

UNIVERSITATEA POLITEHNICA DIN BUCUREȘTI
Facultatea de Ingineria Sistemelor Biotehnice
Departamentul de Sisteme Biotehnice



Ing. Dipl. Mihai CHIȚOIU

Rezumatul tezei de doctorat

Summary of PhD Thesis

**CERCETĂRI PRIVIND OPTIMIZAREA PROCESULUI DE
MĂRUNȚIRE A BIOMASEI CU AJUTORUL MORILOR CU
CIOCANE**

***RESEARCHES REGARDING BIOMASS GRINDING PROCESS
OPTIMIZATION USING HAMMER MILLS***

Conducător științific:

Prof. Dr. Ing. Gheorghe VOICU

București (2018)

CUPRINS

Cuvânt înainte	8	6
Listă de notații și simboluri	10	7
Capitolul 1 Introducere. Importanța și obiectivele tezei	13	8
Capitolul 2 Considerații generale privind mărunțirea biomasei din plante energetice	16	8
2.1. Sinteza proprietăților fizico-mecanice ale biomasei din plante energetice	16	8
2.2. Cerințe privind materialul mărunțit în vederea utilizat la peletizare/brichetare	19	8
2.3. Bazele teoretice ale operației de mărunțire și indici de apreciere	20	9
2.3.1. Bazele teoretice ale operației de mărunțire	20	9
2.3.2. Indici de apreciere ai operației de mărunțire	26	9
2.4. Concluzii privind mărunțirea biomasei din plante energetice	30	9
Capitolul 3. Stadiul actual al cercetărilor teoretice și experimentale privind procesul de lucru și construcția morilor cu ciocane utilizate pentru mărunțirea biomasei	32	10
3.1. Sinteza soluțiilor constructive de mori cu ciocane pentru mărunțirea biomasei vegetale	32	10
3.1.1. Soluții constructive de mori cu ciocane	33	10
3.1.2. Tipuri de rotoare cu ciocane	40	10
3.1.3. Dimensiunea rotorului cu ciocane	41	10
3.1.4. Tipuri de ciocane și dispunerea lor pe rotor	42	10
3.1.5. Contrabătătoare și site	45	10
3.2. Cercetări teoretice și experimentale efectuate pe plan mondial privind procesul de lucru al morilor cu ciocane	47	11
3.3. Concluzii privind stadiul cercetărilor teoretice și experimentale	56	13
Capitolul 4. Aspecte și contribuții teoretice privind procesul de lucru al morilor cu ciocane	58	14
4.1. Aspecte privind echilibrarea la șoc a ciocanelor și echilibrarea dinamică a rotorului	58	14
4.2. Modelarea matematică a procesului de lucru al morilor cu ciocane, prin analiză dimensională utilizând teorema II	78	17
4.3. Simularea solicitărilor în organele de lucru ale morilor cu ciocane	87	19
4.4. Concluzii privind procesul de lucru al morilor cu ciocane	93	20
Capitolul 5. Cercetări experimentale privind procesul de lucru al echipamentelor de mărunțit folosind două tipuri de biomasă	95	21
5.1. Obiectivele cercetărilor experimentale și aparatura utilizată	95	21
5.2. Descrierea aparaturii utilizate în cadrul experimentelor	96	21
5.3. Metodica determinărilor experimentale	101	22
5.3.1. Materialul utilizat în experimente și metodica de lucru	102	22
5.3.2. Indici de apreciere ai procesului de mărunțire urmăriți în experimente	103	22

5.4. Rezultatele experimentale	104	23
5.5. Verificarea unor teorii consacrate privind mărunțirea pe bază de rezultate experimentale	107	25
5.5.1. Verificarea teoriilor consacrate ale energiei consumate în funcție de condițiile de experimentare	107	25
5.5.2. Determinarea distribuției materialului mărunțit pe clase de dimensiuni și corelație cu legea Rosin - Rammler	113	27
5.6. Cercetări privind influența parametrilor constructivi ai morii asupra consumului de energie la mărunțire	115	28
5.6.1. Influența diametrului orificiilor sitei asupra consumului specific de energie	115	28
5.6.2. Influența tipului de ciocan asupra energiei consumate la mărunțire	119	29
5.7. Cercetări privind influența parametrilor constructivi ai morii asupra calității materialului mărunțit	122	29
5.7.1. Influența diametrului orificiilor sitei asupra dimensiunilor medii a particulelor mărunțite	122	30
5.7.2. Influența tipului de ciocan asupra dimensiunilor medii a particulelor mărunțite	127	30
5.8. Cercetări privind influența proprietăților fizice ale biomasei asupra consumului specific de energie și a calității materialului mărunțit	131	31
5.8.1. Influența umidității materialului asupra consumului de energie la mărunțire	131	31
5.8.2. Influența umidității materialului asupra dimensiunilor medii ale particulelor mărunțite	134	31
5.9. Cercetări privind influența parametrilor funcționali ai morii asupra indicilor de mărunțire	138	32
5.9.1. Influența turației rotorului morii cu ciocane asupra energiei consumate la mărunțire	138	32
5.9.2. Influența turației rotorului morii cu ciocane asupra dimensiunilor medii ale particulelor mărunțite	143	33
5.10. Concluzii privind cercetările experimentale	148	34
Capitolul 6. Contribuții privind optimizarea procesului de mărunțire a biomasei folosind mori cu ciocane	150	34
6.1. Noțiuni generale privind optimizarea unui proces	150	34
6.2. Descrierea procesului de lucru al morilor cu ciocane, ca sistem	152	35
6.3. Modelarea statistică a procesului de mărunțire cu mori cu ciocane	154	35
6.4. Considerații privind optimizarea procesului de lucru al morilor cu ciocane	159	38
6.4.1. Funcția obiectivă care descrie calitatea procesului de lucru al morilor cu ciocane destinate mărunțirii materialului vegetal	160	38

6.4.2. Studiul calității materialului mărunțit cu ajutorul distribuțiilor statistice	163	40
6.5. Studiul optimizării procesului de mărunțire privind consumul de energie	165	41
6.5.1. Estimarea funcțiilor obiectiv energetice pentru biomasă de miscanthus	165	41
6.5.2. Estimarea funcțiilor obiectiv energetice pentru biomasă de salcie	173	43
6.6. Analiza de regresie pentru funcția energetică a mărunțirii biomasei	175	44
Capitolul 7. Concluzii generale; Contribuții; Recomandări; Perspective	181	45
7.1. Concluzii generale privind cercetările teoretice și experimentale	181	45
7.2. Contribuții personale	182	46
7.3. Recomandări și perspective	186	47
BIBLIOGRAFIE	187	47

Cuvânt înainte

Lucrarea este structurată pe 7 capitole, dezvoltate pe 174 de pagini, fiind ilustrată cu 149 de figuri, 44 de tabele, 211 relații matematice, precum și o bibliografie alcătuită din 107 surse bibliografice. În plus lucrarea conține o serie de anexe (circa 38 pagini).

Teza de doctorat "Cercetări privind optimizarea procesului de mărunțire a biomasei cu ajutorul morilor cu ciocane" prezintă o sinteză a cercetărilor experimentale efectuate de autor cu privire la procesul de mărunțire al plantelor energetice și implicațiile diferiților parametrii constructivi și funcționali asupra regimului de lucru.

Obiectivul principal al cercetărilor experimentale din cadrul acestei lucrări îl constituie analiza procesului de mărunțire a biomasei din plante energetice folosind mori cu ciocane., proces care face parte din procesul tehnologic de obținere a biocombustibililor solizi.

În capitolul 1, al lucrării se prezintă elemente generale referitoare la importanța utilizării biomasei pentru obținerea de biocombustibil solid, precum și necesitatea parcurgerii proceselor de prelucrare în vederea unei mai fiabile manevrări a acesteia.

Capitolul 2, prezintă considerații generale privind mărunțirea biomasei din plante energetice, prin prezentarea aspectelor referitoare la proprietățile fizico-mecanice ale biomasei din plante energetice.

În capitolul 3, intitulat „**Stadiul actul al cercetărilor teoretice și experimentale privind procesul de lucru și construcția morilor cu ciocane utilizate pentru mărunțirea biomasei**” sunt prezentate soluții constructive de mori cu ciocane pentru mărunțirea biomasei vegetale, tipuri de rotoare cu ciocane, dimensiunile rotorului cu ciocane, tipuri de ciocane și dispunerea acestora pe rotor precum și o sinteză a cercetărilor teoretice și experimentale efectuate pe plan mondial privind procesul de lucru al morilor cu ciocane.

Capitolul 4, intitulat „**Aspecte și contribuții teoretice privind procesul de lucru al morilor cu ciocane**”, descrie pentru început aspecte teoretice privind echilibrarea la șoc a ciocanelor și echilibrarea dinamică a rotorului. Tot în cadrul capitolului 4 s-a realizat modelarea matematică a procesului de lucru al morilor cu ciocane, prin analiză dimensională utilizând teorema II și simularea solicitărilor în organele de lucru ale morilor cu ciocane folosind programul SolidWorks 2016 Premium.

În capitolul 5 intitulat „**Cercetări experimentale privind procesul de lucru al echipamentelor de mărunțit folosind două tipuri de biomasă,**” se prezintă pentru început aparatura și metodică de lucru privind determinările experimentale. De asemenea se face referire la indicii de apreciere ai procesului de mărunțire rezultați prin efectuarea cercetărilor.

Capitolul 6 intitulat „**Cercetări privind optimizarea procesului de mărunțire a biomasei folosind mori cu ciocane,**” evidențiază aspecte privind corelații între parametrii care descriu procesul de mărunțire, un studiu de optimizare pentru ciocanul cu o treaptă, o analiză de regresie pentru funcția energetică, funcții obiectiv care descriu calitatea procesului de lucru al morilor cu ciocane dar și modelarea statistică a calității prin distribuția Rosin-Rammler.

Capitolul 7 al lucrării este destinat **Concluziilor generale** ale lucrării și contribuțiilor personale cu privire la optimizarea procesului de mărunțire a biomasei cu ajutorul morilor cu ciocane. De asemenea, sunt evidențiate și perspective referitoare la această temă, care pot fi abordate în continuare de alți cercetători.

Autorul consideră ca prezenta teză constituie o contribuție relativ modestă privind optimizarea procesului de mărunțire a biomasei cu ajutorul morilor cu ciocane.

Listă de simboluri și notații

Capitolul 2 – Considerații generale privind mărunțirea biomasei din plante energetice

m	masa probei de material, (kg);
Z	gradul de maruntire (mm);
D	dimensiunea echivalentă medie a materialului alimentat, (mm);

Capitolul 3 – Stadiul actual al cercetărilor teoretice și experimentale privind procesul de lucru și construcția morilor cu ciocane utilizate pentru mărunțirea biomasei

D_m	diametrul rotorului cu ciocane (m).
L_m	lungimea rotorului cu ciocane (m).
Q	debit de material alimentat (kg/s);

Capitolul 4 – Aspecte și contribuții teoretice privind procesul de lucru al morilor cu ciocane

a	lungimea ciocanului (m);
b	lățimea ciocanului (m);
c	distanța de la axa de articulație a ciocanului la centrul de masă al acestuia (m);
f	distanța de la centrul găurilor de prindere la marginea ciocanului (m);
l	cota care indică centrul găurii de prindere la vârful ciocanului;

Capitolul 5 – Cercetări experimentale privind procesul de lucru al echipamentelor de mărunțit folosind două tipuri de biomasă

R(x)	refuzul pe sita cu diametrul orificiilor x,(%);
x	dimensiunea medie a particulelor (d) a clasei, (μm sau mm);
b, n	coeficienți constanți sau parametri de distribuție determinați experimental prin analiză de regresie.

Capitolul 6 – Cercetări privind optimizarea procesului de mărunțire a biomasei folosind mori cu ciocane

d_s	diametrul sitei (m);
v	turația (frecvența de rotație) rotorului (s^{-1});
t	timpul de prelucrare a șarjei (s).

Capitolul 1- Introducere. Importanța și obiectivele tezei de doctorat

Cercetările experimentale efectuate de oamenii de știință au dus la concluzia că resursele provenite din biomasă pot fi transformate în orice formă de energie. Biomasa supusă diferitelor procese de prelucrare din cadrul fluxului tehnologic duce la produse finite diferite destinate consumatorilor. Aceste costuri sunt puternic influențate de costurile cumulate ale proceselor din fluxul tehnologic, așa că cercetătorii urmăresc optimizarea fiecărei etape, cu obiectivul de a reduce consumul energetic, de a prelunge durata de viață a echipamentelor folosite, și de a spori calitatea produselor finale.

Obiectivul principal al lucrării face referire la optimizarea procesului de mărunțire a biomasei cu ajutorul morilor cu ciocane. Între obiectivele specifice ale acestei teze se numără:

- identificarea factorilor care influențează procesul de mărunțire a plantelor energetice (biomasei);
- studiul construcției echipamentelor de mărunțit biomasă cu precădere a morilor cu ciocane;
- studiul teoretic al procesului de lucru efectuat de organele de lucru ale morilor cu ciocane;
- modelarea matematică a procesului de lucru al morilor cu ciocane;
- simularea solicitărilor în organele de lucru ale morilor cu ciocane;
- determinarea influenței tipului de ciocan asupra gradului de mărunțire a plantelor energetice;
- determinarea influenței turației rotorului cu ciocane asupra gradului de mărunțire a plantelor energetice (miscanthus și salcie);
- determinarea influenței dimensiunii sitei asupra gradului de mărunțire a plantelor energetice;
- stabilirea unor corelații între parametrii procesului de mărunțire al morilor cu ciocane, în vederea îmbunătățirii acestuia.

Capitolul 2. - Considerații generale privind mărunțirea biomasei din plante energetice

2.1 Sinteza proprietăților fizico-mecanice ale biomasei din plante energetice

Deși dezvoltarea constantă a industriei moderne privind utilizarea plantelor energetice este remarcabilă, caracteristicile fizico – mecanice și chimice de bază ale materialelor sunt puțin cunoscute. În lucrare sunt prezentate proprietăți ale biomasei precum: densitatea particulelor, masa volumică, porozitatea, compactitatea, umiditatea, rezistența mecanică, modulul de elasticitate, energia specifică pentru mărunțire, puterea calorică a plantelor, compoziția chimică a biomasei.

2.2. Cerințe privind materialul mărunțit utilizat la peletizare/brichetare

Cea mai importantă variabilă a procesului de compactare a materialelor este compoziția materiei prime (biomasa). Procesul de granulare (compactare) este în mare parte influențat și de proprietățile fizico- mecanice ale biomasei și de lianții folosiți. Gradul de mărunțire obținut în urma procesului de mărunțire contribuie la determinarea calității procesului tehnologic și a produsului comercializat pe piață.

2.3. Bazele teoretice ale operației de mărunțire și indici de apreciere

Operația optimă de mărunțire reprezintă transformarea unui material cu un consum minim de energie într-un produs cu anumite condiții de granulometrie solicitate de următoarea operațiune de pe fluxul tehnologic de obținere a unui produs finit. În vederea caracterizării unui proces de mărunțire este necesar a se cunoaște trei indici principali și anume: gradul de mărunțire, Z ; modulul măcinășului, M ; consumul specific de energie, L_s . Energia necesară procesului de măcinare depinde de natura biomasei, starea sa inițială (distribuția după dimensiune), structura și starea sa internă, mărimea, viteza și durata efortului aplicat. În limitele deformațiilor elastice se presupune că întreaga energie se consumă pentru deformarea particulei de biomasă și, deci, lucrul mecanic specific este proporțional cu volumul deformat (raportul dintre volumul inițial și cel final), [14].

Majoritatea relațiilor experimentale pot fi deduse pornind de la următoarea ecuație generală:

- **ecuația generală a energiei:**

$$dE = -C \frac{dD}{D^n} \quad (2.27)$$

Pentru integrarea acestei ecuații între limitele d și D și dând valori diferite lui n obținem legea lui Kick, Rittinger, Bond, Gross-Zimmerley de obținere a energiei consumate la mărunțirea plantelor energetice.

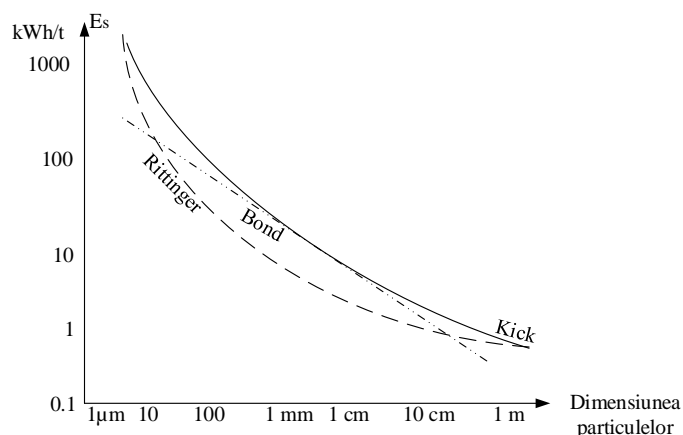


Fig. 2.3. Variația lucrului specific de mărunțire în funcție de mărimea particulelor [68]

2.4. Concluzii privind mărunțirea biomasei din plante energetice

Operația de mărunțire contribuie atât la manipularea mai ușoară a biomasei cât și la realizarea unui produs finit compact destinat consumatorilor finali. Pentru ca măcinarea culturilor să se realizeze cu un consum optim de energie în literatura de specialitate se întâlnesc studii și cercetări care urmăresc îmbunătățirea echipamentelor de mărunțit, atât din punct de vedere al designului, cât și din punct de vedere al îndeplinirii cerințelor proceselor de prelucrare al materialului mărunțit după această etapă.

