

CONTRIBUȚII LA OPTIMIZAREA PROCESELOR DE FABRICARE A PELEȚILOR ȘI BRICHETELOR FOLOSIND ELEMENTE DE INTELIGENȚĂ ARTIFICIALĂ, STATISTICĂ ȘI CERCETĂRI OPERAȚIONALE

Teză de doctorat – Rezumat

pentru obținerea titlului științific de doctor la

Universitatea Politehnica Timișoara

în domeniul de doctorat Inginerie Industrială

autor Mariș Simina-Ștefania

conducător științific Prof.univ.dr.ing. Titus Slavici

luna martie anul 2022

INTRODUCERE

Peleții și brichetele sunt produse obținute prin aglomerarea mecanică sau presarea materiei prime, după ce aceasta a fost în prealabil mărunțită sau transformată în pulbere, în vederea transportului, a prelucrării lor ulterioare sau a folosirii .

În această lucrare, vor fi studiați peleții și brichetele pentru încălzire și vor fi prezentate principalele rezultate originale obținute. În continuare vor fi detaliate importanța și necesitatea temei alese, obiectivele cercetării dar și structura lucrării.

Importanța și necesitatea temei alese

Energia este o componentă cheie a progresului actual și a dezvoltării civilizației. Dintre tehnologiile de prelucrare a biomasei în scopul obținerii de energie, o eficiență crescută o au peletizarea și brichetarea. Aceste tehnologii permit reducerea considerabilă a volumului de biomasă, o dată cu creșterea gradului de confort în utilizare [3].

Având în vedere potențialul imens al combustibililor solizi obținuți din biomasă, atât din punct de vedere al aportului energetic, dar și din punct de vedere ecologic și al unei dezvoltări sustenabile, acest domeniu de producție este unul intens sprijinit la nivel european și regional.

Începând cu a doua jumătate a secolului XX și o dată cu dezvoltarea și folosirea pe scară largă a computerelor și dezvoltarea tehnologiei informației procesele specifice ingineriei industriale au început să fie reprojctate. Folosind tehnicile de planificare a experimentelor, tehnicile de modelare și softurile de simulare numerică, costurile activităților de cercetare experimentală necesare pentru îmbunătățirea producției pot fi reduse .

În lucrarea de față se folosesc elemente de tehnologia informației (în particular elemente de programare și rețele neuronale artificiale) pentru previziunea și optimizarea proceselor care apar în cadrul unei întreprinderi care are ca principal obiect de activitate fabricarea de peleți și brichete din deșeuri lemnoase, folosite ca sursă alternativă de energie.

Obiectivele cercetării

Optimizarea procesului de fabricare a peleților și brichetelor pentru încălzire se poate referi la maximizarea profitului, la creșterea productivității, la reciclarea deșeurilor de origine agricolă sau forestieră, la maximizarea puterii calorifice, de încadrarea în standardele tehnice, la determinarea de rețete de fabricare specifice fiecăreia dintre aceste cazuri, la soluții

inovatoare pentru automatizarea liniei de producție etc. Aceste aspecte vor fi detaliate în cadrul prezentei teze.

Obiectivele primare care vor fi atinse în cadrul stagiului de cercetare doctorală sunt:

- OP1** obținerea de rezultate științifice și tehnologice privind utilizarea resurselor naturale regenerabile în vederea procesului de realizare a peleților și brichetelor
- OP2** optimizarea unor rețete de fabricație a peleților și brichetelor din diverse direcții de cercetare utilizând planificarea și cercetarea industrială științifică

Pentru atingerea obiectivelor primare, este necesară atingerea următoarelor **obiective secundare**, corespunzătoare activităților realizate în prezentul stadiu de cercetare:

- OS1** proiectarea de activități experimentale și elaborarea unei metodologii de realizare a cercetărilor experimentale
- OS2** propunerea de îmbunătățiri în cadrul procesului de producție
- OS3** realizarea unui sistem dinamic de know-how aplicabil în mai multe direcții
- OS4** realizarea unui soft pentru previzionarea puterii calorifice, noxelor și a costurilor în cazul diferitelor produse novative de tip materie energetică regenerabilă

Structura lucrării

Lucrarea este structurată pe 7 capitole. Abordarea cercetărilor specifice acestei teze pornește cu prezentarea unei întreprinderi care produce peleți și brichete pentru încălzire. Sunt identificate soluții pentru retehnologizarea acesteia și pentru inovarea liniilor de producție. În cadrul liniilor de producție sunt realizate rețete de peleți realizate cu materiale din zonă și, prin analiza acestora, sunt determinate rețete îmbunătățite, caracterizate prin putere calorifică mare și procentaj scăzut de cenușă reziduală. Sunt identificate noi direcții de cercetare și de diversificare a producției. Deoarece determinarea unei rețete de peleți care să maximizeze puterea calorifică în timp ce cantitatea de cenușă reziduală și noxele se încadrează în anumite limite este o problemă de optimizare liniară, următorul pas logic a fost scrierea acestei probleme din punct de vedere matematic, studiarea existenței și a proprietăților soluției. A fost realizată o bază de date cu proprietăți ale principalelor materiale disponibile pentru realizarea de peleți și, asociat acesteia, o soluție software de determinare a unei rețete cu mai multe componente bazată pe soluția problemei de optimizare liniară. Baza de date existentă poate fi completată de către utilizator fie pe baza determinărilor experimentale directe, fie printr-o metodă hibridă (folosirea unei rețele neuronale care să suplinească datele necesare care nu pot fi determinate experimental).

1 STADIUL ACTUAL AL CERCETĂRII ÎN TEMATICA TEZEI PROPUSE

Având în vedere complexitatea temei, stadiul actual al cercetărilor poate fi considerat din mai multe puncte de vedere, astfel:

- din punct de vedere al producției de energie regenerabilă folosind biocombustibil solid și a datelor de referință aplicabile în mod curent în producția de peleți și brichete pentru încălzire
- din punct de vedere al folosirii tehnicilor de programare liniară în producție
- din punct de vedere al folosirii rețelelor neuronale și a algoritmilor specifici inteligenței artificiale pentru determinarea și completarea unor anumite date
- din punct de vedere al fezabilității unui transfer tehnologic

Toate aceste puncte de vedere vor fi detaliate în continuare, pentru a realiza o imagine cât mai fidelă pentru stadiul actual al cercetărilor în domeniu.

1.1 Tendințe și date de referință în producția de biocombustibili regenerabili solizi

Posibilitatea de a folosi în mod eficient deșeurile lemnoase sau agricole pentru producerea de energie constituie o tendință actuală atât în industrie, cât și pentru consumul casnic.

Standardele, caracteristicile fizico-chimice, date despre producție și logistică, tehnologii de combustie, analiza costurilor atât pentru producția cât și pentru utilizarea de peleți pentru încălzire, o analiză a impactului de mediu dar și o analiză a pieței pentru peleți au fost colectate și prezentate în 2010 de Obernberger și Thek [18]. Specificațiile biocombustibililor solizi de tip peleți și brichete fac obiectul unor standarde care sunt în continuă actualizare. Reglementările UE pentru aceste tipuri de biocombustibil sunt incluse în standardele EN 17225-1 [4], EN 17225-2 [5] și EN 17225-6 [6]. Din acest punct de vedere sunt acceptate următoarele standarde:

- standarde pentru peleți și brichete din lemn pentru consum casnic: Enplus A1, Enplus A2, Enplus B
- standarde pentru peleți și brichete din lemn pentru consum industrial: I 1, I 2, I 3
- standarde pentru peleți și brichete din biomasă non-lemnoasă și blenduri de biomasă: MBP A, MBP B

Având în vedere necesitățile și problemele actuale la nivel global în domeniul energiei [10] la fel ca și noile oportunități de dezvoltare în domeniul energiilor regenerabile din România se conturează în mod logic o nouă direcție în domeniul cercetării-dezvoltării industriale. Aceasta se referă la determinarea unor tehnici de optimizare a proceselor asociate producției de biocombustibili.

Determinarea puterii calorifice a diversilor biocombustibili solizi a fost întotdeauna o provocare. Printre lucrările relevante din acest domeniu în contextul tezei se numără [11],[12],[14],[19].

Tendințe actuale privind folosirea tehnicilor de programare liniară în producție

Optimizarea liniară (sau programarea liniară) este o metodă matematică de determinare a unei valori optime în anumite condiții care se folosește la alegerea proiectelor, planificarea producției, mixturi de anumite produse etc. Determinarea unui amestec de două tipuri de biomasă care să maximizeze puterea calorifică în timp ce elementele generatoare de noxe din compoziția chimică rămân sub valori limită admise duce la determinarea soluției unei probleme de optimizare liniară.

Tendințe actuale privind aplicațiile rețelelor neuronale

De referință pentru orice lucrare care abordează teme legate de inteligența artificială este lucrarea lui Russell și Norvig [21]. Un software consacrat pentru construirea și analiza rețelelor neuronale este Matlab. În [17] Demuth și Beale prezintă, pe lângă domeniile în care se pot aplica rețelele neuronale construite cu Matlab și modele neuronale, arhitecturi de rețele, funcții de antrenare, algoritmi de retropropagare, etc.

Tendințe actuale privind transferurile tehnologice și importanța acestora pentru inovare

Există o legătură puternică între cercetare și cercetarea aplicată. În ultimul secol, inovarea a devenit, treptat, cel mai important factor al creșterii productivității. În consecință, nu se mai poate nega rolul cercetării academice și ale aplicațiilor sale în dezvoltarea socio-culturală și economică.

