

**MINISTERUL EDUCAȚIEI  
UNIVERSITATEA DIN PETROȘANI  
ȘCOALA DOCTORALĂ**

**DOMENIUL DE DOCTORAT: MINE, PETROL ȘI GAZE**

**Ing. Danci Marius Daniel**

**TEZĂ DE DOCTORAT**

**CONTRIBUȚII PRIVIND ÎMBUNĂTĂȚIREA EFICIENȚEI  
ENERGETICE A ECHIPAMENTELOR PNEUMATICE CU  
APLICABILITATE ÎN INDUSTRIA MINIERĂ**

**Conducător științific:**

**Prof.univ.dr.ing. RADU SORIN MIHAI**

**Petroșani  
2024**

INTRODUCERE	8
<b>CAPITOLUL I</b>	15
<b>UTILIZAREA AERULUI COMPRIMAT ÎN INDUSTRIA MINIERĂ</b>	
1.1. CONTEXTUL ENERGETIC ACTUAL LA NIVEL EUROPEAN SI MONDIAL	15
1.2. ROLUL ENERGIEI PNEUMATICE ÎN CONTEXTUL ENERGETIC ACTUAL	19
1.3. PROBLEME GENERALE PRIVIND UTILIZAREA AERULUI COMPRIMAT ÎN INDUSTRIA MINIERĂ	20
<b>CAPITOLUL II</b>	28
<b>CADRUL CONCEPTUAL PRIVIND PRODUCEREA AERULUI COMPRIMAT IN INDUSTRIA MINIERĂ</b>	
2.1. COMPRESOARE CU PISTON	28
2.1.1. Modelarea proceselor din compresorul cu piston cu două trepte de comprimare	28
2.1.2. Posibilități de evidențiere a pierderilor din compresorul cu piston cu două trepte de comprimare.	30
2.2. TURBOCOMPRESORUL	32
2.2.1. Modelarea proceselor din turbocompressoare.	33
2.2.2. Posibilități de evidențiere a pierderilor din turbocompresor	35
2.3. COMPRESORUL ELICOIDAL. CONSTRUCȚIA ȘI CALCULUL COMPRESORULUI ELICOIDAL	38
2.3.1. Considerații generale și scurt istoric	38
2.3.2. Principiul de funcționare al compresoarelor elicoidale	40
2.3.3. Tipuri de compresoare elicoidale. Profilele rotoarelor	41
2.4. FUNCȚIONAREA COMPRESORULUI ELICOIDAL	43
2.5. PARAMETRI CONSTRUCTIVI AI COMPRESORULUI ELICOIDAL	46
2.5.1. Determinarea dimensiunilor rotoarelor la compresorul elicoidal	46
<b>CAPITOLUL III</b>	56
<b>POSIBILITĂȚI DE OPTIMIZARE ENERGETICĂ A REȚELELOR PNEUMATICE MINIERE</b>	
3.1. MODELUL MATEMATIC AL REȚELELOR PNEUMATICE	57
3.1.1. Modelarea matematică a elementelor discrete ale rețelelor pneumatice	58
3.1.1.1. Modelul matematic al curgerii prin conducte	58
3.1.1.2. Modelul matematic al curgerii aerului comprimat prin rezistențe locale	65
3.1.2. Bilanțul exergetic al rețelelor pneumatice miniere	67
<b>CAPITOLUL IV</b>	69
<b>STUDII DE CAZ</b>	
4.1. STUDIU DE CAZ I. EVALUAREA MĂSURILOR CAPABILE SĂ MAJOREZE EFICIENȚA ENERGETICĂ A COMPRESOARELOR UTILIZATE ÎN MINERIT GENERALITĂȚI	69
4.1.1. Observații sintetice generale vizând energetica sistemelor pneumatice	71

