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

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

REZUMATUL TEZEI DE DOCTORAT

CONTRIBUȚII PRIVIND OPTIMIZAREA REȚELELOR DE GAZE NATURALE

Autor: Drd. ing. Gașpar Răzvan-Mihai
Conducător științific: Prof. univ. habil. dr. ing. Timur-Vasile Chiș

Ploiești, 2026

COMISIA DE DOCTORAT

Calitatea	Numele	Instituția
Președinte	Prof. univ. habil. dr. ing. Silvian Costel SUDITU	Universitatea Petrol-Gaze din Ploiești
Conducător științific	Prof. univ. habil. dr. ing. Timur-Vasile CHIȘ	Universitatea Petrol-Gaze din Ploiești
Referent oficial	Prof. univ. dr. ing. Dan Florin NIȚOI	Universitatea Națională de Știință și Tehnologie POLITEHNICA din București
Referent oficial	C.Ș. I dr. ing. Anca ANTONOV	INCDPM „Alexandru Darabont” București
Referent oficial	Conf. univ. habil. dr. ing. Iuliana Veronica GHEȚIU	Universitatea Petrol-Gaze din Ploiești

Teza de doctorat poate fi consultată la Biblioteca Universității Petrol-Gaze din Ploiești.

CUPRINSUL TEZEI DE DOCTORAT

Numerotarea capitolelor, figurilor, tabelelor și a relațiilor din prezentul rezumat urmează numerotarea din teză; paginile indicate sunt cele ale tezei.

INTRODUCERE 6

CAPITOLUL 1. Stadiul actual al cercetărilor privind scurgerea gazelor din conductele supraterane 10

1.1. Analiza modelelor matematice privind pierderile de gaze în urma avariilor și/sau emisiilor fugitive . 10

1.2. Modelarea numerică a curgerii gazelor prin conducte 38

1.3. Modele utilizate în România pentru determinarea debitelor de gaze prin defectele conductelor supraterane 54

1.4. Contribuții privind crearea unui model numeric iterativ (Algoritmul Δx) cu corecție BWR 63

1.5.–1.6. Tabel centralizator și contribuții proprii 68

CAPITOLUL 2. Contribuții privind determinarea scurgerilor reale din conductele subterane în cazul avarierii acestora 71

2.1. Caracteristici ale mediului poros adiacent conductelor de distribuție 71

2.2.–2.3. Scurgerea gazelor prin defecte ale conductelor subterane; defectul astupat (metoda surselor imagine) 74

2.4. Analiza scurgerii de gaze naturale în sol (Ordinul ANRE 18/2014, experimente, modelul cuplat) 82

2.5.–2.8. Analiza experimentală, analiza finală a modelelor, contribuții proprii 97

CAPITOLUL 3. Contribuții privind optimizarea rețelelor de distribuție a gazelor naturale 102

3.1.–3.3. Necesitatea optimizării; modele numerice; model bazat pe curgerea fluidelor 102

3.4. Modelul O. Alves Jr. și C. Fontes 122

3.5. Modelul avansat propriu de simulare 129

3.6.–3.10. Analiza comparativă, simulare pentru patru scenarii teritoriale, contribuții proprii 137

CAPITOLUL 4. Analiza influenței modelelor termodinamice asupra sistemelor de transport gaze naturale–hidrogen 145

4.1. Cadrul de reglementare european privind integrarea hidrogenului în rețelele de gaze 145

4.2. Modelarea în CHEMCAD a curgerii amestecului hidrogen–gaze naturale 147

4.3. Concluzii și contribuții proprii 155

CONCLUZII GENERALE ALE TEZEI 157

Direcții de cercetare viitoare 159

BIBLIOGRAFIE 160

CUVINTE CHEIE

rețele de distribuție a gazelor naturale; scurgeri accidentale; curgere Fanno; gaz real; ecuația de stare Benedict-Webb-Rubin; coeficient de debit; medii poroase; legea lui Darcy; model cuplat sol-conductă; programare mixt-întreagă (MILP); logică fuzzy; amestecuri hidrogen–gaze naturale; CHEMCAD; învățare automată (ANN, Random Forest, SVR).

INTRODUCERE

Combustibilii fosili rămân, în continuare, principala sursă de energie pentru producerea electricității, pentru transport și pentru sectorul rezidențial. Producția globală de energie este dominată de țiței, lichide din gaze naturale și materii prime (32%), urmate de cărbune (28%) și de gazele naturale (21,6%). Estimările Administrației pentru Informații Energetice a SUA indică o creștere a consumului mondial de energie de la 524 la 820 de cvadrilioane BTU între 2010 și 2040 (circa 56%), gazul natural fiind combustibilul fosil cu cea mai rapidă creștere (aproximativ 1,7% pe an). În paralel, hidrogenul, cu o energie specifică de 140 MJ/kg, de 3–4 ori mai mare decât a combustibililor convenționali, devine un vector energetic esențial al tranziției către decarbonizare.