Nivelul de maturitate tehnologică (TRL – Technology Readiness Level) al unei tehnologii se referă la etapa de dezvoltare a respectivei tehnologii. Nivelul de maturitate crește de la 1 la 9, astfel:

- Nivelurile 1-3 (TRL 1 – TRL 3) constituie faza de cercetare
- Nivelurile 4-6 (TRL 4 – TRL 6) constituie faza de dezvoltare
- Nivelurile 7-9 (TRL 7 – TRL 9) constituie faza de implementare

1.2 Ancorarea cercetării în stadiul actual al cunoașterii

Inovarea, ca orice altă activitate umană, necesită un aport de energie, care trebuie produsă folosind resursele existente (fie resurse convenționale, fie resurse neconvenționale). Preocuparea pentru o mai bună folosire a resurselor energetice este de foarte mare actualitate, atât la nivel european cât și la nivel național.

În lucrarea de față sunt analizate diverse tipuri de biomasă care pot fi folosite în producția de peleți și brichete pentru încălzire, fără însă a intra în detalii privind piețele de desfacere. Analizând cercetările din domeniu (de exemplu [18]) a reieșit importanța folosirii de aditiv în procesul de peletizare.

Analizând posibilitățile de aplicare a tehnicilor de programare liniară la optimizarea procesului de fabricație al peleților pentru încălzire, concomitent cu tendințele de cercetare în acest domeniu, au fost identificate ca funcție obiectiv de optimizat puterea calorifică a unei mixturi de mai multe materii prime, iar ca și constrângeri noxele emise și cantitatea de cenușă reziduală rezultată în urma arderii. Valorile maxime pentru aceste constrângeri sunt determinate în principiu de valorile maxime admise în standarde.

Nu avem cunoștință ca această tehnică să fie aplicată în trecut pentru determinarea unei rețete optime de biomasă (pentru care se obține maximul puterii calorifice atunci când valoarea noxelor rămâne sub un anumit nivel).

Am preferat să studiem legătura dintre compoziția elementară a materiei prime, pe de o parte și puterea calorifică și cantitatea de cenușă reziduală rezultată în urma arderii, pe de altă parte. În condițiile în care precizia rețelei antrenate depășește 90%, alegerea unuia dintre cele două seturi de intrări (plus ieșirile aferente) disponibile depinde exclusiv de posibilitatea efectuării analizelor fizico-chimice asupra materiilor prime.

Parte integrantă demersurilor pentru îmbunătățirea capacității de inovare a României, prezenta cercetare își propune să contribuie la creșterea cooperării dintre mediul academic și sectorul industrial prin realizarea unui transfer tehnologic viabil. Elementele de cercetare teoretică în domeniul cercetărilor operaționale vor fi validate experimental întâi la nivel de laborator și apoi într-o întreprindere, pentru a contribui la creșterea competitivității acesteia.

Elementele originale, de noutate, care fac obiectul acestei lucrări au ca efect scăderea costurilor de cercetare în cazul firmelor care produc peleți și/sau brichete din biomasă, concomitent cu creșterea calității producției.

2 CONTRIBUȚII LA OPTIMIZAREA ARHITECTURII UNEI LINII TEHNOLOGICE PENTRU PRODUCȚIA DE PELEȚI ȘI BRICHETE

Obiectivele acestui capitol sunt:

- prezentarea unei linii tehnologice standard pentru producția de peleți și brichete, existente într-o micro-întreprindere de profil
- prezentarea unei soluții de optimizare a liniei tehnologice pentru producerea de peleți și brichete din mixturi de biomasă
- identificarea de soluții pentru finanțarea investițiilor într-o astfel de firmă

Rezultatele originale aferente acestui capitol de cercetare sunt:

- o schemă pentru o linie tehnologică optimizată pentru producerea de peleți din mixturi

- două schițe de proiecte pentru accesare de fonduri europene

2.1 Conceptul clasic al liniilor tehnologice pentru producția de peleți și brichete

Procesul de transformare a materiei prime în peleți sau brichete are mai multe etape:

- etapa de alimentare (include sortarea, tocarea și rafinarea materiei prime)
- etapa de uscare (în care materia primă este adusă la umiditatea necesară)
- etapa de peletizare sau de brichetare propriu-zisă
- etapa de răcire a produsului finit
- etapa de ambalare

Inițial, linia tehnologică a fost alcătuită din următoarele componente esențiale pentru funcționarea fabricii: tocător, moară cu ciocane, instalație de uscare, buncărul preseii, presă de peleți, presă de brichete, sită cernere și răcire peleți.

Pentru linia de brichetare, etapele de alimentare și uscare recurg la aceleași utilaje. Pentru presare, se folosește o presă de brichete cu piston hidraulic.

2.2 Schemă de optimizare a liniei tehnologice pentru peleți

Analizând procesele tehnologice necesare producerii de peleți, ca și posibilitățile de utilizare a materiei prime disponibile, s-a evidențiat nevoia de a completa linia tehnologică cu elemente care să permită prelucrarea simultană a mai multor materii prime în vederea peletizării, dar și elemente care să permită producția în serie mică, pentru testarea experimentală și validarea rezultatelor cercetării.

Pentru realizarea experimentelor, sunt necesare cel puțin următoarele echipamente suplimentare:

- site și matrițe de diverse dimensiuni pentru moara cu ciocane și presa de peleți
- un al doilea tocător, pentru a putea prelucra simultan două tipuri de biomasă
- un al doilea buncăr pentru a stoca simultan două tipuri de biomasă
- un malaxor pentru realizarea de mixturi de cel puțin două componente
- presă de peleți de capacitate mică (presă-hobby) pentru a testa rețetele obținute

Cu presa-hobby au fost realizate rețetele de peleți studiate în teză.

2.3 Soluții de finanțare a dezvoltării liniilor tehnologice

Pentru dezvoltarea liniilor tehnologice, cea mai bună opțiune este folosirea fondurilor europene. Fără a intra în detalii, în continuare va fi ilustrat modul în care se pot folosi aceste finanțări pentru îmbunătățirea liniilor de producție.

Finanțare prin proiecte de tip STARTUP NATION

Programul Start-up Nation este un program destinat a încuraja și stimula înființarea și dezvoltarea întreprinderilor mici și mijlocii. Prin acest proiect, start-up-ul dorește să achiziționeze o linie tehnologică de prelucrat peleți și brichete.

Obiectivele pe termen lung asumate de start-up sunt corelate cu investiția dorită. Ca rezultat al implementării acestui proiect este obținerea unei tehnologii optimizate de producere a peleiților și brichetelor, atât din punct de vedere al compoziției amestecurilor de biomasă folosite, cât și din punct de vedere al regimurilor de lucru ale utilajelor.

Analiza SWOT evidențiază ca principale puncte tari inovarea de proces, identifică principalele oportunități ca provenind din creșterea cererii pentru produse dezvoltate.

Sunt descrise activitățile proiectului și echipamentele de achiziționat pentru realizarea acestor activități, este realizată o analiză a pieței pentru peleții de încălzire și este propus un buget pentru achiziții.



Figura 2.1 Detaliu funcționare presă peleți de capacitate mică

Finanțare prin Programul Operațional Competitivitate

O altă modalitate de a finanța un start-up în domeniul producerii de resurse energetice regenerabile, este prin Programul Operațional Competitivitate, acțiunea 1.2.1, prin proiecte de tip „Întreprinderi inovatoare tip start-up și spin-off”.

Acest tip de proiecte se adresează întreprinderilor inovatoare de tip start-up sau spin-off și au ca principal realizarea și comercializarea de produse sau tehnologii semnificativ îmbunătățite. Prin acest program se acordă o asistență financiară nerambursabilă de maxim 840.000 lei (echivalent a 200.000 Euro), reprezentând 90% din costurile eligibile totale ale proiectului, restul de 10% din aceste costuri fiind suportate de către beneficiar. Un proiect poate să dureze maxim 2 ani.

Unul dintre obiectivele specifice ale acestui proiect este realizarea unei rețete inovatoare pentru fabricarea peleișilor și/sau brichetelor, din diverse direcții de cercetare prin valorificarea reziduurilor forestiere și agricole

Activitățile propuse pentru a se realiza în cadrul proiectului sunt: activități de cercetare-dezvoltare (cercetare industrială și/sau dezvoltare experimentală), achiziția de servicii pentru cercetare-dezvoltare, activități pentru introducerea în producție și realizare produs/ proces/ tehnologie, activități de procurare de materii prime și materiale necesare realizării proiectului, activități de informare și publicitate privind proiectul, activități de asigurare a vizibilității, activități pentru management de proiect și audit.

Acest proiect a fost depus în 2017, a fost câștigat și se află în curs de implementare.

3 FUNDAMENTELE TEORETICE ALE CERCETĂRII

Obiectivele acestui capitol sunt:

- fundamentarea teoretică a cercetării
- trecerea în revistă a diverselor metode de cercetare fundamentală [20],[25],[21] care vor fi utilizate în capitolele următoare

Vor fi trecute în revistă generalități privind organizarea cercetărilor experimentale și planificarea științifică a experimentelor factoriale, tehnici de prelucrare a datelor experimentale, elemente de cercetări operaționale și inteligență artificială, precum și softurile dedicate Statgraphics Centurion și Matlab, utilizate în teză pentru obținerea unor rezultate specifice.

3.1 Viziune generală asupra organizării cercetărilor experimentale pe linia de peleți și brichete

Fiecare activitate de cercetare se bazează pe date colectate anterior. Măsurarea unei mărimi fizice înseamnă a o compara cu altă mărime fizică, numită etalon sau unitate de măsură, folosind un anumit principiu (sau metodă) de măsurare. Orice măsurători sunt afectate de erori – întâmplătoare, sistematice sau greșeli.