4.2. STUDIU DE CAZ II. REDUCEREA CONSUMULUI DE ENERGIE ȘI A EMISIILOR DE GAZE CU EFECT DE SERĂ LA COMPRESOARE ELICOIDALE CU INECȚIE DE ULEI	73
4.2.1 Breviar de calcul pentru bilanțul exergetic al compresoarelor	74
4.2.2. COMPRESOR KAESER ESD 375. Cuantificări ale efectelor recuperării căldurii	76
4.2.3. COMPRESOR KAESER DSDX 305. Cuantificări ale efectelor recuperării căldurii	81
4.2.4. CUANTIFICĂRI ALE EFECTELOR INTRODUCERII USCĂTOARELOR	85
4.3. STUDIU DE CAZ III. GAMA DE PUTERI A COMPRESOARELOR UTILIZATE ÎN MINELE DIN VALEA JIULUI	87
4.3.1 Evaluare efectelor modificării parametrilor de funcționare al compresorului	91
4.4. STUDIU DE CAZ IV. BILANȚ ENERGETIC PENTRU ANSAMBLUL COMPRESOR INGERSOLL RAND – SSRM 250 LV	95
4.4.1. Bilanț energetic pentru ansamblul compresor INGERSOLL RAND – SSRM 250 LV	95
4.4.2. Tabele recapitulative și diagrame Sankey pentru bilanțurile energetice ale ansamblului compresorului INGERSOLL RAND SSR-250 MV	97
4.4.3. Bilanț energetic pentru ansamblul compresor ATLAS COPCO G.A. 250W Vizualizarea componentelor constructive al compresorului ATLAS COPCO G.A. 250W	104
4.4.4. Tabele recapitulative și diagrame Sankey pentru bilanțurile energetice ale ansamblului compresorului ATLAS COPCO GA 250	106
4.4.5. Analiza comparativă a performanțelor energetice a compresoarelor elicoidale studiate	113
4.4.6. Concluzii și măsuri tehnico-organizatorice	114
4.5. STUDIU DE CAZ IV. CALCULUL REȚELEI DE AER COMPRIMAT E.M. LONEA	115
4.5.1. Breviar de calcul	115
4.5.2. Posibilități de alimentare cu aer comprimat	124
<b>CAPITOLUL V</b>	126
<b>CONCLUZII ȘI CONTRIBUȚII PERSONALE</b>	
5.1. CONCLUZII GENERALE	126
5.2. CONTRIBUȚII PERSONALE	127
5.2.1. Contribuții teoretice	127
5.2.2. Contribuții practice	127
5.3. OPORTUNITĂȚI ȘI PERSPECTIVE VIITOARE	128
5.4. LIMITELE CERCETĂRII	129
<b>BIBLIOGRAFIE</b>	130

## 1. METODOLOGIA CERCETĂRII. ACTUALITATE, NECESITATE, IMPORTANTĂ

Ponderea mare a consumului de energie pentru producerea aerului comprimat în industria minieră subliniază oportunitatea eficientizării producerii și consumului de aer comprimat. Energia pneumatică este una din cele mai scumpe surse de energie, iar cota parte din consumul de energie industrială al UE pentru producerea energiei pneumatice este destul de ridicată fiind de aproximativ 10%, fapt ce evidențiază importanța abordării temei în cadrul tezei de doctorat.

În cadrul celor 17 Obiective ale Dezvoltării Durabile (ODD) pot fi evidențiate patru obiective esențiale pentru aplicarea practică a noțiunii de dezvoltare durabilă, obiective care se referă la energie, mediu și societate.

Prin conținutul său, prezenta lucrare de doctorat, abordează următoarele aspecte din cuprinsul celor patru obiective.

**Obiectivul 7**, care se referă la energie curată și la prețuri accesibile, concentrându-se mai ales pe ținta 7.3 și anume, până în 2030, dublarea ratei globale de îmbunătățire a eficienței energetice, prin realizarea unor algoritmi și metode de calcul al eficienței energetice a sistemelor industriale și propunerea de măsuri ce au ca obiectiv realizarea țintei 7.3.

Îndeplinirea **Obiectivului 9** Construirea unor infrastructuri rezistente, promovarea industrializării durabile și încurajarea inovației, presupune realizarea unei industrializări competitive și durabile, în condițiile consolidării *economiei circulare*. În vederea realizării acestui obiectiv, *majorarea eficienței energetice a sistemelor industriale*, prin soluțiile inovative propuse promovează inovația și industrializarea durabilă.