Transportul gazelor naturale prin rețele de distribuție este guvernat de legile mecanicii fluidelor și ale termodinamicii, gazul fiind un fluid compresibil și vâscos. Analiza mișcării gazelor prin conducte presupune modele matematice care descriu variațiile presiunii, temperaturii, densității și vitezei, iar înțelegerea acestora este esențială pentru optimizarea rețelelor, reducerea pierderilor și prevenirea accidentelor.

Teza abordează tranziția de la infrastructura tradițională de transport și distribuție a gazului metan la **sisteme energetice hibride**, capabile să integreze vectori curați (hidrogenul verde, biometanul), cu menținerea unor standarde riguroase de siguranță, eficiență economică și continuitate în alimentare. Motivația cercetării derivă din necesitatea actualizării modelelor clasice de simulare și optimizare a rețelelor în contextul politicilor europene de decarbonizare și al liberalizării pieței de energie.

Obiectivele tezei

1. Evaluarea critică a modelelor matematice de calcul al pierderilor de gaze prin avarii și emisii fugitive și cuantificarea erorilor introduse de ipotezele simplificatoare (gaz ideal, curgere izotermă, coeficient de debit constant).
2. Elaborarea unui algoritm numeric propriu, iterativ, care să integreze comportamentul de gaz real prin ecuația de stare Benedict-Webb-Rubin (BWR) și derivatele adimensionale ale factorului de compresibilitate.
3. Determinarea scurgerilor reale din conductele subterane prin modele analitice și experimentale care să țină seama de rezistența mediului poros adiacent conductei.
4. Formularea unui model de optimizare a rețelelor de distribuție hibride (gaze naturale–hidrogen) care să gestioneze incertitudinile pe termen lung (orizontul 2030–2050).

5. Analiza influenței modelelor termodinamice asupra comportamentului amestecurilor hidrogen–gaze naturale în sistemele de transport.

Structura tezei

Teza este structurată în patru capitole, urmate de concluzii generale, direcții de cercetare viitoare și bibliografie. Capitolul 1 analizează modelele de scurgere a gazelor din conductele supraterane și introduce algoritmul propriu Δx cu corecție BWR. Capitolul 2 tratează scurgerile din conductele subterane, cu accent pe interacțiunea dintre conductă și mediul poros. Capitolul 3 propune un model hibrid de optimizare a rețelelor de distribuție bazat pe programare mixt-întreagă și logică fuzzy. Capitolul 4 analizează, prin simulare în CHEMCAD, influența adaosului de hidrogen asupra regimului termodinamic și hidraulic al unei conducte de transport.

CAPITOLUL 1. STADIUL ACTUAL AL CERCETĂRILOR PRIVIND SCURGEREA GAZELOR DIN CONDUCTELE SUPRATERANE

1.1. Modele matematice privind pierderile de gaze în urma avariilor

Determinarea precisă a masei de gaz eliberate în urma unei avarii este o etapă critică, justificată de rațiuni economice, ecologice și de reglementare. În evaluarea cantitativă a riscului (QRA), riscul a fost definit ca produs între probabilitatea de apariție a defectului P(d), modelată printr-o distribuție Weibull, și debitul masic de scurgere ṁ(p,d). Harta de risc construită în funcție de presiunea din conductă și diametrul defectului, aproximată printr-o regresie de ordinul 2, arată că termenul d^2 (asociat ariei defectului) are cea mai mare influență asupra riscului. Astfel, un defect de 30 mm la 10 bar impune intervenție urgentă, în timp ce un defect de 5 mm la aceeași presiune poate fi monitorizat; prin includerea probabilității P(d), modelul permite prioritizarea investițiilor de înlocuire a conductelor vechi din zonele de presiune ridicată.

Spre deosebire de sistemele de transport, rețelele de distribuție au structuri ramificate sau buclate și dispun de puține date de măsurare în timp real, iar coeficientul de debit prin defect variază semnificativ în domeniul presiunilor medii și intermediare (0,01–1,6 MPa). Au fost analizate modelul de curgere izotermă (baza majorității simulatoarelor comerciale) și modelul de curgere adiabatică (Fanno), atât pentru gaz ideal, cât și pentru gaz real, precum și modelele cu Z constant, Ciarnîi, H. Pascal și Z variabil (C. Trifan).

Tabelul 1.1. Eroarea relativă a modelelor de calcul a pierderilor de presiune (L = 1000 m, D = 100 mm, p_1 = 2 bar abs, p_2 măsurat = 1,8 bar abs, T = 288 K, Z = 0,98)

Model	p_2 calculat [bar]	Eroare relativă	Observații
Z constant	1,82	1,11%	Medierea lui Z introduce o ușoară abatere
Ciarnîi	1,805	0,28%	Precizie superioară prin transformări Fourier
H. Pascal	1,812	0,67%	Metoda perturbațiilor, cu erori de rotunjire
Z variabil (Trifan)	1,801	0,06%	Cea mai înaltă precizie
Fanno	1,85	2,78%	Ipoteza adiabatică este inadecvată pe tronsoane lungi

