



UNIVERSITATEA DIN PETROȘANI

ȘCOALA DOCTORALĂ

DOMENIUL DE DOCTORAT: INGINERIE ȘI MANAGEMENT

TEZĂ DE DOCTORAT

CONDUCĂTOR DE DOCTORAT:

Prof.univ.dr.habil.ing.ec. POPESCU Cătălin Nicolae

STUDENT DOCTORAND:

ANGHEL (VLĂDESCU) Elena Cristina

2025



UNIVERSITATEA DIN PETROȘANI
ȘCOALA DOCTORALĂ
DOMENIUL DE DOCTORAT: INGINERIE ȘI MANAGEMENT

TITLUL TEZEI DE DOCTORAT

**Contribuții la dezvoltarea sistemelor de management predictiv destinate
îmbunătățirii tehnologiilor de mentenanță anticipativă a infrastructurilor
de transport prin conducte a hidrocarburilor fluide**

CONDUCATOR DE DOCTORAT:

Prof.univ.dr.habil.ing.ec. POPESCU Cătălin Nicolae

STUDENT DOCTORAND:

ANGHEL (VLĂDESCU) Elena Cristina

	<i>Membrii comisiei de îndrumare/ comisiei de îndrumare și integritate academică:</i>
1.	Conf.univ.dr.ing. DRUMEANU Adrian Cătălin
2.	Conf.univ.dr.ing. EPARU Cristian
3.	Conf.univ.dr.ing. PRICOP Emil

2025

CUPRINS

	Introducere.....	1
	Partea I Analiza sistemelor de transport țiței prin conducte din România..	4
1.	Analiza sistemelor de mentenanță a conductelor de transport lichide petroliere.....	5
1.1.	Istoricul mentenanței conductelor de transport țiței.....	5
1.2.	Analiza industriei petroliere din România.....	11
2.	Stadiul actual în cercetarea managementului reparației conductelor de transport țiței.....	12
2.1.	Analiza integrității sistemelor de transport țiței prin conducte.....	12
2.2.	Managementul reparațiilor conductelor de transport țiței.....	17
2.3.	Provocări și riscuri în operarea și repararea conductelor de transport țiței	20
2.3.1.	Cauzele defecțiunii sistemelor de conducte.....	20
2.3.2.	Riscurile operaționale, de mediu și siguranță în exploatare.....	22
2.3.3.	Provocările managementului reparațiilor.....	24
2.4.	Analiza critică a tehnologiilor actuale de inspecție și monitorizare.....	26
2.5.	Inspecția în linie (inspecția conductelor în flux continuu) (ILI) utilizând PIG-uri Inteligente.....	27
2.5.1.	Tehnologii cheie și capabilitățile acestora.....	27
2.5.2.	Limitările și provocările tehnologiilor de inspecție non intrusivă (NDT)	30
2.6.	Rolul senzorilor, dronelor și a teledetecției în mentenanța conductelor....	31
3.	Modelarea statistică a cheltuielilor de exploatare a operatorului național de transport țiței prin conducte.....	36
3.1.	Metodologie.....	36
3.2.	Analiză rezultate.....	43
3.2.1.	Statistica descriptivă.....	43
3.2.2.	Corelații.....	52
3.2.3.	Considerații sintetice asupra secțiunii dedicate modelării statistice a cheltuielilor de exploatare	77
4.	Modelarea riscului în managementul reparației conductelor de transport țiței.....	79
4.1.	Tehnici consacrate de reparare a conductelor.....	79
4.1.1.	Reparații prin sudură.....	79
4.1.2.	Reparații mecanice prin aplicarea de manșoane și cleme.....	81
4.1.3.	Reparații mecanice prin aplicarea de cleme.....	83
4.1.4.	Înlocuirea secțiunii afectate (Cutout).....	84
4.1.5.	Polizarea (Grinding).....	84
4.2.	Tehnologii moderne aplicate în repararea conductelor.....	85
4.2.1.	Reparații cu materiale compozite (Manșoane Compozite - Wraps).....	85
4.2.2.	Sisteme robotizate de reparație.....	86
4.2.3.	Metode de reabilitare fără șanț (Trenchless).....	88
4.3.	Strategii moderne de management al integrității conductelor.....	89
4.4.	Sisteme de management al siguranței conductelor (PSMS - API RP 1173)	90
4.5.	Metodologii de evaluare a riscului.....	93
4.6.	Modelarea riscului în exploatarea conductelor de transport fluide petroliere.....	95

	Partea II. Contribuții privind optimizarea mentenanței sistemelor de transport țiței prin conducte din România.....	102
5.	Aplicarea firelor de așteptare și a elementelor fuzzy în cadrul reparațiilor conductelor de transport fluide petroliere.....	103
5.1.	Analiza sistemelor de conducte prin utilizarea firelor de așteptare.....	103
5.2.	Modelul M/M/1.....	103
5.3.	Modelul M/M/c.....	105
6.	Mentenanța predictivă a sistemelor supuse defecțiunilor majore, bazată pe modelul de riscuri proporționale.....	115
6.1.	Metodologie.....	115
6.2.	Beneficii și concluzii.....	117
7.	Modelarea emisiilor gazelor cu efect de seră din țițeiurile scurse în urma producerii unor avarii.....	128
7.1.	Date teoretice privind tipul de emisii.....	128
7.2.	Impactul asupra mediului și sănătății.....	129
7.3.	Modelarea emisiilor provenite în urma avariei unor conducte de țiței.....	130
	Concluzii.....	138
	Bibliografie.....	151
	Anexe	161

REZUMATUL TEZEI DE DOCTORAT

Contribuții la dezvoltarea sistemelor de management predictiv destinate îmbunătățirii tehnologiilor de mentenanță anticipativă a infrastructurilor de transport prin conducte a hidrocarburilor fluide

Contextul și motivația cercetării

În România (din cauza lipsei raportărilor oficiale ale numărului de avarii la conductele de transport țitei), evaluarea acestor accidente cât mai ales clasificarea acestora este deficitară.

Clasificările existente la acest moment indică faptul că avariile se datorează:

- Forțelor externe sistemului de transport prin conducte,
- Fenomenelor de coroziune,
- Alte defecte provocate de mediul de amplasare a conductelor,
- Defecte provocate de operator,
- Defecte ale materialului conductei,
- Defecte de sudură,
- Defecte ale echipamentelor de măsurare presiune și/sau control al integrității sistemelor de transport prin conducte.

În ultima perioadă de timp, datorită creșterii îngrijorărilor privind efectele emisiilor datorate arderii produselor petroliere asupra mediului ambiant, cât mai ales a creșterii cerințelor populației privind protecția mediului ambiant (urmată de înăsprirea legislației), a apărut necesitatea implementării unui sistem de management al integrității conductelor (bazat pe adaptarea tehnologiilor avansate de inspecție și monitorizare necesare depistării precoce a defectelor) și introducerii unor metode de management predictiv destinate îmbunătățirii tehnologiilor de mentenanță anticipativă.

Consecințele extrem de grave ale defecțiunilor și costurile asociate remedierii fac din prevenirea și limitarea efectelor incidentelor priorități absolute.

Această tendință favorizează adoptarea unor tehnici de reparație care să reducă riscul de scurgere în timpul intervenției și să diminueze amprenta ecologică a operațiunii (de exemplu, reparații fără săpături, utilizarea manșoanelor compozite).

Operarea și întreținerea rețelelor extinse de conducte de transport țiței sunt procese complexe care sunt supuse unei varietăți de provocări și riscuri inerente.

Pe fond, cauzele defecțiunii sistemelor de conducte sunt:

- a. Coroziunea, care reprezintă în continuare una dintre cele mai importante amenințări la adresa siguranței conductelor;
- b. Defecțiuni ale materialului țevii sunt datorate procesului de fabricare a țevii (defecte în corpul țevii sau în sudura longitudinală/elicoidală);
- c. Defecțiuni de sudură pot apărea în timpul construcției (suduri circumferențiare neconforme, instalare inadecvată);
- d. Defecțiunile echipamentelor auxiliare (vane, fittinguri, garnituri sau sistemele de control), reprezintă, de asemenea, o cauză semnificativă de incidente;
- e. Avariile provocate de terți sunt definite ca și intervenții accidentale ale terților în zona de siguranță a conductei, în special prin activități de săpare sau construcție;
- f. Îndoiturile provocate de loviri sau amplasarea conductelor în zone cu pietriș sau roci dure sunt deosebit de periculoase fiind însoțite ulterior și de pierdere de material;
- g. Fenomenele naturale (riscuri geologice) reprezintă o altă sursă relevantă de avariere externă;
- h. Operare neconformă sau/și eroare umană în operarea sistemului sunt greșelile comise în timpul funcționării normale sau în situații anormale și pot conduce la incidente grave; supra-presurizarea accidentală, controlul inadecvat al presiunii sau debitului, nerespectarea procedurilor de operare sau de întreținere și deciziile eronate în situații de urgență sunt exemple frecvente;
- i. Fisurarea materialului țevii datorată apariției unor tensiuni interne; aceste tensiuni se pot datora coroziunii sub tensiune sau fisurilor datorate oboselii materialului;
- j. Fragilizarea materialului țevelor (este un fenomen determinant în cazul conductelor magistrale de transport țiței);
- k. Intervențiile neautorizate asupra sistemului de transport țiței.

Așa cum am specificat mai sus defecțiunile conductelor de transport țiței conduc și la declanșarea unei game extinse de pericole operaționale, ecologice și de siguranță, cu un potențial impact sever asupra mediului ambiant.

Acestate sunt:

- Pericole pentru siguranță
- Pericole pentru mediu
- Pericole economice

- Pericole sociale.

Ca atare, sistemele de transport prin conducte se confruntă cu provocări excepționale în ceea ce privește mentenanța acestora, determinate inclusiv de:

- a. Vechimea conductelor
- b. Accesul dificil și medii ostile
- c. Strategiile de dezvoltare urbanistică a României
- d. Conformarea la legislația în vigoare
- e. Limitările tehnologice
- f. Managementul și analiza datelor
- g. Forța de muncă calificată
- h. Managementul costurilor și a resurselor

Pe acest fond am efectuat, în continuare, o analiză critică a tehnologiilor actuale de inspecție și monitorizare.

