



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



REZUMAT

TEZĂ DE ABILITARE

**Contribuții la analiza consumurilor tehnologice în sistemele energetice bazate
pe gaze naturale și integrarea hidrogenului și a stocării geologice a CO₂
pentru reducerea emisiilor**

Conf. Dr. Ing. Iuliana Veronica Ghețiu

Ploiești 2026

Fundamentarea și modelarea consumurilor tehnologice disimulate în sistemele de gaze naturale

Capitolul al doilea al tezei este dedicat fundamentării, dezvoltării și validării unui model metodologic integrat pentru identificarea, cuantificarea și certificarea consumurilor tehnologice în infrastructura de producție, tratare și transport a gazelor naturale. Cercetările prezentate în acest capitol pornesc de la premisa că o parte semnificativă a gazelor naturale produse nu ajunge în circuitul comercial, fiind utilizată în procese tehnologice interne sau pierdută prin mecanisme specifice funcționării instalațiilor industriale. Aceste volume sunt definite în mod generic drept consumuri tehnologice, însă în practica industrială ele sunt frecvent tratate simplificat, prin estimări procentuale sau prin abordări contabile, fără o fundamentare inginerescă riguroasă a mecanismelor fizice care le generează.

În acest context, contribuția științifică a capitolului constă în dezvoltarea unui cadru metodologic coerent care permite transformarea consumurilor tehnologice din indicatori globali aproximați în mărimi cuantificabile analitic, corelate direct cu procesele fizice și cu structura tehnologică a instalațiilor energetice. Abordarea propusă se bazează pe integrarea principiilor de bilanț volumetric și energetic, pe modelarea mecanismelor fizice responsabile de apariția consumurilor tehnologice și pe validarea rezultatelor prin studii de caz realizate în infrastructuri industriale reale din sectorul gazelor naturale.

Prima parte a capitolului este dedicată fundamentării conceptuale a consumurilor tehnologice disimulate în sistemele de producție și procesare a gazelor naturale. Analiza pornește de la observația că infrastructura energetică modernă reprezintă un sistem complex de procese interdependente, în care apar multiple transformări termodinamice, mecanice și chimice ale fluidelor. În aceste condiții, o parte a gazelor naturale este utilizată direct pentru funcționarea echipamentelor tehnologice, în timp ce alte volume sunt afectate de procese precum expansiunea gazelor, condensarea hidrocarburilor, corecțiile volumetrice sau pierderile prin emisii fugitive. În absența unei metodologii unificate de evaluare, aceste mecanisme sunt adesea contabilizate fragmentat sau incluse implicit în balanțele tehnologice ale operatorilor.

Pornind de la această problemă, capitolul propune o abordare sistemică a consumurilor tehnologice, în care acestea sunt tratate ca rezultat al interacțiunii dintre fluxurile energetice și configurația tehnologică a instalațiilor. Modelul dezvoltat permite identificarea punctelor

potențiale de generare a consumurilor în cadrul lanțului tehnologic, de la sondă până la instalațiile de procesare și transport, și cuantificarea volumelor asociate fiecărui subsistem.

În continuare, metodologia este aplicată pentru analiza consumurilor tehnologice în diferite configurații industriale, începând cu sistemele de separare a gazelor naturale. Modelarea consumurilor într-un parc de separatoare reprezintă unul dintre primele studii de caz analizate, deoarece aceste instalații constituie elemente esențiale ale infrastructurii de producție. Abordarea metodologică propusă presupune descompunerea instalației în subsisteme funcționale și evaluarea consumurilor asociate fiecărei componente tehnologice. Rezultatele obținute evidențiază faptul că nivelul consumurilor tehnologice este determinat nu doar de parametrii operaționali ai instalației, ci și de complexitatea arhitecturii tehnologice și de numărul echipamentelor implicate în procesul de tratare a gazelor.

Extinderea analizei către traseul dintre sondă și parcul de separatoare a permis evaluarea consumurilor tehnologice generate în rețelele de conducte și în echipamentele auxiliare asociate acestora. Modelul dezvoltat integrează procese precum variațiile de presiune, modificările de temperatură și interacțiunea dintre fazele fluidelor, demonstrând că aceste fenomene contribuie la apariția unor consumuri tehnologice dificil de observat prin metodele clasice de monitorizare.

Un alt domeniu analizat îl reprezintă instalațiile de separare a gazelor asociate cu țițeiul, unde procesele de amestecare, separare și stabilizare a fazelor conduc la apariția unor mecanisme suplimentare de consum tehnologic. Prin modelarea fluxurilor de fluide și prin integrarea parametrilor operaționali ai instalațiilor, studiul evidențiază modul în care caracteristicile fizice ale hidrocarburilor influențează nivelul consumurilor tehnologice în aceste sisteme.