Pentru gazul real a fost introdus factorul de compresibilitate relativ $K(p,T) = Z(p,T)/Z(p_{ref},T_{ref})$ și derivatele sale adimensionale K_p și K_T, calculate pentru metan, pentru gazul natural distribuit în România și pentru amestecuri gaz–hidrogen. Rezultatele arată că K_p tinde către zero la presiuni apropiate de cea atmosferică și crește neliniar spre 100 bar, iar adaosul de hidrogen reduce K_p și K_T, deci abaterea de la comportamentul ideal. Masa molară a amestecului scade de la 17,50 kg/kmol (gaz natural) la 14,40 kg/kmol (20% H_2), iar constanta gazului crește de la 475,1 la 577,4 J/(kg·K), ceea ce conduce la debite masice de scurgere mai mari în aceleași condiții.

Pentru debitul prin deschideri neregulate s-a utilizat modelul ajutajului convergent (Bendemann), corectat cu factorul de gaz real ϕ și coeficientul de debit $C_D(\beta)$. Dependența debitului

critic de presiune și diametru a fost aproximată printr-o regresie polinomială de ordinul 2 ($R^2 \approx 0,995$) și prin trei modele de învățare automată, cu rezultatele din tabelul 1.4.

Tabelul 1.4. Modele de evaluare a debitului masic de scurgere în funcție de presiune și diametrul defectului

Model	Precizie (R^2)	Complexitate	Utilizare recomandată
Regresie polinomială	0,992	Scăzută	Calcule rapide, analitice
Random Forest (50 arbori, $max_{depth} = 8$)	0,998	Medie	Date cu zgomot (senzoristică SCADA)
ANN 2-16-16-1 (ReLU)	0,999	Ridicată	Monitorizare în timp real

1.2. Modelarea numerică a curgerii și caracterizarea curgerii prin orificii neregulate

Coeficientul de debit pentru deschideri laterale în conducte din polietilenă a fost determinat experimental pe un stand propriu (secțiune PE 63 × 5,8 mm, compresor, regulator de presiune, debitmetru cu turbină și calculator de debit), utilizând aer din motive de siguranță. Valorile C_D au scăzut de la 0,867 ($\beta = 0,285$) la 0,694 ($\beta = 0,908$). Pentru $\beta \leq 0,3024$ coeficientul de debit se consideră constant ($C_D = 0,8674$); diferențele de C_D între aer și metan sunt sub 1,2%, ceea ce permite transferul rezultatelor la gazul natural. Corelația obținută pentru rezultatele proprii este $C_D = 1,00 - 0,15\beta - 0,12\beta^2$ ($R^2 = 0,998$).

Studiul de caz al unei conducte avariate ($L = 5,0$ km, $D_i = 51,3$ mm, orificiu de 15 mm, $T = 10$ °C) a cuantificat erorile introduse de simplificări. La înaltă presiune (5,0 MPa), modelul izoterm de gaz real supraestimează debitul de evacuare cu 18,8%, iar modelul adiabatic de gaz ideal îl subestimează cu 8,2% față de modelul adiabatic de gaz real ($Q_n = 2845$ m³N/h). La medie presiune (0,38 MPa), modelul izoterm supraestimează debitul cu 24,0%, iar utilizarea unui coeficient de debit constant introduce o eroare de 2,9%. Prin introducerea hidrogenului (0–20%), debitul de evacuare crește de la 2721 la 2912 m³N/h, iar eroarea modelului de gaz ideal scade de la 6,8% la 2,1%.

1.3. Modele utilizate în România și verificarea experimentală

Au fost comparate trei metode de calcul pentru conductele supraterane: modelul adiabatic Fanno pentru gaz real, modelul normativ ANRE (Ordinul 18/2014, cu coeficienți de debit 0,75 în regim critic și 0,85 în regim subcritic) și modelul jetului liber. Verificarea s-a făcut experimental pentru defecte de 2 mm și 10 mm, debitele măsurate cu aer fiind convertite pentru metan prin raportul rădăcinilor pătrate ale densităților. De la circa 0,84 atm suprapresiune, curgerea prin orificiu devine critică (viteza de 381 m/s rămâne constantă).

Erorile modelelor teoretice față de datele experimentale (metan)

Model	Eroare relativă medie	R^2	Interpretare
Fanno (gaz real)	+8,2%	0,985	Cel mai apropiat dintre modelele clasice
ANRE (Ord. 18/2014)	−15,4%	0,970	Subestimează debitul; caracter conservator

Model	Eroare relativă medie	R^2	Interpretare
Jet liber	+12,6%	0,940	Dispersie mare la diametre de 10 mm

1.4. Algoritmul numeric iterativ Δx cu corecție BWR (contribuție proprie)

Spre deosebire de simulatoarele comerciale, care utilizează un factor de compresibilitate mediu, algoritmul propus rezolvă local ecuațiile de conservare (masă, impuls, energie) pe fiecare segment Δx al conductei. Factorul Z(p,T) este calculat cu ecuația de stare Benedict-Webb-Rubin, iar densitatea locală este actualizată prin derivatele K_p și K_T, evitând reevaluarea completă a ecuației BWR la fiecare pas. Temperatura este actualizată din ecuația entalpiei, cu schimb termic cu mediul, iar iterația continuă până când $|p_{i+1} - p_i| < 10^{-6}$.