Industria de transport țiței prin conducte beneficiază de sisteme de detecție locală a grosimii de perete și a stării izolației, precum și de instrumente inteligente care detectează starea conductelor prin parcurgerea interioară a acestora.

Astfel, evaluarea nedistructivă (NDT) are ca principale metode:

- i. Testarea ultrasonică (UT);
- j. Testarea ultrasonică cu unde distribuite pe distanțe mari (GWUT);
- k. Inspecția cu scurgeri de flux magnetic (MFL);
- l. Utilizarea de traductoare acustice electromagnetice (EMATs);
- m. Testarea cu curenți turbionari (ECT);
- n. Emisia acustică (AE).

De asemenea, evaluările NDT cuprind și inspecțiile în linie ILI (inspecția conductelor în flux continuu) utilizând PIG-uri Inteligente:

- a. PIG-uri MFL (Magnetic Flux Leakage):

O variantă a Inspecției cu câmp magnetic transversal (Transverse Field Inspection - TFI), utilizează o orientare diferită a câmpului magnetic și este uneori folosită pentru detectarea anumitor tipuri de fisuri sau defecte orientate longitudinal;

- b. PIG-uri UT (Ultrasonic Testing): Utilizează traductoare ultrasonice pentru a măsura direct grosimea rămasă a peretelui conductei.
- c. PIG-uri de calibrare/geometrie (Caliper PIGs): Aceste instrumente sunt echipate cu brațe mecanice flexibile sau senzori electromecanici care măsoară diametrul intern al conductei pe întreaga sa lungime.

d. PIG-uri pentru detectarea fisurilor:

Standardul care definește modul de aplicare a tehnologiilor In-Line este standardul API Std 1163, care stabilește cerințe bazate pe performanță, definind puncte cheie precum Probabilitatea de Detecție (POD), Probabilitatea de Identificare (POI) și Acuratețea Dimensionării (Sizing Accuracy - SA).

Ca în orice domeniu există limitări și provocări pentru tehnologiile de inspecție non intrusivă (NDT):

- a. Pigabilitatea (Piggability)
- b. Calitatea datelor
- c. Acuratețea detecției și a dimensionării defectului
- d. Costul.

În acest context general a luat naștere motivația centrală a cercetării conținută de teza de doctorat, și anume identificarea, verificarea și propunerea unor tehnici moderne de urmărire și control care să gestioneze integrat suita de mijloace enumerată mai sus în vederea creșterii gradului de siguranță în exploatare a sistemelor de transport hidrocarburi.

Obiectivele cercetării

Prezenta teză de doctorat se dorește a fi o primă lucrare de specialitate care să analizeze:

- a. Utilizarea tehnicilor de control fuzzy în asigurarea mentenanței conductelor;
- b. Analiza statistică a cheltuielilor necesare întreținerii unui sistem de conducte;
- c. Studiarea metodelor predictive de mentenanță a conductelor;
- d. Evaluarea riscurilor în timpul operațiilor de asigurare a securității în exploatare a conductelor de transport țitei;
- e. Analiza sensibilității medicale a angajaților care lucrează în domeniul mentenanței conductelor de transport țitei din cadrul societății naționale de transport prin conducte a lichidelor petroliere;

Lucrarea are un puternic caracter aplicativ, fiind prima din lume care analizează:

- a. Rolul conductelor de transport fluide petroliere în asigurarea securității energetice a țărilor membre NATO;
- b. Modul de creștere a siguranței în exploatare prin utilizarea tehnicilor moderne de urmărire și control;
- c. Provocările de mediu în contextul trecerii la reducerea emisiilor gazelor cu efect de

seră și utilizarea resurselor energetice provenite din surse regenerabile;

d. Decarbonizarea sistemului național român de transport lichide petroliere, prin analiza alocării conductelor în vederea transportului de dioxid de carbon.

De asemenea, lucrarea își propune să obțină o înțelegere mai profundă a factorilor determinanți ai daunelor și a impactului acestora asupra costurilor economice, în vederea dezvoltării unor politici eficiente de prevenire, îmbunătățirii strategiilor de mentenanță și optimizării alocării resurselor pentru reducerea pierderilor în sectorul transportului prin conducte.

Metodologia cercetării

Metodologia cercetării a inclus utilizarea unor tehnici avansate de analiză, cum ar fi testele de normalitate Kolmogorov-Smirnov și Shapiro-Wilks, analiza varianței (ANOVA), testul Kruskal-Wallis, regresia liniară multiplă și modelele arborelui decizional (CHAID). Prin utilizarea metodelor statistice, mentenanța predictivă ajută companiile să reducă riscurile, să optimizeze costurile și să prelungească durata de viață a conductelor, contribuind astfel la o gestionare mai eficientă a rețelelor de transport al țițeiului. Studiul se concentrează pe structura și distribuția defecțiunilor, distribuția geografică a defecțiunilor, impactul economic al defecțiunilor, sezonabilitatea defecțiunilor, analiza corelațiilor și modelarea factorilor de cost.

Pentru metodele de cercetare abordate am utilizat rapoarte, studii experimentale anterioare, studii longitudinale și studii transdisciplinare, am colectat și analizat date numerice, accentul fiind pus pe măsurarea scalei, intervalului, frecvenței fenomenelor enunțate, am creat modele de simulare pentru analiza ratei de risc instantaneu al unui sistem de conducte, evaluarea cantitativă a riscului (Quantitative Risk Assessment - QRA), utilizând modele matematice și date statistice.

Variabilele din cercetare au fost selectate astfel încât să asigure o cât mai bună analiză a aspectelor legate de cauzele pierderilor și avariilor din sector.

Datele referitoare la costul total și costul mediu lunar în lei au fost transformate în USD pe baza cursului valutar mediu lunar publicat pe BNR pe site-ul său pentru o mai bună comparare a evoluției acestora în perioada analizată.

Pentru variabilele continue (numerice) a fost verificat cu ajutorul testului One sample Kolmogorov – Smirnov dacă valorile urmează o distribuție normală, la nivelul întregului eșantion de înregistrări statistice, pentru a alege ulterior instrumentele și metodele statistice adecvate.

Din rezultatele prezentate s-a dedus că pentru niciuna din variabilele continue (numerice) nu există o distribuție normală și prin urmare s-au utilizat metode ale statisticii neparametrice adecvate datelor de tip "non-normal distribution".

Deoarece pentru analiza datelor s-au făcut comparații între sau în interiorului unui grup (de exemplu, comparații ale diferențelor între ani, între luni, tip de avarie etc.) s-a testat normalitatea distribuției valorilor pentru variabilele continue din cercetare cu ajutorul testului Shapiro – Wilks.

Pentru a analiza dacă există corelații, asocieri între variabilele din cercetare am aplicat corelațiile neparametrice Spearman și Pearson pentru variabilele categoriale din studiu.

Pentru a analiza dacă există diferențe semnificative ale numărului de avarii înregistrate într-o lună, costului total în lei și/ sau dolari într-o lună sau ale costului mediu pe lună în lei și / sau în dolari am aplicat metoda One – way ANOVA cu corecție Bonferroni și testul pentru eșantioane independente Kruskal – Wallis cu comparații perechi pentru a identifica exact între ce subgrupuri există aceste diferențe semnificative statistice.

Acest rezultat este confirmat și de rezultatele testului ANOVA pentru compararea mediilor acestor variabile între anii de studiu, iar testul Bonferroni nu semnalează diferențe între nicio pereche comparativă de ani.

Testul de comparație perechi Bonferroni nu a semnalat însă nicio diferență semnificativă statistic între tipurile de produse avariate.

Pentru a identifica care este cel mai bun predictor sau variabila care diferențiază cel mai bine între valorile sub sau peste costul mediu, am aplicat metoda "decision tree" cu algoritm CHAID, rezultatele fiind prezentate grafic.

În concluzie, implementarea unui sistem de mentenanță preventivă și predictivă bine structurat nu numai că va reduce riscurile de defecțiuni, dar va optimiza și costurile operaționale, asigurând funcționarea sigură și eficientă a infrastructurii pe termen lung.

Structura tezei

Sintetic, teza de doctorat este structurată pe două direcții consistente:

“Analiza sistemelor de transport țiței prin conducte din România”,

desfășurată pe larg în:

- **Capitolul I „Analiza sistemelor de mentenanță a conductelor de transport lichide petroliere”;**

- Capitolul II „Stadiul actual în cercetarea managementului reparației conductelor de transport țiței”;
- Capitolul III „Modelarea statistică a cheltuielilor de exploatare a operatorului național de transport țiței prin conducte”;
- Capitolul IV “Modelarea riscului în managementul reparației conductelor de transport țiței”,

Respectiv,

“Contribuții privind optimizarea mentenanței sistemelor de transport țiței prin conducte din România”,

detaliată în:

- Capitolul V “Aplicarea firelor de așteptare și a elementelor fuzzy în cadrul reparațiilor conductelor de transport fluide petroliere”;
- Capitolul VI “Mentenanța predictivă a sistemelor supuse defecțiunilor majore, bazată pe modelul de riscuri proporționale”;
- Capitolul VI “Modelarea emisiilor gazelor cu efect de seră din țițeiurile scurse în urma producerii unor avarii”.

Rezultatele cercetării

Managementul eficient al reparațiilor nu poate fi disociat de strategiile mai largi de management al integrității conductelor (PIM) și de sistemele de management al siguranței (PSMS).

Aceste tehnici moderne oferă o abordare structurată și proactivă pentru identificarea, evaluarea și reducerea riscurilor pe parcursul întregului ciclu de viață al conductei, informând deciziile privind inspecțiile, întreținerea și reparațiile.

Managementul Integrității Conductelor (PIM) este definit ca un proces sistematic, cuprinzător și integrat, conceput pentru a evalua și a reduce riscurile asociate cu operarea conductelor, asigurând astfel siguranța și fiabilitatea acestora.