O metodă statistică de a analiza datele de măsurare ce depind de unul sau mai mulți factori cu acțiune simultană, în scopul de a stabili semnificația acestora asupra funcției obiectiv este analiza dispersională (sau analiza varianței).

După determinarea unui model teoretic pentru un proces sau un fenomen, urmează simularea acestuia. Simularea se face folosind tehnici de programare și urmărește studierea procesului sau a fenomenului analizat în anumite circumstanțe, care pot fi controlate de către utilizator. Prin variația parametrilor, utilizatorul își poate forma o privire de ansamblu asupra fenomenului studiat, poate să îl înțeleagă, poate să îl studieze folosind resurse aflate la îndemână [83].

3.2 Considerații privind planificarea științifică a experimentelor factoriale

Proiectarea experimentală (planificarea științifică a experimentelor) reprezintă o abordare riguroasă și sistematică a procesului de rezolvare de probleme [17]. Prin aceasta, în stadiul culegerii datelor experimentale se aplică diverse principii și tehnici de natură a asigura concluzii valide și consistente cu un consum cât mai mic de resurse.

3.3 Tehnici de prelucrare a datelor experimentale

Metodele statistice tradiționale folosite pentru a lega date de intrare cu date de ieșire sunt numite, în general, “curve fitting” (fie că e vorba de interpolare sau regresie).

Cele mai frecvent utilizate regresii sunt regresia liniară (prin care se determină o dreaptă ca fiind cea mai bună aproximație dintr-o diagramă de dispersie), regresia nonliniară (prin care se determină o curbă ca fiind cea mai bună aproximație a unei digrame de dispersie) și regresia multiplă (caz în care variabila dependentă depinde de mai multe variabile independente).

Eroarea de aproximare depinde de o serie de factori mai mult sau mai puțin controlabili în practică, cum ar fi gradul de omogenitate a eșantionului analizat sau exactitatea măsurătorilor [17]. Una din cele mai folosite metode de determinare a ecuațiilor de regresie este metoda celor mai mici pătrate.

Orice model pentru care coeficienții se pot transforma în coeficienți liniari poate fi redus la un model liniar. Principalele caracteristici ale ecuațiilor de regresie sunt coeficientul de corelație, deviațiile și erorile standard, coeficienții de determinare.

Valorile aberante sunt acele valori care nu se încadrează în modelul general al celorlalte valori. În cazul unei distribuții normale, regula empirică este că valoarea depărtată de medie cu mai mult de 3 abateri standard este o valoare aberantă. Valorile aberante pot influența major coeficienții de regresie, de aceea este important ca ele să fie identificate [17],[2] și eliminate.

3.4 Procesarea statistică a datelor folosind Statgraphics Centurion

Statgraphics Centurion XVI este un software dedicat pentru prelucrarea statistică a datelor, dezvoltat de firma StatPoint Technologies [23] și a fost primul software dedicat analizei

statistice adaptat pentru folosirea pe calculatoare personale, primul software care a folosit metode grafice de ilustrare a datelor statistice.

Datele sunt introduse într-un așa-numit Data Book, organizat similar unei foi de lucru din Excel, în care fiecare coloană corespunde unei anumite informații de analizat. Pentru a le analiza, se poate alege procedura dorită din meniul principal sau din bara de meniuri sau se poate folosi asistentul incorporat, StatWizard.

3.5 Elemente de cercetări operaționale aplicabile în cercetare

Cercetările operaționale reprezintă o ramură a matematicii aplicate care se ocupă cu crearea și aplicarea de metode analitice ce permit o îmbunătățire a procesului decizional. În acest mod, sunt găsite soluții optime pentru probleme complexe care implică luarea de decizii.

Etapele de rezolvare ale unei probleme cu ajutorul cercetărilor operaționale sunt [1]:

1. definirea problemei
2. clasificarea și conceptualizarea problemei
3. formularea și construirea modelului matematic
4. soluția modelului, care oferă un feedback asupra procesului de conceptualizare
5. validarea, analiza sensibilității și recomandări
6. dacă soluția este aplicabilă, ea va fi implementată.

O problemă de programare liniară (sau un program liniar) are, de obicei, următoarea formă [1]:

găsiți maximul (sau minimul) unei funcții obiectiv

$$f(x_1, \dots, x_n) = \sum_{i=1}^n c_i x_i \quad (3.1)$$

date fiind restricțiile

$$\sum_{i=1}^n a_{ji} x_i \leq b_j, \quad 1 \leq j \leq m \quad (3.2)$$

O soluție a problemei de programare liniară constă în acele valori x_i care verifică restricțiile.

Orice problemă de optimizare liniară poate fi adusă la o formă standard, care se rezolvă cu ajutorul algoritmului simplex.

Teoremă [25] Dacă programul în formă standard (P) este compatibil și toate soluțiile sale admisibile de bază sunt nedegenerate atunci aplicarea algoritmului simplex se termină într-un număr finit de iterații, fie cu găsirea soluției optime, fie cu concluzia că programul are optim infinit.

3.6 Metode ale inteligenței artificiale în optimizarea și previziunea proceselor

Inteligența artificială (IA) este inteligența demonstrată de mașini. Printre elementele sale, rețelele neuronale artificiale (RNA) au început să fie folosite în mod extensiv începând cu anii 1980. "Neuronii" RNA sunt elemente de software care simulează neuronii umani. În principiu, un neuron este compus dintr-o intrare, p , transmisă printr-o conexiune care îi multiplică puterea cu ponderea w , o funcție de transfer (sau de activare) $f(wp)$ și o ieșire a . În cazul în care există un prag (bias sau deplasare), b , acesta poate fi asimilat unui input egal cu unitatea și cu o pondere b . Ieșirea neuronului va deveni astfel $a = f(wp + b)$.

Structura unei RNA cu propagare înainte constă din:

- un strat de intrare (input layer) – I, conținând un anumit număr de neuroni,
- unul sau mai multe straturi intermediare, ascunse (hidden layers) – H (fiecare compus dintr-un anumit număr de neuroni)

- un strat de ieșire (output layer) – O, compus, de obicei, dintr-un singur neuron ("răspunsul" rețelei).

RNA își găsesc aplicații în toate domeniile: financiar-bancar, asigurări, aerospațial, automotive, apărare, electronică, divertisment, industrie, producție, medicină, robotică, recunoașterea vorbirii și a scrisului, securitate, telecomunicații și chiar estimarea puterii calorifice brute .

3.7 Proiectarea rețelelor neuronale folosind Matlab

Una dintre cele mai utilizate soluții software pentru implementarea rețelelor neuronale este Matlab. [13][17].

Pentru a folosi RNA, trebuie să fie urmate următoarele etape :

- etapa de antrenare (în care sunt introduce în rețea asocierile cunoscute dintre inputuri și outputuri);
- etapa de validare (în care rezultatele RNA sunt verificate prin comparare cu rezultate cunoscute);
- etapa de testare (în care RNA prezice rezultate asociate unor seturi de date de intrare).

Algoritmul standard de antrenare al unei rețele cu propagare înainte este algoritmul de retropropagare a erorii (backpropagation), care urmărește să minimizeze o funcție de eroare. Practic, funcția de eroare măsoară performanța rețelei.

Două dintre cele mai importante probleme ale retropropagării sunt viteza mică de convergență și capacitatea limitată de generalizare. Viteza mică de convergență (faptul că eroare descresște prea lent) se poate remedia folosind algoritmi rapizi, bazați pe tehnici euristice (ca retropropagarea cu viteză variabilă de învățare), sau tehnici de optimizare numerică (ca metoda gradientului conjugat, metode cvasi-Newton, metoda Levenberg-Marquardt). O îmbunătățire a capacității de generalizare se poate obține folosind fie metoda regularizării bayesiene (care operează la nivelul funcției de eroare), fie criteriul de oprire timpurie (atunci când algoritmul de antrenare a rețelei nu este unul care să converge rapid).

4 CERCETĂRI EXPERIMENTALE PRIVIND PELEȚII PENTRU ÎNCĂLZIRE. PRELUCRAREA ȘI INTERPRETAREA DATELOR OBȚINUTE

Obiectivele acestui capitol sunt:

- stabilirea unei metodologii pentru cercetarea experimentală referitoare la peleții pentru încălzire
- realizarea unor experimente pe teren în scopul determinării proprietăților peleților pentru încălzire și analiza acestora
- determinarea unei rețete de peleți care să maximizeze puterea calorică (în MJ/kg) atunci când se folosesc principalele materii prime disponibile în zonă, atunci când cenușa reziduală se încadrează în limitele unui anumit standard sau este minimizată
- studiul influenței unui aditiv asupra calității produsului final (putere calorică, cenușă, omogenitate, densitate)
- identificarea de direcții de cercetare conexe pentru diversificarea producției
- studiul calitativ preliminar al potențialului scoarței de salcie

Rezultatele originale obținute sunt:

- o metodologie a cercetărilor
- o serie de rețete de peleți pentru materiile prime din zonă, cu sau fără aditiv
- probe de peleți realizate cu rețetele propuse

- o estimare a proprietăților peleților obținuți din materii prime din zonă (în termeni de putere calorifică și cenușă reziduală, încadrarea în standarde) în funcție de rețeta de fabricare
- o serie de formule care previzionează calitatea peleților din rumeguș de brad și boabe de grâu în funcție de cantitatea de aditiv (boabe de porumb) adăugată
- un studiu calitativ inițial al posibilităților de diversificare a producției
- o estimare preliminară a cantității de salicină care se poate obține prin prelucrarea separată a scoarței de salcie

4.1 Metodologia cercetărilor empirice experimentale prin descompunerea în elemente chimice primare

În continuare vor fi prezentate conceptele cheie folosite în acest capitol în cadrul cercetărilor empirice experimentale, precum și principalele metode și echipamente folosite în cadrul cercetărilor (o metodologie a cercetărilor, metode de analiză a rezultatelor).