Tabelele 1.20–1.21. Validarea algoritmului BWR față de modelele teoretice și datele experimentale (p = 1,0 atm)

Model	Defect 10 mm [m³/h]	Eroare	Defect 2 mm [m³/h]	Eroare
Algoritm propriu BWR	91,85	+0,40%	3,68	+0,27%
Experiment (metan)	91,48	referință	3,67	referință
Fanno	84,00	−8,18%	3,40	−7,36%
ANRE	69,00	−24,57%	2,80	−23,71%
Jet liber	101,00	+10,41%	4,10	+11,72%

Algoritmul BWR reduce eroarea față de experiment sub 0,5% pentru ambele dimensiuni ale defectului și reduce dispersia rezultatelor cu peste 60% față de modelul Fanno standard, eliminând dependența de coeficienți empirici de corecție.

CAPITOLUL 2. CONTRIBUȚII PRIVIND DETERMINAREA SCURGERILOR REALE DIN CONDUCTELE SUBTERANE ÎN CAZUL AVARIERII ACESTORA

2.1. Mediul poros adiacent conductelor

Solul din jurul conductelor nu este un mediu inert: porozitatea, permeabilitatea, gradul de tasare și umiditatea pot atenua sau, dimpotrivă, favoriza migrarea gazului. La presiuni scăzute, curgerea prin porii capilari este influențată de efectul Klinkenberg, iar prezența apei interstițiale reduce permeabilitatea efectivă. Observațiile din teren au evidențiat migrarea preferențială a gazului: într-un caz, imobilul aflat la 129 m de defect a înregistrat o concentrație de gaz mai mare decât cel aflat la 70 m, datorită canalizării fluxului de-a lungul traseului altor conducte; într-un alt caz, explozia unui imobil a fost precedată de migrarea gazului printr-o galerie de animal cu diametrul de circa 4,5 cm. În astfel de căi preferențiale, rezistența la curgere devine neglijabilă și poate canaliza aproape 90% din debitul de gaz.

2.2.–2.3. Scurgerea prin defecte ale conductelor subterane

Defectul a fost asimilat unei surse punctuale izotrope situate la adâncimea H, iar condiția de izobarism la suprafața solului ($p = p_a$) a fost impusă prin **metoda surselor imagine** (o sursă negativă simetrică față de suprafața terenului). În coordonate cilindrice, componentele vitezei de filtrare rezultă din legea lui Darcy, iar debitul total care ajunge la suprafață se obține prin integrarea vitezei verticale pe suprafața solului. Debitele estimate pentru un defect de 2 mm variază cu două ordine de mărime între nisip (1,45–3,95 m³/h pentru 0,5–1,5 atm) și pământul saturat cu apă (0,01–0,03 m³/h); pentru un defect de 10 mm în nisip, la 1,5 atm, debitul ajunge la 98,75 m³/h, valoare care, în lipsa ventilării, poate genera rapid atmosfere explozive.

2.4. Modelul normativ, modelul experimental și modelul cuplat sol–conductă

Au fost comparate trei abordări. Metodologia ANRE (Ordinul 18/2014) furnizează debite cu aproximativ 30% mai mici decât cele obținute cu modelul BWR, deoarece nu integrează variația neliniară a factorului de compresibilitate; ea rămâne însă baza legală pentru raportarea pierderilor. Modelul experimental s-a bazat pe teste de laborator privind trecerea gazului prin paturi de nisip, pământ și pământ presat, cu diferite umidități; panta dreptelor $Q = f[(P_1^2 - P_2^2)/l]$ a scăzut de la 75.000 (nisip uscat) la 57.000 (nisip + 180 ml apă) și de la 100.000 (pământ nepresat) la 50.000 (pământ presat + 225 ml apă), confirmând efectul combinat al umidității și compactării asupra permeabilității.

Contribuția principală a capitolului este **modelul cuplat sol–conductă**, care egalează debitul expulzat prin orificiu (împins de presiunea rețelei P_1 și frânat de presiunea intermediară P_2 a „pungii de gaze” formate la gura defectului) cu debitul pe care solul îl poate disipa spre suprafață (filtru sferic, permeabilitate 40 Darcy). Sistemul neliniar se rezolvă iterativ pentru valoarea unică a lui P_2 care satisface conservarea masei, astfel că modelul nu mai impune presiunea atmosferică la gura defectului.