Un program PIM tipic implică un ciclu continuu de activități:

1. **Identificarea riscurilor:** Recunoașterea tuturor pericolelor potențiale care ar putea afecta integritatea conductei (ex. coroziune, deteriorări mecanice, defecte de material, forțe naturale, erori operaționale);

2. **Colectarea și integrarea datelor:** Adunarea tuturor informațiilor relevante despre conductă (caracteristici constructive, istoric operațional, date de inspecție și monitorizare, condiții de mediu);
3. **Evaluarea riscului:** Analizarea datelor pentru a estima probabilitatea și consecințele potențiale ale unei defecțiuni pentru fiecare segment de conductă, permițând prioritizarea zonelor cu risc ridicat;
4. **Evaluarea integrității:** Utilizarea metodelor de inspecție adecvate (ex. ILI, evaluare directă, teste hidrostatice) pentru a determina starea actuală a conductei, în special în zonele cu risc ridicat sau în zonele cu posibile consecințe mari (High Consequence Areas - HCA);
5. **Reparații și măsuri preventive/P&MM):** Implementarea acțiunilor necesare pentru a corecta defectele identificate (reparații) sau pentru a reduce probabilitatea sau consecințele unei defecțiuni (măsuri preventive, cum ar fi îmbunătățirea protecției catodice, sau măsuri mitigative, cum ar fi instalarea de vane de închidere rapidă);
6. **Evaluarea performanței și îmbunătățirea continuă:** Monitorizarea eficacității programului PIM prin intermediul unor indicatori de performanță (metrics) și ajustarea continuă a strategiilor și proceselor pe baza rezultatelor și a lecțiilor învățate.

Pe dimensiunea îmbunătățirii sistemelor de management al siguranței conductelor (Standard API RP 1173), care are drept scop gestionarea proactivă și sistematică a riscurilor de siguranță în toate aspectele operaționale și decizionale ale companiei, am creat un model AI care să dezvolte o platformă de management al siguranței.

Componentele cheie ale platformei sunt:

1. Panou de Control Operațional:

- **Hartă Interactivă:** O reprezentare vizuală a rețelei de conducte din România;
- **Informații în Timp Real:** (presiune, debit și nivelul de risc static al zonei respective).

2. Motorul de Inteligență Artificială (Simulat):

- **Detecția Anomaliilor;**
- **Alerte Inteligente;**

3. Mentenanță Predictivă:

- **Grafic de Risc:** Acest grafic este actualizat în timp real și arată probabilitatea de defecțiune estimată de un model AI (simulat) pentru fiecare segment în următoarele șase luni.

- **Luarea Deciziilor:** Acest instrument permite echipelor de mentenanță să își prioritizeze eforturile, concentrându-se pe segmentele cu cel mai mare risc de defecțiune, înainte ca un incident să aibă loc.

În ceea ce privește evaluarea riscului și modelarea riscului în exploatarea unui sistem de conducte, am plecat de la:

1. analiza stării conductei (a presiunii de operare) funcție de grosimea peretelui;
2. evaluarea defectelor de metal și clasificarea acestora prin cinci clase de intervenție;
3. evaluarea defectelor de izolație și clasificarea acestora prin cinci clase de intervenție;
4. integrarea datelor privind starea mediului (date geologice, date meteorologice, etc.);
5. analiza de risc a unor avarii la o conductă de țiței;
6. crearea unui model de evaluare de risc bazat pe inteligență artificială;
7. optimizarea modelului.

În cadrul acestui model am utilizat:

1. baze de date privind starea conductei;
2. simularea Monte Carlo pentru a evalua incertitudinea și distribuția rezultatelor posibile a unui accident;
3. modelarea dispersiei atât a țițeiului cât și a compușilor organici volatili;
4. evaluarea riscului în ceea ce privește sănătatea angajaților și a personalului contractor;
5. evaluarea riscului accidentelor conductelor de transport fluide petroliere asupra mediului ambiant (clădiri etc.).

În cadrul acestei teze de doctorat am scris un program în Python privind evaluarea riscului în exploatarea conductelor de transport țiței.

Scriptul Python demonstrează o abordare simplificată, bazată pe un model care utilizează scoruri de definire a riscului.

Când riscul numeric este mai mare de 60, activitatea este critică, pentru o valoare mai mare de 35 și mai mică de 60 riscul este ridicat, pentru o valoare mai mare de 15 și mai mică de 35 riscul este mediu și sub valoare de 15, riscul este scăzut.

Modelul propus de mine anterior l-am transferat într-un model care utilizează inteligență artificială (AI).

Modelul dezvoltat de mine în AI pleacă de la definirea unui sistem de conduite (un set mare de date istorice despre conduite, inclusiv care dintre ele au avut avarii și care nu).

Pentru acest capitol am generat prin Machine Learning softul de calcul al riscului în exploatare prin:

1. Simularea a peste 1000 de segmente de conductă;
2. Includerea proprietăților acestora și a numărului de avarii pe tronsoane;
3. Utilizarea algoritmului RandomForestClassifier, antrenat pe 80 % din datele introduse de noi;
4. Evaluarea performanței modelului (pe restul de 20 % din conduite care sunt segmente noi);
5. Obținerea unor date privind factorii cei mai importanți în predicția unei avarii (de exemplu vârsta conductei sau coroziunea mediului ambiant).

Modelul descris prin calcularea riscului se bazează pe elemente definite de către expertul care face predicția.

Cel definit cu ajutorul AI învață singur care sunt tiparele și corelațiile ascunse în datele cu risc crescut de avarie.

Datele de ieșire au constat în:

1. Rapoartele de clasificare (în consolă);
2. Graficul cu matricile de confuzie (acest grafic este esențial pentru a înțelege *tipul* de greșeli pe care le face fiecare model);
3. Graficul cu curbele ROC;
4. Graficele cu importanța factorilor.

Datele de rulare a softului sunt prezentate în Anexa nr. 1 a prezentului rezumat.

În continuare am abordat, în scopul îmbunătățirii, problematica analizei sistemelor de conduite prin utilizarea firelor de așteptare.

Teoria firelor de așteptare, cunoscută și sub numele de teoria cozilor, este un domeniu al matematicii aplicate care studiază liniile de așteptare sau cozile.

Aceasta este esențială în contextul reparației conductelor de transport țitei, unde gestionarea eficientă a resurselor și timpilor de reparație sunt critice pentru funcționarea optimă.

Teoria firelor de așteptare se bazează pe modele matematice care descriu comportamentul cozilor.

Aceste modele utilizează variabile precum timpul de sosire, timpul de serviciu, numărul de servere și capacitatea cozii.

Cele mai comune modele includ:

- M/M/1 (o singură linie de așteptare cu sosiri și servicii Markoviene);
- M/M/c (multiple servere cu sosiri și servicii Markoviene);
- M/G/1 (o singură linie de așteptare cu sosiri Markoviene și servicii generale).

Fiind cel mai complex, a abordat, spre îmbunătățire, **modelul M/M/c**.

În model am definit:

- M (Markovian): Descrie procesul de apariție a avariilor și presupune că avariile apar aleatoriu în timp, dar la o rată medie constantă.

Timpul dintre două avarii consecutive urmează o distribuție exponențială.

- A doua literă M (Markovian): Descrie procesul de reparare a conductei. Acesta presupune că timpul necesar pentru o reparație urmează, de asemenea, o distribuție exponențială. Toate cele "c" echipe de mentenanță sunt considerate a fi identice în ceea ce privește viteza lor medie de lucru.
- c: Reprezintă numărul de servere (echipe de mentenanță) disponibile pentru a efectua reparațiile.

Și în această etapă a tezei de doctorat am creat un program software care combină teoria cozilor de așteptare cu inteligența artificială (AI).

Având în vedere că un model M/M/c se bazează pe distribuții probabilistice fixe, iar un program cu AI poate folosi date istorice pentru a face predicții specifice, îmbunătățind astfel acuratețea simulării, softul creat este un model de învățare automată care prezice timpul necesar pentru o reparație, pe baza unor caracteristici ale avariei, în loc să folosească o rată medie fixă de service.

Acest program este o simulare, nu doar un calcul de formule, etapele cheie fiind:

1. Date sintetice: Programul creează un set de date de antrenament care leagă tipul avariei și locația cu un timp de reparație. Aceasta simulează baza de date istorică pe care o companie de mentenanță o are.
2. Model AI: Un model simplu de regresie liniară din biblioteca scikit-learn este antrenat pe aceste date. Rolul său este de a prezice cât va dura o reparație.
3. Simulare: Programul simulează apariția avariilor (la intervale aleatorii) și cere modelului AI să prezică timpul de reparație, apoi le plasează într-o coadă pentru echipele de mentenanță.

4. Rezultate: La finalul simulării, se calculează indicatori precum timpul mediu de așteptare și numărul mediu de avarii în sistem.

Acest program demonstrează cum un model de AI poate oferi o estimare mai granulară și mai realistă a timpului de service, făcând simularea mult mai precisă.

În capitolul următor am abordat mentenanța predictivă a sistemelor supuse defecțiunilor majore, bazată pe modelul de riscuri proporționale.

Rolul acestei tehnici de lucru are drept scop anticiparea defecțiunilor înainte ca acestea să se producă. Mentenanța predictivă utilizează date în timp real și modele statistice pentru a estima momentul probabil al unei defecțiuni.

O metodologie statistică deosebit de puternică în acest context este modelul de riscuri proporționale (modelul COX), care permite analiza și predicția defecțiunilor majore prin identificarea factorilor de risc ce influențează durata de viață a unui sistem.

În concluzie, această metodologie transformă datele brute, colectate de senzori, într-o unealtă strategică de management al riscului, asigurând o operare mai sigură, mai eficientă și mai rentabilă a infrastructurii critice de transport.

Am creat un model pentru CONPET în sistemul COX.

Pentru acest sistem de conducte am generat, în etapa I, un program în AI pentru 2500 de date istorice și am împărțit modelul în 2000 de puncte de antrenament și 500 puncte de testare (figura 6.2).

Am utilizat toate cele patru teste AI și anume Regresie Liniară, Random Forest, XGBoost și Rețea Neuronală.

Performanțele au fost exprimate prin MSE (mai mic înseamnă mai bun) și am obținut pentru:

- Regresie Liniară : 0.001923;
- Random Forest : 0.001040;
- XGBoost : 0.001057;
- Rețea Neuronală : 0.001109.