Metodologia este aplicată ulterior în analiza conductelor de distribuție a gazelor naturale, unde consumurile tehnologice sunt generate în principal de procesele de echilibrare a presiunii, de variațiile de temperatură și de pierderile asociate echipamentelor de reglare și control. Rezultatele arată că, deși procentul pierderilor raportat la debitul total al conductei poate părea redus, aceste volume devin semnificative atunci când sunt analizate la scară regională sau națională.

Capitolul continuă cu analiza consumurilor tehnologice în instalații complexe de procesare a gazelor naturale, precum instalațiile de uscare și dezbenzinare. În aceste sisteme, consumurile tehnologice sunt generate de procesele termice necesare regenerării agenților de absorbție sau de fracționării hidrocarburilor. Modelarea acestor procese a permis identificarea mecanismelor

dominante de consum și evaluarea contribuției fiecărei etape tehnologice la bilanțul energetic global al instalației.

Pe baza acestor analize, capitolul dezvoltă o metodologie generală de certificare a consumurilor tehnologice, care integrează atât consumurile directe de energie, cât și corecțiile volumetrice și emisiile fugitive. Un element esențial al acestei metodologii îl constituie diferențierea conceptuală între consumurile tehnologice reale și corecțiile necesare pentru adaptarea volumelor de gaze la condițiile standard de raportare. Această distincție permite evitarea supraestimării consumurilor și asigură o evaluare corectă a performanței energetice a instalațiilor.

Metodologia propusă este validată prin aplicarea sa în cadrul unor operatori industriali din sectorul gazelor naturale. Prima validare complexă a fost realizată în cadrul operatorului Amromco Energy, unde modelul dezvoltat a fost utilizat pentru analiza consumurilor tehnologice în mai multe locuri de producție. Implementarea metodologiei a implicat cartografierea detaliată a instalațiilor, identificarea echipamentelor generatoare de consum și integrarea datelor operaționale în modelul de calcul.

Studiile de caz realizate pentru diferite sectoare de producție au demonstrat că nivelul consumurilor tehnologice este puternic influențat de configurația instalațiilor și de procesele tehnologice utilizate. În sectoarele caracterizate prin existența sistemelor de comprimare și a instalațiilor de uscare a gazelor, consumurile tehnologice sunt dominate de energia necesară funcționării compresoarelor și a sistemelor termice. În schimb, în sectoarele cu infrastructură tehnologică simplificată, consumurile sunt determinate în principal de procesele de transport și de corecțiile volumetrice.

Pentru a demonstra caracterul generalizabil al metodologiei, aceasta a fost aplicată și în cadrul operatorului Dacian Petroleum, unde infrastructura tehnologică prezintă caracteristici diferite față de cea analizată anterior. Analiza comparativă a acestor sisteme a evidențiat faptul că modelul dezvoltat nu este dependent de configurația specifică a instalațiilor, ci poate fi aplicat în mod coerent în infrastructuri energetice diverse.

Un rezultat important al cercetării îl constituie identificarea relației directe dintre complexitatea tehnologică a instalațiilor și nivelul consumurilor tehnologice. Analizele realizate arată că procesele de comprimare, încălzire și regenerare a agenților tehnologici reprezintă principalii generatori de consum energetic în infrastructura de gaze naturale. În același timp,

procesele de corecție volumetrică și emisiile fugitive contribuie la diferențele dintre volumele produse și cele comercializate.

Din punct de vedere metodologic, capitolul demonstrează că evaluarea consumurilor tehnologice trebuie realizată printr-o abordare integrată, care să combine analiza inginerescă a proceselor tehnologice cu metodele de bilanț volumetric și energetic. Această abordare permite nu doar cuantificarea consumurilor, ci și identificarea zonelor cu potențial de optimizare operațională și de reducere a pierderilor energetice.

Prin urmare, capitolul configurează un cadru metodologic complet pentru evaluarea consumurilor tehnologice în infrastructura de gaze naturale, demonstrând că acestea pot fi modelate și cuantificate printr-o analiză riguroasă a proceselor tehnologice. Rezultatele obținute contribuie la dezvoltarea unor instrumente de analiză utile atât pentru operatorii industriali, cât și pentru autoritățile de reglementare, în contextul creșterii importanței eficienței energetice și al reducerii emisiilor asociate sectorului hidrocarburilor.