Umiditatea este definită ca și cantitatea totală de apă, în procente, prezentă în combustibil.

Cenușa este reziduul solid care rămâne în urma arderii combustibilului până la masă constantă, la temperaturi de $815^{\circ}\pm 25^{\circ}$ [24].

Puterea calorifică inferioară (cunoscută și sub denumirea de putere calorifică utilă sau putere calorifică industrială) se definește ca și cantitatea de căldură degajată prin arderea „perfectă și completă” a unei unități de masă dintr-un anumit combustibil, atunci când vaporii de apă rezultați din ardere nu sunt condensați și căldura latentă de vaporizare nu se recuperează.

Densitatea particulelor este un factor care influențează calitatea și timpul de ardere al peleților. Strâns legată de densitatea particulelor este densitatea de vrac a peleților.

Conceptele cheie, care sunt detaliate în teză, se referă la:

A. Stabilirea unei metodologii de lucru

B. Determinarea puterii calorifice inferioare

C. Determinarea cantității de cenușă reziduale

D. Determinarea parametrilor geometrici ai peleților

4.2 Determinarea puterii calorifice și a cenușii reziduale pentru mixturi

Pentru determinarea puterii calorifice și a cenușii reziduale, un prim pas este definirea unei strategii experimentale. După realizarea efectivă a determinărilor experimentale, datele colectate sunt analizate și interpretate cu ajutorul Statgraphics Centurion.

Strategia experimentului

Scopul experimentului este de a determina influența compoziției peleților asupra puterii calorifice și a cenușii reziduale, în cazul unor mixturi de maxim 5 componente, printre cele mai des întâlnite materii prime din zona de câmpie est-europeană.

Pentru compoziția mixturii a fost ales un model liniar, factorii experimentului fiind A (paie), B (rumeguș fag), C (tocătură / resturi crengi), D (boabe de porumb neconform), E (boabe de grâu neconform). Cele 5 tipuri de materie primă și peleții obținuți din acestea sunt prezentate în Figura 4.1.

Realizarea efectivă a determinărilor experimentale

Pentru fiecare amestec din cele 15 propuse pentru analiză, au fost realizate probe de peleți la fabrica de la Cenei, care au fost apoi analizate în Centrul de Cercetare pentru Mașini și Echipamente Termice, Transporturi și Combaterea Poluării de la Universitatea Politehnica din Timișoara.

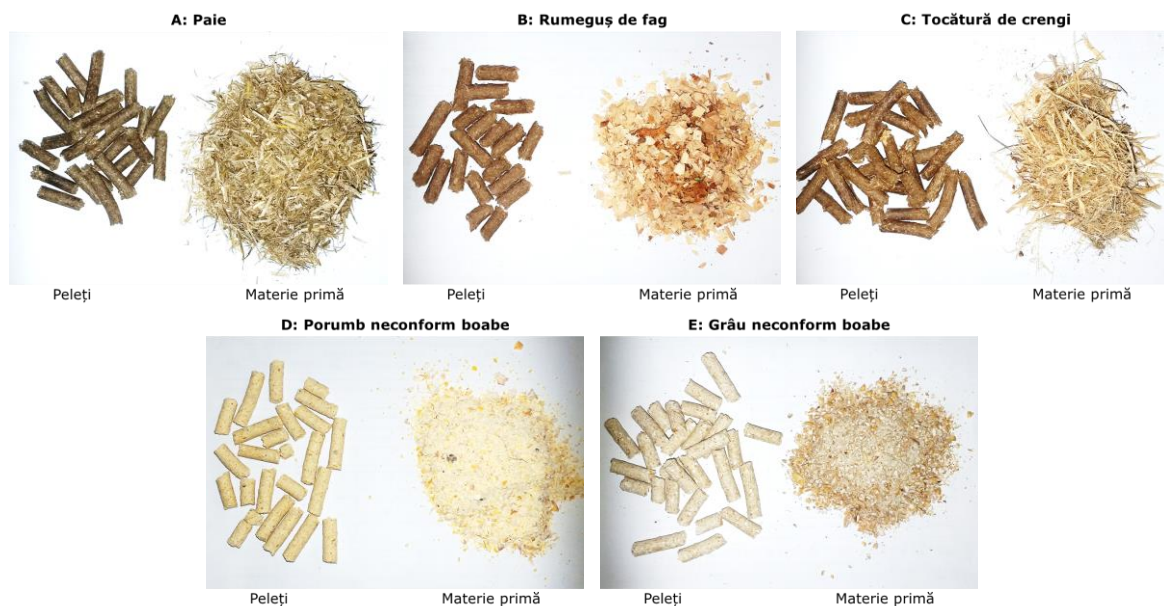


Figura 4.1 Factorii experimentului (materie primă și peleți)

Evaluarea experimentului, analiza și interpretarea datelor obținute

Analiza mixturii indică faptul că modelul care descrie cel mai bine atât puterea calorică a amestecului cât și procentul de cenușă reziduală este un model liniar.

Modelul de regresie pentru puterea calorică este

$$Q = 15,9299 \cdot Factor_A + 18,7661 \cdot Factor_B + 18,375 \cdot Factor_C + 16,9027 \cdot Factor_D + 16,2113 \cdot Factor_E \quad (4.1)$$

cu constrângerea că suma factorilor trebuie să fie egală cu 1 (100%). Acest model explică 100% din variația puterii calorifice. Eroarea standard a estimării este de 0,000338062, iar abaterea medie pătratică de 0,000228571. Valoarea maximă pentru Q este de 18,77 (corespunzătoare cazului în care mixtura este alcătuită în totalitate din fag), iar cea minimă este de 15,93 (corespunzătoare situației în care mixtura este alcătuită în întregime din paie).

Modelul de regresie pentru cenușa reziduală este

$$ash = 4,26133 \cdot Factor_A + 2,17048 \cdot Factor_B + 2,01762 \cdot Factor_C + 0,729048 \cdot Factor_D + 2,28819 \cdot Factor_E \quad (4.2)$$

cu restricția că suma factorilor trebuie să fie egală cu 1 (100%).

Valoarea minimă pentru cenușa reziduală este de 0,73 (corespunzătoare unei mixturi alcătuite în totalitate din porumb neconform), iar valoarea maximă este de 4,26 (corespunzătoare unei mixturi alcătuite în totalitate din paie).

Analizând valorile coeficienților pentru Q și cenușă, se observă că cele mai bune opțiuni sunt cele pentru care factorii E (grâu neconform) și A (paie) sunt nuli.

Obținem un grafic care indică valori posibile pentru factorii B, C, D astfel încât puterea calorică și cenușa reziduală să se încadreze între anumite valori (Figura 4.2). Această figură indică faptul că e posibil să determinăm rețete de mixturi de 3 componente pentru care puterea calorică să fie mai mare de 18,5 MJ/kg, în același timp în care cenușa reziduală este sub 2% sau rețete cu puterea calorică 18,0 MJ/kg și cenușa reziduală sub 2%. Mai puțin eficiente din punct de vedere ale puterii calorifice, dar dezirabile din punct de vedere al cantității de cenușă reziduală sunt și cazurile $Q > 17,5$ MJ/kg și $ash < 1,5\%$ și $Q > 17,0$ MJ/kg și $ash < 1,0\%$.

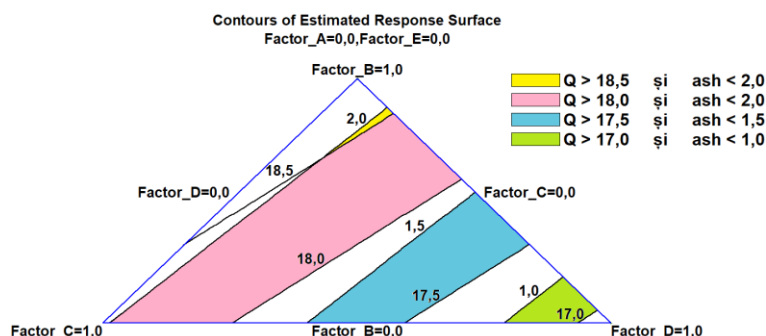


Figura 4.2 Valori posibile pentru puterea calorică și cenușa reziduală în funcție de valorile factorilor experimentali

4.3 Studiul influenței aditivului asupra calității peleților obținuți dintr-o mixtură de 2 tipuri de biomasă

Strategia experimentului

În cadrul acestui experiment s-a urmărit studiul influenței aditivului (în acest caz, porumb boabe) asupra calității peleților obținuți dintr-o mixtură de două tipuri de biomasă: rumeguș de brad și grâu boabe.