În etapa a II-a a acestui studiu am creat un model de simulare cu 2000 de date simulând problemele ce pot afecta integritatea conductelor de transport țigei și anume:

- a. Activitățile ilicite;
- b. Starea protecției catodice;
- c. Agresivitatea solului;
- d. Vechimea conductei;

- e. Finațare slabă a activității de mentenanță;
- f. Management defectuos;
- g. Defecte de material;
- h. Defectarea aparaturii de control;
- i. Defectarea materialului conductei.

Programul realizat de mine prin metode Cox a returnat timpul până la apariția unei defecțiuni (zile).

În etapa a III-a am creat Curbele de Supraviețuire (un grafic extrem de intuitiv).

Acest program ne oferă o analiză completă și robustă, exact cum ar proceda un analist de date într-o companie de petrol și gaze pentru a prioritiza inspecțiile și reparațiile.

De asemenea am generat într-un program AI selectarea celui mai bun model în evaluarea efectelor asupra avarierii conductelor.

Am generat peste 2000 de puncte de avariere obținând:

- Regresie Liniară : 18287.353611;
- Random Forest : 20300.916058;
- XGBoost : 24616.211764;
- Rețea Neuronală : 17477.628347.

Interpretarea rezultatelor grafice a condus la concluzia că, deși folosesc o abordare complet diferită, modelele AI avansate pot "redescoperi" cu succes principalii factori de risc dintr-un set de date complex, oferind rezultate aliniate cu cele ale metodelor statistice clasice, dar cu o flexibilitate potențial mai mare.

În continuare am analizat modalitățile de modelare a emisiilor gazelor cu efect de seră din țigări scurse în urma producerii unor avarii.

Deși, în literatura de specialitate nu sunt foarte multe relații de modelare numerică am reușit ca, prin determinarea în teren a cantităților de scurgerii de țigări și mai ales prin măsurarea emisiilor diversilor compuși, să creez unele relații numerice date de regresie liniară.

Regresia liniară este un model "transparent" (white box) care produce o ecuație matematică simplă și direct interpretabilă.

Modelele SVR, Random Forest și Gradient Boosting sunt modele "cutie neagră" (black box).

Ele sunt adesea mult mai precise, dar nu produc o formulă algebrică simplă.

Predicția lor este rezultatul unui algoritm complex, reprezentat ca o funcție $f(\text{variabile})$.

Modelele avansate (SVR, Random Forest, Gradient Boosting) oferă o predicție mai precisă prin modelarea complexă a volatilității H_2S în funcție de proprietățile fizice ale țițeiului.

Concluzii și direcții de cercetare viitoare

Cu toate progresele realizate persistă o serie de provocări semnificative și domenii care necesită cercetare suplimentară:

- **Gestionarea infrastructurii îmbătrânite:** Managementul eficient al riscurilor asociate cu conductele vechi, care constituie o parte semnificativă a rețelei globale, rămâne o provocare majoră din punct de vedere tehnic și economic.
- **Detectarea defectelor complexe:** Detectarea și dimensionarea fiabilă a anumitor tipuri de defecte rămân dificile. Fisurile complexe (ex.: colonii de SCC, fisuri interacționate, fisuri în zone cu geometrie complexă sau tensiuni reziduale ridicate), anumite defecte de sudură sau stadiile incipiente ale coroziunii sau deteriorării mecanice pot scăpa detectării sau pot fi dimensionate incorect de tehnologiile actuale.
- **Conductele negodevilabile (Unpiggable Pipelines):** O proporție semnificativă a conductelor existente nu poate fi inspectată prin metode ILI convenționale din cauza constrângerilor geometrice sau operaționale. Dezvoltarea și validarea unor metode alternative de inspecție (ex. evaluări directe îmbunătățite - ECDA) sau a unor tehnologii noi (ex. roboți de inspecție internă) pentru aceste segmente sunt esențiale.
- **Integrarea și validarea datelor:** Combinarea eficientă a datelor provenite din surse multiple și eterogene (ILI cu tehnologii diferite, NDT, senzori, date operaționale, istoric) într-un model de risc coerent și fiabil este o provocare continuă. Asigurarea calității datelor, cuantificarea incertitudinilor și gestionarea datelor lipsă sau incomplete sunt aspecte critice.
- **Performanța pe termen lung a materialelor noi:** Deși reparațiile compozite sunt standardizate, validarea durabilității și performanței lor pe termen foarte lung (decenii) în condiții operaționale și de mediu reale necesită acumularea de date de teren și cercetări suplimentare privind mecanismele de degradare pe termen lung.
- **Factorii umani și cultura siguranței:** Eroarea umană rămâne un factor contributor semnificativ la incidente. Implementarea și menținerea unei culturi organizaționale robuste a siguranței, care să încurajeze vigilența, comunicarea deschisă și învățarea continuă, este un proces permanent și esențial.

- **Rentabilitatea economică:** Găsirea echilibrului optim între investițiile necesare pentru implementarea tehnologiilor avansate de inspecție, monitorizare și reparație și a programelor PIM/PSMS cuprinzătoare, și constrângerile bugetare operaționale, rămâne o provocare managerială constantă.

Tendențe viitoare și direcții de cercetare

Viitorul managementului reparației și integrității conductelor pare a fi modelat de convergența mai multor tendințe tehnologice și strategice:

- **Integrarea AI/ML:** Se anticipează o utilizare tot mai extinsă a inteligenței artificiale și a învățării automate în toate etapele ciclului PIM. Aceasta include algoritmi mai sofisticati pentru analiza automată a datelor NDT și ILI în vederea detectării și caracterizării defectelor, modele predictive mai precise pentru estimarea degradării, optimizarea evaluărilor de risc și dezvoltarea de sisteme de suport decizional inteligente pentru operatori.
- **Geamănul digital (Digital Twin):** Conceptul de a crea o replică virtuală detaliată a conductei fizice, actualizată în timp real cu date de la senzori și inspecții, câștigă teren. Gemenii digitali permit simularea comportamentului conductei în diverse scenarii operaționale sau de avarie, optimizarea strategiilor de întreținere predictivă, vizualizarea riscurilor și testarea virtuală a intervențiilor.
- **Robotica avansată:** Se așteaptă progrese continue în dezvoltarea roboților pentru inspecție și reparații, cu accent pe creșterea autonomiei, a capacității de navigare în medii complexe (conducte ne-pigabile, subacvatic), a dexterității manipuloarelor și a gamei de sarcini pe care le pot efectua (ex. sudură, aplicare compozite, NDT avansat).
- **Senzori și monitorizare îmbunătățite:** Cercetarea se concentrează pe dezvoltarea de senzori mai sensibili, mai fiabili, mai ieftini și mai ușor de implementat (inclusiv senzori wireless și auto-alimentați) pentru monitorizarea continuă a parametrilor cheie ai conductei și ai mediului înconjurător. Tehnologiile de teledetecție (satelit, drone) vor beneficia de rezoluții spațiale și temporale mai bune și de algoritmi de analiză a imaginilor mai performanți.
- **Materiale avansate:** Continuarea cercetării și dezvoltării de noi materiale pentru construcția și repararea conductelor, cu proprietăți mecanice superioare, durabilitate crescută și rezistență îmbunătățită la coroziune și alte forme de degradare. Dezvoltarea

materialelor adecvate pentru transportul hidrogenului este, de asemenea, o prioritate emergentă.

- **Fuziunea și vizualizarea datelor:** Dezvoltarea de platforme și tehnici mai eficiente pentru fuzionarea datelor din surse multiple și eterogene și pentru crearea de vizualizări intuitive și interactive care să faciliteze înțelegerea rapidă a stării de integritate și a riscurilor asociate.
- **Sustenabilitate și considerații ESG (Environmental, Social, Governance):** O atenție sporită va fi acordată reducerii impactului asupra mediului al operațiunilor de conducte, inclusiv minimizarea scurgerilor și emisiilor (legate de produs sau de activitățile de întreținere), selectarea materialelor și tehnologiilor cu amprentă ecologică redusă și îmbunătățirea transparenței și a angajamentului față de comunități.
- **Securitate cibernetică (Cybersecurity):** Pe măsură ce sistemele de control și monitorizare a conductelor devin tot mai digitalizate și interconectate, protejarea lor împotriva atacurilor cibernetice devine o componentă esențială a managementului riscului.

Convergența tehnologiilor digitale avansate – AI/ML, senzori IoT, robotică și gemeni digitali – prefigurează o nouă eră în managementul integrității conductelor, adesea denumită "Pipeline 4.0".

Această paradigmă promite o gestionare mult mai automatizată, bazată pe date în timp real și fundamental predictivă, cu potențialul de a îmbunătăți dramatic siguranța, eficiența și fiabilitatea operațiunilor.

Totuși, realizarea acestei viziuni necesită depășirea unor bariere semnificative legate de investițiile în tehnologie și infrastructura de date, dezvoltarea de standarde pentru interoperabilitate, asigurarea securității cibernetice și, poate cel mai important, transformarea competențelor forței de muncă pentru a putea opera și gestiona aceste sisteme complexe.

Pe lângă avansul tehnologic, considerentele de sustenabilitate și impact asupra mediului devin factori tot mai influenți în strategiile de management al integrității.

Presiunea publică și regulatorie, împreună cu o conștientizare corporativă crescută, împing industria să adopte practici care nu doar asigură siguranța imediată, ci și minimizează amprenta ecologică pe termen lung.

Aceasta poate influența alegerea tehnologiilor de inspecție și reparație (favorizând soluțiile non-invazive sau cu emisii reduse), selecția materialelor și prioritizarea investițiilor în detectarea și prevenirea scurgerilor.

În final, în ciuda tuturor inovațiilor tehnologice, provocările fundamentale legate de gestionarea infrastructurii fizice, în special a celei îmbătrânite, și de asigurarea unui control riguros al calității pe parcursul întregului ciclu de viață al conductei – de la selecția materialelor și fabricație, la construcție, operare și, crucial, în timpul activităților de reparație– rămân de actualitate.

Tehnologia este un instrument puternic, dar nu poate înlocui principiile solide de inginerie, asigurarea meticuloasă a calității și un management vigilent al activelor pe termen lung.