Capitolul 3. - Stadiul actual al cercetărilor teoretice și experimentale privind procesul de lucru și construcția morilor cu ciocane utilizate pentru mărunțirea biomasei

În acest capitol sunt prezentate o serie de echipamente mecanice folosite în cadrul procesului de mărunțire a biomasei din plante energetice. Între acestea se numără: moara cu ciocane cu camera închisă MCE-1, moara cu camera deschisă MC-3, moara cu ciocane Champion 11, moara cu ciocane Moinho de Martelo, moara cu ciocane Peruzzo, Optimill, Agrobi Richet, Mill 800, WCR. De asemenea în cadrul acestui capitol sunt prezentate și principalele elemente componente ale unei mori cu ciocane: rotorul cu ciocane, ciocanele, sitele. În continuare sunt prezentate și aspecte privind cercetările teoretice și experimentale efectuate pe plan mondial.

3.1. Sinteza soluțiilor constructive de mori cu ciocane pentru mărunțirea biomasei vegetale

Avantajele morilor cu ciocane constau în posibilitatea de utilizare în vederea realizării unei mărunțiri grosiere, mijlocii și fine, obținerea unui grad de mărunțire mare, cu un consum de energie liniar, dacă se ia în considerare debitul morii cu ciocane. Un exemplu de moară cu ciocane este moara cu ciocane cu camera deschisă MC-3 prezentată în fig 3.2, în paralel fiind prezentate organele de lucru ale unei mori.

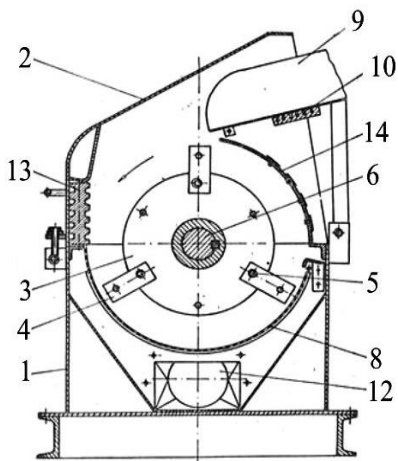


Fig. 3.2. Schema constructivă a morii cu ciocane cu cameră deschisă MC-3 [14, 55]



Fig. 3.19. Organele de lucru ale morilor cu ciocane [103]

Lățimea camerei de măcinare este de 310 mm iar diametrul rotorului cu ciocane de 520 mm, la un unghi de înfășurare al sitei de 180° . Rotorul morii este prevăzut cu 10 discuri (3), 54 de ciocane (4) montate pe trei axe (5) decalate la 120° . Ciocanele sunt montate câte 18 pe fiecare ax, câte două ciocane în fiecare interval dintre două discuri. Distanța dintre ciocane este determinată de câte trei șaibe a căror grosime este de 3, 6 și 9 mm care asigură o dispunere combinată a ciocanelor pe rotor. Sub rotor se află montată o sită interschimbabilă (8) care asigură dimensiunea dorită a măcinșului. Dispozitivul de alimentare este format din jgheabul (9) și cutia cu magneți permanenți (10) care a rolul de a reține impuritățile feroase. Alimentarea cu material se face tangențial prin curgerea liberă pe toată lungimea camerei de măcinare prin înclinarea jgheabului

(9). La intrarea în camera de măcinare particulele de material sunt supuse loviturilor ciocanelor. Datorită acestor lovituri, particulele inițiale se fărâmițează, iar particulele rezultate sunt proiectate pe plăcile cu rifluri (13) și (14) unde are loc a doua mărunțire. De pe aceste plăci cu rifluri, particulele rezultate ricoșează ajungând din nou în zona de acțiune a ciocanelor, după care fenomenul se repetă. Particulele ajunse la dimensiunile orificiilor sitei trec prin acestea și sunt evacuate prin conducta de transport (12).

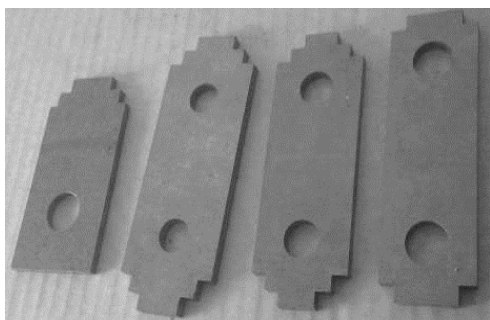


Fig. 3.15. Forme constructive de ciocane [14]

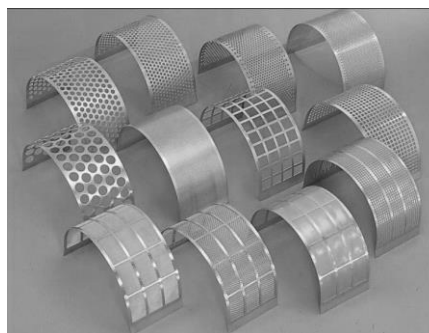


Fig. 3.21. Diferite tipuri de site utilizate la mărunțirea biomasei [104]

Ciocanele reprezintă organul de lucru principal al morilor cu ciocane. De forma constructivă a acestora depinde în mare măsură calitatea mărunțirii materialului și consumul specific de energie.

Cel de-al doilea organ de lucru folosit în cadrul procesului de mărunțire este contrabătătorul. Aceasta poate fi de formă cilindrică, semicilindrică sau sub formă de sectoare cilindrice, având suprafața activă riflată, dințată sau cu orificii. În unele cazuri contrabatatorul lipsește, rolul lui fiind preluat de sită. Rolul sitelor este de a separa materialul mărunțit din camera de măcinare. Capacitatea de separare a acestora depinde de dimensiunea și desimea acestora pe 1 cm^2 , de tipul orificiilor și de suprafața ocupată de sită pe conturul camerei de măcinare.

Totodată un element important component al morilor cu ciocane care trebuie amintit este format din rotorul cu ciocane. Pentru determinarea dimensiunilor principale ale rotorului cu ciocane este necesar să se cunoască capacitatea de măcinare, granulația măcinisului, proprietățile fizico-mecanice ale materialului.

3.2. Cercetări teoretice și experimentale efectuate pe plan mondial privind procesul de lucru al morilor cu ciocane

În analiza sintetică a acestor cercetări s-a urmărit studiul procesului de lucru al morilor cu ciocane și influența materialului utilizat la cercetări experimentale asupra parametrilor de funcționare. În cadrul unei mori cu ciocane măcinarea are loc prin intermediul impactului cu materialul de măcinat și fragmentarea lui. Cercetări asupra morilor cu ciocane s-au efectuat în special asupra vitezei de mărunțire, debitului de lucru, dimensiunea orificiilor sitelor, evacuarea masei de material tocat. Morile cu ciocane sunt utilizate pentru mărunțirea materialelor medii sau fine datorită faptului că în procesul de mărunțire se consumă energie mai puțină.

Un consum ridicat de energie consumată la efectuarea procesului de mărunțire s-a evidențiat pentru iarba energetică indiferent de dimensiunea orificiilor sitei sau de conținutul de umiditate al materialului. S-a înregistrat un consum de energie de 51.6, 37.0, respectiv 11.4 kWh/t pentru site cu dimensiunea orificiilor de 0.8, 1.6 și 3.2 mm iar umiditatea biomasei de tipul paielor de grâu cuprinsă între 4 și 7%. Analizând tulpinile de porumb s-a constatat ca energia consumată a fost de 11 kWh/t pentru sita de 3,2 mm și 12% umiditate a probelor de material [55]. Cercetătorii au concluzionat faptul că energia consumată în timpul procesului de mărunțire este mai mare pentru dimensiuni ale orificiilor sitei mai mici, [55].

Mani et al., [36] au studiat efectele dimensiunii particulelor și a proprietăților peleților din biomasă de paie de grâu, paie de orz, coceni de porumb și miscanthus într-o moară cu ciocane, unde s-au instalat site cu orificii de 3.2, 1.6 și 0.8 mm. În urma analizei datelor achiziționate s-a observat că peleții din coceni de porumb care au fost mărunțiți folosind sita de 1.6 mm erau de la 5 la 16% mai denși decât peleții obținuți din biomasă mărunțită folosind sita de 3.2 mm.

Murphy et al. [49] au observat prin teste experimentale că reducerea dimensiunii sitelor de la 3 mm la 2 mm a dus la o scădere a dimensiunii particulelor tocate pentru grâu, sorg și orz.

S-a analizat consumul energetic pentru procesul de mărunțire a semințelor de palmier și a cojilor de alune folosind o moară cu ciocane de laborator. Tipul de material și sita folosită a influențat puternic consumul de energie [37]. Relațiile între consumul energetic și sitele folosite au arătat o formă polinomială. Densitatea în vrac a cojilor de alune a scăzut odată cu creșterea diametrului mediu, în timp ce în cazul semințelor de palmier densitatea în vrac a crescut odată cu diametrul mediu.

În cadrul unui alt studiu s-au efectuat de asemenea, cercetări experimentale folosind morile cu ciocane. S-a urmărit reducerea dimensiunilor biomasei formate din miscanthus, switchgrass, salcie și trestie în scopul obținerii de peleți. Echipamentele de mărunțire au fost o moară cu cuțite tip Retsch SM2000, o moara cu ciocane Retsch SK100 și o moară cu ciocane comercială. Rezultatele experimentale au arătat o dependență între consumul de energie în timpul mărunțirii și mărimea orificiilor sitelor, exemplificată prin legile folosite la prelucrarea rezultatelor experimentale. Dimensiunea particulelor după mărunțire s-a demonstrat a fi invers proporțională cu densitatea particulelor pentru fiecare din cele patru tipuri de biomasă.

O concluzie a cercetărilor experimentale a evidențiat o funcție de tip putere pentru dependența consumului de energie la mărunțire de dimensiunile orificiilor sitelor. S-a arătat că pentru aceeași dimensiune a orificiilor sitei moara cu ciocane a fost mai eficientă decât moara cu cuțite. Shastri et al. [58] au analizat problema mărunțirii biomasei și a densificării acesteia în vederea optimizării procesului și a reducerii consumului de energie. Rezultatele obținute în urma experimentelor în procesul de mărunțire a plantei miscanthus au arătat ca atât densitatea în vrac, cât și energia specifică consumată au scăzut odată cu o dimensiune mai mare a particulelor [58].

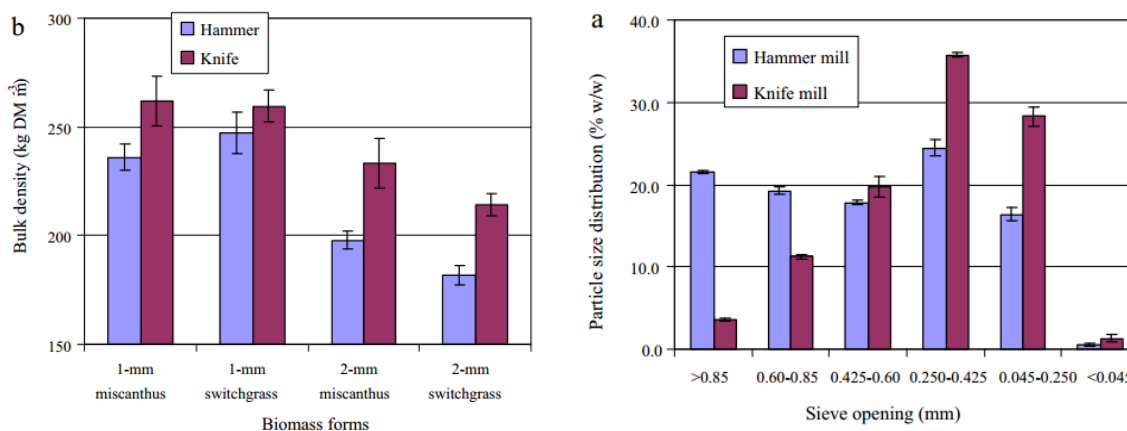


Fig. 3.34. Compararea masei volumice în funcție de dimensiunea particulelor de miscanthus și switchgrass la moara cu ciocane Retsch SK 100 și moara cu cuțite SM2000 [42]

Datele experimentale pentru mărunțirea tulpinilor de miscanthus au arătat că masa volumică a fost invers proporțională cu mărimea particulelor. S-au efectuat cercetări experimentale folosind: 4 turații diferite: 1550, 1800, 2000 și 2250 rpm; 3 niveluri de umiditate a materialului: 10, 12 și 14% și 3 grosimi de ciocan 1, 3 și 5 mm.

S-a observat că o creștere a turației rotorului a dus la o creștere a capacității morii, dar scăderea eficienței energetice. Cea mai bună valoare a capacității morii a fost de 0,871Mg/h obținută la turația de 2250 rpm, umiditatea de 10% și grosimea ciocanului de 5 mm, în timp ce eficiența energetică cea mai bună (92,9%) a fost obținută la o turație de 1550 rpm umiditatea de 14% și grosimea ciocanului de 1,5 mm [107].

Din punct de vedere economic, în cazul unei linii de producție peleți, doar presa de pelletizare consumă mai multă energie decât moara cu ciocane pentru mărunțit biomasa, în ceea ce privește consumul total de energie. Pentru o mărunțire mai fină atât energia consumată, cât și uzura pieselor active sunt mai accentuate.

3.3. Concluzii privind stadiul cercetărilor teoretice și experimentale

Din analiza soluțiilor constructive de mori cu ciocane se poate spune că morile cu ciocane nu au suferit modificări semnificative din punct de vedere al procesului de lucru dar constructiv au devenit din ce în ce mai eficiente. Un element important care ajută consumatorii în ziua de azi este legată de dimensiunea morilor cu ciocane. Datorită gabariturii, aceste mori pot fi folosite atât în gospodăria proprie, cât și pe linii industriale de prelucrare a diverselor materiale.

Totodată din studiile realizate în scopul determinării comportării plantelor în timpul procesului de măcinare/tocare s-a evidențiat faptul că proprietățile mecanice ale plantelor utilizate ca materie primă, influențează foarte mult procesul de lucru al echipamentelor.

Statistic consumul energetic al unei mori cu ciocane pe toata durata vieții acesteia este între 10 și 20 ori mai mare decât prețul inițial. Pentru morile cu ciocane, un randament bun este dat de alegerea unor site care să fie în conformitate cu puterea motorului electric cu care moara a fost

echipată. Totodată, viteza periferică a ciocanelor este foarte importantă, aceasta având o influență semnificativă asupra dimensiunii particulelor de biomasă după procesul de mărunțire.

Viteze periferice mari (5000 rpm) vor produce întotdeauna particule mai fine decât vitezele periferice mici (2000 rpm). Ca o regulă, sitele cu orificii mai mici ar trebui folosite pentru viteze periferice mari, în vreme ce sitele cu orificii mari se folosesc pentru viteze periferice mici. Ciocanele folosite la morile cu ciocane sunt foarte variate, în Europa cele mai comune sunt ciocanele plane cu două găuri fără tratament al muchiei [34].

Capitolul 4. - Aspecte și contribuții teoretice privind procesul de lucru al morilor cu ciocane

4.1. Aspecte privind echilibrarea la șoc a ciocanelor și echilibrarea dinamică a rotorului

În proiectarea și construcția morilor cu ciocane utilizate pentru mărunțirea biomasei, o problemă importantă o constituie determinarea parametrilor constructivi ai rotoarelor și ciocanelor. Parametrii constructivi ai celor două componente au o influență deosebită asupra funcționării morilor. Alegerea corectă a acestor parametri asigură o funcționare cu trepidații reduse ceea ce contribuie la o creștere a duratei de exploatare.

Pentru ca durata de exploatare să poată fi prelungită se adoptă anumite condiții de alimentare cu material și, se asigură o mișcare de rotație stabilă a ciocanelor în procesul de măcinare, pentru care ciocnirea particulelor de material cu ciocanele nu produce percuții în articulații de legătură, iar rotorul morii este echilibrat atât din punct de vedere static și dinamic.

Prin echilibrarea la șoc a ciocanelor se înțelege adoptarea unor astfel de condiții de alimentare cu material și alegerea unor parametri constructivi ai ciocanelor, astfel încât percuțiile aplicate de ciocane particulelor de material să nu se transmită articulației O_1 . Pentru analiza parametrilor de echilibru ai morilor cu ciocane s-a ales moara cu ciocane MC-22 care a fost studiată din punct de vedere al echilibrării la șoc a ciocanelor.