În concluzie, cercetările prezentate în acest capitol evidențiază faptul că evaluarea consumurilor tehnologice reprezintă un element esențial în managementul energetic al infrastructurii de gaze naturale. Prin dezvoltarea unui model metodologic integrat și prin validarea acestuia în condiții industriale reale, capitolul demonstrează că o analiză riguroasă a consumurilor tehnologice poate contribui semnificativ la îmbunătățirea eficienței energetice și la optimizarea funcționării sistemelor de producție și procesare a gazelor naturale.

Evaluarea și modelarea emisiilor atmosferice provenite din surse staționare în instalațiile petroliere

Capitolul al treilea al tezei este dedicat evaluării și modelării emisiilor atmosferice generate de surse staționare în instalațiile petroliere și de gaze, cu accent asupra proceselor de evacuare și ardere a gazelor reziduale în sistemele de flaring. Cercetările prezentate în acest capitol urmăresc dezvoltarea unei metodologii integrate pentru analiza fenomenelor termice, aerodinamice și chimice care caracterizează procesele de combustie și dispersie a poluanților în atmosferă. Abordarea propusă are ca obiectiv principal cuantificarea impactului acestor procese asupra calității aerului și evaluarea condițiilor de siguranță operațională asociate funcționării instalațiilor industriale din sectorul petrolier.

Analiza pornește de la rolul fundamental al sistemelor de flare în infrastructura de producție și procesare a hidrocarburilor. În cadrul instalațiilor petroliere moderne, faclele reprezintă elemente esențiale pentru evacuarea controlată a gazelor excedentare rezultate în timpul funcționării normale a instalațiilor, în timpul operațiunilor de pornire sau oprire, precum și în situații de avarie sau de descărcare de siguranță a echipamentelor sub presiune. Prin arderea controlată a acestor gaze se previne acumularea unor cantități periculoase de combustibil în instalații și se reduce impactul potențial asupra mediului și asupra siguranței operaționale.

În acest context, dimensionarea corectă a sistemelor de flaring și evaluarea impactului emisiilor generate constituie o etapă esențială în proiectarea și operarea instalațiilor petroliere. Capitolul dezvoltă o metodologie complexă de analiză care integrează determinarea parametrilor termici ai arderii gazelor, dimensionarea geometrică a instalațiilor de flare, evaluarea radiației termice generate de flacăra și modelarea dispersiei poluanților în atmosferă.

Prima etapă a cercetării este dedicată caracterizării surselor staționare de emisii atmosferice din instalațiile petroliere. Aceste surse sunt reprezentate în principal de instalațiile de ardere controlată a gazelor, de sistemele de ventilare și de echipamentele de evacuare a gazelor sub presiune. Analiza acestor surse evidențiază faptul că procesele de evacuare și ardere sunt caracterizate printr-o interacțiune complexă între parametrii termodinamici ai gazelor, caracteristicile constructive ale instalațiilor și condițiile atmosferice locale.

Un element central al metodologiei dezvoltate îl reprezintă determinarea parametrilor termici ai procesului de ardere. Energia eliberată în timpul combustiei gazelor evacuate determină caracteristicile flăcării și influențează atât distribuția radiației termice în jurul instalației, cât și formarea produselor de ardere și a poluanților atmosferici. Evaluarea acestor parametri se bazează pe analiza compoziției gazelor combustibile, pe determinarea puterii calorifice a componentelor și pe calculul fluxului termic total generat în procesul de combustie.

Rezultatele obținute permit estimarea energiei termice eliberate de flacăra faclei și constituie baza pentru evaluarea parametrilor geometrici ai flăcării. Această etapă este esențială pentru dimensionarea instalației și pentru determinarea zonei de radiație termică care poate afecta echipamentele tehnologice și personalul aflat în proximitatea instalației.

În continuare, cercetarea analizează procesul de dimensionare geometrică a faclelor utilizate în instalațiile petroliere. Un parametru fundamental în proiectarea acestor sisteme este diametrul arzătorului, care influențează viteza de evacuare a gazelor, stabilitatea jetului de

combustibil și caracteristicile flăcării. Dimensionarea diametrului faclei se realizează utilizând relații empirice și semi-empirice dezvoltate în literatura de specialitate și în ghidurile tehnice elaborate de organisme internaționale de reglementare.

Analiza comparativă a acestor metodologii evidențiază faptul că majoritatea relațiilor de calcul corelează dimensiunile instalației cu fluxul energetic al gazelor arse și cu debitul de gaz evacuat. Creșterea debitului de gaz conduce la creșterea diametrului necesar al arzătorului pentru menținerea unui regim stabil de curgere și pentru prevenirea fenomenelor nedorite, precum instabilitatea flăcării sau formarea fumului.