Lucrarea se adresează și dezideratul **Obiectivului 11** cu accent pe ținta 11.6 - până în 2030, reducerea pe cap de locuitor a impactului negativ asupra mediului în orașe, inclusiv prin acordarea unei atenții deosebite calității aerului și gestionării deșeurilor municipale și de alt tip, având în vedere că, majorarea eficienței energetice, mai ales în cadrul proceselor și instalațiilor industriale are un impact major privind reducerea consumului de combustibili fosili și prin urmare reducerea emisiilor poluante. În consecință, având în vedere ponderea mare a industriei în consumul energetic la nivel național și mondial, *creșterea eficienței energetice* va reduce semnificativ impactul asupra mediului și va crește performanțele pentru componentele energie – mediu.

În ceea ce privește **Obiectivul 13** - Acțiunea climatică, acesta este în mod direct influențată prin creșterea eficienței energetice, având în vedere faptul că, o industrie *eficientă energetic* va produce emisii de CO<sub>2</sub> mult reduse, contribuind astfel la reducerea impactului asupra climei. Formularea sintetică a dezideratului major pentru aplicarea practică conceptului

de dezvoltare industrială durabilă, poate fi enunțat astfel: *maximizarea efectelor utile în condițiile minimizării consumului de resurse.*

Acest lucru se poate realiza prin *creșterea eficienței energetice* a proceselor industriale care duce în mod direct la reducerea consumului de combustibili fosili și prin urmare al impactului asupra mediului. Pe de altă parte implementarea unor măsuri inovative în vederea creșterii eficienței energetice a proceselor și instalațiilor industriale analizate poate duce la valorificarea RES, acest lucru putând facilita dezvoltarea unor noi afaceri în jurul acestor centre, afaceri ce pot beneficia de energie la un preț competitiv, lucru ce va afecta în mod pozitiv dezvoltarea regională, prin crearea de noi locuri de muncă.

Luând în considerare precizările de mai sus și analizând *eficiența energetică a diverselor instalații industriale*, lucrarea de doctorat elaborată, prin tema stabilită și prin conținut, urmărește propunerea și analizarea unor soluții fezabile de încadrare a sistemului explorat în conceptul de energie durabilă prin reducerea consumurilor energetice și în consecință și a consumului de combustibili fosili, având în vedere că, deocamdată combustibilii fosili au o pondere însemnată în producția de energie electrică.

### **1.1. – Tema**

Îmbunătățirea eficienței energetice a echipamentelor pneumatice cu aplicabilitate în industria minieră.

### **1.2. – Obiective specifice**

Scopul și justificarea realizării lucrării de doctorat se referă la dorința de a oferi unele soluții la provocările cu care se confruntă industria minieră din Valea Jiului, dar aceste cercetări pot fi aplicate în orice alt domeniu în care se utilizează energia pneumatică, cum ar fi spre exemplu în transportul pneumatic al detergenților, transportul pulberilor, etc.

Principalele provocări se referă la:

- găsirea unor soluții locale capabile să atenueze efectele creșterii prețului energiei prin eficientizarea sistemului pneumatic având în vedere consumul mare de energie pentru producerea aerului comprimat;
- analizarea unor variante de îmbunătățire a eficienței energetice a sistemului de producere și distribuire a energiei pneumatice;
- posibilități de valorificare eficientă a resurselor energetice secundare disponibile în ca urmare a producerii aerului comprimat;
- protejarea și ameliorarea calității capitalului natural concomitent cu îmbunătățirea condițiilor pentru capitalul uman și social prin reducerea emisiilor ca urmare a creșterii eficienței proceselor și reducerea consumului de combustibili fosili.

Pentru a sugera o serie de variante care să răspundă provocărilor evidențiate mai sus, lucrarea de doctorat urmărește următoarele obiective:

- realizarea unei sinteze privind contextul energetic actual la nivel mondial și al UE;
- realizarea unei sinteze privind stadiul actual al soluțiilor de producere transport și utilizare al aerului comprimat;
- realizarea unor algoritmi și metode de calcul pentru realizarea bilanțurilor energetice și analiza posibilităților de eficientizare a sistemelor pneumatice;

- validarea metodelor de calcul realizând diverse studii de caz, bazate pe determinări experimentale în diverse sisteme pneumatice industriale;
- reducerea consumului de energie și a emisiilor de gaze cu efect de seră la compresoare elicoidale cu injecție de ulei;
- simularea pe baza unui program numeric de calcul a influenței unor parametri funcționali asupra unor mărimi legate de eficiența energetică a generatoarelor de energie pneumatică;
- elaborarea unor programe numerice de calcul prin care s-au cuantificat performanțele energetice ale compresoarelor elicoidale, ventilatoarelor compresoarelor și rețelelor pneumatice.
- propunerea de soluții de creștere a eficienței energetice a sistemelor pneumatice cu scopul de a verifica și justifica încadrarea măsurilor propuse în conceptul de energetică eficientă, competitivă și inovativă.