Condiția de echilibrare a ciocanelor se îndeplinește dacă percuția ce apare în articulația acestuia la rotor este nulă. Conform literaturii de specialitate [14, 74] componenta tangențială a acestei percuții este nulă, atunci când ciocanele lovesc materialul perpendicular. Pentru ca acest lucru să fie îndeplinit alimentarea cu material a morii se realizează, de regulă, pe direcție tangențială. Considerând că percuțiile se aplică la periferia ciocanelor, componenta normală a percuției egală cu zero doar dacă lungimea l a ciocanului satisface relația:

$$l = \frac{J_{O_1}}{M \cdot c} \quad (4.27)$$

unde: J_{O_1} este momentul de inerție mecanic al ciocanului în raport cu axa sa de articulație ($\text{kg}\cdot\text{m}^2$); M – masa ciocanului (kg); c – distanța de la axa de articulație a ciocanului la centrul de masă al acestuia (cm). S-au calculat de fiecare dată valorile lui l , c , J_{O_1} , M și f pornind de la valorile cunoscute ale lungimii ciocanului a , latimii ciocanului b , diametrul gaurii de prindere și dimensiunea muchiilor pentru fiecare colt al fiecărui ciocan. Se constată că există diferențe destul

de mari între valorile momentelor de inerție J_c și J_{O1} (față de centrul de masa al ciocanului și față de punctul de articulație la rotor) în funcție de forma geometrică a colțurilor de acțiune asupra materialului. Este obligatoriu ca toate colțurile să respecte prescripțiile de execuție pentru a nu apărea diferențe și abateri de formă care să conducă a o funcționare neuniformă. În ceea ce privește cota de echilibru la șoc a ciocanului f , se constată că valorile calculate sunt mult diferite de valoarea reală a acesteia, ceea ce înseamnă că constructorul nu a respectat cerințele teoretice. Aceasta poate induce o funcționare cu trepidații care pot conduce la ieșirea din uz a morii mult mai devreme decât se preconizează.

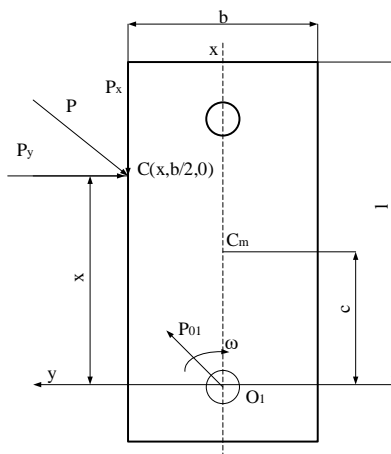


Fig 4.3. Schema de calcul pentru echilibrarea la șoc a ciocanelor

Pentru echilibrarea la șoc a ciocanelor morii MC-22 sau ales 4 ciocane cu muchii diferite, dar dimensiuni generale identice.

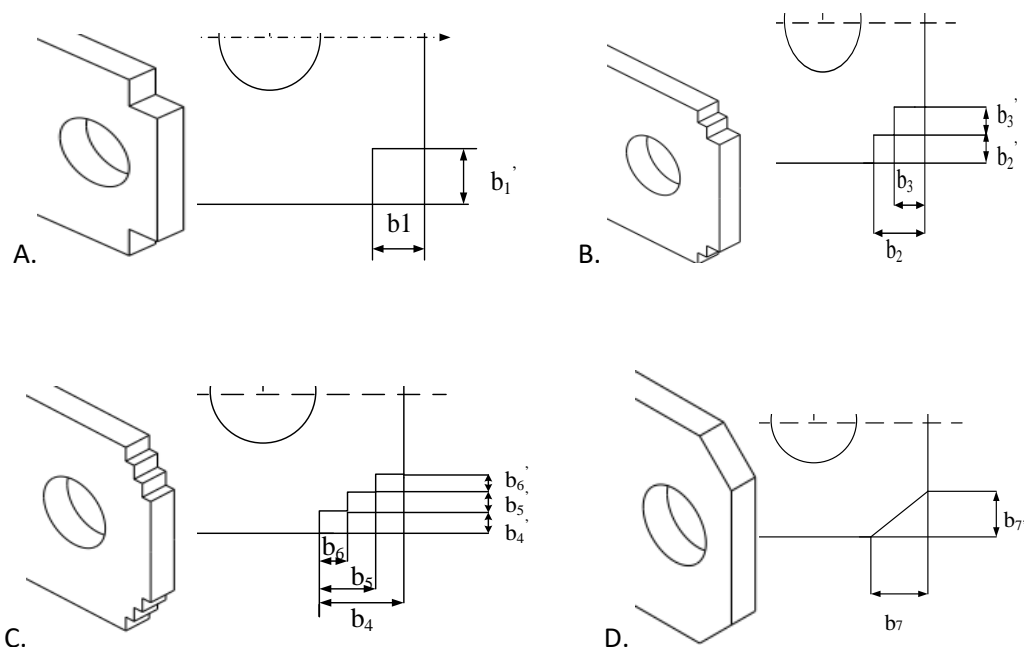


Fig. 4.6, 4.7, 4.8, 4.9 Tipuri de ciocane analizate pentru echilibrarea la șoc

Pentru a putea vorbi despre condițiile de echilibrare ale rotorului este necesar ca mai înainte să vorbim despre dispunerea ciocanelor pe rotor și modul în care acestea influențează procesul. Pentru ca rotorul să nu fie dezechilibrat este necesar ca dispunerea corectă a ciocanelor să îndeplinească cerințe precum: pe aceeași urmă să treacă un număr minim de ciocane, preferabil 1; să nu se aglomereze materialul într-o anumită zonă a camerei de măcinare și ciocanele să acopere întreaga zonă de lucru. În general, condiția de echilibrare dinamică este îndeplinită dacă ciocanele au o dispunere simetrică pe desfășurata rotorului. Dezavantajul dispunerii ciocanelor după linii elicoidale constă în faptul că aglomerează biomasa în una din zonele camerei de măcinare. Cunoscând dispunerea ciocanelor pe rotor, grosimea ciocanului de 8 mm și a discului de 10 mm au rezultat cu ajutorul căruia s-au trasat diagramele de variație ale momentului de inerție pe cele două axe în funcție de unghiul de rotație.

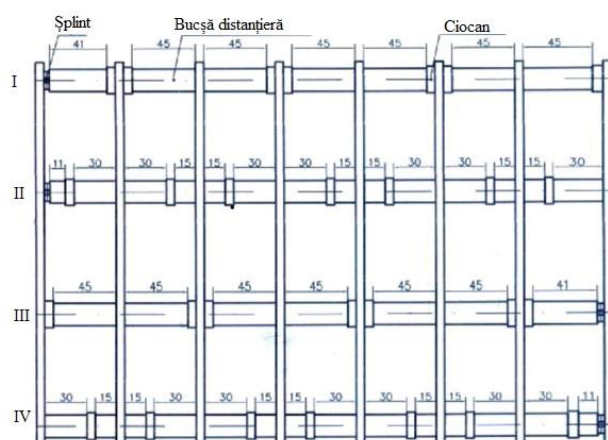


Fig. 4.13 Dispunerea ciocanelor pe rotor [10]

Figura 4.15 reprezintă momentul de inerție în funcție de unghiul de rotație al rotorului. Se poate observa o curbă sinusoidală cu valori pozitive și negative, momentul de inerție încadrându-se între $2 \cdot 10^{-3}$ și $-2 \cdot 10^{-3}$ ($\text{kg} \cdot \text{m}^2$).

Din câte se poate observa în figura 4.15 cele două curbe ale momentelor de inerție I_{zx} și I_{yz} nu trec niciodată simultan prin zero. Totodată, valoarea maximă este aceeași pentru ambele momente de inerție, valorile maxime și minime ale I_{zx} și I_{yz} fiind relative mici.

De asemenea, pentru anumite poziții momentul de inerție pe axa Oy este 0 iar momentul de inerție pe axa Ox este fie maxim fie minim și invers. Aceste valori ale momentului de inerție centrifugale pot introduce unele vibrații ale rotorului în raport cu axa Oz (pe lungimea rotorului).

Echilibrarea rotoarelor cu ciocane este foarte importantă pentru o mai bună funcționare a morilor cu ciocane, fără vibrații. Verificările noastre pentru moara cu ciocane românească MC-22 a condus la două constatări majore: ciocanele nu sunt echilibrate la șoc (există o diferență majoră între f calculat și f real de la circa 47 mm la 10 mm); există o valoare mică a momentelor de inerție centrifugale, diferită de zero (pentru cotele de pe desenul de dispunere a ciocanelor pe rotor).

Orice abatere de la geometria ciocanului și de la masa acestuia introduce un neechilibru în timpul rotirii rotorului cu ciocane, care conduce la o funcționare cu vibrații, indiferent cât de mici sunt abaterile. Orice abatere de la dimensiunile de dispunere a ciocanelor pe rotor (în lungul

bolțului de articulație) introduce de asemenea neechilibrări ale rotorului, iar funcționarea va fi cu vibrații și trepidații. Orice abatere de poziție unghiulară, oricât de mică, a bolțurilor de articulație conduce, la fel, la o funcționare cu trepidații datorită echilibrării necorespunzătoare a rotorului.

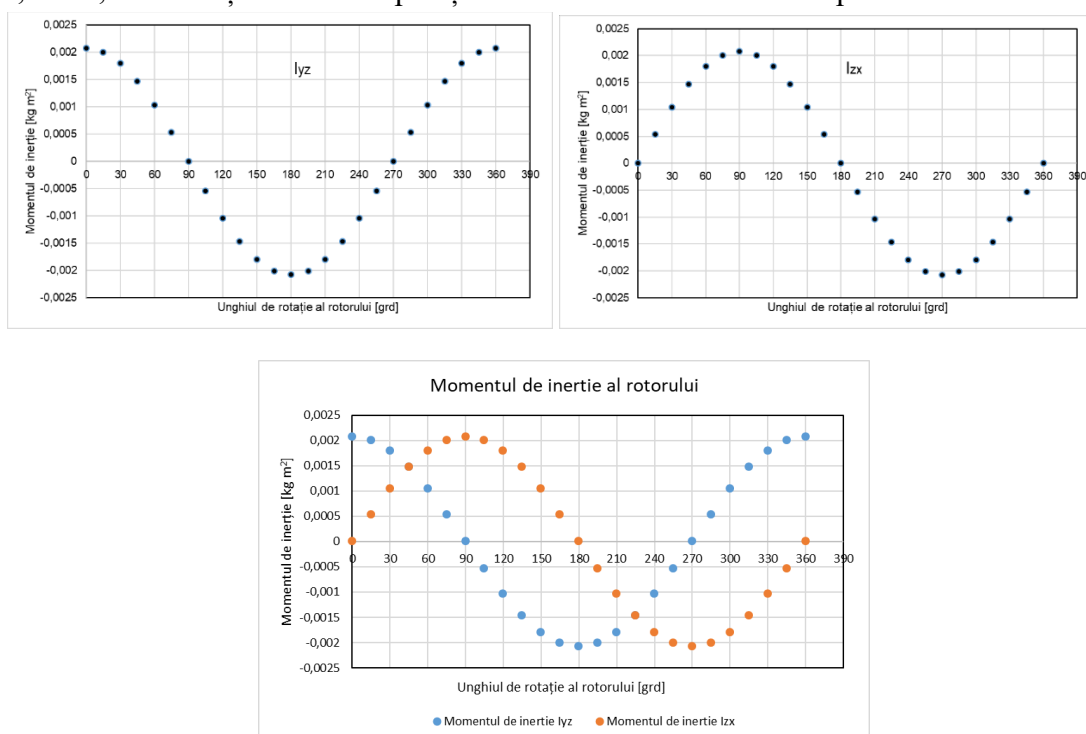


Fig. 4.15. Variația momentului de inerție [45]

a. Variația momentului de inerție pe axa Ox; b. Variația momentului de inerție de axa Oy

4.2. Modelarea matematică a procesului de lucru al morilor cu ciocane, prin analiză dimensională utilizând teorema II

Pentru a studia procesul de mărunțire a biomasei cu ajutorul morilor cu ciocane s-a aplicat teoria analizei dimensionale, având drept scop modelarea matematică a acestui proces. Prin această analiză s-a urmărit anticiparea puterii necesare de acționare a morii atât pentru mărunțirea biomasei de miscanthus cât și pentru mărunțirea de salcie energetică. Modelarea matematică a fost realizată prin analiză dimensională aplicând teorema II, enunțată de Buckingham, [65,71].

S-au luat în considerare în analiza procesului de lucru al morilor cu ciocane numai 6 parametri principali care influențează procesul de lucru al morii cu ciocane și anume: puterea consumată în timpul procesului de lucru P [$\text{kg} \cdot \text{m}^2/\text{s}^3$], energia consumată de moara cu ciocane E [m^2/s^2], dimensiunea particulelor după mărunțire d_m [m], turația morii cu ciocane, n [s^{-1}], dimensiunea orificiilor sitei morii cu ciocane D_s [m], debitul de alimentare Q [kg/s]. De asemenea s-au considerat și o analiză cu 7 respectiv 5 parametri principali care influențează procesul de lucru al morii cu ciocane.

Funcția implicită care descrie dimensional procesul de mărunțire, unde toți termenii sunt dimensionali omogeni în raport cu mărimile fundamentale din Sistemul Internațional (L,M,T) este:

$$f(E, P, D_s, Q, n, d_m) = 0 \quad (4.97)$$

S-a considerat ca mărimi determinante grupul (E, P, D_s) , iar pe baza teoremei π , s-au determinat complexii adimensionali (criteriile de similitudine) ai procesului de mărunțire al morilor cu ciocane pentru mărimile fizice n, Q, d_m :

$$\Pi_1 = \frac{Q}{P^{x_1} E^{x_2} D_s^{x_3}} \quad (4.98)$$

$$\Pi_2 = \frac{n}{P^{x'_1} E^{x'_2} D_s^{x'_3}} \quad (4.99)$$

$$\Pi_3 = \frac{d_m}{P^{x''_1} E^{x''_2} D_s^{x''_3}} \quad (4.100)$$

în care exponenții $x_1, x_2, x_3, x'_1, x'_2, x'_3, x''_1, x''_2, x''_3$, au fost determinați din condițiile ca π_1, π_2 , și π_3 să fie adimensionali, în raport cu mărimile fundamentale L (lungime), M (masă), T (timp). Astfel, matricea dimensională a celor 6 mărimi în raport cu mărimile fundamentale L, M, T este dată mai jos:

	x1	x2	x3			
	P	E	D_s	Q	n	d_m
L	2	2	1	0	0	1
M	1	0	0	1	0	0
T	-3	-2	0	-1	-1	0

Punând condiția ca Π_1 să fie adimensional, în raport cu cele trei mărimi fundamentale, L, M, T, s-a obținut din matricea de mai sus, următorul sistem de ecuații liniare:

$$\begin{cases} 2x_1 + 2x_2 + x_3 = 0 \\ x_1 = 1 \\ -3x_1 - 2x_2 = -1 \end{cases} \quad (4.101)$$

Din rezolvarea sistemului au fost găsite soluțiile $x_1 = -1, x_2 = -1, x_3 = 0$, respective $x'_1 = 0, x'_2 = 1/2, x'_3 = -1$ respectiv $x''_1 = 0, x''_2 = 0, x''_3 = 1$ astfel expresia complexului adimensional $\Pi_1 \Pi_2$ respectiv Π_3 devine:

$$\Pi_1 = \frac{Q}{PE^{-1}} = \frac{QE}{P} \quad (4.102)$$

$$\Pi_2 = \frac{nD_s}{E^{1/2}} \quad (4.104)$$

$$\Pi_3 = \frac{d_m}{D_s} \quad (4.106)$$

Cu aceste mărimi adimensionale s-a obținut ecuația criterială sub forma implicită anume:

$$\varphi\left(\frac{QE}{P}, \frac{nD_s}{E^{1/2}}, \frac{d_m}{D_s}\right) = 0 \quad (4.107)$$

Pentru determinarea puterii necesare procesului de lucru al morilor cu ciocane s-a separat termenul P din ecuația criterială, acesta devenind:

$$\frac{QE}{P} = \varphi\left(\frac{nD_s}{E^{1/2}}, \frac{d_m}{D_s}\right) \quad (4.108)$$

Pentru o primă aproximare a fost propus modelul matematic al produsului de puteri ale celorlalte mărimi adimensionale, respectiv:

$$\frac{QE}{P} = k^* \left(\frac{nD_s}{E^{1/2}}\right)^{\alpha_1} \left(\frac{d_m}{D_s}\right)^{\alpha_2} \quad (4.109)$$

în care: k^* , α_1 , α_2 , sunt coeficienți constanți, respectiv exponenți calculați prin regresie liniară bazată pe date experimentale. Efectuând calculul și separând din ecuație puterea de acționare a morii cu ciocane ecuația devine:

$$P = \frac{1}{k^*} QE^{1+0,5\alpha_1} n^{-\alpha_1} D_s^{\alpha_2-\alpha_1} d_m^{-\alpha_2} \quad (4.110)$$

Pentru analiza dimensională cu 5 parametri s-a determinat grafic variația dimensiunii particulelor de biomasă mărunțită cu complexul adimensional Π_1 .