Analiza influenței compoziției asupra puterii calorifice a peleților

Ecuatia de regresie determinată pentru puterea calorică inferioară este

$$Q = 9,95867 + 0,712252 \cdot \text{Grâu} - 0,503132 \cdot \text{Brad} - 0,159012 \cdot \text{Aditiv} - 0,00638362 \cdot \text{Grâu}^2 - 0,0008125 \cdot \text{Grâu} \cdot \text{Brad} + 0,008875 \cdot \text{Grâu} \cdot \text{Aditiv} + 0,00616284 \cdot \text{Brad}^2 - 0,00015 \cdot \text{Brad} \cdot \text{Aditiv} - 0,00296552 \cdot \text{Aditiv}^2 \quad (4.3)$$

Impunând condiția $\text{Grâu} + \text{Brad} + \text{Aditiv} = 100(\%)$ și ținând seama că valorile pentru procentajul de grâu variază între 38% și 42%, iar aditivul – porumb boabe – se adaugă într-un procentaj de maxim 5% se obține diagrama din Figura 4.3.

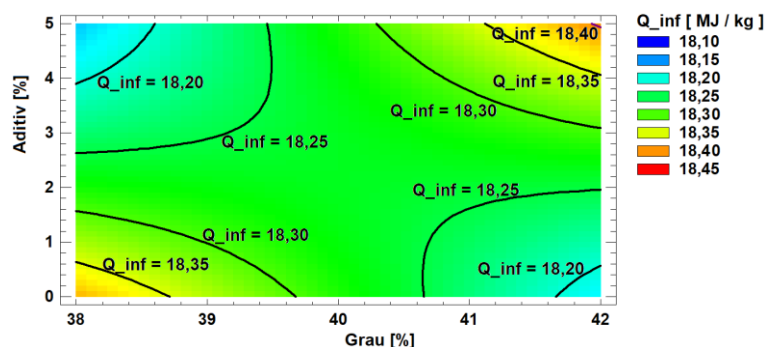


Figura 4.3 Curbe de nivel pentru Q_{inf}

Pe baza formulei deduse pentru Q se poate calcula un punct de extrem local al funcției Q în intervalul $[38,42] \times [38,62] \times [0,5]$. Se obține astfel o valoare minimă pentru Q de 18,262 MJ/kg pentru rețeta $\text{Grâu}:\text{Brad}:\text{Aditiv}=40,068:57,901:2,031$. Valoarea maximă pentru Q în aceste condiții este de 18,404 MJ/kg, corespunzătoare rețetei $\text{Grâu}:\text{Brad}:\text{Aditiv}=42:53:5$.

Pentru influența aditivului asupra cenușii reziduale și a calităților fizice ale peleților (lungime, diametru, densitate de vrac, densitatea particulelor) au fost obținute rezultate similare.

4.4 Direcții de cercetare și activități conexe

În afară de peleți și brichete pentru încălzire, firma își poate diversifica activitatea cu investiții minime prin:

- includerea în producție a furajelor pentru animale
- includerea în producție a îngrășămintelor provenite din nămoluri din stațiile de epurare
- valorificarea scoarței de salcie în scopuri fitoterapeutice

O soluție de îmbunătățire a calității peletilor din salcie energetică presupune decojirea lemnului. Aceasta însă produce un deșeu industrial: scoarța. Pentru o dezvoltare sustenabilă, scoarța de salcie ar trebui valorificată într-un fel sau în altul.

Scoarța de salcie este utilizată ca atare sau ca extract încă din antichitate în scopuri analgezice. Substanța activă este salicina, conținută în diverse procente. Pentru a putea fi folosită, coaja de salcie uscată trebuie să conțină minim 1,5% derivați salicilici, exprimați ca și conținut de salicină.

Un extract în metanol al cojii de salcie furnizată de partenerii de la Rebina SA a fost analizat în laboratoarele INCEMC, iar rezultatele analizei cromatografice arată, calitativ, prezența semnificativă a unui compus salicilic în scoarța analizată.

Astfel, pentru *Salix alba*, după separarea scoarței se obține o creștere a puterii calorifice superioare cu 2,68%. Pe de altă parte, la o producție de salcie de 7 tone/ha, se obțin 1169 kg scoarță, care conțin 16,0153 kg salicină (la un procentaj de 1,37% salicină în scoarță).

5 PRELUCRAREA ȘI INTERPRETAREA DATELOR EXPERIMENTALE FOLOSIND TEHNICI DE CERCETĂRI OPERAȚIONALE

Obiectivele acestui capitol sunt:

- alcătuirea unei baze de date care să conțină informații despre materia primă existentă în regiunea climatică specifică vestului României (compoziție elementară, putere calorifică, cenușa reziduală, preț)
- sintetizarea standardelor actuale pentru calitatea peletilor pentru încălzire
- stabilirea unui model de optimizare liniară pentru rețetele de peleți
- stabilirea unor proprietăți matematice ale modelului de optimizare liniară în cazul mixturilor de două componente, cu sau fără aditiv
- realizarea unei soluții software preliminare care să determine un raport de masă optimal în cazul mixturilor de două componente fără aditiv
- realizarea unei soluții software care să implementeze modelul de optimizare liniară pentru baza de date construită și mixturi de două componente, cu sau fără aditiv
- stabilirea unor proprietăți matematice ale modelului de optimizare liniară în cazul mixturilor de $n \geq 2$ componente, cu sau fără aditiv
- realizarea unei soluții software care să implementeze modelul de optimizare liniară pentru baza de date construită și mixturi de $n \geq 2$ componente, cu sau fără aditiv

Rezultatele originale obținute sunt:

- o bază de date cu proprietățile diverselor materii prime disponibile pentru peletizare
- o problemă de optimizare (în 2 sau mai multe dimensiuni),
- condiții necesare din punct de vedere matematic pentru existența soluției problemei de optimizare,
- algoritmi de determinare a soluției problemei de optimizare,
- soluție software de determinare a rețetei optime în funcție de opțiunile utilizatorului.

5.1 Baze de date utilizate în procesul de decizie

Pentru realizarea unui proces de decizie cât mai eficient, este necesar să se realizeze următoarele baze de date: o bază de date cu standardele internaționale aplicabile în producția de biomasă și o bază de date cu caracteristici pentru principalele tipuri de biomasă care pot fi prelucrate pe linia tehnologică.

Standardele internaționale aplicabile în producția de biomasă pentru combustibil sunt preluate din ISO17225 și ENPlus și se referă la cerințele asupra originii biomasei, puterii calorifice inferioare, concentrației de cenușă, și concentrației de noxe (N, S, Cl) în gazele de ardere.

Pentru implementarea rezultatelor de cercetări operaționale enunțate anterior, a fost construită o bază de date cu informații despre standardele UE pentru peleți, compoziția chimică a diverselor tipuri de biomasă și prețul materiei prime (în lei/kg). Acolo unde nu au putut fi determinate prin analiză chimică directă, compozițiile chimice elementare ale materiei prime au fost luate din literatura de specialitate ([11],[12],[14],[19]).

Pentru a determina puterea calorifică în funcție de compoziția elementară, se poate folosi formula lui Mendeleev care dă puterea calorifică în MJ/kg în funcție de cantitatea procentuală de C, H, O, S din materialul combustibil:

$$Q = 0,339 \cdot C + 1,029 \cdot H + 0,109 \cdot S - 0,109 \cdot O \quad (5.1)$$

Pentru un rezultat mai precis, aplicabil la datele din baza de date, am determinat cu ajutorul Statgraphics o ecuație de regresie pentru puterea calorifică, prin care este calculată puterea calorifică (în MJ/kg) în funcție de cantitățile procentuale de C, H, N, O, S, Cl din materialul combustibil:

$$Q = 0,363504 \cdot C - 0,872841 \cdot Cl - 0,00671136 \cdot H + 0,316865 \cdot N + 0,0207733 \cdot O - 0,305485 \cdot S \quad (5.2)$$

Pentru această ecuație, precizia este de 99,6018%.

5.2 Proprietăți ale soluției problemei de optimizare lineară în cazul unei mixturi de două componente

Din punct de vedere matematic, pentru orice două tipuri de biomasă, 1 și 2, problema de programare liniară standard este următoarea:

$$\left\{ \begin{array}{l} \max c = x_1 c_1 + x_2 c_2 \\ \text{dacă} \\ c_1 = 0.339 C_1 + 1.029 H_1 + 0.109 S_1 - 0.109 O_1 \\ c_2 = 0.339 C_2 + 1.029 H_2 + 0.109 S_2 - 0.109 O_2 \\ x_1 = \frac{m_1}{m_1 + m_2} \\ x_2 = \frac{m_2}{m_1 + m_2} \\ S = x_1 S_1 + x_2 S_2 \leq S_{\max} \\ N = x_1 N_1 + x_2 N_2 \leq N_{\max} \\ Cl = x_1 Cl_1 + x_2 Cl_2 \leq Cl_{\max} \\ ash = x_1 ash_1 + x_2 ash_2 \leq ash_{\max} \\ 0 \leq m_1, m_2 \end{array} \right. \quad (5.3)$$

unde indicii 1 și 2 se referă la cele două tipuri de biomasă considerate, C, H, S, O, N, Cl se referă la concentrația masică a elementului chimic respectiv în tipul de biomasă considerat, ash se referă la cantitatea procentuală de cenușă a tipului de biomasă considerat, iar m_1 și m_2 sunt masele cu care cele două materii prime contribuie la amestecul final. Indicele max se referă la valoarea maximă admisă pentru respectiva componentă.

În continuare sunt prezentate principalele rezultate referitoare la proprietățile problemei de programare liniară.

Propoziția 1 Condiția necesară pentru ca problema să aibă o soluție este ca

$$x_1 + x_2 = 1. \quad (5.4)$$

Presupunem fără a restrânge generalitatea că $c_1 > c_2$.

