunătățirea comportamentului pseudoplastic al fluidului. În plus, testele de inhibiție a hidratării șisturilor indică o reducere semnificativă a umflării argilelor în prezența nanoparticulelor oxidice, efect atribuit atât mecanismelor electrostatice, cât și interacțiunilor de suprafață la nivel molecular.

Pentru ZnO și MgO, mecanismul dominant este asociat cu modificarea sarcinii de suprafață și blocarea spațiilor interlamelare ale mineralelor argiloase. În cazul Fe₂O₃ și CuO, efectul este completat de interacțiuni suplimentare la interfața solid–lichid, care contribuie la consolidarea structurii coloidale a fluidului. Autorul evidențiază că eficiența maximă nu este obținută la concentrații ridicate, ci la niveluri moderate, unde echilibrul între stabilitatea dispersiei și interacțiunea cu faza solidă este optim.

O contribuție distinctă constă în corelarea proprietăților structurale ale nanoparticulelor cu performanța inhibitoare în sisturi reactive. Analizele XRD asupra argilelor tratate arată reducerea distanței interplanare caracteristice hidratării, confirmând penetrarea și stabilizarea interlamelară. Testele de umflare și analiza variației volumetrice demonstrează o îmbunătățire semnificativă a stabilității formațiunii, comparativ cu fluidele convenționale.

Capitolul evidențiază și potențialul extinderii aplicațiilor către alte domenii energetice, inclusiv utilizarea nanomaterialelor în procese catalitice și sisteme de conversie energetică. Sinteza și caracterizarea avansată a oxidului de staniu-ferită sau a altor structuri nanoarhitecturale demonstrează capacitatea autorului de a opera la interfața dintre nanotehnologie și ingineria proceselor.

Prin integrarea etapelor de sinteză, caracterizare și evaluare funcțională, autorul construiește un cadru coerent pentru dezvoltarea fluidelor inteligente („smart drilling fluids”), adaptate condițiilor HPHT și formațiunilor argiloase complexe. Abordarea este orientată nu doar către îmbunătățirea performanței tehnice, ci și către reducerea impactului asupra mediului, prin utilizarea sistemelor pe bază de apă și limitarea aditivilor chimici convenționali agresivi.

În ansamblu, capitolul demonstrează maturitatea științifică a autorului în domeniul nanomaterialelor aplicate, capacitatea de a integra caracterizarea avansată cu testarea funcțională și de a transforma rezultatele experimentale în criterii tehnologice aplicabile. Contribuția originală constă în dezvoltarea unei relații fundamentate științific între structura nanometrică și performanța fluidelor de foraj, oferind o bază solidă pentru proiecte viitoare și coordonarea activităților doctorale în domeniul nanotehnologiilor aplicate în energie.

Activitatea prezentată în acest capitol poziționează autorul în domeniul emergent al nanotehnologiilor aplicate în industria petrolului și gazelor, un sector în care cerințele de performanță tehnică sunt corelate tot mai strâns cu criterii de sustenabilitate și eficiență energetică.

Publicarea rezultatelor în reviste internaționale și dezvoltarea de sisteme nano-oxidice pentru inhibiția șisturilor confirmă vizibilitatea și relevanța cercetării la nivel global.

Poziționarea personală a autorului derivă din capacitatea de a integra sinteza chimică, caracterizarea avansată și testarea în condiții industriale reale, depășind fragmentarea tradițională dintre știința materialelor și ingineria aplicată. Autorul dezvoltă o platformă de cercetare care poate fi extinsă către aplicații în cataliză, conversie energetică și materiale funcționale pentru procese sustenabile, consolidând astfel un profil interdisciplinar solid.

În contextul actual, în care industria petrolului și gazelor caută soluții inovatoare pentru reducerea impactului asupra mediului și creșterea eficienței operaționale, contribuțiile prezentate oferă un model de integrare între cercetarea fundamentală și aplicabilitatea industrială. Această poziționare justifică pe deplin capacitatea autorului de a coordona direcții doctorale și proiecte de cercetare avansate în domeniul nanomaterialelor pentru aplicații energetice.

VIZIUNE STRATEGICĂ ȘI DIRECȚII DE DEZVOLTARE 2026–2035 ÎN INGINERIA PETROLULUI ȘI GAZELOR

Cercetările prezentate în această teză de abilitare definesc o direcție științifică integrată, situată la intersecția dintre caracterizarea materialelor, modelarea numerică și optimizarea proceselor energetice subterane. În contextul tranziției energetice europene și al integrării hidrogenului în infrastructura existentă, ingineria petrolului și gazelor trebuie redefinită ca domeniu orientat către gestionarea sustenabilă a fluxurilor energetice și dezvoltarea soluțiilor tehnologice pentru decarbonizare.

Viziunea strategică pentru perioada 2026–2035 se bazează pe consolidarea conceptului material–proces–mediu, prin integrarea studiilor experimentale asupra interacțiunilor gaz–rocă cu simularea numerică avansată și dezvoltarea materialelor funcționale. O direcție prioritară o reprezintă extinderea cercetărilor privind stocarea subterană a hidrogenului și a sistemelor multi-gaz, prin modele tridimensionale predictive capabile să includă simultan procese convective, difuzive și efecte geochimice pe termen lung.

În paralel, optimizarea numerică a infrastructurii de stocare existente va permite conversia depozitelor convenționale în sisteme hibride adaptate amestecurilor H_2-CH_4 și aplicațiilor CCUS. Simularea va fi utilizată ca instrument decizional strategic pentru amplasarea sondelor, definirea ciclurilor de injecție și evaluarea riscurilor operaționale.

O altă direcție majoră vizează dezvoltarea nanomaterialelor funcționale pentru fluide de foraj și aplicații energetice avansate, cu accent pe sinteza controlată, corelarea structurii nanometrice cu performanța tehnologică și integrarea metodelor moderne de optimizare.

Prin aceste direcții, autorul propune formarea unei platforme doctorale interdisciplinare, capabile să integreze experimentul cu modelarea și dezvoltarea materialelor avansate, contribuind la consolidarea poziționării internaționale și la transferul tehnologic către industrie. În ansamblu, strategia 2026–2035 urmărește construirea unei direcții științifice coerente și sustenabile, cu impact direct în modernizarea infrastructurii energetice și în susținerea tranziției către un sistem energetic decarbonizat.