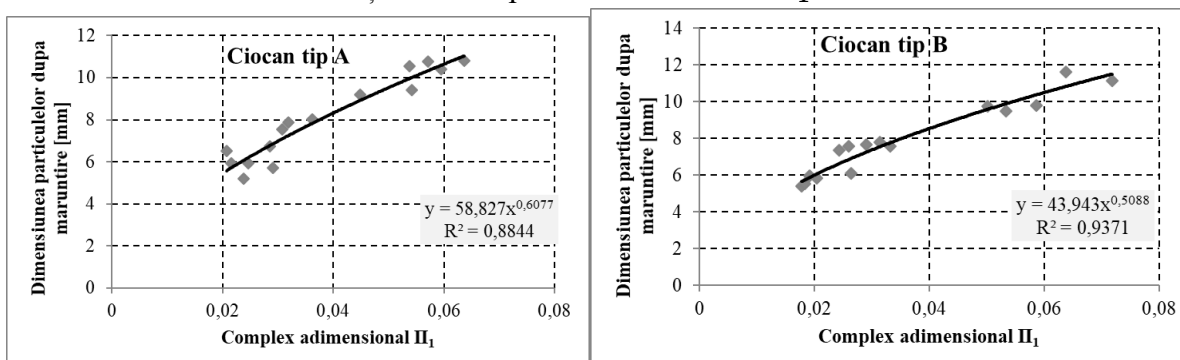


Fig. 4.17. Variația dimensiunii particulelor de biomasă mărunțită cu complexul adimensional Π_1

4.3. Simularea solicitărilor în organele de lucru ale morilor cu ciocane

În cadrul acestei etape de elaborare a tezei s-a aplicat metoda elementelor finite (MEF) pentru analiza structurală a organelor de lucru ale morii cu ciocane. Pentru simularea procesului de lucru al morii cu ciocane s-a utilizat programul SolidWorks 2016 Premium, care permite atât proiectarea cât și rezolvarea problemelor dificile într-un mod rapid și eficient. Prima fază a acestei modelări a reprezentat-o generarea modelului geometric urmată apoi de generarea modelului discretizat. Geometria organelor de lucru a fost realizată cu ajutorul programului SolidWorks și este prezentată în figura 4.18. Au fost create organele de lucru pornind de la dimensiunile cunoscute ale discurilor, ciocanelor și ale axului de rotație. Pentru aplicarea problematicilor de mișcare și simulare s-a ales un ansamblu de 2 discuri și 4 ciocane.

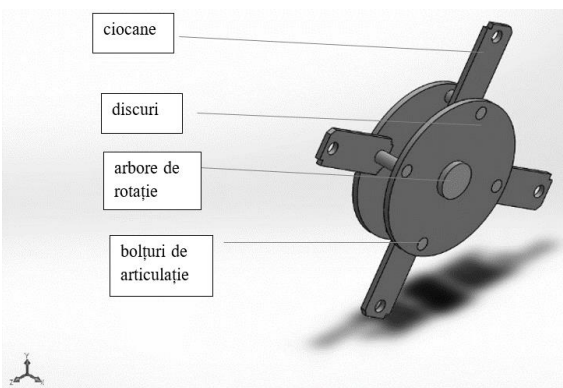


Fig. 4.18. Modelul geometric al ansamblului



Fig. 4.22. Discretizarea în elemente finite tetraedrale a modelului

Pentru analiză s-a ales ca turație a rotorului valoarea de 3000 rot/min. S-a observat o stabilizare a rotorului de la pornire până la turația maximă în doar 1,2 secunde. Din graficele rezultate se poate observa o stabilizare a oscilațiilor ciocanelor după 2 secunde (fig.4.19). Numărul cadrelor pe secundă a fost stabilit la 12000.

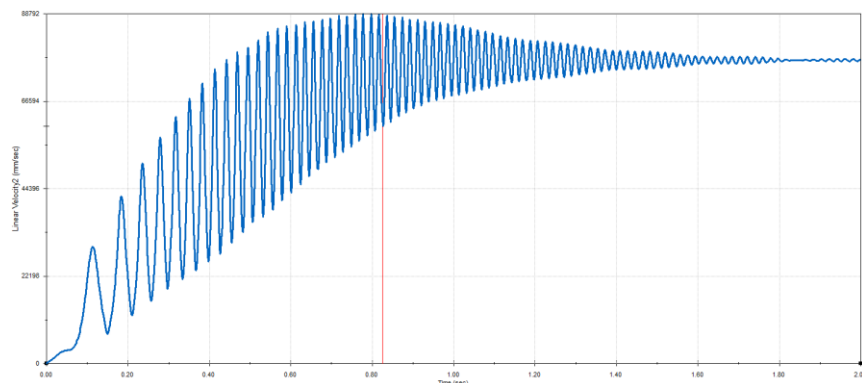


Fig. 4.21. Variația vitezei periferice a unuia dintre ciocanele rotorului

S-a efectuat o analiză statică din care au rezultat deplasările, tensiunile, precum și frecvențele proprii. În cazul analizei statice materialul supus analizelor cedează în locul în care eforturile calculate depășesc limita de rupere a materialului. Analiza de frecvență a fost efectuată pentru a identifica dacă există frecvențe proprii care coincid cu frecvența de funcționare a rotorului sau sunt mai mici decât aceasta. Se observă că prima frecvență proprie a ansamblului este de 33903 rad/s, valoare mult superioară frecvenței de funcționare a rotorului 314 rad/s.

Din rezultatele obținute referitor la analiza frecvenței proprii s-a putut observa o deformație maximă de 0,036 mm la vârful ciocanelor datorată forței centrifuge din timpul funcționării.

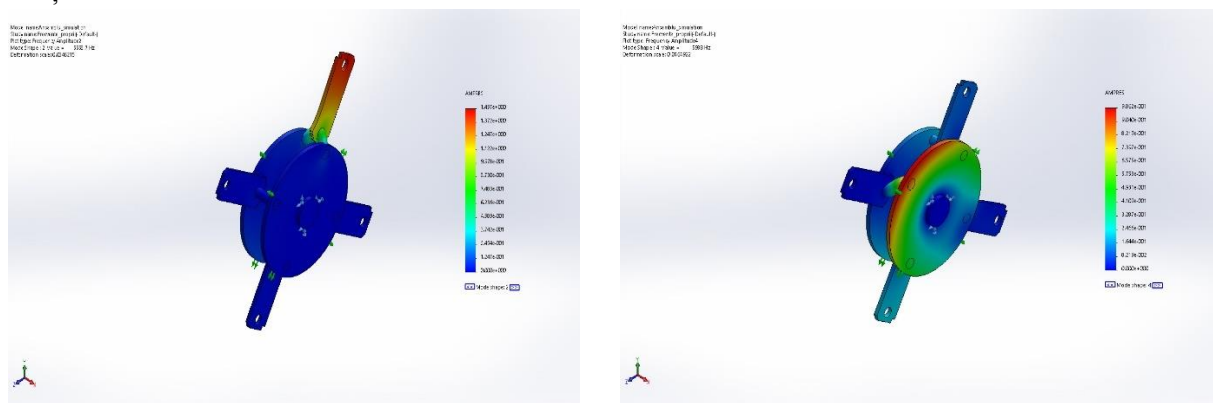


Fig.4.24. Deformația ansamblului prin aplicarea analizei de frecvență pentru diferite frecvențe proprii

4.4. Concluzii privind procesul de lucru al morilor cu ciocane

Referitor la echilibrarea la șoc a ciocanelor s-a putut constata că datorită unor dimensiuni identice ale ciocanelor de tip A, B, C și D valorile calculate ale lui l , c și f sunt și ele identice. Totodată, se evidențiază diferențe foarte mici între cele trei valori ale cotei f (cota f indică poziția găurilor și reprezintă cota de echilibrare la șoc a ciocanelor). Prin simularea cu element finit s-a

constat o deformare maximă de 0,036 mm la vârful ciocanelor datorată forței centrifuge din timpul funcționării. De asemenea, tensiunile au fost la jumătatea limitei de elasticitate, iar efortul unitar echivalent se manifestă asupra ciocanelor pe suprafața de contact a fiecărui ciocan cu fiecare ax.

Capitolul 5. - Cercetări experimentale privind procesul de lucru al echipamentelor de mărunțit folosind două tipuri de biomasă

5.1. Obiectivele cercetărilor experimentale

Obiectivul general al cercetărilor experimentale din prezenta lucrare este analiza proceselor de prelucrare mecanică prin mărunțire din cadrul procesului tehnologic general de obținere de biocombustibil solid, având drept scop îmbunătățirea performanțelor utilajelor care realizează aceste operații și stabilirea unor regimuri optime de lucru pentru mașina de mărunțit:

Între obiectivele specifice acestei teze se numără:

- identificarea factorilor care influențează procesul de mărunțire a plantelor energetice (biomasei);
- studiul construcției echipamentelor de mărunțit biomasă cu precădere a morilor cu ciocane;
- studiul teoretic al procesului de lucru efectuat de către organele morilor cu ciocane;
- modelarea și simularea cu element finit a solicitărilor din articulațiile ciocanelor de lucru ale morilor cu ciocane;
- determinarea influenței tipului de ciocan asupra gradului de mărunțire a plantelor energetice și a consumului specific de energie;
- determinarea influenței turației rotorului cu ciocane asupra gradului de mărunțire a plantelor energetice (miscanthus și salcie), respectiv asupra consumului energetic;
- determinarea influenței dimensiunii sitei asupra gradului de mărunțire a plantelor energetice și a consumului specific de energie;
- stabilirea unor corelații între parametrii procesului de mărunțire al morilor cu ciocane, în vederea îmbunătățirii acestuia.

5.2. Descrierea aparaturii utilizate în cadrul experimentelor

În vederea parcurgerii tuturor etapelor propuse s-au utilizat diverse echipamente, dintre care cel mai important fiind moara cu ciocane MC-22 pentru resturi vegetale, care funcționează în fluxul de fabricație al agripeleților și cu ajutorul căreia s-a efectuat mărunțirea plantelor energetice.

Moara cu ciocane articulate MC-22 are lungimea rotorului de 500 mm, diametrul de dispunere a ciocanelor $\phi 220$ mm și diametrul camerei de măcinare $\phi 500$ mm, de asemenea puterea motorului electric este de 2 kW, turația motorului electric 3000 rot/min, capacitatea de tocare 900 m³/h. Sita utilizată în experimente a fost interschimbabilă având orificii de 25, 16, 10 și 7 mm la biomasa de miscanthus și 16, 10 și 7 mm la biomasa de salcie.

Alte echipamente utilizate au fost cronometru, ruleta, șublerul digital, balanța analitică model AV 220, etuva UFE 500, turometru și aparatul de fotografiat digital.



Fig. 5.1 – Moară cu ciocane MC-22

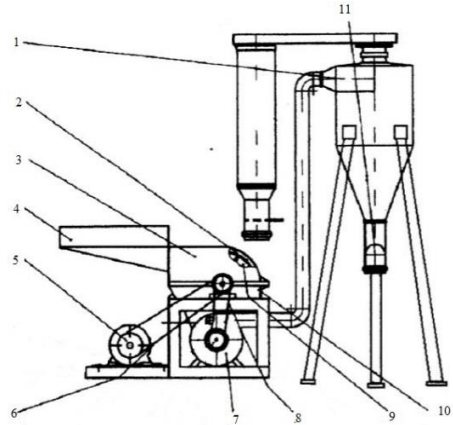


Fig. 5.2. Schema constructivă a morii cu ciocane MC 22[10]

5.3. Metodica determinărilor experimentale

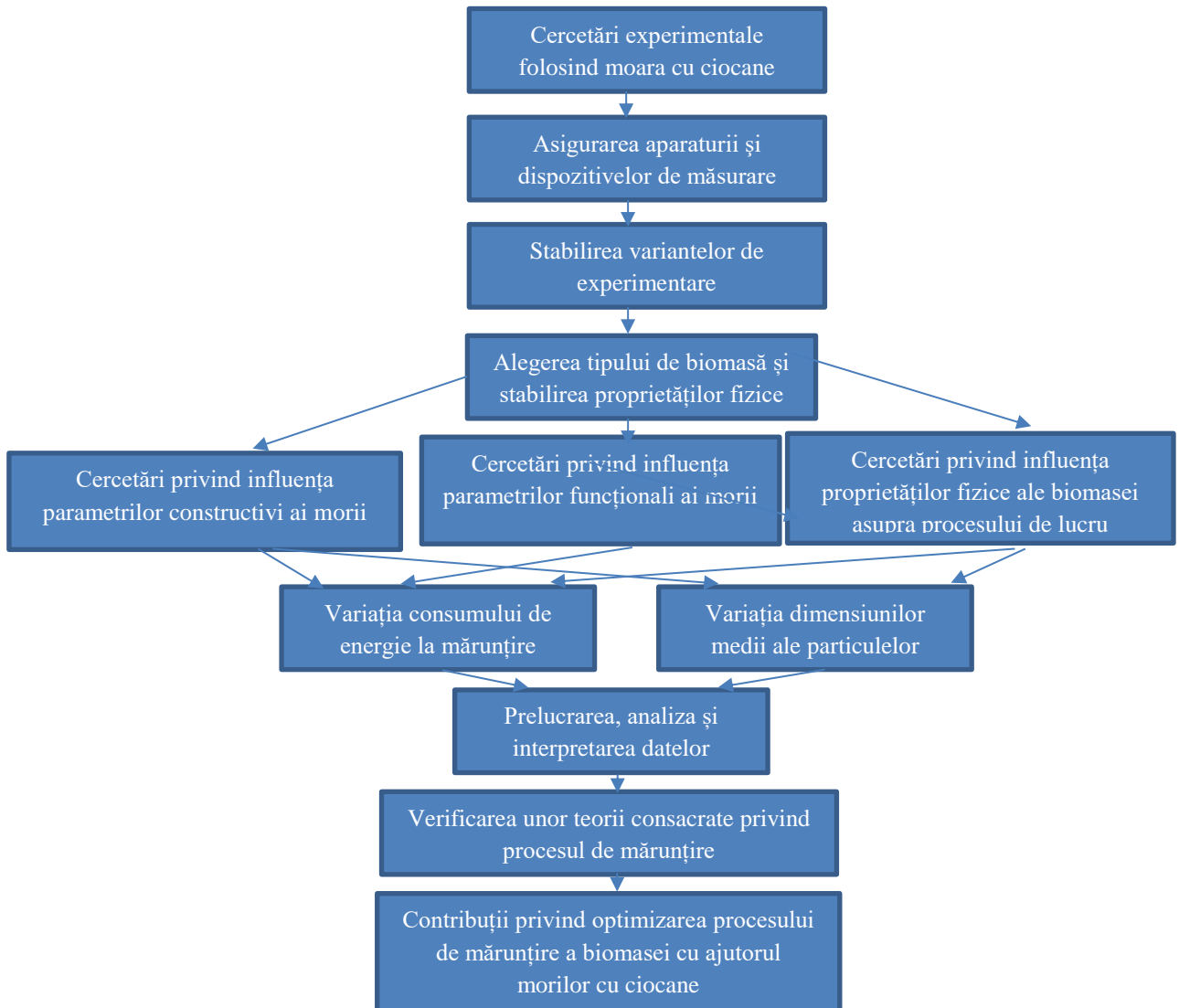


Fig. 5.12. Schema de desfășurare a experimentărilor pentru analiza procesului de lucru al morilor cu ciocane

Pentru testele experimentale s-au prelevat prin eșantionare din grămada de material 10 eșantioane de câte 0,5 kg din locuri diferite, atât pentru miscanthus, cât și pentru salcie energetică. S-au măsurat dimensiunile particulelor de material recoltat în stare tocată și s-a determinat dimensiunea medie a particulelor.

Astfel, particulele de miscanthus au avut dimensiunea medie 123-127 mm, în timp ce particulele de salcie energetică au avut dimensiuni cuprinse între 25 – 47 mm (peste 85% din material). Înainte de a executa primul test s-au realizat câteva încercări preliminare care au contribuit și la alegerea parametrilor de reglare a morii cu ciocane. Testele experimentale s-au realizat folosind diferite cantități de material, în cazul plantei energetice miscanthus s-au folosit 5 kg de material la majoritatea testelor, iar în cazul salciei energetice s-a utilizat 4 kg sau 3 kg. Toate datele au fost centralizate, iar apoi prelucrate cu ajutorul programelor Excel, Origin 7.0, Table Curve2D, Statistica.