### **1.3. – Ipoteza cercetării**

Pe baza studiului documentar, și informațiilor descoperite referitoare la tema tezei, am realizat o inventariere a soluțiilor care să răspundă provocărilor precizate anterior.

După selectarea sistemelor care se încadrează criteriilor energiei durabile, în lucrare m-am focusat pe:

- analiza contextului energetic actual cu evidențierea rolului energiei pneumatice și problemele generale privind utilizarea aerului comprimat în industria minieră
- realizarea unui studiu privind cadrul conceptual pentru producerea aerului comprimat în industria minieră, cu analizarea principalelor soluții de producere și anume: compresoare cu piston, turbocompresoare și compresoare elicoidale;
- realizarea unor modele matematice și breviare de calcul pentru determinarea eficienței energetice a compresoarele enumerate anterior;
- realizarea unei analize critice comparative a compresoarelor utilizate în industria minieră;
- realizarea unui algoritm de calcul și model matematic pentru rețeaua pneumatică minieră;
- determinări experimentale în vederea validării modelelor matematice realizate;
- analiza bilanșurilor energetice reale/optime obținute și propunerea de soluții inovative privind creșterea eficienței energetice;

### **1.4. – Tehnici de colectare a datelor**

Pentru colectarea datelor și prelucrarea informațiilor se vor utiliza:

- parametri caracteristici existenți în prospectele instalațiilor analizate și date din literatură pentru instalații similare;
- măsurile măsurate și monitorizate “in situ” la sistemele care fac obiectul studiilor de caz;
- verificarea indicatorilor energetici pentru stabilirea oportunității aplicării soluțiilor propuse.

## **2. STRUCTURA TEZEI**

Conținut capitole: teza conține o introducere, cinci capitole, cuprins și bibliografie, prezentate în 134 pagini, 20 tabele, 73 figuri și 54 referințe bibliografice.

În **Capitolul 1**, intitulat **UTILIZAREA AERULUI COMPRIMAT ÎN INDUSTRIA MINIERĂ** este prezentat contextul energetic actual la nivel european și mondial, rolul energiei

pneumatice în contextul energetic actual, precum și o prezentare detaliată problemelor generale privind utilizarea aerului comprimat în industria minieră.

**Capitolul 2**, tratând subiectul CADRUL CONCEPTUAL PRIVIND PRODUCEREA AERULUI COMPRIMAT ÎN INDUSTRIA MINIERĂ, realizează o analiză detaliată a compresoarelor cu piston, turbocompressoarelor și compresorului elicoidal. Se evidențiază parametrii constructivi ai acestora și se stabilesc principalele relații care permit realizarea unui model matematic de calcul al funcționării acestora.

Conținutul **Capitolului 3**, având titlul POSIBILITĂȚI DE OPTIMIZARE ENERGETICĂ A REȚELELOR PNEUMATICE MINIERE, propune un model matematic al rețelelor pneumatice, abordând atât partea algoritmului de parcurgere a unei rețele pneumatice în succesiunea corectă a elementelor componente cât și modelarea matematică a elementelor discrete ale rețelelor pneumatice și anume conducte și diverse rezistențe locale:

**Capitolul 4**, STUDII DE CAZ, este focusat pe prezentarea studiilor de caz realizate în vederea validării modelelor matematice elaborate. Sunt prezentate 5 studii de caz relevante pentru scopul tezei: evaluarea măsurilor capabile să majoreze eficiența energetică a compresoarelor utilizate în minerit; reducerea consumului de energie și a emisiilor de gaze cu efect de seră la compresoare elicoidale cu injecție de ulei; gama de puteri a compresoarelor utilizate în minele din Valea Jiului; elaborarea bilanțului energetic pentru ansamblul compresor INGERSOLL RAND – SSRM 250 LV și a bilanțului energetic pentru ansamblul compresor atlas COPCO G.A. 250W și analiza comparativă; calculul rețelei de aer comprimat de la E.M. LONEA pe baza unui program numeric de calcul. Tot aici se prezintă breviare de calcul detaliate pentru calculul bilanțurilor exergetice, precum și tabele cu date determinate experimental necesare realizării calculelor. Rezultatele sunt prezentate sub formă de tabel și diagrame, valoric și procentual și sunt realizate analize amănunțite ale bilanțurilor energetice reale și optime în vederea stabilirii măsurilor pentru creșterea eficienței energetice a echipamentelor pneumatice studiate.