Propoziția 2 Dacă problema are soluție, atunci

$$0 \leq x_1 \leq \min \left\{ \frac{N_{max} - N_2}{N_1 - N_2}, \frac{S_{max} - S_2}{S_1 - S_2}, \frac{Cl_{max} - Cl_2}{Cl_1 - Cl_2}, \frac{ash_{max} - ash_2}{ash_1 - ash_2} \right\}. \quad (5.5)$$

Propoziția 3 Problema are soluție dacă și numai dacă

$$\min \left\{ \frac{N_{max} - N_2}{N_1 - N_2}, \frac{S_{max} - S_2}{S_1 - S_2}, \frac{Cl_{max} - Cl_2}{Cl_1 - Cl_2}, \frac{ash_{max} - ash_2}{ash_1 - ash_2} \right\} \geq 0. \quad (5.6)$$

Cazuri particulare Fără a restrânge generalitatea, se consideră în cele ce urmează doar la inecuația corespunzătoare concentrației de N , pentru celelalte inecuații raționamentul fiind similar și rezultatele similare. Este studiat semnul raportului $R_N = \frac{N_{max} - N_2}{N_1 - N_2}$ și soluția inecuației

$x_1 N_1 + (1 - x_1) N_2 \leq N_{max}$. Se disting următoarele cazuri particulare:

1. $N_1 \leq N_2 < N_{max}$ Atunci raportul R_N este negativ, iar problema nu are soluție.
2. $N_2 \leq N_1 \leq N_{max}$ Atunci raportul R_N este pozitiv, iar problema poate avea soluție dacă și celelalte rapoarte sunt pozitive.
3. $N_1, N_2 \geq N_{max}$ problema nu are soluții.
4. $N_2 = N_{max}$ Atunci inecuația se reduce la $x_1(N_1 - N_{max}) \leq 0$, care are soluții doar dacă $N_1 \leq N_{max}$.
5. $N_1 = N_{max}$ Atunci inecuația se reduce la $x_1(N_{max} - N_2) \leq N_{max} - N_2$, care are soluții doar dacă $N_2 < N_{max}$.
6. $N_1 = N_2 \leq N_{max}$ Atunci raportul R_N este pozitiv, iar problema poate avea soluție dacă și celelalte rapoarte sunt pozitive.
7. $N_2 \geq N_{max}$ Atunci raportul R_N este pozitiv doar dacă $N_1 \leq N_2$. În plus, deoarece N_1 și N_2 nu pot fi simultan mai mari decât N_{max} , este necesar ca $N_1 \leq N_{max}$.

Propoziția 4 În condițiile enunțate anterior în acest paragraf, puterea calorică maximă a unui amestec de 2 componente este

$$c_{max} = c_2 + (c_1 - c_2) \cdot \min \left\{ \frac{N_{max} - N_2}{N_1 - N_2}, \frac{S_{max} - S_2}{S_1 - S_2}, \frac{Cl_{max} - Cl_2}{Cl_1 - Cl_2}, \frac{ash_{max} - ash_2}{ash_1 - ash_2} \right\}. \quad (5.7)$$

Ținând cont de constrângerile enunțate mai sus și prin efectuarea substituției $x_2 = 1 - x_1$, problema de optimizare liniară devine o problemă de determinare a maximumului unei funcții liniare de o singură variabilă, ceea ce se reduce la studiul monotoniei funcției obiectiv.

Propoziția 5 Fie constantele reale $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ și problema de determinare a maximumului unei funcții liniare de o singură variabilă

$$\max_{\gamma \leq x_1 \leq \delta} (\alpha x_1 + \beta) \quad (5.8)$$

Atunci următoarele afirmații sunt adevărate:

- a. Dacă $\gamma > \delta$ atunci problema nu are soluții.
- b. Dacă $\gamma = \delta$ atunci problema are o unică soluție admisibilă, $x_1 = \gamma$, ceea ce corespunde la $x_2 = 1 - \gamma$. Această soluție este optimă, iar valoarea funcției obiectiv este $c = \alpha x_1 + \beta$.
- c. Dacă $\gamma < \delta$, problema are următoarele soluții, în funcție de parametrul α :
 - i. Dacă $\alpha > 0$ (cazul în care funcția obiectiv este strict crescătoare), valoarea optimă se obține pentru $x_1 = \delta$ (care corespunde situației $x_2 = 1 - \delta$) și este $c = \alpha \delta + \beta$.

- ii. Dacă $\alpha < 0$ (cazul în care funcția obiectiv este strict descrescătoare), valoarea optimă se obține pentru $x_1 = \gamma$ (corespunzând la $x_2 = 1 - \gamma$) și este $c = \alpha\gamma + \beta$.
- iii. Dacă $\alpha = 0$ (dacă funcția obiectiv este constantă), există o infinitate de soluții optime, corespunzătoare valorilor $x_1 \in [\gamma, \delta]$, iar valoarea optimă este $c = \beta$.

Pe baza Propoziției 5 a fost construit un algoritm de tip simplex pentru determinarea puterii calorifice în cazul amestecurilor de două componente [15].

Un caz particular este cazul în care mixtura conține aditivi, așadar pe lângă componenta x_1 și componenta x_2 apare și componenta x_a . Cunoscând însă natura aditivului (compoziția chimică elementară, puterea calorifică și cenușa) precum și cantitatea de aditiv adăugată, se pot calcula noi valori standard maxime pentru N, S, Cl și cenușă. Cu aceste valori maxime, problema de optimizare se reduce la problema de determinare a unei rețete fără aditivi.

Algoritmul de determinare a puterii calorifice permite atât calculul unei rețete optimale fără aditivi, cât și a uneia cu aditivi. Acesta este implementat în C și are o interfață care permite utilizarea lui facilă de către utilizatori. Programul permite mai multe opțiuni: consultarea standardelor internaționale, determinarea unei rețete optime pe baza datelor aflate într-un fișier adiacent, adăugarea unui material nou în fișierul adiacent.

Fișierul adiacent, care conține materiile prime, este structurat pe linii, fiecare linie fiind de tipul

material	C	H	O	N	S	Cl	Preț	Q_inf	cenușă
----------	---	---	---	---	---	----	------	-------	--------

Opțiunea 1, de consultare a standardelor, are ca efect afișarea limitărilor (asupra $N_{\max}$, $S_{\max}$, $Cl_{\max}$, $cenușa_{\max}$, $aditiv_{\max}$) impuse de cele 8 standarde predefinite:

Pentru opțiunea 2, de a determina o rețetă, fișierul care conține baza de date este parcurs, iar utilizatorul trebuie să aleagă numele materialului care ar putea să facă parte din rețeta cea nouă. Apoi, utilizatorul poate alege unul dintre standardele predefinite sau poate să impună propriile valori maxime care vor fi considerate pentru N, S, Cl, cenușă, aditiv.

```

6 pentru I3
7 pentru Mixed biomass pellets A
8 pentru Mixed biomass pellets B
9
10 N_max=1.5
11 S_max=0.5
12 Cl_max=0.2
13 cenușa_max=10
14 aditiv_max=10
15 ati ales standardul 0 - Personalizat
16 cu limitările
17     N_max = 1.50%
18     S_max = 0.50%
19     Cl_max = 0.20%
20     cenușa_max = 10.00%
21     aditiv_max = 10.00%
22 In condițiile standardului ales rețeta perfectă are compoziția procentuală:
23     100.00% Brad
24     0.00% Orz_boabe
25     0.00% aditiv
26     Q_min=19.19 MJ
27     pret=0.00 lei/100kg
28 Alegeti o optiune:
29     1 - Consulta standarde
30     2 - Determina o rețeta

```

Figura 5.1 Folosirea unui standard personalizat într-o rețetă

În cazul în care se dorește introducerea unui aditiv în compoziție, calculele sunt efectuate pentru valoarea maxim admisă a acestui aditiv. Alegerea unui aditiv influențează de asemenea limitările impuse de standarde, iar noile valori sunt afișate. Dacă se dorește un standard personalizat, acesta poate fi introdus de către utilizator.

Se prezintă în continuare răspunsul programului în cazul în care s-a ales o rețetă pe bază de brad și boabe de orz, fără aditiv și cu valori maxime admise de 1,5% pentru N, 0,5% pentru S, 0,2% pentru Cl, 10% pentru cenușă și 10% pentru aditiv.

În cazul în care se dorește adăugarea unui nou material în baza de date, utilizatorul este atenționat că este imperativă cunoașterea valorilor procentuale pentru N, S, Cl, cenușă și puterea calorică Q în MJ/kg.

5.3 Problema de optimizare liniară în cazul mixturilor de n componente, $n \geq 2$

Date fiind n materii prime pentru care se cunosc concentrațiile elementare C, H, S, O, N, Cl, concentrația de cenușă și puterea calorică (în MJ/kg), se pune problema determinării compoziției acelei mixturi pentru care concentrațiile de N, S, Cl și cenușă rămân sub anumite limite și în plus puterea calorică a mixturii este maximă.

În cazul în care $n > 2$, soluția problemei nu poate fi determinată imediat. În schimb, existența soluției și, în caz afirmativ, valoarea maselor celor n componente ale mixturii pot fi stabilite folosind algoritmul simplex, similar cu cazul $n = 2$.

5.4 Aplicația de determinare a unor rețete optime de peleți din perspectiva posibilității de transfer tehnologic

Principiile de bază, conceptul tehnologic, funcționalitățile și caracteristicile acestuia au fost demonstrate la nivel analitic sau experimental. Componentele au fost validate în condiții de laborator (TRL4), apoi în mediul industrial, la fabrica din Cenei, începând cu 2018.