Tabelul 2.6 (extras). Debite de scurgere [m³/h] calculate cu modelul cuplat sol–conductă

Tip sol	Presiune [atm]	2 mm	6 mm	10 mm
Nisip	0,8	1,64	14,84	41,22
Nisip	1,5	3,08	27,65	76,81
Pământ argilos	0,8	0,13	1,19	3,31
Pământ argilos	1,5	0,24	2,24	6,22
Pământ + apă	0,8	0,016	0,14	0,39
Pământ + apă	1,5	0,023	0,21	0,59

2.5.–2.6. Analiza experimentală și analiza finală a modelelor

Experimentele pe o conductă de 63 mm, la 0,8 atm (presiunea medie a unei rețele de distribuție), au dat debite de 0,658 m³/h pentru defectul de 2 mm și de 0,813 m³/h pentru defectul de 10 mm, față de 1,48/37,10 m³/h (ANRE) și 1,64/41,22 m³/h (modelul cuplat). Diferența arată că, într-o conductă de diametru mic, creșterea defectului de la 2 la 10 mm nu produce o creștere proporțională a debitului: orificiul atinge regimul sonic, iar capacitatea hidraulică a conductei devine factorul limitativ, în timp ce modelele teoretice presupun o sursă de presiune infinită în amonte. Modelele normative și cuplate rămân utile pentru identificarea riscului maxim ipotetic, iar analiza experimentală definește realitatea operativă a sistemului.

CAPITOLUL 3. CONTRIBUȚII PRIVIND OPTIMIZAREA REȚELELOR DE DISTRIBUȚIE A GAZELOR NATURALE

3.1.–3.2. Necesitatea optimizării și modelul dinamic de amestec

Rețelele care preiau gaze de la mai mulți furnizori, cu compoziții diferite, ridică „problema agregării" (pooling problem): fluxurile se amestecă în noduri, iar produsul livrat trebuie să respecte standardele de calitate (putere calorifică, densitate, indice Wobbe, număr de metan). Piața liberalizată favorizează achiziția de la furnizori cu costuri reduse, dar fără specificație asigurată, ceea ce impune un control dinamic al amestecului. Modelul dinamic de amestec al lui O. Alves Jr. și C. Fontes (bilanț molar tranzitoriu în conducta colectoare, întârzieri de transport, condiții izoterme, gaz ideal justificat de un Z minim de circa 0,91) a fost validat pe un colector de 26,4 m și 16″, la 26,5 °C și 25 kgf/cm²; diferența dintre puterea calorifică medie zilnică simulată și cea măsurată cu cromatograful în linie a fost de 0,82%.

3.3.–3.4. Modele de optimizare bazate pe curgerea fluidelor și pe reziliență

Au fost analizate un model hidraulic staționar bazat pe ecuația generală de curgere și pe ecuația lui Menon (2005) și un model de optimizare a rezilienței aprovizionării, care maximizează flexibilitatea volumelor livrate și minimizează pierderile și emisiile din timpul opririlor. Acesta din urmă include restricții privind capacitatea zăcămintelor, a uzinelor de prelucrare și a stațiilor de compresoare, satisfacerea cererii, stocarea de tip line-pack, bilanțul masic nodal, limitele de presiune, căile alternative de descărcare și stările de pornire/oprire ale instalațiilor (timpi minimi de funcționare și de inactivitate).

3.5. Modelul avansat propriu de simulare (Modelul 4)

Modelul propriu se adresează unei rețele de distribuție modernizate, care integrează hidrogenul verde (Power-to-Gas) și biometanul, pentru orizontul de planificare 2030–2050. Întrucât acest orizont este dominat de incertitudini economice, de reglementare și climatice, modelul cuplează **programarea mixt-întreagă (MILP)** cu **logica fuzzy**: creșterea demografică, cererea viitoare, costurile de capital și disponibilitatea hidrogenului devin variabile lingvistice. Un indice global de incertitudine a tranziției energetice $u \in [0, 1]$ (0 – scenariu conservator, 1 – accelerare verde agresivă) generează, prin funcții de apartenență, factorii multiplicativi pentru cerere și pentru bugete.

Funcția obiectiv multi-criterială agregată, $\text{Max } F = w_1 \cdot Z_1 - w_2 \cdot Z_2 - w_3 \cdot Z_3$, maximizează volumele livrate și flexibilitatea fluxurilor (Z_1), minimizează costurile totale OPEX + CAPEX (Z_2) și minimizează pierderile și emisiile fugitive (Z_3). Sistemul cuprinde **45 de ecuații și constrângeri**, grupate în: dinamica fluidelor și hidraulica tranzitorie (conservarea masei și a impulsului, întârzierea de transport, plafonul presiunii nodale); calitatea gazului și integrarea hidrogenului (puterea calorifică, indicele Wobbe, pragul volumetric de H_2, corelația presiune–concentrație de H_2 pentru prevenirea fragilizării oțelului, stocarea Power-to-Gas, odorizarea); infrastructura (compresoare, line-pack, stări de funcționare); cererea, aspectele economice și bugetare; opririle neplanificate și redundanța.

3.6.–3.7. Analiza comparativă și simularea pentru patru scenarii teritoriale

Spre deosebire de modelele anterioare, care tratează fie amestecul compozițional, fie hidraulica opririlor, în medii deterministe, Modelul 4 integrează simultan vectorii energetici curați, logica fuzzy pentru orizontul 2030–2050 și sinteza celor 45 de constrângeri într-o singură funcție obiectiv. Modelul a fost aplicat pentru patru entități teritoriale.