Un alt parametru important analizat în capitol este lungimea flăcării și deviația acesteia sub acțiunea condițiilor atmosferice. În condiții reale de exploatare, forma flăcării nu este determinată exclusiv de parametrii jetului de gaz, ci este influențată semnificativ de viteza și direcția vântului. Acțiunea vântului produce deformarea jetului de gaz și conduce la apariția unor deviații ale flăcării atât pe direcția verticală, cât și pe direcția orizontală. Determinarea acestor deviații este esențială pentru evaluarea radiației termice și pentru stabilirea distanțelor de siguranță în exploatarea instalațiilor.

În paralel cu analiza parametrilor geometrici ai flăcării, capitolul dezvoltă o metodologie pentru determinarea parametrilor jetului de gaz evacuat. Debitul volumic al gazului și viteza acestuia la ieșirea din arzător reprezintă parametri esențiali pentru stabilitatea procesului de ardere. O viteză insuficientă poate conduce la instabilitatea flăcării și la arderea incompletă a combustibilului, în timp ce o viteză excesivă poate genera turbulențe intense și creșterea lungimii flăcării. Prin urmare, determinarea corectă a acestor parametri este esențială pentru funcționarea sigură și eficientă a instalațiilor de flaring.

Pe baza parametrilor termici și geometrici determinați, cercetarea analizează distribuția radiației termice generate de flacăra faclei. Energia eliberată în procesul de combustie este transmisă parțial sub formă de radiație către mediul înconjurător, iar nivelul acesteia trebuie menținut sub valorile admisibile pentru a asigura protecția echipamentelor și siguranța personalului. Determinarea distanței de expunere termică și a înălțimii optime a faclei reprezintă o etapă esențială în proiectarea instalațiilor industriale.

În etapa următoare, capitolul abordează evaluarea emisiilor atmosferice generate de procesele de flaring și ventilare. Estimarea cantităților de poluanți evacuați în atmosferă se realizează utilizând metodologii standardizate bazate pe factori de emisie. Acești factori permit

corelarea cantității de combustibil consumat sau a energiei eliberate în procesul de combustie cu cantitatea de poluanți generați.

Principalii poluanți analizați includ oxizii de azot, monoxidul de carbon, compușii organici volatili și particulele în suspensie. Acești compuși sunt generați în principal ca rezultat al proceselor de combustie incompletă a hidrocarburilor sau al reacțiilor chimice care au loc la temperaturi ridicate în timpul arderii.

Pentru evaluarea impactului emisiilor asupra mediului atmosferic, capitolul dezvoltă un model de dispersie a poluanților bazat pe modelul gaussian al penei de fum. Acest model matematic descrie distribuția spațială a concentrației de poluant în atmosferă în funcție de distanța față de sursă, viteza vântului și parametri de dispersie atmosferică.

Integrarea modelului gaussian în cadrul metodologiei de analiză permite estimarea concentrațiilor maxime de poluanți la nivelul solului și evaluarea conformității instalațiilor industriale cu standardele de calitate a aerului stabilite prin legislația de mediu. Modelul evidențiază faptul că concentrația maximă a poluanților apare la o anumită distanță față de sursă, corespunzătoare punctului în care axa penei de dispersie intersectează nivelul solului.

Un rol important în procesul de dispersie îl joacă stabilitatea atmosferică, care influențează gradul de amestecare a aerului și distribuția poluanților în atmosferă. Clasificarea stabilității atmosferice conform sistemului Pasquill–Gifford permite caracterizarea condițiilor meteorologice și determinarea coeficienților de dispersie utilizați în modelarea procesului de transport al poluanților.

Pe baza acestor parametri, capitolul analizează distribuția tridimensională a concentrațiilor de poluanți în atmosferă și evidențiază modul în care condițiile meteorologice influențează procesul de diluție și transport al poluanților. În condiții atmosferice instabile, dispersia poluanților este intensificată datorită turbulenței ridicate, în timp ce în condiții stabile poluanții pot rămâne concentrați în apropierea sursei de emisie.

Un aspect important al cercetării îl reprezintă evaluarea riscului de explozie asociat evacuării gazelor combustibile. Analiza este realizată prin compararea concentrației calculate a gazului în atmosferă cu limitele de inflamabilitate ale amestecului gaz–aer. Pentru metan, domeniul de inflamabilitate este delimitat de limita inferioară de explozie și limita superioară de explozie. Determinarea distribuției spațiale a concentrațiilor de gaz permite identificarea zonelor

în care există posibilitatea apariției unui risc de explozie și evaluarea condițiilor de siguranță în exploatarea instalațiilor.

În final, capitolul prezintă contribuția originală a cercetării, care constă în dezvoltarea unei metodologii integrate pentru evaluarea emisiilor atmosferice generate de instalațiile petroliere. Metodologia propusă corelează parametrii termici ai arderii, caracteristicile geometrice ale instalațiilor de flaring și modelele de dispersie atmosferică într-un cadru unitar de analiză.