Prototipul este în curs de validare la scară reală (TRL6) într-o fabrică specializată pentru producția de peleți și brichete pentru încălzire.

Faza de maturitate a tehnologiei propuse în prezenta cercetare (i.e., funcționalitatea produsului în condiții relevante de funcționare (TRL 7), sistemul finalizat și calificat (TRL 8) și demonstrarea în medii operaționale a funcționalității produsului (TRL 9)) urmează să fie atinsă într-un viitor apropiat.

6 VALIDAREA, OPTIMIZAREA ȘI PREVIZIUNEA PROCESELOR FOLOSIND ELEMENTE DE INTELIGENȚĂ ARTIFICIALĂ

Obiectivele acestui capitol sunt:

- construirea unei rețele neuronale artificiale care să determine compoziția elementară a unui combustibil solid, dacă se cunosc puterea calorică a acestuia și cenușa reziduală rezultată în urma arderii acestuia.
- utilizarea ieșirilor rețelei pentru determinarea puterii calorifice, folosind o formulă de regresie determinată special.
- compararea rezultatelor obținute cu datele experimentale și determinarea condițiilor în care soluția teoretică (rețea neuronală + regresie) se poate aplica în practică.

Rezultatele originale obținute în acest capitol sunt:

- o rețea neuronală pentru determinarea compoziției elementare a unui material, pornind de la puterea calorică a acestuia și cenușa reziduală rezultată în urma arderii
- o evaluare a posibilității de a aplica această metodă în combinație cu soluția software detaliată în capitolul precedent pentru a determina rețete optime de producere a peletilor

6.1 Construirea unei rețele neuronale pentru determinarea compoziției elementare a combustibilului

Pentru construirea unei rețele neuronale, este nevoie în primul rând să fie enunțate o serie de considerente generale legate de parametri de proces și tehnica de lucru, apoi să fie detaliată arhitectura rețelei neuronale care va fi construită.

Calcululele au fost realizate folosind Neural Networks toolbox din Matlab [7].

Setul de date de intrare a fost divizat în mod aleator în în setul de testare (71,06% din intrări, adică 54 intrări), setul de validare (14,47% din intrări, adică 11 intrări) și setul de test (14,47% din intrări, adică 11 intrări). Fiecare intrare este de tipul

Q_inf	cenușa
-------	--------

iar fiecare ieșire de tipul

C	H	O	N	S	Cl
---	---	---	---	---	----

Așadar, rețeaua neuronală este o funcție

$$\mathbf{y} = f(\mathbf{x}) \quad (6.1)$$

unde $\mathbf{y}$ este un vector cu 6 elemente corespunzător compoziției chimice elementare procentuale (C, H, O, N, S, Cl), iar $\mathbf{x}$ este un vector cu 2 elemente, corespunzător valorilor pentru puterea calorică inferioară în MJ/kg și cantitatea de cenușă în %.

Rețeaua neuronală are un strat de intrare, cu 2 neuroni, două straturi ascunse cu 10, respectiv 6 neuroni și un strat de ieșire cu 6 neuroni (Figura 6.1).

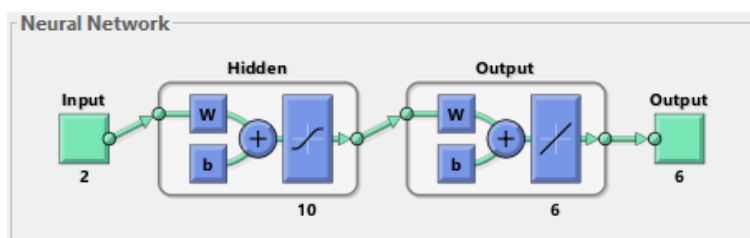


Figura 6.1 Structura RNA care leagă compoziția elementară de puterea calorică și cenușa reziduală ale unui material

Au fost create două rețele: o rețea antrenată cu algoritmul Levenberg-Marquardt (implementat cu funcția Matlab `trainlm`) și una antrenată folosind regularizarea bayesiană (implementată cu funcția Matlab `trainbr`).

În ambele cazuri menționate anterior, algoritmul de antrenare al rețelei presupune parcurgerea următoarelor etape:

Inițializarea ponderilor cu valori aleatoare

Repetă epoca de antrenament:

Pentru fiecare set de date de intrare:

Realizează etapa forward, aplicând funcția de transfer neuronilor de pe stratul de intrare

Realizează etapa backward

Ajustează ponderile

Recalculează funcția de eroare

Până când se îndeplinește condiția de oprire

Algoritmul Levenberg-Marquardt folosește atât setul de antrenare, cât și cele de validare și testare pentru construcția rețelei. Precizia rețelei pentru etapa de antrenare este de 0,99667,

pentru etapa de validare este de 0,9968, iar pentru testare este de 0,99042. În total, rețeaua construită are o precizie de 0,99581.

Algoritmul de regularizare bayesiană folosește doar setul de antrenare și cel de testare. Validarea propriu-zisă este inclusă în algoritm. Precizia rețelei pentru etapa de antrenare este de 0,99875, iar pentru etapa de testare este de 0,99235. În ansamblu, precizia rețelei este de 0,99784.

6.2 Utilizarea arhitecturilor de rețele proiectate pentru previzionarea proprietăților fizice ale diferitelor mixturi

Cele două rețele neuronale create în paragraful anterior au fost folosite pentru a determina compoziția elementară a componentelor. Apoi, pe baza valorilor returnate de cele două rețele neuronale, a fost reconstituită puterea calorifică și a fost comparată cu cea determinată experimental. Puterea calorifică a fost calculată în două moduri:

- folosind formula lui Mendeleev
- folosind ecuația de regresie pe care am determinat-o în capitolul 5, paragraful 5.1, cu ajutorul Statgraphics și pentru care precizia este de 99,6018%:

Câtă vreme precizia rețelei construite cu algoritmul Levenberg-Marquardt este una bună, de 99,581%, datele returnate de rețea nu au corespondent în practică. Astfel, la un număr de 9 rețete din cele 15 pentru care am testat algoritmul, valoarea Cl are valori negative – ceea ce este fizic imposibil.

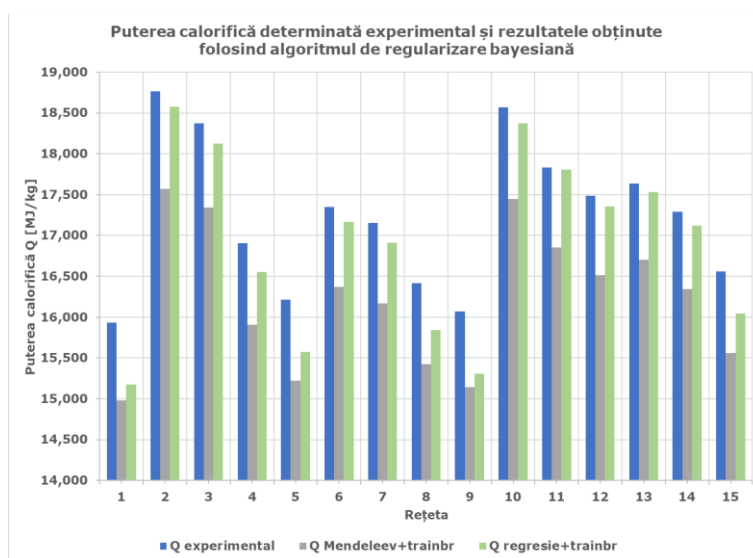


Figura 6.2 Comparație între rezultatele experimentale și cele calculate cu algoritmul de regularizare bayesiană

Rețeaua construită folosind regularizarea bayesiană nu pune probleme practice, cel puțin nu pentru setul de date experimentale folosit pentru testare. În plus precizia acestei rețele (de 99,784%) este mai mare decât precizia rețelei antrenate cu algoritmul Levenberg-Marquardt. Așadar, folosirea rețelei antrenate cu algoritmul de regularizare bayesiană este de preferat.

Pentru datele furnizate de ambii algoritmi s-au aplicat formulele de determinare a unei puteri calorifice estimative. Prin aplicarea formulei lui Mendeleev asupra ieșirilor rețelelor neuronale, atât în cazul funcției trainlm cât și în cazul funcției trainbr, valorile pentru puterea calorifică sunt mai mici decât valorile experimentale. Mai mult, în general valorile corespunzătoare rețelei antrenate cu trainbr sunt, în general, mai mici decât cele corespunzătoare rețelei antrenate cu trainlm.

Așadar, folosind combinația dintre rețeaua antrenată cu trainbr și regresia determinată pe baza ieșirilor rețelei, rezultatele sunt mai apropiate de rezultatele experimentale – așadar eroarea este mai mică.

7 CONCLUZII GENERALE. CONTRIBUȚII PERSONALE. PERSPECTIVE ALE CERCETĂRII

7.1 Concluzii generale

Pornind de la nevoia de inovare în producția de peleți și brichete pentru încălzire, exprimată de o firmă care activează în domeniu, cercetarea de față a oferit o serie de răspunsuri legate de inovarea liniei de producție, de posibilitatea de diversificare a producției și de determinare de rețete optime date fiind materiile prime disponibile pentru a fi prelucrate.

Contribuțiile aduse la cunoaștere de către teză vor fi prezentate în cele ce urmează.

7.2 Contribuții personale

Contribuțiile personale sunt de natură teoretică, experimentală sau aplicabilă industrial, bazate pe studii documentare, modelare teoretică și cercetări experimentale realizate pe durata stagiului de pregătire doctorală. Acestea vor fi rezumate în continuare, împreună cu importanța lor și domeniile de aplicabilitate.