Pe baza analizelor realizate și a rezultatelor obținute în cuprinsul capitolelor prezentate anterior, în cadrul **Capitolului 5**, se evidențiază CONCLUZII ȘI CONTRIBUȚII PERSONALE. Aici sunt prezentate concluziile generale, contribuțiile personale teoretice și practice, oportunitățile și perspectivele viitoare, incluzând performanțele actuale, soluțiile de majorare a performanțelor, variante viitoare pentru asigurarea sustenabilității sistemului de producere și distribuție a energiei pneumatice și se încheie cu limitele cercetării.

Aspecte inedite tratate în lucrare:

- sistematizarea și sintetizarea unor aspecte privind producerea și distribuția aerului comprimat;
- conceperea unor programe numerice de calcul pentru utilizatorii de energie pneumatică și pentru rețea;
- prezentarea comparativă a performanțelor diferitelor sisteme de producere a aerului comprimat;
- compararea indicatorilor de performanță energetică și exergetică pentru diferite tipuri de compresoare realizate de firme diferite;
- prezentarea unor studii de caz concrete, realizate pe baza unor determinări “in situ”.

- realizarea unor bilanțuri energetice reale orare și optime pe baza modelelor matematice elaborate;

- analiza detaliată bilanțurilor energo-exergetice și propunerea de soluții pentru creșterea eficienței energetice.

### **3. CONTRIBUȚII PERSONALE**

#### **3.1. Contribuții teoretice**

- realizarea unei sinteze privind problemele generale ale utilizării aerului comprimat în industria minieră;

- s-au prezentat parametri constructivi ai compresorului elicoidal;

- analiza comparativă a diverselor posibilități de acționare a diferitelor unelte, cu evidențierea avantajelor și dezavantajelor utilizării acționării pneumatice.

- analiza ponderii consumului de energie cu producerea aerului comprimat în cadrul consumului de energie din exploatarea miniere, cu evidențierea consumurilor specifice.

- realizarea unor modele matematice pentru funcționarea compresorului elicoidal, pe baza cărora să se poată efectua o balanță energo-exergetică pentru evidențierea pierderilor de energie.

- realizarea unui model matematic pentru calculul balanței energo-exergetice a rețelei pneumatice.

#### **3.2. Contribuții practice**

Am realizat determinări experimentale în vederea validării modelului matematic și întocmirii bilanțului energo-exergetic la compresoare elicoidale și rețele pneumatice.

Am realizat două studii de caz privind funcționarea în condiții reale ale compresorului elicoidal.

S-au conceput studii de caz privind reducerea consumului de energie și a emisiilor de gaze cu efect de seră la compresoare elicoidale cu injecție de ulei.

S-au realizat bilanțurile exergetice orare reale aferente compresoarelor KAESER ESD 375; KAESER DSDX 305, fiind cuantificate efectele recuperării căldurii la compresoarele elicoidale anterior menționate.

Am abordat un studiu de caz, utilizat pentru a justifica energetic oportunitatea înlocuirii compresoarelor vechi, cu multe ore de funcționare, cu două compresoare dotate cu recuperatoare de căldură și cu uscătoare pentru aerul comprimat fiind determinați: factorul Carnot, cantitatea de căldură cedată, exergia valorificată, căldura utilă, exergia furnizată de rețea, creșterea eficienței utilizării energiei, durată de funcționare anuală a compresorului, economia anuală de energie, producția de GES. Calculele efectuate au rolul de justifica montarea unor schimbătoare de căldură la compresoarele din sistemele pneumatice. Pe baza calculelor efectuate s-au cuantificat și efectele introducerii uscătoarelor.