5.4. Rezultatele experimentale

Tabelul 5.3. Parametrii experimentali rezultați la cercetările experimentale de mărunțire a biomasei de *Miscanthus X Giganteus*

Tip ciocan	Dimensiunea orificiilor sitelor	Turația rotorului	Umiditatea materialului	Energia consumată la mărunțire	Dimensiunea medie a particulelor mărunțite	Indicele de apreciere al gradului de mărunțire
	ϕ_s (mm)	n (rot/min)	u (%)	E_s (kJ/kg)	dm (mm)	λ
Ciocan tip A – cu o treaptă	16	3000	11,19	42,93	18,04	6,93
		2850	11,05	40,81	16,65	7,51
		2700	11,07	48,44	16,80	7,44
		2550	11,13	42,96	17,24	7,25
		2400	11,09	55,32	17,28	7,24
Ciocan tip B – cu două trepte	16	3000	10,34	114,28	15,48	8,08
		2850	10,20	102,14	14,85	8,42
		2700	10,29	76,84	15,87	7,88
		2550	10,23	80,86	15,62	8,00
		2400	11,06	48,45	16,68	7,49

În tabele 5.3, 5.4 sunt prezentate datele experimentale doar pentru sita cu dimensiuni ale orificiilor de $\phi 16$ mm, atât pentru miscanthus, cât și pentru salcie. Rezultatele pentru sitele de $\phi 25$ mm și $\phi 10$ mm pentru miscanthus, respectiv $\phi 10$ mm și $\phi 7$ mm pentru salcie sunt în anexele 5.1 – 5.4. De asemenea, conform teoriei mărunțirii, care face referire la distribuția particulelor de material mărunțit după dimensiunile lor, s-a arătat că schimbarea acestor dimensiuni poate include particule de la cele mai mici la cele mai mari.

Tabelul 5.4. Parametrii experimentali rezultați în cercetările experimentale de mărunțire biomasei de *Salix Viminalis* (salcie)

Tip ciocan	Dimensiunea orificiilor sitelor	Turația rotorului	Umiditatea materialului	Energia consumată la mărunțire	Dimensiunea medie a particulelor mărunțite	Indicele de apreciere al gradului de mărunțire
	ϕ_s	N	u	E_s	dm	λ
	(mm)	(rot/min)	(%)	(kJ/kg)	(mm)	
Ciocan tip A – cu o treaptă	16	3000	10,12	30,49	10,40	12,02
		2850	9,09	28,36	9,40	13,30
		2700	8,89	26,83	10,76	11,61
		2550	8,87	40,85	10,56	11,84
		2400	8,90	32,72	10,80	11,57
Ciocan tip B – cu două trepte	16	3000	10,23	44,03	9,51	13,15
		2850	10,76	33,11	9,75	12,82
		2700	10,17	29,61	9,82	12,73
		2550	10,81	25,59	11,62	10,76
		2400	10,20	28,70	11,16	11,21

Tabelul 5.5. Procentul particulelor pe clase de dimensiuni pentru sita de $\phi 16$ mm

Tipul ciocanului	Tipul materialului	Clase de dimensiuni	Turația rotorului, n (rot/min)				
			3000	2850	2700	2550	2400
Ciocan tip A – cu o treaptă	miscanthus	0	0	0	0	0	0
		5	7,745	12,93	11,135	13,71	14,2275
		10	25,3675	31,85	29,21	25,96	25,775
		16	41,6025	48,8375	46,305	42,7275	44,705
		21	99,2625	99,6275	98,07	97,915	99,075
Ciocan tip B – cu două trepte	miscanthus	0	0	0	0	0	0
		5	12,495	18,36	14,2925	14,2575	13,545
		10	32,45	35,2625	30,2725	29,37	27,5725
		16	54,025	55,8025	51,2225	53,6625	46,23
		21	97,485	97,6325	97,5725	97,5475	97,705
Ciocan tip A – cu o treaptă	salcie	0	0	0	0	0	0
		5	14,99	23,693	9,982	12,357	12,812
		10	45,753	58,349	43,315	44,689	40,624
		16	92,657	91,765	92,459	92,488	92,144
		21	99,1505	99,207	98,958	98,926	98,937
Ciocan tip B – cu două trepte	salcie	0	0	0	0	0	0
		5	29,888	29,88	22,38	13,989	13,791
		10	64,635	64,415	60,71	50,403	48,883
		16	85,529	83,624	87,689	80,807	85,749
		21	99,282	99,296	99,199	99,135	99,294

În cadrul acestei lucrări s-a realizat analiza granulometrică folosind legea de distribuție a materialului de tip Rosin – Rammler. Pentru un anumit set de date prezentate în tabelul 5.5 din totalul rezultatelor experimentale s-a aplicat legea de distribuție Rosin Rammler cumulativă.

5.5. Verificarea unor teorii consacrate privind mărunțirea pe bază de rezultate experimentale

În acest subcapitol, pe baza relațiilor consacrate ale lui Kick, Bond și Rittinger, care descriu consumul de energie la mărunțire, au fost determinați coeficienții acestor relații având în vedere valori reale (determinate experimental) pentru energia de mărunțire a biomasei. Pentru a putea aplica ecuațiile de energie s-a determinat diametrul mediu la particulelor înainte de mărunțire atât pentru miscanthus, cât și pentru salcie, valorile acestora fiind de 125 mm respectiv cuprinse între 25 -47 mm..

5.5.1. Verificarea teoriilor consacrate ale energiei consumate în funcție de condițiile de experimentare

Utilizând relațiile lui Kick, Rittinger, și folosind programul de calcul Microsoft Office Excel au fost calculate valorile coeficienților acestor relații C_k , C_R , C_B (prezentate în tabelul 5.6, 5.7, 5.8).

Tabelul 5.7. Valorile constantelor C_k , C_R , C_B pentru sita de $\phi 16$ mm, la miscanthus

Tip ciocan	Turația rotorului	Dimensiunea de particulelor de material înainte de mărunțire	Dimensiunea de particulelor material mărunțit	Gradul de mărunțire	Energia consumată	Constanta lui Kick $E = C_k \ln \frac{D}{d}$	Constanta lui Rittinger $E = C_R \left(\frac{1}{d} - \frac{1}{D} \right)$	Constanta lui Bond $E = C_B \left(\frac{1}{d^{0.5}} - \frac{1}{D^{0.5}} \right)$
	rot/min	mm	mm		kJ/kg	kJ/kg	kJ m kg ⁻¹	kJ m ^{0.5} kg ⁻¹
A	3000	125	18,04	6,929	42,934	22,180	0,905	9,299
	2850	125	16,65	7,508	40,811	20,243	0,784	8,291
	2700	125	16,80	7,442	48,437	24,133	0,940	9,910
	2550	125	17,24	7,251	42,956	21,682	0,859	8,971
	2400	125	17,28	7,236	55,320	27,953	1,109	11,572
B	3000	125	15,48	8,076	114,282	54,711	2,019	21,936
	2850	125	14,85	8,415	102,136	47,951	1,722	18,995
	2700	125	15,87	7,878	76,845	37,230	1,397	15,036
	2550	125	15,62	8,003	80,857	38,877	1,443	15,629
	2400	125	16,68	7,492	48,449	24,058	0,933	9,860

Urmărind și analizând datele din tabel se constată că valorile lui C_k se încadrează în limitele 29.66 – 47.11 kJ/kg pentru ciocanul de tip A și sita morii de $\phi 25$ mm, respectiv între 17.58 – 35.31 kJ/kg pentru ciocanul de tip C la aceeași sită utilizată, pentru biomasa de miscanthus, ceea ce

înseamnă că energia de mărunțire specifică este mai mică la ciocanele cu două muchii față de ciocanul cu o singură muchie.

Referitor la coeficientul C_R , din relația lui Rittinger, acesta variază în limitele 0.82 – 2.69 kJ·m/kg, în funcție de tipul ciocanului și turația rotorului, pentru sita de $\phi 25$ mm, respectiv 0.71 – 2.02 kJ·m/kg, pentru sita de $\phi 16$ mm, și între 0.45 – 1.34 kJ·m/kg pentru sita de $\phi 10$ mm, în cazul biomasei de miscanthus.

Legat de tipul ciocanului utilizat, de exemplu, pentru ciocanul de tip C, coeficientul C_R se modifică cu turația rotorului și cu diametrul sitei morii, de la 0.76 kJ·m/kg pentru sita de $\phi 10$ mm și 1.02 kJ·m/kg pentru sita de $\phi 25$ mm la turația de 2550 rot/min.

Analizând datele din tabele se observă că C_B se modifică de la 9.54 kJ·m^{0.5}/kg la 24.67 kJ·m^{0.5}/kg pentru sita $\phi 25$ mm, în funcție de tipul ciocanului și turația rotorului, respectiv între 8.24 – 21.93 kJ·m^{0.5}/kg pentru sita de $\phi 16$ mm și între 6.1 – 16.7 kJ·m^{0.5}/kg pentru sita de $\phi 10$ mm. Pentru o turație constantă, de exemplu, 2400 rot/min, valorile lui C_B , se încadrează între 9.63 – 20 kJ·m^{0.5}/kg pentru sita cu orificii de 25 mm în funcție de tipul ciocanului, respectiv între 9.86 – 14.87 kJ·m^{0.5}/kg pentru sita cu orificii de 16 mm și între 8.47 – 14.07 kJ·m^{0.5}/kg pentru sita cu orificii de 10 mm.

Valorile constantelor C_k , C_R , C_B determinate pentru biomasă de miscanthus cu moara MC-22 (utilizată în experimentele din această teză) pot fi comparate cu valorile obținute de alți cercetători, dar literatura de specialitate nu prezintă date legate de această plantă și nici pentru cazul morilor cu ciocane utilizate la mărunțirea biomasei grosiere.

Tabelul 5.9. Valorile constantelor C_k , C_R , C_B pentru sita de $\phi 16$ mm, la salcie

Tip ciocan	Turația rotorului	Dimensiunea orficiilor sitei	Gradul de mărunțire	Energia consumată	Constanta lui Kick	Constanta lui Rittinger	Constanta lui Bond
	rot/min	mm		kJ/kg	kJ/kg	kJ m kg ⁻¹	kJ m ^{0.5} kg ⁻¹
A	3000	10,40	12,016	30,495	12,265	0,346	4,371
	2850	9,40	13,303	28,359	10,958	0,288	3,787
	2700	10,76	11,614	26,831	10,942	0,316	3,940
	2550	10,56	11,840	40,854	16,530	0,471	5,917
	2400	10,80	11,572	32,717	13,362	0,387	4,816
B	3000	9,51	13,147	44,032	17,092	0,453	5,928
	2850	9,75	12,817	33,110	12,980	0,350	4,537
	2700	9,82	12,730	29,606	11,638	0,315	4,076
	2550	11,62	10,762	25,590	10,770	0,328	3,967
	2400	11,16	11,205	28,700	11,877	0,352	4,323

Valorile lui coeficientului lui Kick se încadrează în limitele 7.02 – 19.0 kJ/kg pentru toate sitele, toate tipurile de ciocane și toate turațiile. Se constată că cea mai mică valoare a coeficientului lui Kick se întâlnește pentru ciocanul de tip C și turația de 2400 rot/min, iar cea mai mare valoare a coeficientului lui Kick se întâlnește pentru ciocanul de tip A și turația de 2400 rot/min. Referitor la coeficientul lui Rittinger, C_R , se poate spune că acesta variază în limitele 0.15 – 0.49 kJ·m/kg pentru toate tipurile de ciocane, site și turațiile rotorului. Dacă turația rotorului este 2850 rot/min atunci pentru ciocanul de tip A coeficientul lui Rittinger are valori cuprinse între 0.29 – 0.35

$\text{kJ}\cdot\text{m}/\text{kg}$, în funcție de tipul sitei utilizate, valoarea cea mai mare fiind cea pentru sita cu diametrul orificiilor de $\phi 7$ mm.

Se observă un maxim al coeficientului C_B în valoare de $6.52 \text{ kJ}\cdot\text{m}^{0.5}/\text{kg}$ pentru ciocanul de tip A și turația de 2400 rot/min și un minim de $2.57 \text{ kJ}\cdot\text{m}^{0.5}/\text{kg}$ pentru ciocanul de tip C și turația de 2400 rot/min. Dacă analizăm valorile lui C_B pentru fiecare sită în parte, avem valori încadrate în gama $2.57 \text{ kJ}\cdot\text{m}^{0.5}/\text{kg}$ pentru ciocanul de tip C și $5.92 \text{ kJ}\cdot\text{m}^{0.5}/\text{kg}$ pentru ciocanul de tip B, amândouă pentru sita $\phi 16$ mm, $3.07 \text{ kJ}\cdot\text{m}^{0.5}/\text{kg}$ pentru ciocanul de tip C și $6.52 \text{ kJ}\cdot\text{m}^{0.5}/\text{kg}$ pentru ciocanul de tip A, amândouă pentru sita $\phi 10$ mm, și $2.45 \text{ kJ}\cdot\text{m}^{0.5}/\text{kg}$ pentru ciocanul de tip A și $5.54 \text{ kJ}\cdot\text{m}^{0.5}/\text{kg}$ pentru ciocanul de tip A amândouă pentru sita $\phi 7$ mm.

Similar cercetărilor realizate pentru planta miscanthus și în cazul salciei, literatura de specialitate nu prezintă date legate de această plantă pentru cazul morilor cu ciocane.

5.5.2. Determinarea distribuției materialului mărunțit pe clase de dimensiuni și corelație cu legea Rosin - Rammler

Pentru determinarea corelației datelor experimentele privind analiza granulometrică a materialului mărunțit s-a efectuat analiza de regresie a acestora cu legea Rosin Rammler. S-a utilizat relația cunoscută pentru distribuția cumulativă a materialului cernut pe site $T(x)$, (relația 5.1). S-au ales atât pentru miscanthus cât și pentru salcie valorile experimentale obținute din analiza granulometrică pentru sita de $\phi 16$ mm și ciocane de tip A (cu o muchie) și de tip B (cu două muchii). Analiza de regresie s-a efectuat utilizând programul de calcul Matlab.

Tabelul 5.12. Valorile coeficienților experimentali ai analizei de regresie

Tipul biomasei	Tip Ciocan	Turația rotorului (rot/min)	Coeficienții experimentali		
			b	n	R ²
<i>Miscanthus X Giganteus</i>	A	3000	-772	-2,659	0,853
		2850	-384	-2,471	0,8607
		2700	-450,1	-2,498	0,8642
		2550	-655,4	-2,596	0,8345
		2400	-779	-2,681	0,8417
<i>Salix viminalis</i>	B	3000	-24,28	-1,831	0,9854
		2850	-22,58	-1,787	0,9842
		2700	-42,24	-2,025	0,9844
		2550	-72,23	-2,109	0,9756
		2400	-102,5	-2,264	0,9717

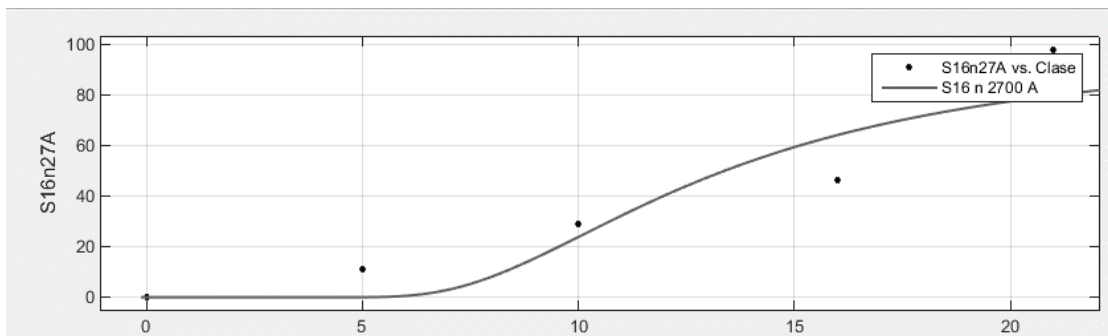


Fig. 5.14. Curba de distribuție granulometrică $T(x)$ pentru miscanthus, ciocan de tip A și sită $\phi 16$ mm

5.6. Cercetări privind influența parametrilor constructivi ai morii asupra consumului de energie la mărunțire

5.6.1. Influența diametrului orificiilor sitei asupra consumului specific de energie

Potrivit cu graficele rezultate, se poate afirma că utilizarea ciocanului de tip A conduce la consumuri energetice mai mici decât celelalte tipuri de ciocane, dar trebuie aleasă corespunzător atât turația cât și sita utilizată.