Rezultatele obținute demonstrează că integrarea acestor modele permite estimarea realistă a distribuției poluanților în atmosferă, evaluarea impactului instalațiilor industriale asupra mediului și determinarea condițiilor optime de funcționare în siguranță a sistemelor de flare. În același timp, metodologia dezvoltată poate fi utilizată ca instrument de analiză în proiectarea instalațiilor industriale, în evaluarea impactului asupra mediului și în elaborarea strategiilor de reducere a emisiilor atmosferice în sectorul petrolier și al gazelor naturale.

Evaluarea experimentală a comportării amestecurilor hidrogen–gaz natural și analiza gazelor arse

Capitolul al patrulea al tezei este dedicat evaluării experimentale a comportării amestecurilor de hidrogen și gaz natural și analizei gazelor rezultate în urma proceselor de combustie. Cercetarea este realizată în contextul tranziției energetice globale și al necesității reducerii emisiilor de gaze cu efect de seră, hidrogenul fiind considerat unul dintre vectorii energetici esențiali ai viitorului. Integrarea hidrogenului în infrastructura existentă de gaze naturale reprezintă una dintre direcțiile tehnologice majore pentru decarbonizarea sistemelor energetice, iar utilizarea amestecurilor hidrogen–gaz natural constituie o etapă intermediară importantă în procesul de tranziție către sisteme energetice cu emisii reduse de carbon.

Cercetările prezentate în acest capitol sunt fundamentate pe rezultatele experimentale obținute în cadrul proiectului pilot ROHYD, realizat prin Contractul nr. 247/7901/21.04.2023, care a avut ca obiectiv analiza comportării amestecurilor hidrogen–gaz natural și evaluarea impactului acestora asupra proceselor de ardere și asupra emisiilor generate. Datele experimentale obținute în cadrul acestui proiect permit investigarea detaliată a fenomenelor fizico-chimice asociate combustiei amestecurilor H_2-CH_4 și oferă o bază experimentală relevantă pentru evaluarea impactului utilizării hidrogenului asupra performanței energetice și asupra emisiilor poluante.

În contextul actual al tranziției energetice, hidrogenul este considerat o soluție tehnologică promițătoare pentru reducerea intensității de carbon a sistemelor energetice. Spre deosebire de combustibilii fosili convenționali, hidrogenul nu conține carbon în structura sa moleculară, iar arderea acestuia conduce în principal la formarea vaporilor de apă. Cu toate acestea, dezvoltarea unei infrastructuri dedicate transportului și distribuției hidrogenului necesită investiții semnificative, ceea ce face ca utilizarea amestecurilor hidrogen–gaz natural să reprezinte o soluție pragmatică pentru integrarea treptată a hidrogenului în sistemele energetice existente.

Conceptul de hydrogen blending presupune introducerea controlată a hidrogenului în gazul natural transportat prin infrastructura existentă de conducte. Această abordare permite reducerea emisiilor de carbon generate în procesele de combustie fără a necesita modificări majore ale echipamentelor energetice existente. Cu toate acestea, utilizarea amestecurilor H_2-CH_4 ridică o serie de provocări tehnice legate de stabilitatea procesului de combustie, proprietățile fizico-chimice ale amestecurilor gazoase și comportarea acestora în instalațiile energetice.

În acest context, cercetarea experimentală realizată în cadrul proiectului ROHYD a urmărit evaluarea stabilității arderii amestecurilor hidrogen–gaz natural și analiza emisiilor generate în urma procesului de combustie. Experimentele au fost realizate utilizând o instalație pilot de amestecare GN– H_2 , care permite controlul precis al proporțiilor de hidrogen introduse în gazul natural și monitorizarea parametrilor procesului de combustie.

Determinarea compoziției amestecurilor hidrogen–gaz natural a fost realizată utilizând metode moderne de analiză cromatografică. În cadrul instalației pilot a fost utilizat un cromatograf de gaze mobil ABB model 8206, care permite monitorizarea în timp real a compoziției gazului introdus în sistem. Pentru validarea rezultatelor obținute în teren, probele de gaz au fost analizate suplimentar în laboratorul Universității de Petrol și Gaze din Ploiești utilizând un cromatograf Varian 3800 echipat cu detector de conductivitate termică (TCD) și detector de ionizare în flacără (FID). Utilizarea acestor tehnici analitice a permis determinarea precisă a compoziției amestecurilor gazoase și evaluarea corelației dintre concentrațiile teoretice de hidrogen introduse în instalație și cele determinate experimental.