Tabelul 3.2. Rezultatele simulării pentru patru niveluri de aglomerație teritorială

Entitate	Populație	Cerere bază [m³/zi]	Cerere fuzzy [m³/zi]	H_2 injectat [m³/zi]	HV [kcal/m³]	CAPEX [RON]
Comună	5.000	120.000	162.000	8.100	9.150	150.000
Oraș mic	50.000	1.500.000	2.025.000	101.250	9.120	1.200.000
Municipiu	500.000	14.500.000	19.575.000	978.750	9.080	9.500.000
Mun. București	5.200.000	155.000.000	209.250.000	10.462.500	9.050	95.000.000

Rezultatele arată o creștere a cererii proiectate cu circa 35% față de cererea de bază, un aport de hidrogen de circa 5% din cererea proiectată și o scădere moderată a puterii calorifice medii (de la 9.150 la 9.050 kcal/m³) și a indicelui Wobbe (de la 11.850 la 11.750 kcal/m³) odată cu creșterea aglomerației, valorile rămânând în limitele de calitate impuse. Comparația celor patru modele pe un ciclu de 24 de ore confirmă viabilitatea tehnică și economică a operării rețelelor hibride.

CAPITOLUL 4. ANALIZA INFLUENȚEI MODELELOR TERMODINAMICE ASUPRA SISTEMELOR DE TRANSPORT GAZE NATURALE–HIDROGEN

4.1. Cadrul de reglementare european

Pachetul legislativ european de decarbonizare a pieţelor de gaze şi hidrogen (un regulament şi o directivă) stabileşte reguli pentru organizarea pieţelor, dezvoltarea infrastructurii şi accesul hidrogenului la reţelele existente. Printre prevederi se numără reducerea de 100% a tarifelor bazate pe capacitate pentru înmagazinarea subterană şi terminalele GNL, permiterea amestecării hidrogenului în reţeaua de gaze naturale până la un prag volumetric de 2% în punctele de interconectare transfrontalieră, separarea proprietăţii pentru viitoarele reţele de hidrogen, înfiinţarea Reţelei Europene a Operatorilor de Reţele de Hidrogen şi interzicerea prelungirii contractelor pe termen lung pentru gaze fosile după 2049. Prin REPowerEU, Uniunea Europeană şi-a propus pentru 2030 producţia internă a 10 milioane de tone de hidrogen regenerabil şi importul a altor 10 milioane de tone.

4.2. Modelarea în CHEMCAD a curgerii amestecului hidrogen–gaze naturale

A fost simulat un sistem industrial format dintr-o staţie de comprimare şi un tronson de conductă de oţel DN 20″ cu lungimea de 1000 m. Peste un gaz natural de referinţă s-au introdus treptat 5, 10, 15 şi 20% molar hidrogen, urmărindu-se temperatura de formare a hidraţilor şi pierderile de presiune pe tronson. Au fost utilizate ecuaţiile de stare cubice Peng-Robinson şi Soave-Redlich-Kwong, adecvate sistemelor nepolare gazoase la presiuni medii şi ridicate.

Tabelul 4.2. Rezultatele simulării şi ale regresiei numerice

H_2 [% mol]	T hidraţi 50 atm – simulat [K]	T hidraţi – regresie [K]	Δp – simulat [bar]	Δp – regresie [bar]
0	162,093	162,093	0,01100	0,01100
5	163,572	163,691	0,01083	0,01054
10	165,118	165,373	0,01028	0,01004
15	166,733	167,138	0,00975	0,00950
20	168,455	168,988	0,00921	0,00892

Adaosul de hidrogen creşte temperatura de formare a hidraţilor la 50 atm cu peste 1,3 K (peste 3%), ceea ce impune o atenţie sporită asupra uscării gazului înainte de introducerea în sistem. Din punct de vedere hidraulic, densitatea redusă a hidrogenului scade densitatea medie a amestecului, iar pierderea de presiune pe tronson scade de la 0,01100 bar (gaz natural) la 0,00921 bar (20% H_2). Au fost obţinute ecuaţiile de regresie $T_{hidrat}(x) = 162{,}093 + 0{,}318x + 0{,}001x^2$ ($R^2 \approx 0{,}999$) şi $\Delta p(x) = 0{,}0110 - 0{,}00009x - 0{,}0000005x^2$ ($R^2 \approx 0{,}998$), utilizabile ca instrumente rapide în dispecerat, şi au fost adaptate modelele ANN, Random Forest şi SVR pentru prognoza în timp real fără rularea modelului termodinamic complet.