Recomandări pentru cercetare viitoare și adoptare în industrie

Pentru a continua progresul în domeniul managementului reparației conductelor de țiței, sunt necesare eforturi concertate atât în cercetare, cât și în implementarea industrială:

- **Direcții de cercetare prioritare:**

- Validarea pe termen lung a performanței și durabilității reparațiilor compozite în condiții operaționale diverse și dezvoltarea unor modele de predicție a degradării acestora.
- Îmbunătățirea acurateței, robusteții și interpretabilității modelelor AI/ML pentru întreținerea predictivă și caracterizarea defectelor complexe din datele de inspecție.
- Dezvoltarea și validarea unor tehnici NDT fiabile și rentabile pentru detectarea și dimensionarea defectelor critice (ex. fisuri SCC, defecte în suduri) în conducte nepigabile sau greu accesibile.
- Avansarea capacităților robotice pentru sarcini complexe de reparație (ex. sudură de precizie, aplicare de reparații interne în condiții dificile) și creșterea autonomiei și fiabilității acestora.
- Standardizarea formatelor de date provenite de la diverse tehnologii de inspecție și monitorizare pentru a facilita integrarea și analiza multi-sursă.
- Cercetarea materialelor noi pentru conducte și reparații, cu accent pe durabilitate, rezistență la medii agresive și compatibilitate cu fluide viitoare (ex. hidrogen).

- **Recomandări pentru adoptare în industrie:**

- Accelerarea adoptării și implementării riguroase a cadrelor PSMS (API RP 1173) pentru a consolida cultura siguranței și managementul holistic al riscului.
- Investiții strategice în infrastructura de management al datelor și în dezvoltarea

competențelor analitice interne pentru a valorifica potențialul datelor de integritate.

- Adoptarea pe scară mai largă a evaluării cantitative a riscului (QRA) și a strategiilor de întreținere predictivă pentru optimizarea deciziilor și a resurselor.
- Sprijinirea activă a eforturilor de standardizare pentru tehnologiile emergente (robotica, AI în PIM) pentru a facilita adoptarea lor sigură și eficientă.
- Încurajarea colaborării și a schimbului de bune practici între operatori, furnizori de tehnologie, instituții de cercetare și autorități de reglementare.
- Prioritizarea programelor de instruire și dezvoltare a forței de muncă pentru a asigura competențele necesare în utilizarea noilor tehnologii și în analiza datelor complexe.

Observații concluzive

Managementul reparației conductelor de transport țiței a evoluat semnificativ de la o abordare reactivă la una proactivă, integrată și bazată pe date.

Progresele în tehnologiile de inspecție, monitorizare și reparație, împreună cu dezvoltarea unor cadre de management al integrității și siguranței tot mai sofisticate (PIM și PSMS), au contribuit la îmbunătățirea siguranței și fiabilității acestei infrastructuri critice.

Cu toate acestea, provocări majore persistă, în special cele legate de gestionarea infrastructurii îmbătrânite, detectarea defectelor complexe, managementul volumelor masive de date și asigurarea calității pe tot parcursul ciclului de viață.

Viitorul domeniului este strâns legat de continuarea inovației tehnologice, în special prin integrarea inteligenței artificiale, a roboticii și a monitorizării avansate, și de adoptarea pe scară largă a abordărilor predictive și cantitative în managementul riscului.

Asigurarea siguranței pe termen lung a conductelor de țiței necesită un angajament continuu față de cercetare, dezvoltare, standardizare și implementarea celor mai bune practici disponibile.

Colaborarea între toți actorii implicați – operatori, furnizori, cercetători și autorități – este esențială pentru a aborda provocările complexe și pentru a valorifica oportunitățile oferite de noile tehnologii, garantând astfel transportul sigur și responsabil al resurselor energetice vitale.

Anexa 1

Datele de rulare a softului sunt:

[14.84] Defect nou a aparut (ID: 1, Severitate: 10)

[15.00] Echipa 0 a inceput reparatia defectului 1 (Severitate: 10). Timp de asteptare: 0.16

[16.21] Defect nou a aparut (ID: 2, Severitate: 9)

[16.58] Defect nou a aparut (ID: 3, Severitate: 1)

[17.00] Echipa 1 a inceput reparatia defectului 2 (Severitate: 9). Timp de asteptare: 0.79

[17.00] Echipa 2 a inceput reparatia defectului 3 (Severitate: 1). Timp de asteptare: 0.42

[17.04] Defect nou a aparut (ID: 4, Severitate: 8)

[19.60] Defect nou a aparut (ID: 5, Severitate: 9)

[23.09] Echipa 0 a finalizat reparatia defectului 1. Durata reparatiei: 8.09

[23.09] Echipa 0 a inceput reparatia defectului 5 (Severitate: 9). Timp de asteptare: 3.49

[23.85] Defect nou a aparut (ID: 6, Severitate: 10)

[24.09] Defect nou a aparut (ID: 7, Severitate: 8)

[26.07] Defect nou a aparut (ID: 8, Severitate: 2)

[26.14] Echipa 2 a finalizat reparatia defectului 3. Durata reparatiei: 9.14

[26.14] Echipa 2 a inceput reparatia defectului 6 (Severitate: 10). Timp de asteptare: 2.28

[26.53] Echipa 2 a finalizat reparatia defectului 6. Durata reparatiei: 0.39

[26.53] Echipa 2 a inceput reparatia defectului 4 (Severitate: 8). Timp de asteptare: 9.49

[27.65] Defect nou a aparut (ID: 9, Severitate: 10)

[32.89] Defect nou a aparut (ID: 10, Severitate: 8)

[34.89] Echipa 0 a finalizat reparatia defectului 5. Durata reparatiei: 11.80

[34.89] Echipa 0 a inceput reparatia defectului 9 (Severitate: 10). Timp de asteptare: 7.24

[34.94] Echipa 1 a finalizat reparatia defectului 2. Durata reparatiei: 17.94

[34.94] Echipa 1 a inceput reparatia defectului 7 (Severitate: 8). Timp de asteptare: 10.84

[40.05] Defect nou a aparut (ID: 11, Severitate: 5)

[41.49] Echipa 2 a finalizat reparatia defectului 4. Durata reparatiei: 14.96

[41.49] Echipa 2 a inceput reparatia defectului 10 (Severitate: 8). Timp de asteptare: 8.60

[43.41] Defect nou a aparut (ID: 12, Severitate: 1)

[44.65] Defect nou a aparut (ID: 13, Severitate: 3)

[47.10] Echipa 2 a finalizat reparatia defectului 10. Durata reparatiei: 5.61

[47.10] Echipa 2 a inceput reparatia defectului 11 (Severitate: 5). Timp de asteptare: 7.04

[47.83] Echipa 1 a finalizat reparatia defectului 7. Durata reparatiei: 12.89

[47.83] Echipa 1 a inceput reparatia defectului 13 (Severitate: 3). Timp de asteptare: 3.18

[49.39] Defect nou a aparut (ID: 14, Severitate: 5)

[50.05] Defect nou a aparut (ID: 15, Severitate: 6)

[51.49] Defect nou a aparut (ID: 16, Severitate: 2)

[52.09] Defect nou a aparut (ID: 17, Severitate: 1)

[55.87] Defect nou a aparut (ID: 18, Severitate: 5)

[59.78] Echipa 2 a finalizat reparatia defectului 11. Durata reparatiei: 12.68

[59.78] Echipa 2 a inceput reparatia defectului 15 (Severitate: 6). Timp de asteptare: 9.73

[60.74] Echipa 2 a finalizat reparatia defectului 15. Durata reparatiei: 0.96

[60.74] Echipa 2 a inceput reparatia defectului 14 (Severitate: 5). Timp de asteptare: 11.35

[62.60] Defect nou a aparut (ID: 19, Severitate: 1)

[68.61] Echipa 2 a finalizat reparatia defectului 14. Durata reparatiei: 7.87

[68.61] Echipa 2 a inceput reparatia defectului 18 (Severitate: 5). Timp de asteptare: 12.74

[70.80] Echipa 2 a finalizat reparatia defectului 18. Durata reparatiei: 2.19

[70.80] Echipa 2 a inceput reparatia defectului 8 (Severitate: 2). Timp de asteptare: 44.72

[71.13] Echipa 0 a finalizat reparatia defectului 9. Durata reparatiei: 36.24

[71.13] Echipa 0 a inceput reparatia defectului 16 (Severitate: 2). Timp de asteptare: 19.64

[72.19] Echipa 0 a finalizat reparatia defectului 16. Durata reparatiei: 1.07

[72.19] Echipa 0 a inceput reparatia defectului 12 (Severitate: 1). Timp de asteptare: 28.79

[72.21] Echipa 2 a finalizat reparatia defectului 8. Durata reparatiei: 1.41

[72.21] Echipa 2 a inceput reparatia defectului 17 (Severitate: 1). Timp de asteptare: 20.12

[72.39] Echipa 1 a finalizat reparatia defectului 13. Durata reparatiei: 24.56

[72.39] Echipa 1 a inceput reparatia defectului 19 (Severitate: 1). Timp de asteptare: 9.78

[72.58] Defect nou a aparut (ID: 20, Severitate: 8)

[75.72] Echipa 0 a finalizat reparatia defectului 12. Durata reparatiei: 3.52

[75.72] Echipa 0 a inceput reparatia defectului 20 (Severitate: 8). Timp de asteptare: 3.13

[77.29] Echipa 2 a finalizat reparatia defectului 17. Durata reparatiei: 5.08

[80.10] Echipa 1 a finalizat reparatia defectului 19. Durata reparatiei: 7.72

[80.59] Defect nou a aparut (ID: 21, Severitate: 9)

[81.10] Echipa 1 a inceput reparatia defectului 21 (Severitate: 9). Timp de asteptare: 0.52

[81.95] Defect nou a aparut (ID: 22, Severitate: 10)

[82.29] Echipa 2 a inceput reparatia defectului 22 (Severitate: 10). Timp de asteptare: 0.34

[83.66] Echipa 0 a finalizat reparatia defectului 20. Durata reparatiei: 7.95

[86.60] Defect nou a aparut (ID: 23, Severitate: 10)

[86.66] Echipa 0 a inceput reparatia defectului 23 (Severitate: 10). Timp de asteptare: 0.06