Pentru evaluarea impactului amestecurilor hidrogen–gaz natural asupra procesului de combustie, au fost analizate gazele rezultate din ardere utilizând echipamente dedicate de analiză a gazelor de combustie. În cadrul experimentelor au fost monitorizate concentrațiile principalelor

componente ale gazelor de ardere, inclusiv dioxidul de carbon (CO_2), monoxidul de carbon (CO), oxigenul (O_2), oxizii de azot (NO și NO_2), precum și hidrocarburile reziduale.

Analiza experimentală a evidențiat faptul că introducerea hidrogenului în gazul natural influențează parametrii termici ai procesului de combustie. Prezența hidrogenului conduce la o creștere moderată a temperaturii gazelor de ardere, fenomen explicat prin reactivitatea ridicată a hidrogenului și prin viteza mai mare de propagare a flăcării în comparație cu metanul. Rezultatele experimentale au arătat că introducerea unei fracții molare de aproximativ 5–6% hidrogen conduce la o creștere a temperaturii gazelor arse cu aproximativ 7–8 °C, fără a produce instabilități semnificative ale procesului de combustie.

Un aspect important evidențiat de rezultatele experimentale este stabilitatea arderii pentru amestecurile hidrogen–gaz natural cu fracții molare de hidrogen de până la aproximativ 20%. În acest interval de concentrații, procesul de combustie rămâne stabil, iar parametrii principali ai arderii nu prezintă variații semnificative. Stabilitatea observată este explicată prin dominanța metanului în compoziția amestecului și prin compatibilitatea proprietăților fizico-chimice ale celor două gaze.

Pentru concentrații mai mari de hidrogen, rezultatele experimentale au evidențiat apariția unor deviații între concentrațiile teoretice și cele determinate experimental. Aceste deviații sunt asociate diferențelor semnificative dintre proprietățile fizice ale hidrogenului și metanului, în special densitatea și coeficientul de difuzie. Hidrogenul are o densitate mult mai mică decât metanul și o capacitate mai mare de difuzie, ceea ce poate conduce la fenomene de segregare sau heterogenizare a amestecului în anumite condiții de funcționare.

Din punct de vedere al emisiilor generate în procesul de combustie, rezultatele experimentale au evidențiat o reducere a concentrației de dioxid de carbon odată cu creșterea fracției molare de hidrogen în amestecul combustibil. Această reducere este explicată prin faptul că hidrogenul nu conține carbon în structura sa moleculară, iar substituirea parțială a metanului cu hidrogen conduce la scăderea cantității de carbon oxidat în procesul de combustie.

Rezultatele experimentale au arătat că introducerea unei fracții molare de aproximativ 5–6% hidrogen conduce la o reducere a emisiilor de carbon de aproximativ 9–10% comparativ cu arderea gazului natural pur. Pentru concentrații mai mari de hidrogen, efectul de reducere a emisiilor devine mai pronunțat, atingând valori de peste 30% pentru concentrații ridicate de hidrogen.

În ceea ce privește emisiile de monoxid de carbon, rezultatele experimentale indică faptul că introducerea unor fracții moderate de hidrogen nu produce modificări semnificative ale concentrației de CO. Valorile măsurate rămân relativ constante în intervalul analizat, ceea ce indică faptul că procesul de combustie rămâne eficient și nu este afectat de introducerea hidrogenului în proporții moderate.

În cazul oxizilor de azot, rezultatele experimentale indică de asemenea o stabilitate relativă a concentrațiilor de NO_x pentru fracțiile de hidrogen analizate. Valorile măsurate se situează în intervalul 20–27 ppm, ceea ce este în concordanță cu rezultatele raportate în literatura de specialitate pentru procesele de combustie ale amestecurilor metan–hidrogen.

Explicația acestui comportament este legată de mecanismele principale de formare a oxizilor de azot în procesele de combustie. Conform mecanismului Zeldovich, formarea NO_x este puternic dependentă de temperatura flăcării. Creșterea fracției de hidrogen conduce simultan la modificarea raportului combustibil–aer și la reducerea concentrației radicalilor CH implicați în mecanismul Fenimore, ceea ce poate limita creșterea emisiilor de NO_x.

Rezultatele experimentale obținute în cadrul studiului confirmă faptul că utilizarea amestecurilor hidrogen–gaz natural poate contribui la reducerea amprentei de carbon a sistemelor energetice bazate pe gaze naturale, fără a produce modificări semnificative ale parametrilor procesului de combustie pentru concentrații moderate de hidrogen. Acest aspect este deosebit de important în contextul tranziției energetice, deoarece permite utilizarea infrastructurii existente de gaze naturale pentru integrarea treptată a hidrogenului.