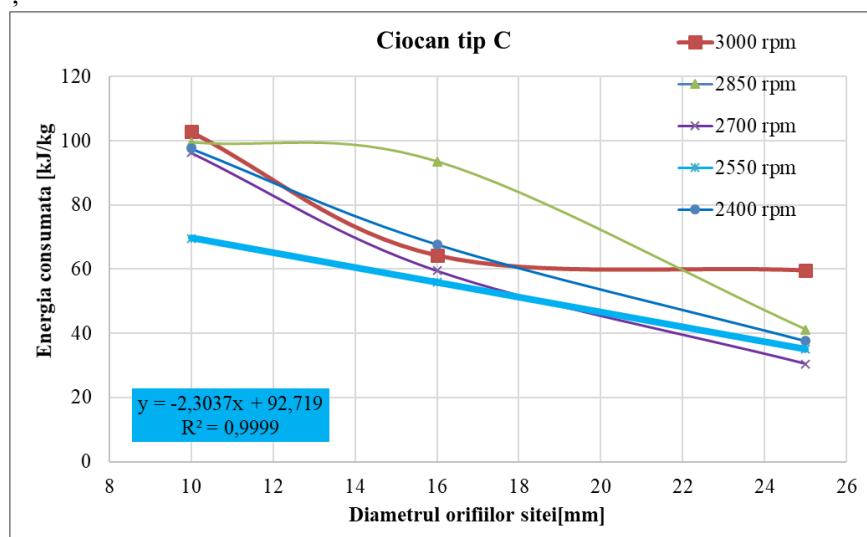


Fig. 5.17. Variația energiei specifice consumate în funcție diametrul orificiilor sitei pentru ciocanul de tip C și biomasă de miscanthus

Din analiza graficelor din figurile 5.19 – 5.22 se constată tendința generală de scădere a consumului energetic cu creșterea dimensiunilor orificiilor sitei utilizate, chiar dacă sunt turații la care tendința de variație e schimbătoare.

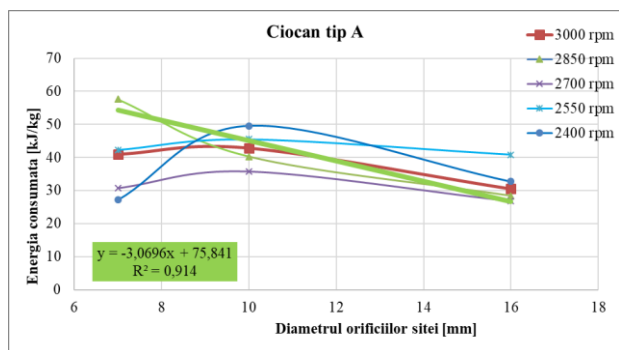


Fig. 5.19. Variația energiei specifice consumate în funcție diametrul orificiilor sitei pentru ciocanul de tip A, pentru biomasa de salcie energetică

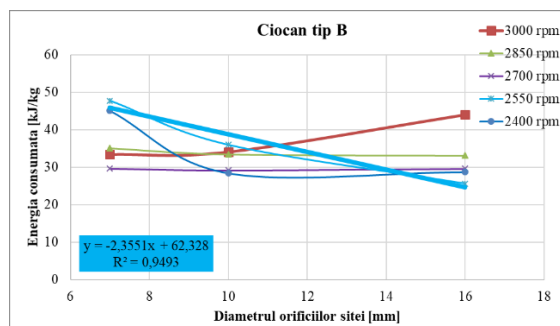


Fig. 5.20. Variația energiei specifice consumate în funcție diametrul orificiilor sitei pentru ciocanul de tip B

Rezultatele experimentale recomandă în principal utilizarea ciocanului drept (tip A) și a ciocanului cu două muchii (tip C) la care cele mai multe valori ale turației rotorului prezintă variații descrescătoare ale consumului specific de energie cu creșterea orificiilor sitelor.

5.6.2. Influența tipului de ciocan asupra energiei consumate la mărunțire

Conform graficelor atât pentru miscanthus cât și pentru salcia energetică, se poate afirma că utilizarea unui anumit tip de ciocan conduce la consumuri energetice mai mici decât celelalte tipuri de ciocane, cu condiția ca sita și turația să fie alese corespunzător. De exemplu din analiza variației consumului de energie pentru sita $\phi 7$ mm în cazul salciei energetice, nu putem indica utilizarea unui anumit ciocan la o anumită turație pentru un consum de energie optim deoarece variația consumului de energie prezintă valori în limite largi indiferent de cei doi parametri.

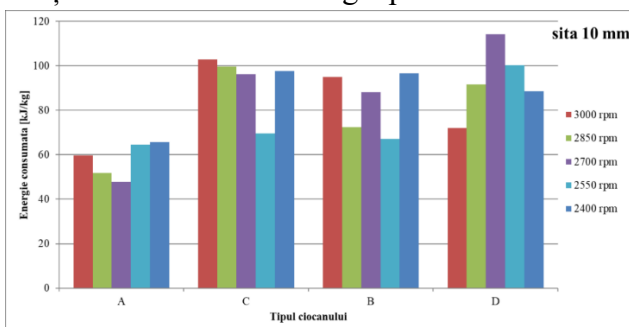


Fig. 5.25. Variația energiei specifice consumate în funcție tipul ciocanului pentru sita de 10 mm, pentru biomasa de miscanthus

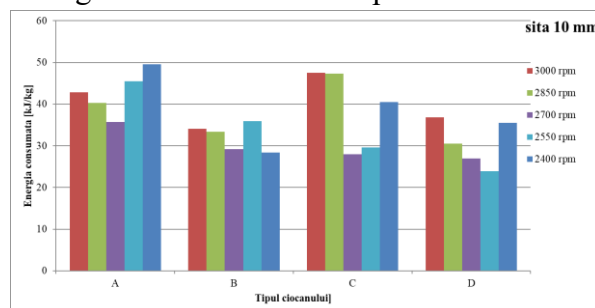


Fig. 5.27. Variația energiei specifice consumate în funcție tipul ciocanului pentru sita $\phi 10$ mm, pentru biomasa de salcie energetică

5.7. Cercetări privind influența parametrilor constructivi ai morii asupra calității materialului mărunțit

Datele experimentale prezentate în tabelele 5.3, 5.4 și anexele 5.1 – 5.4 au fost utilizate în continuare pentru trasarea curbelor de variație ale dimensiunilor medii ale particulelor de material mărunțite în funcție de diametrul orificiilor sitei, pentru ambele tipuri de biomasa. Graficele care reprezintă această variație sunt prezentate în fig 5.29 – 5.36.

5.7.1. Influența diametrului orificiilor sitei asupra dimensiunilor medii ale particulelor mărunțite

Cum este și firesc tendința generală de variație a dimensiunilor particulelor mărunțite este una crescătoare cu creșterea orificiilor sitei utilizate, pentru toate turațiile și ciocanele folosite în experimente.

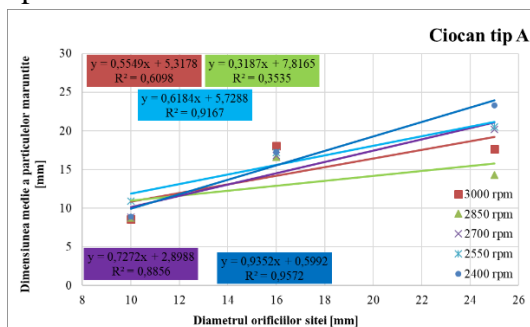


Fig. 5.29. Variația dimensiunii medii ale particulelor mărunțite în funcție diametrul orificiilor sitei pentru ciocanul de tip A și biomasă de miscanthus

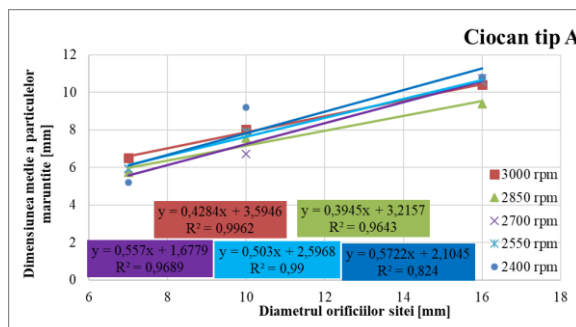


Fig. 5.33. Variația dimensiunii medii a particulelor mărunțite în funcție diametrul orificiilor sitei pentru ciocanul de tip A

Ordinea de dispunere a seturilor de valori pentru fiecare sită utilizată este însă una aleatorie, chiar dacă dreptele sunt relativ apropiate. Este dificil de spus, totuși, care sunt dimensiunile reale ale particulelor mărunțite în situația în care multe particule au o lungime mult mai mare comparativ cu celelalte două dimensiuni și cu diametrul orificiilor sitei.

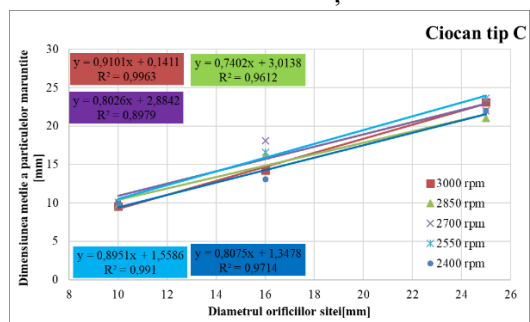


Fig. 5.31. Variația dimensiunii medii ale particulelor mărunțite în funcție diametrul orificiilor sitei pentru ciocanul de tip C și biomasă de miscanthus

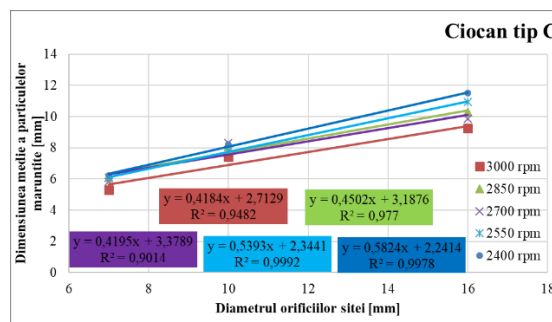


Fig. 5.35. Variația dimensiunii medii a particulelor mărunțite în funcție diametrul orificiilor sitei pentru ciocanul de tip C și biomasă de salcie energetică

În ceea ce privește variația dimensiunilor medii ale materialului mărunțit, la măcinarea salciei, cu diametrul orificiilor sitei, se constată, de asemenea, o variație liniară pentru toate tipurile de ciocane la toate turațiile experimentale.

5.7.2. Influența tipului de ciocan asupra dimensiunilor medii a particulelor mărunțite

Referitor la influența tipului de ciocan, pentru biomasa de miscanthus, asupra dimensiunilor medii ale particulelor mărunțite pentru sita de $\phi 25$ mm se constată o variație a valorilor în limite largi pentru ciocanul de tip A (14 -23 mm) și pentru ciocanul de tip B (16 – 21

mm) comparativ cu ciocanele de tip C și D pentru care dimensiunile particulelor sunt între 21 – 24 mm, respectiv 22.5 – 24.5 mm.

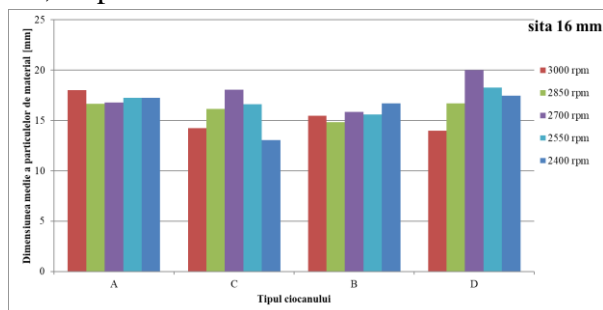


Fig. 5.38. Variația dimensiunii medii a particulelor mărunțite în funcție tipul ciocanului pentru sita cu diametrul orificiilor de 16 mm, biomasa de miscanthus

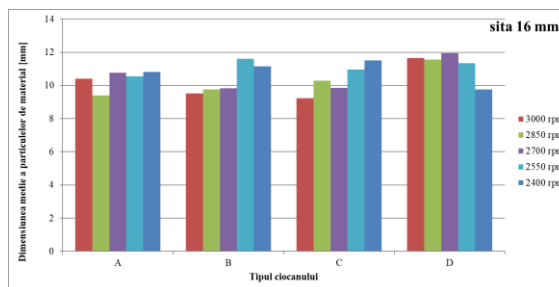


Fig. 5.40. Variația dimensiunii medii a particulelor mărunțite în funcție tipul ciocanului pentru sita cu diametrul orificiilor de 16 mm și biomasa de salcie energetică

Dacă analizăm din punct de vedere al turației rotorului putem spune că dimensiunea particulelor de material mărunțit pentru turația de 2850 rot/min crește odată cu schimbarea tipului de ciocan utilizat la experimente pentru biomasa de tip salcie energetică (de la ciocanul tip A la ciocanul tip D). Valoarea medie a dimensiunilor particulelor de biomasa mărunțite este de aproximativ 9 mm.

5.8. Cercetări privind influența proprietăților fizice ale biomasei asupra consumului specific de energie și a calității materialului mărunțit

5.8.1. Influența umidității materialului asupra consumului de energie la mărunțire

Referitor la influența umidității materialului asupra energiei specifice consumate se constată că nu în toate cazurile există aceeași variație a acestor parametri, astfel că nu se poate trage o concluzie unitară. Este de apreciat că umiditatea nu trebuie să fie nici prea mică, pentru că lignina din componența biomasei poate conduce la consumuri energetice mai mari la valori mici ale umidității.

5.8.2. Influența umidității materialului asupra dimensiunilor medii ale particulelor mărunțite

Se constată astfel că particulele de dimensiuni mari se obțin pentru umidități ale materialului mai mari și dimensiuni mai mici pentru o umiditate mai mică. Pentru obținerea unei mărunțiri corespunzătoare, cu dimensiuni mici ale particulelor de material mărunțit și valori minime ale energiei specifice consumate este necesar ca umiditatea biomasei să fie cât mai redusă. Recomandarea ar fi ca această umiditate să fie sub 10%, sau chiar mai mică pentru ca fibrele tulpinilor de miscanthus să fie cât mai fin mărunțite (divizate).

Dacă analizăm dispersia punctelor experimentale pentru salcie energetică se observă că cele mai multe valori ale dimensiunilor medii ale particulelor mărunțite s-au înregistrat pentru umidități ale materialului cuprinse între 10 – 10.5%. Valorile particulelor de material pentru această situație s-au încadrat în intervalul 5.19 – 6 mm, sub dimensiunea orificiilor sitei (dar foarte aproape de aceasta).

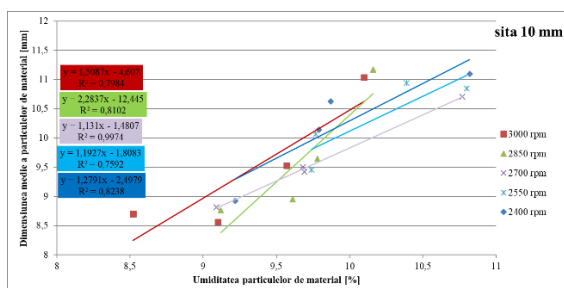


Fig. 5.51. Variația dimensiunii medii a particulelor de material mărunțit în funcție umiditatea acestuia pentru sita de 10 mm în cazul biomasei de miscanthus

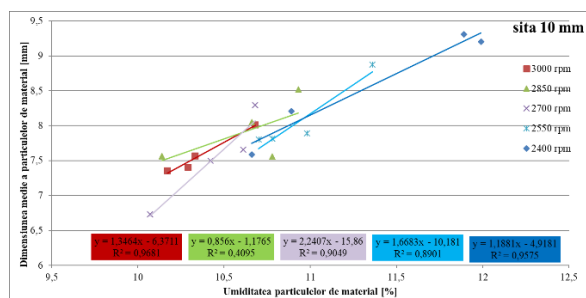


Fig. 5.53. Variația dimensiunii medii a particulelor de material mărunțit în funcție umiditatea acestuia pentru sita de 10 mm și biomasă de salcie energetică

5.9. Cercetări privind influența parametrilor funcționali ai morii asupra indicilor de mărunțire

5.9.1. Influența turației rotorului morii cu ciocane asupra energiei consumate la mărunțire

Variația energiei specifice consumate a fost analizată și în funcție de turația rotorului cu ciocane pentru fiecare tip de ciocan.

Ciocanul de tip B (miscanthus) prezintă variații neuniforme ale curbelor energiei specifice de mărunțire în funcție de turație, observându-se că există valori ale turației care nu pot fi utilizate pentru optimizarea procesului deoarece nu se încadrează în regulile matematice. Făcând abstracție de unele valori ale turației, procesul ar putea fi optimizat în anumite limite, în funcție de sita utilizată și de destinația materialului dacă proprietățile fizice ale acestuia rămân neschimbate.