[93.98] Echipa 2 a finalizat reparatia defectului 22. Durata reparatiei: 11.69

[94.09] Echipa 0 a finalizat reparatia defectului 23. Durata reparatiei: 7.43

[94.22] Defect nou a aparut (ID: 24, Severitate: 3)

[94.98] Echipa 2 a inceput reparatia defectului 24 (Severitate: 3). Timp de asteptare: 0.76

[100.87] Echipa 2 a finalizat reparatia defectului 24. Durata reparatiei: 5.89

[100.93] Defect nou a aparut (ID: 25, Severitate: 9)

[101.09] Echipa 0 a inceput reparatia defectului 25 (Severitate: 9). Timp de asteptare: 0.16

[102.34] Echipa 0 a finalizat reparatia defectului 25. Durata reparatiei: 1.25

[108.34] Defect nou a aparut (ID: 26, Severitate: 10)

[108.87] Echipa 2 a inceput reparatia defectului 26 (Severitate: 10). Timp de asteptare: 0.52

[109.95] Defect nou a aparut (ID: 27, Severitate: 1)

[110.34] Echipa 0 a inceput reparatia defectului 27 (Severitate: 1). Timp de asteptare: 0.38

[115.09] Defect nou a aparut (ID: 28, Severitate: 6)

[119.71] Defect nou a aparut (ID: 29, Severitate: 10)

[125.83] Echipa 2 a finalizat reparatia defectului 26. Durata reparatiei: 16.97

[125.83] Echipa 2 a inceput reparatia defectului 29 (Severitate: 10). Timp de asteptare: 6.13

[126.42] Defect nou a aparut (ID: 30, Severitate: 9)

[127.33] Echipa 2 a finalizat reparatia defectului 29. Durata reparatiei: 1.50

[127.33] Echipa 2 a inceput reparatia defectului 30 (Severitate: 9). Timp de asteptare: 0.91

[128.25] Defect nou a aparut (ID: 31, Severitate: 8)

[130.85] Defect nou a aparut (ID: 32, Severitate: 3)

[139.13] Echipa 2 a finalizat reparatia defectului 30. Durata reparatiei: 11.80

[139.13] Echipa 2 a inceput reparatia defectului 31 (Severitate: 8). Timp de asteptare: 10.88

[142.57] Defect nou a aparut (ID: 33, Severitate: 3)

[143.13] Defect nou a aparut (ID: 34, Severitate: 2)

[146.13] Echipa 1 a finalizat reparatia defectului 21. Durata reparatiei: 65.02

[146.13] Echipa 1 a inceput reparatia defectului 28 (Severitate: 6). Timp de asteptare: 31.04

[148.70] Defect nou a aparut (ID: 35, Severitate: 2)

[154.06] Echipa 0 a finalizat reparatia defectului 27. Durata reparatiei: 43.72

[154.06] Echipa 0 a inceput reparatia defectului 32 (Severitate: 3). Timp de asteptare: 23.21

[156.56] Defect nou a aparut (ID: 36, Severitate: 4)

[157.87] Defect nou a aparut (ID: 37, Severitate: 7)

[159.66] Defect nou a aparut (ID: 38, Severitate: 6)

[162.36] Echipa 1 a finalizat reparatia defectului 28. Durata reparatiei: 16.23

[162.36] Echipa 1 a inceput reparatia defectului 37 (Severitate: 7). Timp de asteptare: 4.49

[163.16] Echipa 2 a finalizat reparatia defectului 31. Durata reparatiei: 24.03

[163.16] Echipa 2 a inceput reparatia defectului 38 (Severitate: 6). Timp de asteptare: 3.50

[164.14] Echipa 2 a finalizat reparatia defectului 38. Durata reparatiei: 0.98

[164.14] Echipa 2 a inceput reparatia defectului 36 (Severitate: 4). Timp de asteptare: 7.58

[168.15] Echipa 1 a finalizat reparatia defectului 37. Durata reparatiei: 5.79

[168.15] Echipa 1 a inceput reparatia defectului 33 (Severitate: 3). Timp de asteptare: 25.58

[169.16] Defect nou a aparut (ID: 39, Severitate: 3)

[173.16] Echipa 1 a finalizat reparatia defectului 33. Durata reparatiei: 5.01

[173.16] Echipa 1 a inceput reparatia defectului 39 (Severitate: 3). Timp de asteptare: 4.00

[177.05] Echipa 1 a finalizat reparatia defectului 39. Durata reparatiei: 3.89

[177.05] Echipa 1 a inceput reparatia defectului 34 (Severitate: 2). Timp de asteptare: 33.92

[177.46] Defect nou a aparut (ID: 40, Severitate: 6)

[179.86] Defect nou a aparut (ID: 41, Severitate: 6)

[181.29] Defect nou a aparut (ID: 42, Severitate: 3)

[187.48] Echipa 2 a finalizat reparatia defectului 36. Durata reparatiei: 23.34

[187.48] Echipa 2 a inceput reparatia defectului 40 (Severitate: 6). Timp de asteptare: 10.02

[188.30] Echipa 2 a finalizat reparatia defectului 40. Durata reparatiei: 0.82

[188.30] Echipa 2 a inceput reparatia defectului 41 (Severitate: 6). Timp de asteptare: 8.44

[195.54] Echipa 2 a finalizat reparatia defectului 41. Durata reparatiei: 7.23

[195.54] Echipa 2 a inceput reparatia defectului 42 (Severitate: 3). Timp de asteptare: 14.25

[197.99] Defect nou a aparut (ID: 43, Severitate: 7)

Bibliografie

1. R.Vlădescu, Contribuții la îmbunătățirea tehnologiilor de mentenanță a sistemelor de transport prin conducte a hidrocarburilor fluide în scopul creșterii gradului de siguranță în exploatare, Teză de doctorat (2022), https://www.upg-ploiesti.ro/sites/default/files/doctorat/VLADESCU%20ROBERT_ANUNTURI%20USTINERE%20TEZA%20DOCTORAT.pdf.
2. Z. Li, Y. Liang, Q. Liao, B. Zhang, H. Zhang, A review of multiproduct pipeline scheduling: from bibliometric analysis to research framework and future research directions, J. Pipeline Sci. Eng. 1 (2021) 395–406.
3. T. Chiș -Liquid Pipeline Accident Statistics Base for Pipeline Rehabilitation, International Pipeline Conference, Calgary, Canada, 9-14 June, 1996, Proceedings of the International Pipeline Conference, ASME, ISBN 079187679, New York, (1996) 6 pg, pg 319-327.
4. I. Ozturk, A literature survey on energy–growth nexus, Energy Pol. 38 (2010) 340–349.
5. M. Soltani, B. Hajipour, J. Tayebinia, Identifying the factors affecting competitiveness: a case study of Iranian natural gas industry, Energy Strategy Rev. 36 (2021).
6. T. Chis, R. Radulescu, D. Stoianovici, Vlădescu, R., A New Model of Oil Pipeline (Oleduct) Risk Assessment. International Journal of Safety & Security Engineering, (2021) 13(1).
7. R. G. Vlădescu, Problems in insuring maintenance of transport systems of fluid hydrocarbons through metal pipes, BULETINUL INSTITUTULUI POLITEHNIC DIN IAȘI Publicat de Universitatea Tehnică „Gheorghe Asachi” din Iași, (2021), Volumul 67 (71), Numărul 2, 2021 Secția CONSTRUCȚII DE MAȘINI DOI:10.2478/bipcm-2021-0012.
8. G. Mutezo, J. Mulopo, A review of Africa’s transition from fossil fuels to renewable energy using circular economy principles, Renew. Sustain. Energy Rev. 137 (2021).
9. <https://www.tdwilliamson.com/company/who-we-are/history>.
10. <https://inspectioneering.com/journal/2017-04-27/6416/a-history-of-in-line-inspection-tools>.
11. <https://www.pipeliner.com.au/internationalnews/the-origin-of-intelligent-pigs/>.

12. <https://en.wikipedia.org/wiki/Pigging>.
13. R. G. Vlădescu, Methods of carrying out the anticipative maintenance of fluid hydrocarbons transport systems. BULETINUL INSTITUTULUI POLITEHNIC DIN IAȘI Publicat de Universitatea Tehnică „Gheorghe Asachi” din Iași (2021), Volumul 67 (71), Numărul 3, 2021 Secția CONSTRUCȚII DE MAȘINI DOI:10.2478/bipcm-2021-0016.
14. X.L. Gong, J.M. Liu, X. Xiong, W. Zhang, The dynamic effects of international oil price shocks on economic fluctuation, Resour. Pol. 74 (2021).
15. C. Chen, C. Li, G. Reniers, F. Yang, Safety and security of oil and gas pipeline transportation: a systematic analysis of research trends and future needs using WoS, J. Clean. Prod. 279 (2021).
16. A. Bazyar, N. Zarrinpoor, A. Safavian, Optimal design of a sustainable natural gas supply chain network under uncertainty, Chem. Eng. Res. Des. 176 (2021) 60–88.
17. F. Shaikh, Q. Ji, P.H. Shaikh, N.H. Mirjat, M.A. Uqaili, Forecasting China’s natural gas demand based on optimised nonlinear grey models, Energy 140 (2017) 941–951.
18. B. Wang, M. Yuan, H. Zhang, W. Zhao, Y. Liang, An MILP model for optimal design of multi-period natural gas transmission network, Chem. Eng. Res. Des. 129 (2018) 122–131.
19. H. Zhang, Y. Liang, Q. Liao, J. Chen, W. Zhang, Y. Long, C. Qian, Optimal design and operation for supply chain system of multi-state natural gas under uncertainties of demand and purchase price, Comput. Ind. Eng. 131 (2019) 115–130.
20. R. Vlădescu, M. Banica, T. Chis, Explosion of the gas pipeline in Sighet-Romania, International Journal of Engineering, Management and Humanities (IJEMH), Volume 2, Issue 4, (2021), pp: 383-389 www.ijemh.com,
21. http://ijemh.com/issue_dcp/Explosion%20of%20the%20gas%20pipeline%20in%20Sighet%20Romania.pdf.
22. <https://oilfieldafricareview.com/bg-technical-linalog-magnetic-flux-leakage-mfl-pipeline-intelligent-inspection-technology/>.
23. https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_countries_by_total_length_of_pipelines.
24. <https://www.petroleumhistory.org/OilHistory/pages/Pipelines/first.html>.
25. <https://beltmag.com/uncovering-america-first-oil-landscape/>.
26. <https://www.okazii.ro/bustenari-sonde-a213270913>.