Prezentare sintetică a 11 tipuri de compresoare elicoidale care funcționează în minele din Valea Jiului pentru care am realizat un calcul al performanțelor energetice semnificative pe baza unui algoritm de calcul propriu, după care am conceput 9 grafice distincte care evidențiază evaluarea efectelor modificării parametrilor de funcționare ai compresorului.



Am realizat studiul comparativ energetic a două tipuri diferite de compresoare de la fabricanți diferiți;

Am realizat o analiză privind schema optimă de alimentare a unei mine echipată cu compresoare produse de diverși fabricanți;

Am întocmit bilanțul energo-exergetic al compresorului și am realizat analiza bilanțului energetic real și optim.

Au fost evidențiate în tabele și vizualizate în diagramă, raportul dintre performanțele semnificative ale compresoarelor:

- diferența dintre puterea accesibilă utilizatorilor de aer comprimat (puterea maximă a aerului comprimat) și necesarul de putere pentru comprimarea aerului (puterea comprimării politropice);

- diferența dintre puterea termică a aerului comprimat și echivalentul exergetic disponibil în căldura recuperată.

Am analizat efectul modificării diferiților parametri asupra performanțelor compresorului elicoidal.

Propunerea unor măsuri tehnico-organizatorice fezabile pe baza analizei energetice comparative a performanțelor energetice a compresoarelor elicoidale studiate.

Realizarea unei forme canonice a unei rețele pneumatice în scopul algoritmicizării calculului, în vederea abordării acesteia cu ajutorul unui program numeric de calcul pentru calculul debitului masic total și disponibil pe baza celor 2 situații limită.

Calculul indicatorilor energetici de performanță în toate punctele caracteristice pe baza relațiilor matematice din literatura de specialitate.

Găsirea unei soluții de majorare a eficienței energetice în transportul aerului comprimat prin alimentare rețelei magistrale prin 2 puncte distincte (put cu skip și put aeraj Jieț) aferente celor 2 stații de compresoare în vederea asimilării magistralelor, cu diametrele  $\varnothing 325$  și  $\varnothing 200$ , cu un collector – distribuitor, care asigura o presiune constantă în punctele de bransare a rețelei de distribuție.

#### **4. OPORTUNITĂȚI ȘI PERSPECTIVE VIITOARE**

Realizarea modelului matematic al compresorului elicoidal, validarea acestuia permite pe viitor calculul bilanțelor energo-exergetice și pentru compresoarele ce funcționează în cadrul unor întreprinderi din alte ramuri industriale.

Algoritmul de calcul permite automatizarea procesului de determinare a principalelor pierderi ce intervin la funcționarea reală a compresoarelor elicoidale.

Concluziile bilanțului energo-exergetic permit extrapolarea rezultatelor și măsurilor ce se impun pentru creșterea eficienței energetice și în cazul altor compresoare elicoidale funcționând în diverse ramuri industriale.

Realizarea modelului matematic al rețelei pneumatice și validarea acestuia prin determinări experimentale permite realizarea bilanței energo-exergetice într-un timp scurt, și prin urmare în cazul unor rezultate nesatisfăcătoare identificarea operativă a pierderilor și luarea unor măsuri de remediere a situației.

Extrapolarea rezultatelor în cazul altor tipuri de rețele permite luarea unor măsuri de

eficientizare a sistemelor de aer comprimat prin aplicarea unor măsuri organizatorice bazate pe experiența altor utilizatori și sintetizate în cadrul tezei.

## **5. LIMITELE CERCETĂRII**

În concluzie, obiectivul de cercetare propus a fost realizat în urma aplicării unor metode adecvate de evaluare a performanțelor energetice ale compresoarelor elicoidale.

Analizele cantitative și calitative, din lucrare, pot fi utilizate ca fundament pentru cercetări viitoare dacă se iau în considerare următoarele limite:

- analizele au fost realizate pentru tipurile de compresoare elicoidale existente în exploatarea miniere din Valea Jiului, fapt care impune realizarea unor determinări experimentale și pentru alte tipuri de compresoare.

- necesitatea realizării unei analize și pentru celelalte componente ale sistemului pneumatic în vederea reducerii în continuare a cererii de energie pneumatică, realizând astfel importante economii în ceea ce privește costurile cu energia electrică.