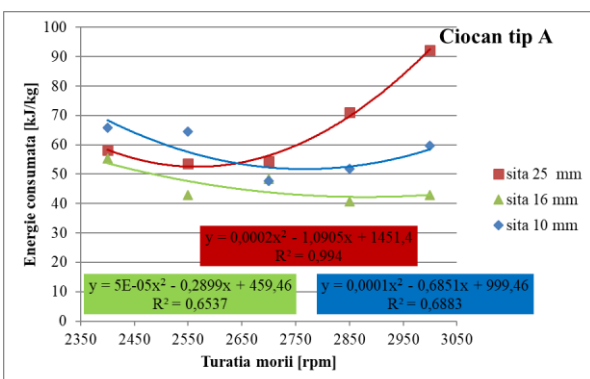


Fig. 5.55. Variația energiei consumate în timpul procesului de mărunțire în funcție de turația rotorului cu ciocane pentru ciocanul tip A, la mărunțirea biomasei de miscanthus

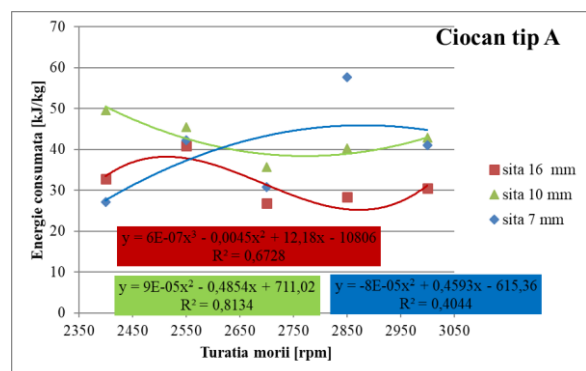


Fig. 5.59. Variația energiei consumate în timpul procesului de mărunțire în funcție de turația rotorului cu ciocane pentru ciocanul tip A

Optimizarea procesului de mărunțire (salcie energetică) din punct de vedere al consumului de energie pentru ciocanul de tip D este posibilă dacă utilizăm sita de 10 mm care prezintă un consum minim de energie la turația rotorului de 2600 rot/min.

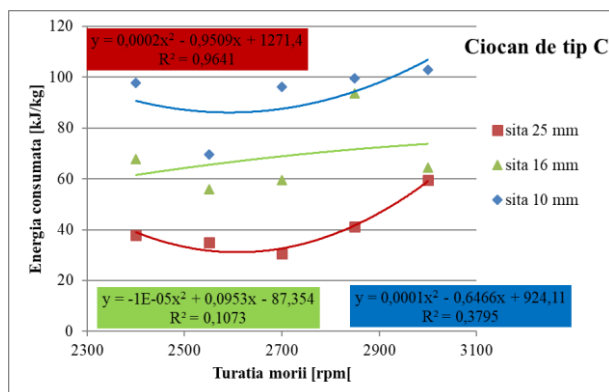


Fig. 5.57. Variația energiei specifice consumate în funcție de turația rotorului cu ciocane pentru ciocanul tip C, la mărunțirea biomasei de miscanthus

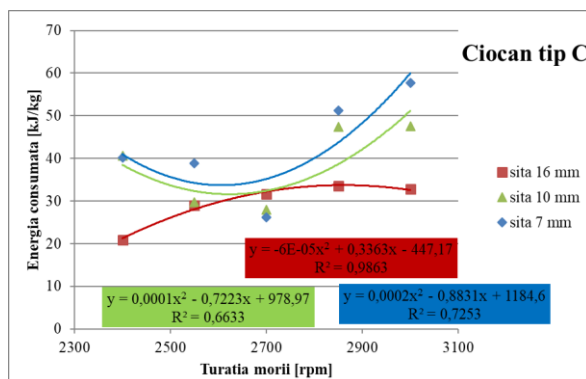


Fig. 5.61. Variația energiei consumate în timpul procesului de mărunțire în funcție de turația rotorului cu ciocane pentru ciocanul tip C

5.9.2. Influența turației rotorului morii cu ciocane asupra dimensiunilor medii ale particulelor mărunțite

Observații atente asupra graficelor de variație a dimensiunilor medii ale particulelor mărunțite arată că există o tendință descrescătoare ale acestora odată cu creșterea turației rotorului, indiferent de sita utilizată, dacă se face abstracție de unele valori ale turației considerate a fi de neutilizat (probabil erori întâmplătoare).

Considerăm că o influență importantă asupra dimensiunilor particulelor mărunțite o are curentul de aer de aspirație, cele mai multe particule de dimensiuni apropiate de dimensiunea orificiilor sitei (sau cu lungime mult mai mare) trecând relativ repede prin orificii, mai ales a debite mici de lucru (miscanthus).

Constatarea generală (salicie energetică) este că cu cât turația rotorului e mai mare cu atât dimensiunile particulelor mărunțite este mai mică, dar acestea sunt foarte apropiate de dimensiunea orificiilor site, ceea ce arată importanța curentului de aer pentru eliminarea de sub sită a particulelor care au trecut prin orificii.

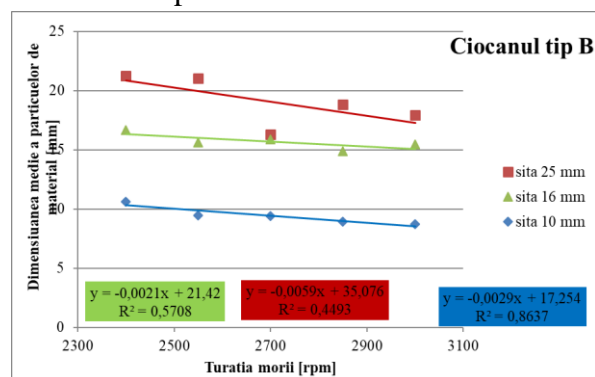


Fig. 5.64. Variația dimensiunii medii a particulelor în funcție de turația rotorului pentru ciocanul de tip B, pentru biomasa de miscanthus

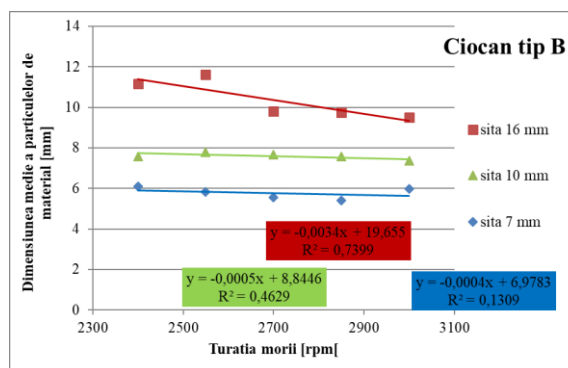


Fig. 5.68. Variația dimensiunii medii a particulelor în funcție de turația rotorului pentru ciocanul de tip B, pentru biomasa de salcie energetică

5.10. Concluzii privind cercetările experimentale

Referitor la analiza privind influența proprietăților fizice ale biomasei asupra consumului specific de energie și a calității materialului mărunțit se poate menționa că pentru influența umidității materialului asupra dimensiunii medii a particulelor mărunțite s-a constatat că particulele de dimensiuni mari se obțin pentru umidități ale materialului mai mari și dimensiuni mai mici pentru o umiditate mai mică. De asemenea, în cadrul acestui capitol s-au verificat teoriile consacrate ale energiei consumate în funcție de condițiile experimentale, determinând astfel coeficienții legilor lui Kick, Bond și Rittinger. În ceea ce privește modificarea coeficientului C_k cu diametrul orificiilor sitei utilizate la rotorul morii cu ciocane, acesta variază în funcție de tipul ciocanului utilizat și turația rotorului. Astfel, pentru ciocanul de tip A, la turația de 2550 rot/min, coeficientul C_k are valori cuprinse între 21.68 kJ/kg la sita $\phi 16$ mm și 29.66 kJ/kg la sita de $\phi 25$ mm. Valorile constantelor C_k , C_R , C_B determinate pentru biomasă de miscanthus cu moara MC-22 (utilizată în experimentele din această teză) pot fi comparate cu valorile obținute de alți cercetători, dar literatura de specialitate nu prezintă date legate de această plantă și nici pentru cazul morilor cu ciocane utilizate la mărunțirea biomasei grosiere. Dacă apreciem coeficientul C_B din punct de vedere al unei anumite turații, de exemplu 3000 rot/min, atunci valorile sunt cuprinse între 3.45 – 5.92 $\text{kJ}\cdot\text{m}^{0.5}/\text{kg}$ pentru sita $\phi 16$ mm., 3.86 – 5.4 $\text{kJ}\cdot\text{m}^{0.5}/\text{kg}$ pentru sita $\phi 10$ mm și 3.31 – 5.29 $\text{kJ}\cdot\text{m}^{0.5}/\text{kg}$ pentru sita $\phi 7$ mm (salcie energetică).

Capitolul 6.- Cercetări privind optimizarea procesului de mărunțire a biomasei folosind mori cu ciocane

6.1. Noțiuni generale privind optimizarea unui proces

În acest capitol s-a încercat parcurgerea etapelor sus menționate pentru procesele de lucru al morilor cu ciocane care realizează mărunțirea materialului vegetal. Având în vedere caracterul intens aleatoriu a multora dintre parametrii care caracterizează procesul de lucru al morilor cu ciocane, este necesară ierarhizarea atentă a obiectivelor cercetării și precizia estimărilor la care este rezonabil să se ajungă. Deoarece modul de abordare a problemei este în mare măsură nou în domeniul proceselor de măcinare (nu numai pentru mori cu ciocane, ci în general pentru diverse tipuri de mori), și totodată destul de general ca să poată fi aplicat în multe domenii de activitate inginerescă, estimarea rezultatelor obținute ar trebui făcută prin prisma realizărilor pretinse de alte lucrări care au vizat modelarea (îmbunătățirea și eventual, optimizarea) proceselor de lucru de acest tip. Deosebit de interesant pentru tema tezei de față, este articolul [26], semnat de o echipă de cercetători iranieni. Autorii [26] studiază variația energiei specifice consumate în morile cu ciocane în funcție de diametrul găurilor sitelor și de proprietățile mecanice ale materialului vegetal măcinat (lucernă). Prima concluzie a articolului [26], este că consumul specific de energie crește odată cu scăderea diametrului orificiilor sitelor folosite. Concluzia, de ordin calitativ s-a găsit și în lucrarea de față. Folosind numai regresia liniară, autorii [26], obțin un coeficient de regresie cu valoarea 0.68–0.7. Folosind regresii neliniare de tip polinomial, s-au obținut coeficienți de regresie peste 0.7, ajungând până la peste 0.9.

6.2. Descrierea procesului de lucru al morilor cu ciocane, ca sistem

Fenomenul de mărunțire a tulpinilor de salcie și miscanthus efectuată pe mori cu patru tipuri de ciocane, a fost studiat după un plan experimental care conține un număr de doisprezece parametri. Lista parametrilor considerați în planul experimental și implicit în modelul teoretic, este dată în tabelul 6.1.

Tabelul 6.1 Lista parametrilor care definesc procesul de mărunțire în mori cu ciocane

Nr.	Numele parametrului	notația	u.m.
1	Diametrul sitei	d_s	m
2	Turația (frecvența de rotație) rotorului	v	s^{-1}
3	Timpul de prelucrare a șarjei	t	s
4	Masa unei șarje	m	kg
5	Debitul de material mărunțit	q	kg/s
6	Tensiunea curentului electric de acționare	U	V
7	Intensitatea curentului de acționare	I	A
8	Puterea curentului de acționare	P	W
9	Energia pe șarjă	E	J
10	Energia consumată pe unitatea de masă prelucrată	ε	J/kg
11	Umiditatea	u	%
12	Distribuția după granulație a materialului mărunțit	g_r	%

S-a măsurat un număr de șase parametri (rubricile hașurate cu portocaliu în tabelul 1) și s-au calculat alți patru parametri (cei hașurați cu verde în tabelul 6.1), folosind relațiile:

$$q = \frac{m}{t} \quad (6.1)$$

$$P = 0.9\sqrt{3}UI \quad (6.2)$$

$$E = P \cdot t \quad (6.3)$$

$$\varepsilon = \frac{E}{m} \quad (6.4)$$

Printre parametrii procesului de lucru al morilor cu ciocane, există un număr mare care au un comportament aleatoriu.

6.3. Modelarea statistică a procesului de mărunțire cu mori cu ciocane

Corelații între parametrii care descriu procesul morilor cu ciocane. Din cei 12 parametri care apar în tabelul 6.1, și care definesc procesul, opt ($q, m, t, P, U, I, E, \varepsilon$) sunt legați prin cele patru relații (1)-(4). Sunt liberi numai patru dintre acești parametri (d_s, v, u, g_r).

Conform experimentărilor, există următoarea clasificare a parametrilor (vezi fig. 6.2):

- parametri de intrare - material: m, t, q, u ;
- parametri de alimentare – energie: P, U, I, E, ε ;
- parametri de comandă și reglaj: d_s, v ;
- parametri de ieșire - calitate: g_r .

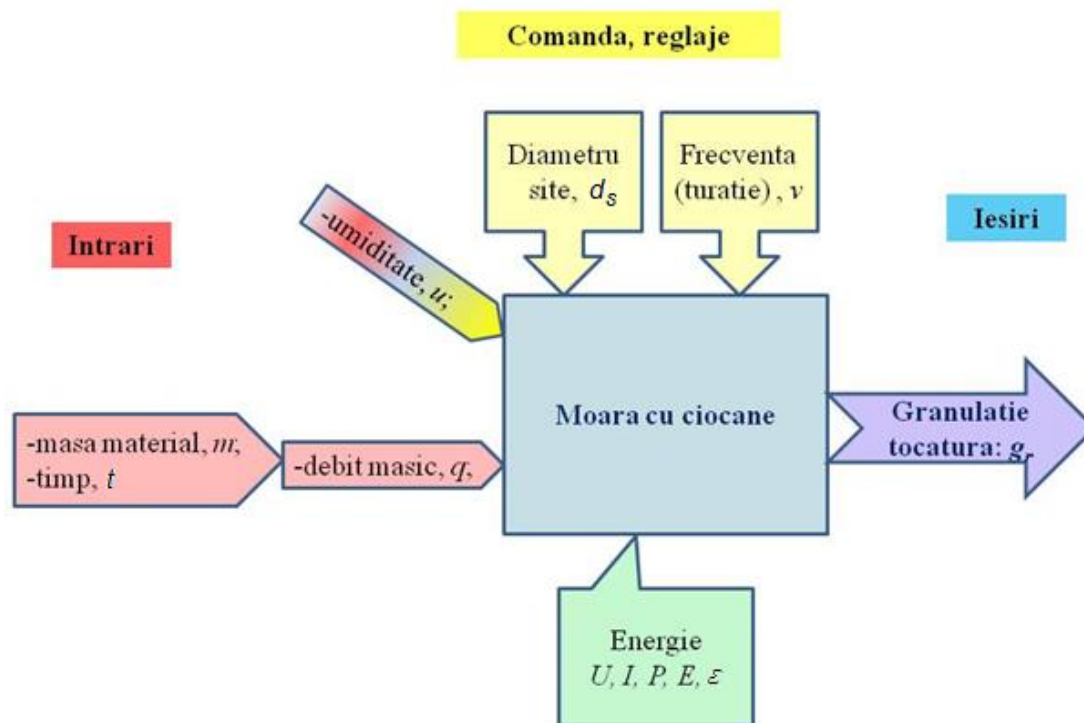


Fig. 6.2 Schema de sistem a morii cu ciocane

Pentru descrierea unor relații interne ale sistemului, ca și pentru descrierea relațiilor dintre mărimile de ieșire și cele de intrare și control, nu există relații fizice aplicabile. Aceasta situație se datorează caracterului profund aleator al procesului de lucru descris.

S-au estimat numai parametrii de dependență statistică a energiei de parametrii de comandă ai procesului (debitul de intrare, diametrul găurilor sitei și turația ca parametri de reglaj). S-a estimat corelația dintre energia consumată în proces și fiecare dintre cei trei parametri, indicele de identificare (pătratul corelației) și panta regresiei liniare, utilizând programul de calcul Excel MS Office, pe baza relațiilor:

$$\text{corr}(x, y) = \frac{\sum_i (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_i (x_i - \bar{x})^2 \sum_i (y_i - \bar{y})^2}} \quad (6.5)$$

$$R^2 = \frac{\sum_i (y_i - \bar{y})^2 - \sum_i (y_i - \hat{y})^2}{\sum_i (y_i - \bar{y})^2} \quad (6.6)$$

$$b = \frac{\sum_i (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum_i (x_i - \bar{x})^2} \quad (6.7)$$

Analiza datelor prezentate în tabelul 6.2 arată o corelație a energiei cu diametrul găurilor sitei, fără excepție negativă, ceea ce dovedește că dacă exista o relație între acești parametri, ea este mai aproape invers proporționalitate. Ținând seama de ambele cazuri (tocătura de miscanthus și cea de salcie energetică), în șapte cazuri din opt corelația arată o dependență inversă între energia consumată și diametrul găurilor sitei folosite. Se poate accepta ipoteza inversei proporționalități între energie și diametrul găurilor sitei folosite în proporție de circa 87.5 %.