27. Milwaukee Daily Sentinel [Milwaukee, Wisconsin] 21 Jan. 1874, and Gas Explosion in Bennington, Vt, Independent Statesman [Concord, New Hampshire], 22 Jan. 1874: 132, Gale NewsVault: Nineteenth Century U.S. Newspapers.
28. <https://bjmures.ro/wp-content/uploads/2024/02/C00125.pdf>.
29. Inspection and maintenance of oil & gas pipelines: a review of policies - ResearchGate,
https://www.researchgate.net/publication/304041364_Inspection_and_maintenance_of_oil_gas_pipelines_a_review_of_policies.
30. Pipeline Integrity Management, accesată pe aprilie 30, 2025, https://pstrust.org/wp-content/uploads/2015/10/Kowalewski-IM-PE_Report.pdf.
31. Importance Of Pipeline Integrity Management - NWE, accesată pe aprilie 30, 2025, <https://nwegroup.no/importance-of-pipeline-and-piping-integrity/>.
32. Pipeline Integrity Regulations & Standards - AUCSC, accesată pe aprilie 30, 2025, https://aucsc.com/downloads/PIM_Pipeline%20Integrity%20and%20Standards_2019.pdf.
33. What is Pipeline Integrity? Procedures, Benefits and The Standards - PetroSync, accesată pe aprilie 30, 2025, <https://www.petrosync.com/blog/what-is-pipeline-integrity/>.
34. Pipeline Safety Management System (PSMS) - Unitil, accesată pe aprilie 30, 2025, <https://unitil.com/energy-projects/pipeline-safety-management-system-psms>.
35. Pipeline Risks - Tip of the Mitt Watershed Council, accesată pe aprilie 30, 2025, <https://watershedcouncil.org/policy-advocacy/state/pipelines/pipeline-risks/>.
36. Pipeline Integrity Management System | US - TUV Rheinland, accesată pe aprilie 30, 2025, <https://www.tuv.com/usa/en/pipeline-integrity-management-system.html>.
37. Accidents Waiting to Happen: Oil Pipelines - Frontier Group, accesată pe aprilie 30, 2025, <https://frontiergroup.org/resources/accidents-waiting-to-happen-oil-pipelines/>.
38. Q. Liao, Y. Liang, N. Xu, H. Zhang, J. Wang, X. Zhou, An MILP approach for detailed scheduling of multi-product pipeline in pressure control mode, Chem. Eng. Res. Des. 136 (2018) 620–637.
39. R. Avalos, T. Fitzgerald, R.R. Rucker, Measuring the effects of natural gas pipeline constraints on regional pricing and market integration, Energy Econ. 60 (2016) 217–231.

40. X. Zhou, Y. Liang, X. Zhang, Q. Liao, S. Gao, W. Zhang, H. Zhang, A MILP model for the detailed scheduling of multiproduct pipelines with the hydraulic constraints rigorously considered, *Comput. Chem. Eng.* 130 (2019).
41. C. Dieckhoner, S. Lochner, D. Lindenberger, European natural gas infrastructure: the impact of market developments on gas flows and physical market integration, *Appl. Energy* 102 (2013) 994–1003.
42. V.G. Cafaro, D.C. Cafaro, C.A. Mendez, J. Cerda, MINLP model for the detailed scheduling of refined products pipelines with flow rate dependent pumping costs, *Comput. Chem. Eng.* 72 (2015) 210–221.
43. T. Keller, G.H. Kuper, M. Mulder, Mergers of Germany's natural gas market areas: is transmission capacity booked efficiently? *Util. Pol.* 56 (2019) 104–119.
44. S.Nazari , H.A Kuzma, III, J.W. Rector, Predicting permeability from well log data and core measurements using support vector machines. In: SEG Technical Program Expanded Abstracts 2011. Society of Exploration Geophysicists, (2011), pp. 2004–2008.
45. S.O. Olatunji, A. Selamat, A. Abdulraheem, Modeling the permeability of carbonate reservoir using type-2 fuzzy logic systems. *Comput. Ind.* (2011), 62 (2), 147–163.
46. E. Oyewole, M. Saneifar, Z. Heidari, et al., Multi-scale characterization of pore structure in carbonate formations: application to the sacroc unit. In: SPWLA 56th Annual Logging Symposium. Society of Petrophysicists and Well-Log Analysts, (2015).
47. D. Potts, C. Sammut, Incremental learning of linear model trees. *Mach. Learn.* 61 (2005), (1–3), 5–48.
48. J.R. Quinlan, Learning with continuous classes. In: *Proceedings of 5th Australian Joint Conference on Artificial Intelligence*, vol. 92. (1992), pp. 343–348.
49. J. Raiga-Clemenceau, J. Martin, S. Nicoletis, et al., The concept of acoustic formation factor for more accurate porosity determination from sonic transit time data. In: *Proceedings of the 27th SPWLA Annual Logging Symposium*. Society of Petrophysicists and Well-Log Analysts, (1986).
50. B.D. Ripley, *Pattern Recognition and Neural Networks*. Cambridge University Press (2007).
51. J.J. Rodríguez, C. García-Osorio, J. Maudes, J.F. Díez-Pastor, An experimental study on ensembles of functional trees. In: *International Workshop on Multiple Classifier Systems*. Springer, (2010), pp. 64–73.

52. M. Saemi, M.Ahmadi, A.Y. Varjani, Design of neural networks using genetic algorithm for the permeability estimation of the reservoir. *J. Petrol. Sci. Eng.* (2007), 59 (1–2), 97–105.
53. C. Avraam, D. Chu, S. Siddiqui, Natural gas infrastructure development in North America under integrated markets, *Energy Pol.* 147 (2020).
54. E. Dukhanina, O. Massol, Spatial integration of natural gas markets: a literature review, *Curr. Sustain./Renew. Energy Rep.* 5 (2018) 129–137.
55. M.T. Devine, M. Russo, Liquefied natural gas and gas storage valuation: lessons from the integrated Irish and UK markets, *Appl. Energy* 238 (2019) 1389–1406.
56. E. Dukhanina, O. Massol, F. L'ev^eque, Policy measures targeting a more integrated gas market: impact of a merger of two trading zones on prices and arbitrage activity in France, *Energy Pol.* 132 (2019) 583–593.
57. X. Tong, J. Zheng, B. Fang, Strategic analysis on establishing a natural gas trading hub in China, *Nat. Gas. Ind. B* 1 (2014) 210–220.
58. A. del Valle, P. Duenas, S. Wogrin, J. Reneses, A fundamental analysis on the implementation and development of virtual natural gas hubs, *Energy Econ.* 67 (2017) 520–532.
59. Crude Oil Transport: Risks and Impacts - Green Choices, accesată pe aprilie 30, 2025, https://www.greenchoices.cornell.edu/resources/publications/transport/Crude_Oil_Transport.pdf
60. Environmental Impacts and its Concerns due to Accidents in Oil& Gas Pipelines around India-a Mini review, accesată pe aprilie 30, 2025, <https://www.heraldopenaccess.us/openaccess/environmental-impacts-and-its-concerns-due-to-accidents-in-oil-gas-pipelines-around-india-a-mini-review>
61. The Danger of the Pipelines and Trains that Serve Refineries | Sightline Institute, accesată pe aprilie 30, 2025, <https://www.sightline.org/2021/10/27/the-danger-of-the-pipelines-and-trains-that-serve-refineries/>
62. PHMSA Final Rule - Gas Pipeline Leak Detection and Repair, accesată pe aprilie 30, 2025, <https://www.phmsa.dot.gov/sites/phmsa.dot.gov/files/2025-01/PHMSA%20Final%20Rule%20-%20Gas%20Pipeline%20Leak%20Detection%20and%20Repair%20-%20As%20submitted.pdf>
63. Operations & Maintenance Enforcement Guidance Part 195 Subpart F - Pipeline and Hazardous Materials Safety Administration, accesată pe aprilie 30, 2025,

<https://www.phmsa.dot.gov/sites/phmsa.dot.gov/files/docs/regulatory-compliance/pipeline/enforcement/5781/o-m-enforcement-guidance-part-195-7-21-2017.pdf>

64. US Department of Transportation Pipeline and Hazardous Materials Safety Administration, accesată pe aprilie 30, 2025,
<https://www.phmsa.dot.gov/sites/phmsa.dot.gov/files/2025-01/Report%20to%20Congress%20-%20PHMSA%20FY%202021-2022%20Pipeline%20Safety%20R%26D%20Update%20Report.pdf>
65. https://www.researchgate.net/publication/237551949_In-Line_Inspection_using_Combined_Technologies_-_Magnetic_Flux_Leakage_and_Ultrasonic_Testing_and_their_Advantages/figures?lo=1&utm_source=google&utm_medium=organic,
66. <https://inosol.id/services-magnetic-flux-leakage-caliper-geometry-crack-detector-stress-concentration-detector-tfi-transverse-field-inspection-in-line-inspection-pipeline/magnetic-flux-leakage-mfl-transverse-field-inspection-tfi-inline-inspection-pipeline/>
67. <https://www.pipecaregroup.com/ultrasonic-inspection/>,
68. <https://www.americanpipelinesolutions.com/caliper-pigging>
69. <https://halfrepairsleeve.com/split-sleeve-clamp/>,
70. <https://www.exportersindia.com/product-detail/full-encirclement-steel-pipe-sleeve-4304588.htm>,
71. <https://www.dwt-pipetools.com/en/products/pipe-welding-tools/pipeline-leak-repair-clamp/>,
72. <https://www.kerreneeredsales.com/blog/tdw-firsts-isolation-tools-in-action>,
73. https://www.apiwebstore.org/standards/1173?utm_term=api%20rp%201173&utm_campaign=Webstore+-+International&utm_source=adwords&utm_medium=ppc&hsa_acc=4890137417&hsa_cam=20477134457&hsa_grp=178894350912&hsa_ad=747633324637&hsa_src=g&hsa_tgt=kwd-860356452610&hsa_kw=api%20rp%201173&hsa_mt=e&hsa_net=adwords&hsa_ver=3&gad_source=1&gad_campaignid=20477134457&gbraid=0AAAAACF6QdGOOvMgDKHjXumF0NRTHjb1S&gclid=CjwKCAjw-svEBhB6EiwAEzSdrhnmJcKd2XAMfl3LsIsPNhL1CqFtwTNdE1TE6aWBEBraXUWhwNa8-hoCKwsQAvD_BwE,