CONCLUZII GENERALE

Cercetarea a urmărit crearea unui cadru metodologic unitar pentru diagnosticarea, modelarea și optimizarea rețelelor de distribuție și transport a gazelor naturale în contextul tranziției energetice. Principalele concluzii sunt:

1. Modelele clasice simplificate, bazate pe ipoteza gazului ideal sau a curgerii strict izoterme, conduc la erori sistematice substanțiale în estimarea debitelor de scăpare: modelul izoterm de gaz real supraestimează debitul de avarie cu 18,8% (înaltă presiune) și 24,0% (medie presiune), iar modelul normativ ANRE îl subestimează cu circa 24% față de experiment.
2. Algoritmul iterativ Δx cu corecție BWR, care actualizează proprietățile gazului prin derivatele K_p și K_T la fiecare pas, menține eroarea față de datele experimentale sub 0,5% (+0,40% pentru defectul de 10 mm și +0,27% pentru defectul de 2 mm).
3. Coeficientul de debit prin deschideri în conducte din polietilenă variază între 0,867 și 0,694 în funcție de raportul presiunilor, iar diferențele dintre aer și metan sunt sub 1,2%; în rețelele de medie și joasă presiune este necesară utilizarea unui coeficient de debit variabil.
4. În cazul conductelor subterane, solul acționează ca o rezistență hidraulică: debitele diferă cu două ordine de mărime între nisip și pământul saturat cu apă, iar căile preferențiale (trasee de conducte, galerii) pot canaliza aproape întregul debit spre construcții. Modelul cuplat sol–conductă determină presiunea „pungii de gaze” la gura defectului și elimină ipoteza descărcării la presiune atmosferică.
5. În conductele de distribuție de diametru mic (63 mm), debitul de scurgere se plafonează odată cu atingerea regimului sonic la orificiu, astfel încât modelele normative și analitice definesc riscul maxim ipotetic, iar experimentul definește realitatea operativă.
6. Modelul 4 de optimizare hibridă (MILP + logică fuzzy, 45 de constrângeri) permite planificarea rețelelor de gaze naturale–hidrogen pe orizontul 2030–2050, integrând calitatea gazului, stocarea Power-to-Gas, bugetele OPEX/CAPEX și emisiile fugitive, și a fost aplicat pe patru niveluri de aglomerație, de la comună la Municipiul București.
7. Adaosul de hidrogen de până la 20% scade pierderile de presiune pe conductă (cu circa 16% pe tronsonul analizat) și reduce eroarea modelelor de gaz ideal, dar crește temperatura de formare a hidraților și debitul masic de scurgere în caz de avarie, impunând coeficienți de debit corectați pentru amestecuri cu peste 10% H_2.

CONTRIBUȚII PROPRII

1. **Algoritmul numeric iterativ Δx cu corecție BWR**, bazat pe ecuația de stare Benedict-Webb-Rubin și pe derivatele adimensionale ale factorului de compresibilitate (K_p, K_T), care elimină dependența de coeficienți empirici constanți și oferă erori medii sub 0,5% în evaluarea debitelor de avarie.
2. **Metodologia QRA** care corelează presiunea și aria defectului cu probabilitatea de defect (distribuție Weibull), pentru prioritizarea mentenanței și a investițiilor de înlocuire.

3. **Determinarea experimentală a coeficientului de debit** pentru deschideri laterale în conducte din polietilenă, pe un stand experimental propriu, și corelația $C_D = f(\beta)$.
4. **Modelul analitic cuplat sol–conductă**, care reunește hidrodinamica scurgerii prin defect cu filtrarea gazului prin mediul poros (legea lui Darcy extinsă) și determină presiunea de contact („punga de gaze”), corectând supraestimările metodelor normative.
5. **Aplicarea metodei surselor imagine** pentru distribuția presiunii în solul de acoperire, cu satisfacerea condiției de izobarism la suprafață.
6. **Modelul 4 de optimizare hibridă** a rețelelor de gaze naturale–hidrogen (MILP + inferență fuzzy, 45 de constrângeri hidraulice, calitative, economice și de mediu), aplicat pe patru scenarii teritoriale.
7. **Validarea experimentală** pe instalații de laborator pentru scurgeri prin medii poroase (nisip, pământ argilos, amestecuri cu diferite umidități și grade de compactare) și prin conducte din polietilenă de 63 mm.
8. **Modelele de învățare automată** (ANN, Random Forest, SVR) și ecuațiile de regresie pentru estimarea rapidă a debitelor de scurgere, a coeficientului de debit, a temperaturii de formare a hidraților și a pierderilor de presiune, integrabile în sisteme SCADA.

DIRECȚII DE CERCETARE VIITOARE

- Extinderea investigațiilor experimentale pentru concentrații de hidrogen de peste 20% mol, cu studiul compatibilității polietilenei de înaltă densitate și a oțelurilor din rețelele existente sub cicluri repetate de presiune și oboseală.
- Dezvoltarea unor sisteme de tip „geamăn digital” (Digital Twin), integrate cu modele ANN în arhitectura SCADA, pentru detectarea autonomă, în timp real, a avariilor subterane.
- Extinderea cadrului de optimizare multi-obiectiv la sistemele multi-energetice integrate (rețele electrice inteligente, termoficare urbană, micro-rețele verzi).