Contribuții teoretice

- **construirea unei baze de date cu biomasa care poate fi prelucrată în zonă.** Acest rezultat contribuie la realizarea obiectivului primar OP1 și la realizarea obiectivelor secundare OS3 și OS4.
- **construirea unei rețele neuronale care să previzioneze compoziția elementară a unui material pornind de la puterea calorifică și cantitatea de cenușă reziduală ale acestui material.** Acest rezultat contribuie la realizarea obiectivului primar OP1 și la obiectivele secundare OS3 și OS4.
- **determinarea unui model pentru puterea calorifică și cenușa reziduală a peletilor pe baza compoziției rețetei din care au fost produși.** Acest rezultat contribuie la realizarea obiectivelor primare OP1 și OP2, dar și a obiectivelor secundare OS3 și OS4.
- **scrierea problemei de optimizare liniară asociată producției de peleți pentru încălzire în cazul amestecurilor de două sau mai multe componente.** Acest rezultat contribuie la realizarea obiectivelor primare OP1 și OP2 și a obiectivelor secundare OS2, OS3, OS4.
- **determinarea unor proprietăți matematice ale problemei de optimizare liniară în cazul amestecurilor de două componente și în cazul amestecurilor de mai multe componente.** Acest rezultat contribuie la realizarea obiectivelor primare OP1 și OP2 și a obiectivelor secundare OS2, OS3, OS4.

Contribuții experimentale

- **verificarea în fabrică a fezabilității diverselor tipuri de peleți ale căror rețete au fost obținute teoretic.** Acest rezultat contribuie la realizarea obiectivului primar OP1 și a obiectivului secundar OS1.
- **verificarea proprietăților unor amestecuri empirice de peleți.** Acest rezultat contribuie la realizarea obiectivului primar OP1 și a obiectivelor secundare OS1, OS3.
- **verificarea influenței aditivului asupra calității peletilor.** Acest rezultat contribuie la realizarea obiectivului primar OP1 și a obiectivelor secundare OS1, OS3.

Contribuții aplicabile industrial

- **premisele de optimizare a liniei tehnologice prin atragerea de fonduri europene.** Acest rezultat contribuie la realizarea obiectivelor primare OP1 și OP2 și a obiectivelor secundare OS2, OS3.
- **posibilitatea de optimizare a rețetelor de peleți pentru încălzire folosind soluțiile software dezvoltate.** Acest rezultat contribuie la realizarea obiectivelor primare OP1 și OP2 și a obiectivelor secundare OS3, OS4.
- **premisele producerii de furaje pentru animale.** Acest rezultat contribuie la realizarea obiectivului primar OP2 și a obiectivului secundar OS3.
- **premisele producerii de îngrășăminte agricole.** Acest rezultat contribuie la realizarea obiectivului primar OP2 și a obiectivului secundar OS3.
- **premisele îmbunătățirii calității peleților de salcie și a dezvoltării durabile a firmei** prin valorificarea scoarței de salcie în scopuri fitoterapeutice. Acest rezultat contribuie la realizarea obiectivului primar OP2 și a obiectivului secundar OS3.

7.3 Perspective de dezvoltare ulterioară

În urma experienței acumulate de-a lungul stagiului de cercetare doctoral, au fost identificate următoarele direcții de dezvoltare ulterioară:

- îmbunătățirea în continuare a liniei de producție prin adăugarea de noi utilaje și tehnici de automatizare
- posibilitatea de a produce nutrețuri care să răspundă cerințelor nutriționale a anumitor categorii de animale sau producerea unui nutreț "universal" care să corespundă cerințelor nutriționale ale cât mai multor categorii de animale
- posibilitatea de a folosi nămoluri din stațiile de epurare pentru producerea de îngrășăminte, concomitent cu dezvoltarea unei baze de date cu acestea care să permită consilierea agricultorilor în privința folosirii în condiții sigure și legale a acestora
- separarea scoarței de salcie în scopul îmbunătățirii calității peleților pentru încălzire, concomitent cu determinarea de rețete optimizate de mixturi pentru peleți și valorificarea scoarței în scopuri fitoterapeutice
- oferirea de soluții optime, personalizate, plecând de la bazele de date și modelele construite în domeniile menționate anterior
- transformarea soluției software dezvoltată în teză într-una mai prietenoasă cu utilizatorul și folosirea ei pe scară mai largă în producția de peleți și brichete pentru încălzire

Prezenta lucrare conține atât rezultate teoretice, cât și experimentale și aplicabile industrial care pot să constituie un transfer de tehnologie de la mediul de cercetare academică și industrială la mediul de afaceri. Acestea au stat la baza a 9 lucrări științifice, din care 7 sunt indexate în Web of Science și 2 sunt indexate în alte baze de date internaționale. Se constituie premisa creșterii competitivității atât pentru firmele din diverse domenii care realizează peleți.

Nivelul actual de maturitate tehnologică al soluției software propuse în teză este TRL 6 - fiind în prezent testată la scară reală în cadrul unei firme producătoare de peleți de la Cenei. Urmează ca în viitor rezultatele cercetării să fie implementate în medii funcționale pe scară mai largă, atingând astfel toate etapele de dezvoltare ale unui proiect de transfer tehnologic.

BIBLIOGRAFIE

- [1] Big, R. (2004). *Cercetări Operaționale pentru Facultăți Tehnice - note de curs*. Baia Mare: Editura Fundației CDIMM Baia Mare.

- [2] Breaz, N., Căbulea, L., Pitea, A., Zbăganu, G., Tudorache, R., & Rasa, I. (2013). *Probabilități și statistică*. Editura StudIS.
- [3] Căproiu, M., Chelemen, I., Ciubotaru, C., Ghinea, T., & Iancu, A. (1982). *Mașini și instalații zootehnice*. București: Editura Didactică și Pedagogică.
- [4] CEN (European Committee for Standardization). (Mai 2014). *EN 17225-1. Solid biofuels – Fuel Specification and classes, Part 1 – General requirements*.
- [5] CEN (European Committee for Standardization). (Mai 2014). *EN 17225-2. Solid biofuels – Fuel Specification and classes, Part 2 – Graded wood pellets*.
- [6] CEN (European Committee for Standardization). (Mai 2014). *EN 17225-6. Solid biofuels – Fuel Specification and classes, Part 6 – Graded non-woody pellets*.
- [7] Chapman, S. J. (2015). *MATLAB programming for engineers*. Nelson Education.
- [8] Chen, D., Batson, R., & Dang, Y. (2011, 09 20). *Applied integer programming: modeling and solution*. John Wiley & Sons.
- [9] Cicală, E.-F. (1999). *Metode de prelucrare statistică a datelor experimentale*. Timișoara: Editura Politehnica.
- [10] Davis, S. C., Hay, W., & Pierce, J. (2014). *Biomass in the energy industry: an introduction*. London, United Kingdom: BP plc.
- [11] García, R., Pizarro, C., Lavín, A., & Bueno, J. (2014). Spanish biofuels heating value estimation. Part I: Ultimate analysis data. *Fuel*, 117, 1130-1138.
- [12] García, R., Pizarro, C., Lavín, A., & Bueno, J. (2014). Spanish biofuels heating value estimation. Part II: Proximate analysis data. *Fuel*, 117, 1139-1147.
- [13] Hahn, B., & Valentine, D. (2016). *Essential MATLAB for engineers and scientists*. . Academic Press.
- [14] Hartmann, H. (Ed.). (2013). *Handbuch Bioenergie-Kleinanlagen 2013 (3rd edition)*. Gülzow (DE): Sonderpublikation des Bundesministeriums für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz und der Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe.
- [15] Ionica, D., Maris, S., Dicu, R., & Maris, S. (2019). Linear Programming Tool for the Optimization of Mixed Biomass Fuel Recipes. *BRAIN – Broad Research in Artificial Intelligence and Neuroscience*, 10(3), 139-149.
- [16] Jădăneanț, M., Ionel, I., Stoian, F., Pop, G., Lelea, D., Stoica, V., & Negoîtescu, A. (2001). *Termotehnică și mașini termice în experimente*. Timișoara: Editura Politehnica.
- [17] MathWorks. (2017). Preluat de pe Matlab Programming: https://in.mathworks.com/help/pdf_doc/matlab/matlab_prog.pdf
- [18] Obernberger, I., & Thek, G. (2010). *The Pellet Handbook The Production and Thermal Utilisation of Pellets*. Earthscan.
- [19] Parikh, J., Channiwala, S., & Ghosal, G. (2007). A correlation for calculating elemental composition from proximate analysis of biomass materials. *Fuel*, 86, 1710-1719.
- [20] Petrișor, A. (2012). *Abordare și metode de cercetare. Note de curs*. București, România: Editura Universitară „Ion Mincu”.
- [21] Russell, S., & Norvig, P. (2002). *Artificial Intelligence: A Modern Approach. 2nd Edition*. Fort Collins, CO: Prentice Hall Series in Artificial Intelligence.
- [22] Salvendy, G. (Ed.). (2001). *Handbook of Industrial Engineering: Technology and Operations Management*. John Wiley & Sons.
- [23] Statgraphics. (2016). *Statgraphics Centurion Overview*. Preluat pe 10 09, 2016, de pe http://www.statlets.com/statgraphics_centurion.htm
- [24] Ungureanu, C., Pănoiu, N., Zubcu, V., & Ionel, I. (1998). *Combustibili. Instalații de ardere. Cazane*. Timisoara: Editura Politehnica.
- [25] Zaharia, M., & Despa, R. (2008). *Cercetări operaționale*. Editura Universitară.