74. <https://www.ibm.com/support/pages/downloading-ibm-spss-statistics-20>.
75. <https://geodacenter.github.io/>
76. <https://www.microsoft.com/ro-ro/microsoft-365/excel>.
77. <https://www.mapchart.net/>.
78. H. Nalbant, M. O. Kayalica, G. Kayakutlu, G. Kaya, An analysis of the natural gas pricing in natural gas hubs: an evaluation for Turkey, *Energy Syst.* (2020) 1–25, <https://doi.org/10.1007/s12667-020-00395-8>.
79. H. Yang, P. You, C. Shang, Distributed planning of electricity and natural gas networks and energy hubs, *Appl. Energy* 282 (2021).
80. T. Jamasb, M. Pollitt, T. Triebs, Productivity and efficiency of US gas transmission companies: a European regulatory perspective, *Energy Pol.* 36 (2008) 3398–3412.
81. J.A. Hern´andez Ibarabal, Natural gas infrastructure investment, regulation and ownership: the Australian case, *Pol. Stud.* 32 (2011) 231–242.
82. U.d.P. Alberto Cavaliere, *The Liberalisation of Natural Gas Markets: Regulatory Reform and Competition Failures in Italy*, 2007.
83. C.v. Hirschhausen, Infrastructure, regulation, investment and security of supply: a case study of the restructured US natural gas market, *Util. Pol.* 16 (2008) 1–10.
84. F. Gasmi, J.D. Oviedo, Investment in transport infrastructure, regulation, and gas–gas competition, *Energy Econ.* 32 (2010) 726–736.
85. C. Chaton, F. Gasmi, M.-L. Guillerminet, J.-D. Oviedo, Gas release and transport capacity investment as instruments to foster competition in gas markets, *Energy Econ.* 34 (2012) 1251–1258.
86. I. Opolska, The efficacy of liberalization and privatization in introducing competition into European natural gas markets, *Util. Pol.* 48 (2017) 12–21.
87. K. Talus, United States natural gas markets, contracts and risks: what lessons for the European Union and Asia-Pacific natural gas markets? *Energy Pol.* 74 (2014) 28–34.
88. C. Mos´acula, J.P. Chaves-Avila, J. Reneses, Reviewing the design of natural gas network charges considering regulatory principles as guiding criteria in the context of the increasing interrelation of energy carriers, *Energy Pol.* 126 (2019) 545–557.
89. F. Cernoch, B. Danc´ak, H. Koouskova, A. Leshchenko, P. Ocelík, J. Osicka, V. Sebek, T. Vlcek, V. Zapletalova, *The Future of the Druzhba Pipeline as a Strategic Challenge for the Czech Republic and Poland*, 2012.
90. O. Voytyuk, The gas sector of Ukraine: past and future, *Wschodnioznawstwo* 14 (2020) 207–232.

91. <https://www.dreamstime.com/photos-images/oil-gas-pipeline-grinding.html> .
92. <https://nautiluslive.org/tech/rov-hercules>.
93. J. Ayaburi, S. Sharma, M. Bazilian, Comparative analysis of selected African natural gas markets and related policies, *Energy Sustain. Dev.* 63 (2021) 67–77.
94. M. Hallack, M. Vazquez, European Union regulation of gas transmission services: challenges in the allocation of network resources through entry/exit schemes, *Util. Pol.* 25 (2013) 23–32.
95. M. Yuan, H. Zhang, B. Wang, R. Shen, Y. Long, Y. Liang, Future scenario of China's downstream oil supply chain: an energy, economy and environment analysis for impacts of pipeline network reform, *J. Clean. Prod.* 232 (2019) 1513–1528.
96. K. Mohlin, *The U.S. Gas Pipeline Transportation Market: An Introductory Guide with Research Questions for the Energy Transition*, IO: Regulation, 2021.
97. M. Vazquez, M. Hallack, *Design of Auctions for Short-Term Allocation in Gas Markets Based on Virtual Hubs*, 2012.
98. E. Çam, D. Lencz, Pricing short-term gas transmission capacity: a theoretical approach to understand the diverse effects of the multiplier system, *Energy Econ.* 95 (2021).
99. J. Xiao, C. Song, G. Zu, L. Lv, B. She, X. Zhang, Gas transmission capability curve of natural gas system: concept and steady-state model, *J. Nat. Gas Sci. Eng.* 87 (2021).
101. M. Ahammed, Probabilistic estimation of remaining life of a pipeline in the presence of active corrosion defects. *Int. J. Pres. Ves. Pip.*, (1998). 75(4), 321–329.
102. C. Bersani, L. Citro, R. V. Gagliardi, R. Sacile, A. M. Tomasoni, Accident occurrence evaluation in the pipeline transport dangerous goods. *Chem. Eng. Trans.*, (2010) 19, 249–254.
103. M. Bertolini, N. Bevilacqua, Methodology and theory oil pipeline cause analysis a classification tree approach. *J. Qual. Mainten. Eng.*, (2006). 12(2), 186–198.
104. L. Chao, M. Skibniewski, Fuzzy logic for evaluating alternative construction technology.” *J. Constr. Eng. Manage.*, (1998). 10.1061/(ASCE)0733-9364(1998)124:4(297), 297–304.
105. P. M. Davis, J. Dubois, F. Gambardella, Uhlig, F. Performance of European cross-country oil pipelines: Statistical summary of reported spillages in 2008 and since 1971.” CONCAWE Oil Pipelines Management Group, Special Task Force, Brussels (2010).
106. A. W. Dawotola, P. H. A. J. M. VanGelder, J. K. Vrijling, Risk assessment of petroleum pipelines using a combined analytical hierarchy process—fault tree analysis

- (AHP-FTA). Proc., 7th Int. Probabilistic Workshop, Dirk Proske Verlag, Delft, The Netherlands (2009).
- 107.M. Detyniecki, B. Moubeche, B. Bouchon-Meunier, On the paradoxical success of mamdani's minimum-based inference. *Studies in Fuzziness and Soft Computing, Combining Experimentation and Theory*, Vol. 271. Scientific Publishing Services, Springer, Chennai, India, (2012) 259–270.
 - 108.P. K. Dey, A risk based model for inspection and maintenance of cross country petroleum pipelines. *J. Qual. Mainten. Eng.*, (2001). 7(1), 25–43.
 109. P. K. Dey, S. O. Ogunlana, S. Naksuksakul, Risk-based maintenance model for offshore oil and gas pipelines: A case study. *J. Qual. Mainten. Eng.*, (2004). 10(3), 169–183.
 - 110.I. Dikmen, M. Birgonul, S. Kiziltas, Prediction of organizational effectiveness in construction companies. *J. Constr. Eng. Manage.*, (2005) 10.1061/(ASCE)0733-9364(2005)131:2(252), 252–261.
 - 111.E. E. Elbeltagi, T. Hegazy,. A hybrid Ai-based system for site layout planning in construction.” *Comput. Aided Civ. Infrastruct. Eng.*, (2001) 16(2), 79–93.
 - 112.G. S. Fishman, *Monte Carlo: Concepts, algorithms, and applications*, Springer, (1996).
 - 113.G.Fu, Z.Kapelan, P. Reed“Reducing the complexity of multiobjective water distribution system optimization through global sensitivity analysis.” *J. Water Resour. Plann. Manage.*, 10.1061/ (ASCE)WR.1943-5452.0000171, (2012). 196–207.
 - 114.R. Goodland, *Oil and gas pipelines social and environmental impact assessment: State of the art.*” IAIA 2005 (2005), Conf., Robert Goodland, McLean, VA.
 - 115.J. M. Hallen, F.Caleyo, J. L. Gonzalez, Probabilistic condition assessment of corroding pipelines in Mexico. Proc., 3rd Pan American Conf. for Nondestructive Testing (PANNDT), (2003), Curran Associates, Red Hook, NY.
 - 116.A. S. Hanna, W. B. Lotfallah, A fuzzy logic approach to the selection of cranes, *Autom. Constr.*, (1999). 8(5), 597–608.
 - 117.E.Horstkotte, What is a fuzzy expert system? Togai InfraLogic, (<http://www.austinlinks.com/Fuzzy/expert-systems.html>), (2002).
 - 118.G. J. Hwang, S. T. Huang, A new environment for developing fuzzy expert systems. *J. Inform. Sci. Eng.*, (1999), 15(1), 53–69.
 - 119.W. Karwowski, A.Mital, Potential applications of fuzzy sets in industrial safety engineering. *Fuzzy Set Syst.*, 19(2), (1986). 105–120.

- 120.J. L. Kennedy, Oil and gas pipeline fundamentals, 2nd Ed., (1993), PennWell Publishing Company, Oklahoma.
- 121.K. B. Khatri, K.Vairavamoorthy, E. Akinyemi, “Framework for computing a performance index for urban infrastructure systems using a fuzzy set approach.” J. Infrastruct. Syst., 10.1061/(ASCE)IS .1943-555X.0000062, (2011) 163–175.
- 122.S. X. Li, S. R. Yu, H. L. Zeng, J. H. Li, Liang, R, Predicting corrosion remaining life of underground pipelines with a mechanically based probabilistic model.” J. Petrol. Sci. Eng., (2009). 65(3–4), 162–166.
- 123.P. Meesad, Quantitative measures of a fuzzy expert system. Final Rep. IEEE NNC Student Summer Research, Intelligent Systems and Control Laboratory, Electrical and Computer Engineering, Oklahoma State Univ., IEEE Computer Society, Washington, DC(2001).
- 124.G. A. Miller, The magical number seven, plus or minus two: some limits on our capacity for processing information.” Psychol. Rev., 63(2), (1956).