În final, contribuția principală a cercetării prezentate în acest capitol constă în realizarea unei analize experimentale detaliate a comportării amestecurilor hidrogen–gaz natural în condiții reale de funcționare. Rezultatele obținute oferă date experimentale valoroase pentru evaluarea impactului hidrogenului asupra proceselor de combustie și asupra emisiilor generate și contribuie la dezvoltarea strategiilor de integrare a hidrogenului în sistemele energetice bazate pe gaze naturale.

Evaluarea potențialului de captare și stocare geologică a CO₂ în rezervoare de hidrocarburi epuizate

Capitolul al cincilea al tezei este dedicat evaluării potențialului de captare și stocare geologică a dioxidului de carbon (CO₂) în rezervoare de hidrocarburi epuizate din România, prin

utilizarea metodelor de modelare numerică a rezervoarelor și analiza mecanismelor fizice și geochimice care controlează stabilitatea pe termen lung a CO₂ injectat în mediul geologic. Cercetarea este realizată în contextul tranziției energetice globale și al necesității reducerii emisiilor de gaze cu efect de seră, tehnologiile de tip Carbon Capture and Storage (CCS) fiind considerate una dintre principalele soluții pentru decarbonizarea sectorului energetic.

Capitolul integrează rezultatele a două studii științifice publicate în literatura de specialitate, care analizează aplicabilitatea tehnologiilor CCS în contextul geologic al României și utilizează modelarea numerică pentru evaluarea capacității de stocare a CO₂ în rezervoare de hidrocarburi epuizate. Prin corelarea rezultatelor obținute pentru structuri geologice aparținând Platformei Moesice și Bazinului Transilvaniei, cercetarea oferă o perspectivă integrată asupra potențialului național de stocare geologică a dioxidului de carbon.

Prima parte a capitolului este dedicată analizei cadrului geologic al structurii Brădești, situată în partea vestică a Platformei Moesice. Această regiune reprezintă una dintre cele mai importante provincii petrolifere din sud-estul Europei și este caracterizată printr-o evoluție geologică complexă, controlată de procese tectonice și sedimentare care au condus la formarea unor structuri favorabile acumulării hidrocarburilor. Succesiunea stratigrafică a platformei include depozite aparținând mai multor intervale geologice, în special Triasicului, Jurassicului și Sarmatianului, caracterizate prin alternanțe de gresii, marne, argile și formațiuni carbonatice.

Prezența unor structuri tectonice bine definite, împreună cu existența unor roci cap impermeabile, favorizează dezvoltarea capcanelor structurale și stratigrafice capabile să rețină fluide în mediul poros. Aceste caracteristici geologice, împreună cu datele detaliate obținute în timpul exploatării hidrocarburilor, fac ca rezervoarele epuizate să reprezinte candidați ideali pentru implementarea tehnologiilor de stocare geologică a CO₂.

Pentru evaluarea potențialului de stocare a fost dezvoltat un model numeric al rezervorului aparținând structurii Brădești, utilizând simulatorul compozițional ECLIPSE. Modelul numeric a fost construit pe baza datelor geologice și petrofizice disponibile și reproduce comportamentul hidrodinamic al rezervorului în timpul exploatării hidrocarburilor și în etapa ulterioară de injecție a CO₂. Parametrii introduși în model includ proprietățile rocii rezervor, precum porozitatea și permeabilitatea, proprietățile fluidelor, presiunile capilare și condițiile operaționale asociate exploatării zăcământului.

Rezervorul analizat prezintă o heterogenitate petrofizică semnificativă, cu valori ale porozității cuprinse între aproximativ 0,027 și 0,28 și permeabilități variabile între 0,1 și peste 1500 mD. Grosimea zonei saturate cu hidrocarburi variază între aproximativ 8 și 43 m, iar presiunea inițială a rezervorului se situează în intervalul 210–245 bar. Aceste caracteristici indică existența unui sistem poros capabil să permită curgerea fluidelor și să asigure un volum semnificativ disponibil pentru stocarea gazelor după epuizarea hidrocarburilor.

Simularea numerică a fost utilizată pentru reproducerea întregului ciclu de viață al rezervorului, de la etapa de producție a hidrocarburilor până la etapa de stocare a CO₂. Modelul include 23 de sonde de producție și reproduce evoluția presiunii și a ratelor de producție pe durata exploatării zăcământului. Rezultatele simulării indică o scădere progresivă a presiunii rezervorului până la aproximativ 50 bar la finalul exploatării, ceea ce evidențiază existența unui volum poros disponibil semnificativ pentru stocarea CO₂.