DISEMINAREA REZULTATELOR

[1] Gașpar M.R., Al Jaseem A.M., Chiș T., *Numerical modeling of the transport of hydrogen-methane gas mixture through pipelines*, 1st International Conference on Pioneer and Academic Research ICPAR 2025, Konya, Turcia, 13–14 iunie 2025, All Sciences Academy, ISBN 978-625-5900-60-9.

[2] Al Jaseem A.M., Gașpar M.R., Chiș T., *Risk factors and main accident scenarios in the C3+ fraction recovery plant from well gases*, ICPAR 2025, Konya, Turcia, 13–14 iunie 2025, ISBN 978-625-5900-60-9.

[3] Gașpar R.M., Prodea L., *Equations for the Movement of Natural Gases Through Pipes Distribution*, EDUDOC 2025 Symposion „Artificial intelligence research – The new paradigm in mines, oil and gas”, Editura Universității Petrol-Gaze din Ploiești, 2025, ISBN 978-973-719-925-6, p. 36.

[4] Gașpar R.M., Prodea L., *Impact of H2-NG Mixture on End-User Equipment*, EDUDOC 2025 Symposion, Editura Universității Petrol-Gaze din Ploiești, 2025, ISBN 978-973-719-925-6, p. 37.

[5] Al Jaseem A., Gașpar R., Damascan A., *The current state of research on the optimization of natural gas distribution*, 75 Years of Energy and Performance in Education and Research, Ploiești, 9.11.2023, Editura Universității Petrol-Gaze din Ploiești, ISBN 978-973-719-887-7.

[6] Neculai A.M., Chiș T., Gligor A.M., Gașpar R.M., *Numerical modeling of oil gas adsorption on activated carbon*, International Journal of Research in Engineering and Science (IJRES), vol. 12, nr. 12, 2024, pp. 110–118.

BIBLIOGRAFIE SELECTIVĂ

[1] International Energy Agency, *World energy statistics*, ed. 2021.

[2] U.S. Energy Information Administration, *Annual Energy Outlook 2023 with projections to 2050*, 2023.

[3] Alfaki M., Haugland D., Strong formulations for the pooling problem, *J. Global Optim.* 56(3) (2013) 897–916.

[4] Dell'Isola M., Ficco G., Lavalle L., Moretti L., Tofani A., Zuena F., A resilience assessment simulation tool for distribution gas networks, *J. Nat. Gas Sci. Eng.* 84 (2020) 103680.

[5] Dyachenko S.A., Zlotnik A., Korotkevich A.O., Chertkov M., Operator splitting method for simulation of dynamic flows in natural gas pipeline networks, *Physica D* 361 (2017) 1–11.

[6] Elaoud S., Hafsi Z., Hadj-Taieb L., Numerical modelling of hydrogen-natural gas mixtures flows in looped networks, *J. Petrol. Sci. Eng.* 159 (2017) 532–541.

[7] Ficco G., Frattolillo A., Zuena F., Dell'Isola M., Analysis of Delta In-Out of natural gas distribution networks, *Flow Meas. Instrum.* 84 (2022) 102139.

[8] Guandalini G., Colbertaldo P., Campanari S., Dynamic modeling of natural gas quality within transport pipelines in presence of hydrogen injections, *Appl. Energy* 185 (2017) 1712–1723.

[9] Herrán-González A., De La Cruz J.M., De Andrés-Toro B., Risco-Martín J.L., Modeling and simulation of a gas distribution pipeline network, *Appl. Math. Model.* 33(3) (2009) 1584–1600.

[10] Osiadacz A.J., Chaczykowski M., Comparison of isothermal and non-isothermal pipeline gas flow models, *Chem. Eng. J.* 81(1) (2001) 41–51.

[11] Ríos-Mercado R.Z., Borraz-Sánchez C., Optimization problems in natural gas transportation systems: a state-of-the-art review, *Appl. Energy* 147 (2015) 536–555.

[12] Audet C., Brimberg J., Hansen P., Le Digabel S., Mladenović N., Pooling problem: alternate formulations and solution methods, *Manage. Sci.* 50(6) (2004) 761–776.

[13] Chaczykowski M., Zarodkiewicz P., Simulation of natural gas quality distribution for pipeline systems, *Energy* 134 (2017) 681–698.

[14] Cheli L., Guzzo G., Adolfo D., Carcasci C., Steady-state analysis of a natural gas distribution network with hydrogen injection to absorb excess renewable electricity, *Int. J. Hydrogen Energy* 46(5) (2021).

[15] Zecheru Gh. et al., *Expertize și simulări privind evaluarea proceselor care conduc la cedarea în exploatare a conductelor*, Raport final, UPG Ploiești, 2008.

[16] Lața I., *Cercetări privind stabilirea capacității portante reziduale și întocmirea programelor de mentenanță pentru conductele de transport al gazelor naturale*, teză de doctorat, UPG Ploiești.

[17] International Energy Agency, *Net Zero by 2050*, IEA, Paris, 2022.