Pe baza acestui model a fost realizată simularea procesului de injecție a dioxidului de carbon provenit de la centrala termoelectrică Ișalnița. Estimările energetice indică faptul că această centrală poate genera emisii anuale de aproximativ 935 kt CO₂, ceea ce reprezintă o sursă semnificativă de emisii de carbon. În scenariul de injecție analizat, debitul volumetric zilnic de CO₂ a fost estimat la aproximativ 1,37 milioane Sm³/zi.

Simulările numerice indică faptul că presiunea rezervorului crește progresiv în timpul procesului de injecție, atingând limita presiunii inițiale a rezervorului în jurul anului 2050. Această limită reprezintă condiția de siguranță geomecanică pentru stabilitatea formațiunii geologice. Analiza scenariilor alternative de injecție, bazate pe debite mai reduse, evidențiază posibilitatea stocării unor volume semnificative de CO₂ fără depășirea limitelor operaționale ale rezervorului.

Rezultatele modelării indică faptul că structura Brădești ar putea stoca aproximativ 20,6 milioane tone de CO₂, confirmând potențialul acestei structuri pentru implementarea unor proiecte de captare și stocare geologică a carbonului. Proximitatea față de surse majore de emisii, precum complexul energetic Oltenia, conferă acestei structuri un rol strategic în dezvoltarea unor proiecte CCS la nivel regional.

În partea a doua a capitolului este analizat potențialul de stocare geologică a CO₂ în structurile de hidrocarburi epuizate din Bazinul Transilvaniei, în proximitatea centralei electrice Iernut. Bazinul Transilvaniei reprezintă una dintre cele mai importante provincii gazifere din

Europa Centrală și de Est, fiind caracterizat printr-o succesiune sedimentară groasă și prin prezența a numeroase structuri capabile să acumuleze gaze naturale.

Modelarea numerică realizată pentru această regiune utilizează un model sintetic reprezentativ pentru rezervoarele de gaze naturale din bazin, caracterizat prin porozitate medie de aproximativ 15%, permeabilitate de aproximativ 0,4 mD și o adâncime de aproximativ 2700 m. Modelul a fost calibrat utilizând datele istorice de producție pentru perioada 1960–2022 și reproduce evoluția presiunii rezervorului și a volumului de gaze în loc.

În etapa de predicție, simulările au analizat procesul de injecție a CO₂ într-un rezervor epuizat utilizând cele 21 de sonde existente convertite în injectoare. Procesul de injecție a fost extins pe o perioadă de aproximativ 140 de ani pentru a evalua stabilitatea pe termen lung a CO₂ stocat.

Un aspect esențial al analizei îl reprezintă evaluarea mecanismelor prin care CO₂ este reținut în mediul geologic. În cadrul simulării au fost analizate patru mecanisme principale de captare: captarea structurală și stratigrafică, captarea reziduală, captarea prin dizolvare și captarea minerală.

Rezultatele obținute indică faptul că mecanismul dominant de captare este reprezentat de captarea structurală și stratigrafică, care permite acumularea CO₂ sub cap-rock-ul impermeabil al rezervorului. În paralel, captarea reziduală contribuie la imobilizarea unei fracții importante de CO₂ în spațiul poros al rocii prin mecanisme capilare.

Captarea prin dizolvare contribuie la stabilizarea sistemului prin transferul CO₂ în faza apoasă a rezervorului, reducând mobilitatea gazului liber. Pe termen lung, o parte din CO₂ este transformată în carbonati stabili prin procese de mineralizare rezultate din reacțiile dintre CO₂ și mineralele silicice ale rocii.

Pe baza rezultatelor simulării numerice, cantitatea totală de CO₂ care poate fi stocată în structurile analizate este estimată la aproximativ 26,46 milioane tone. Această cantitate este distribuită între mecanismele de captare fizică, hidrodinamică și geochemică, care acționează complementar pentru stabilizarea dioxidului de carbon în mediul geologic.

Rezultatele cercetării evidențiază faptul că rezervoarele de hidrocarburi epuizate din România prezintă un potențial semnificativ pentru implementarea tehnologiilor de captare și stocare geologică a CO₂. Combinația dintre caracteristicile geologice favorabile, infrastructura

petrolieră existentă și proximitatea față de surse majore de emisii conferă acestor structuri un rol important în strategiile naționale de decarbonizare.

În ansamblu, cercetarea prezentată în acest capitol demonstrează că integrarea tehnologiilor CCS în rezervoarele epuizate poate contribui semnificativ la reducerea emisiilor de gaze cu efect de seră și la valorificarea infrastructurii petroliere existente. Modelarea numerică a rezervorului reprezintă un instrument esențial pentru evaluarea capacității de stocare, analiza mecanismelor de captare și estimarea stabilității pe termen lung a CO₂ injectat în mediul geologic.