Tabelul 6.2 Caracteristici statistice privind corelația între energie și parametrii de reglaj și comandă, la mărunțirea biomasei de *miscanthus giganteus*

Perechea de parametri	Corelația (rel.5)	Coefficientul de determinare R ² (rel.6)	Panta regresiei liniare (rel.7)	Covarianța P (rel.8)	Kurtoza (rel.9)
<i>Ciocan cu colțuri cu o singură muchie</i>					
Energie – Diametru orificii sită	-0.349	0.122	-1.164	-54.999	-0.603
Energie – Turație rotorului	0.232	0.054	1.504	18.798	4.122
Energie – Debit de alimentare	-0.329	0.109	-199.03	-0.286	0.177
<i>Ciocan cu colțuri cu o trei muchii</i>					
Energie – Diametru orificii sită	-0.847	0.717	-2.950	-139.382	-1.270
Energie – Turație rotorului	0.285	0.081	1.934	24.161	-0.618
Energie – Debit de alimentare	-0.845	0.713	-266.34	-1.536	-1.485
<i>Ciocan cu colțuri cu două muchii</i>					
Energie – Diametru orificii sită	-0.627	0.393	-2.969	-140.279	-0.571
Energie – Turație rotorului	0.153	0.024	1.691	21.134	0.591
Energie – Debit de alimentare	-0.635	0.404	-398.64	-0.659	-0.900
<i>Ciocan cu colțuri teșite (oblice)</i>					
Energie – Diametru orificii sită	-0.629	0.396	-2.602	-122.937	-0.516
Energie – Turație rotorului	-0.305	0.093	-2.454	-30.6795	1.445
Energie – Debit de alimentare	-0.838	0.702	-385.43	-1.4706	-0.958

Pentru dependența dintre energie și frecvența rotorului cu ciocane, în cazul în care materialul mărunțit este salcia, corelația este întotdeauna pozitivă (deci sugerează o dependență directă), dar nesemnificativă pentru cazul morilor cu ciocane cu colțuri într-una și două trepte, moderată pentru moara echipată cu ciocane cu colțuri în trei trepte și slabă pentru moara cu ciocane cu colțuri oblice.

Tabelul 6.3 Caracteristicile statistice între energie și parametrii de reglaj și comandă, pentru tulpinile de salcie

Perechea de parametri	Corelația (rel.6.5)	Coefficientul de determinare R ² (rel.6.6)	Panta regresiei liniare (rel.6.7)	Covarianța P (rel.6.8)	Kurtoza (rel.6.9)
<i>Ciocan cu colțuri cu o singură muchie</i>					
Energie – Diametru orificii sită	-0.439	0.193	-1.013	-14.180	-1.098
Energie – Turație rotorului	0.039	0.002	0.095	1.192	-0.137
Energie – Debit de alimentare	-0.690	0.476	-88.970	-0.39831	-1.605
<i>Ciocan cu colțuri cu o trei muchii</i>					
Energie – Diametru orificii sită	-0.334	0.111843	-1.476	-20.658	-0.793
Energie – Turație rotorului	0.084	0.007	1.433	17.914	-0.240
Energie – Debit de alimentare	-0.238	0.057	-83.025	-0.280	-1.407
<i>Ciocan cu colțuri cu două muchii</i>					
Energie – Diametru orificii sită	-0.550	0.303	-0.570	-7.973	-1.192
Energie – Turație rotorului	0.505	0.255	0.151	1.882	-1.274
Energie – Debit de alimentare	-0.481	0.231	-16.645	-0.139	-1.7345
<i>Ciocan cu colțuri teșite (oblice)</i>					
Energie – Diametru orificii sită	0.396	0.157	0.930	12.814	-0.323
Energie – Turație rotorului	0.268	0.072	0.723	8.295	0.001
Energie – Debit de alimentare	-0.468	0.219	-68.113	-0.235	-1.335

6.4 Considerații privind optimizarea procesului de lucru al morilor cu ciocane

Ca *parametri de optimizare*, adică argumentele funcțiilor obiectiv, este obligatoriu de luat în considerare parametrii de comandă ai procesului sau de control (reglaj), adică frecvența ν (respectiv turația rotorului), și diametrul găurilor siteilor folosite, d_s .

Frecvența rotorului este comanda care dă turația sistemului. Tensiunea U și intensitatea, I ale curentului de alimentare se măsoară. Folosind valorile măsurate ale tensiunii și intensității curentului, se calculează puterea și energia, respectiv energia pe unitatea de masă prelucrată ε . Diametrul găurilor sitei folosite d_s se alege, în primul rând pentru calibrarea lungimii maxime a materialului mărunțit.

Funcțiile obiectiv avute în vedere în această etapă de modelare (în care au fost exceptate de la modelare funcții obiectiv precum anduranța, fiabilitatea etc.) sunt de trei tipuri: energetice, economice și de calitate a producției.

Funcțiile obiectiv de tip *energetic* posibil de considerat sunt:

- energia E calculată din parametrii U și I și având ca argumente parametrii ν , d_s , u , eventual m și t , sau sintetic q ;
- energia ε calculată din parametrii U și I și având ca argumente parametrii ν , t , u , eventual m și t , sau sintetic q ;
- energia specifică unității de capacitate de lucru, w

6.4.1. Funcția obiectiv care descrie calitatea procesului de lucru al morilor cu ciocane destinate mărunțirii materialului vegetal

Experiențele efectuate la mărunțirea materialului vegetal cu mori echipate cu diverse tipuri de ciocane au efectuat și sortarea materialului rezultat.

S-a încercat formarea unei funcții direct pe datele existente normalizate, deci prin interpolarea densității de probabilitate. S-a încercat o interpolare polinomială de gradul doi în patru variabile $P = P(x, d_s, \nu, q)$, unde x este dimensiunea maximă a segmentelor de tocătură.

$$P(x, d_s, \nu, q) = P_0 + a_1x + a_2x^2 + b_1d_s + b_2d_s^2 + c_1\nu + c_2\nu^2 + d_1q + d_2q^2 + a_3xd_s + a_4x\nu + a_5xq + b_3d_s\nu + b_4d_sq + c_3\nu q \quad (6.14)$$

Funcția care aproximează prin interpolare (utilizând metoda celor mai mici pătrate) probabilitatea ca particulele mărunțite să aibă dimensiunea maximă inferioară unei dimensiuni date, are forma:

$$P(x, d_s, \nu, q) = 545.009 + 3945.389x - 0.642x^2 - 852.676d_s - 244158.187d_s^2 - 28.399\nu + 0.24\nu^2 + 949.638q - 7802.92q^2 + 155488.247xd_s - 143.957x\nu + 17010.48xq + 181.595d_s\nu - 0.165d_sq + 34.85\nu q \quad (6.14')$$

Efectuând sumările se observă că există și pierderi (fig. 6.5), care la rândul lor pot forma subiectul unei funcții obiectiv care trebuie minimizată.

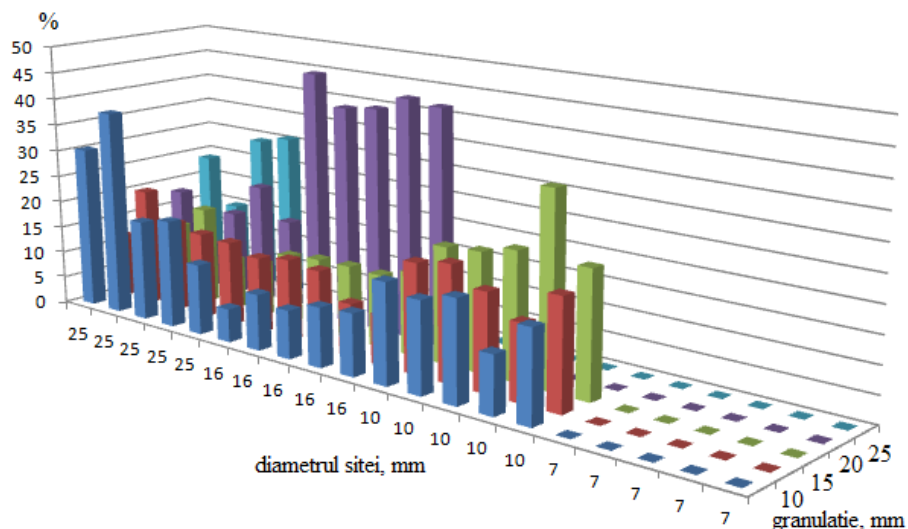


Fig. 6.3. Reprezentare grafică a datelor experimentale privind granulația produsului

Din analiza datelor din tabelul 6.4, se constată că, în ceea ce privește influența în proces, ca mărime absolută, coeficienții polinomiali indică o dependență intensă a funcției (6) de termenii: d_s^2 , d_s , xd_s , q . Ca ordin de mărime, distribuția coeficienților este similară pentru cele patru tipuri de ciocane. Semnele diferă pentru unii coeficienți, dar nu pentru cei dominanți. Coerența cu cazul în care se mărunțesc tulpini de miscanthus este evidentă, în ceea ce privește structura polinomului de interpolare.

Tabelul 6.4 Coeficienții și performanțele soluției de estimare a calității (6.14) pentru cele patru variante de ciocane folosite la mărunțirea tulpinilor de miscanthus

	Ciocan o treaptă	Ciocan cu două trepte	Ciocan cu trei trepte	Ciocan cu colțuri teșite
P_0	545.009	7.647	128.178	-191.809
a_1	3945.389	1840.053	-773.96	4381.88
b_1	-852.676	11921.83	8528.7	13948.771
c_1	-28.399	-1.153	-8.827	5.781
d_1	949.638	-998.537	250.614	-1068.779
a_3	155488.247	135065.701	260449.374	137745.435
a_4	-143.957	-60.465	19.463	-128.117
a_5	17010.48	7892.295	-7283.796	12028.786
b_3	181.595	-114.671	25.341	-20.23
b_4	-0.165	-0.228	-0.065	0.043
c_3	34.85	37.241	-4.106	25.526
a_2	-0.642	-0.803	0.316	0.314
b_2	-244158.187	-233661.571	-395343.692	-409821.124
c_2	0.240	-0.03	0.097	-0.072
d_2	-7802.921	-1786.404	288.491	-1029.165
Corelația cu datele experimentale	0.921	0.911	0.902	0.911
Eroarea maxima,%	29.621	33.895	30.185	28.99

6.4.2. Studiul calității materialului mărunțit cu ajutorul distribuțiilor statistice

În acest paragraf se va descrie modul de utilizare a funcției obiectiv de calitate, dedusă prin metoda celor mai mici pătrate folosind datele experimentale.

Coordonatele punctului de maxim vor fi dependente de parametrul x , care dă comanda beneficiarului, adică dimensiunea limită maximă a fragmentelor. Altfel spus, punctul de maxim de coordonate $(d_{smax}(x), v_{max}(x), q_{max}(x), P_{max}(x))$, este dependent de x .

Notând:

$$\Delta = \begin{vmatrix} 2b_2 & b_3 & b_4 \\ b_3 & 2c_2 & c_3 \\ b_4 & c_3 & 2d_2 \end{vmatrix} \quad \Delta d_s(x) = \begin{vmatrix} -b_1 & -a_3x & b_3 & b_4 \\ -c_1 & -a_4x & 2c_2 & c_3 \\ -d_1 & -a_5x & c_3 & 2d_2 \end{vmatrix} \quad (6.16)$$

$$\Delta v(x) = \begin{vmatrix} 2b_2 & -b_1 & a_3x & b_4 \\ b_3 & -c_1 & a_4x & c_3 \\ b_4 & -d_1 & a_5x & 2d_2 \end{vmatrix} \quad \Delta q(x) = \begin{vmatrix} 2b_2 & b_3 & -b_1 & -a_3x \\ b_3 & 2c_2 & -c_1 & -a_4x \\ b_4 & c_3 & -d_1 & -a_5x \end{vmatrix}$$

se obțin următoarele expresii ale coordonatelor punctului de maxim (care maximizează probabilitatea de a obține fragmente de tocătură de lungime mai mică decât x):

$$d_{smax}(x) = \frac{\Delta d_s(x)}{\Delta}, \quad v_{max}(x) = \frac{\Delta v(x)}{\Delta}, \quad q_{max}(x) = \frac{\Delta q(x)}{\Delta} \quad (6.17)$$

Distribuția materialului mărunțit (produsul principal al procesului de măcinare sau tocare), se caracterizează, în general, statistic arătând în ce măsură moara reușește să reducă dimensiunile geometrice ale materialului prelucrat, uneori încercând chiar să prognozeze distribuția în funcție de parametrii de comandă ai procesului. Una dintre distribuțiile statistice cel mai des folosite în astfel de probleme este distribuția Rosin–Rammler, folosită, de exemplu, în [5].

După calculul efectuat în subcapitolul 4.1, este simplu de luat în considerare o distribuție Rosin–Rammler de forma:

$$P(x, d_s, v, q) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{x}{a(d_s, v, q)} \right)^{b(d_s, v, q)} \right] \quad (6.17')$$

în care a și b sunt funcții de parametri de comandă considerați:

$$a(d_s, v, q) = a_0 d_s + a_1 v + a_2 q \quad b(d_s, v, q) = b_0 d_s + b_1 v + b_2 q \quad (6.17'')$$

Funcțiile a și b pot avea forma (8'') sau orice altă formă adecvată (există o infinitate de astfel de posibilități). Pentru varianta de moară cu ciocane cu colțuri într-o treaptă, în cazul în care materialul mărunțit este miscanthus, se obțin următoarele valori ale coeficienților de regresie: $a_0 = -0.793$, $a_1 = 0.001 \text{ m} \cdot \text{s}$, $a_2 = -0.132 \text{ m} \cdot \text{s/kg}$, $b_0 = -0.574 \text{ m}^{-1}$, $b_1 = 0.04 \text{ s}$, $b_2 = 0.005 \text{ s/kg}$ (rel.6.17').

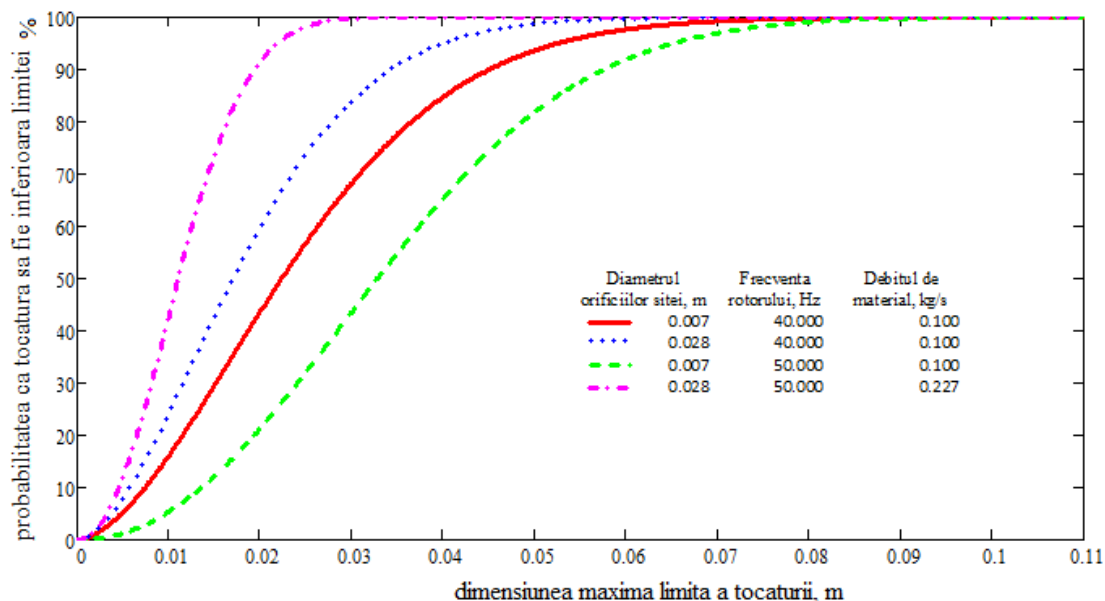


Fig. 6.3 Probabilitatea cumulativă ca măcinișul să aibă lungimea inferioară dimensiunii limită (pentru patru combinații de parametri de comandă)

Rezultate sintetice pentru celelalte cazuri, în care parametrii distribuției Rosin–Rammler (6.17') și (6.17'') s-au calculat minimizând funcționala (de mai jos), se găsesc în tabelul 6.5.

$$\Omega(a_0, a_1, a_2, b_0, b_1, b_2) = \sum_{k=0}^n [M(x_i, d_{s,i}, v_i, q_i, a_0, a_1, a_2, b_0, b_1, b_2) - g_i]^2 \quad (6.18)$$

Tabelul 6.5 Modelarea statistică a calității prin distribuția Rosin–Rammler (rel. 6.18)

Tip ciocan	a_0	a_1	a_2	b_0	b_1	b_2
<i>Miscanthus giganteus</i>						
cu o treaptă	-0.314	0.001	-0.152	0.349	0.043	0.005
cu două trepte	0.389	0.001	-0.202	0.138	0.041	0.005
cu trei trepte	-0.496	0.001	0.005	0.493	0.039	0.005
cu colț teșit	-0.194	0.001	-0.065	0.689	0.045	0.005
<i>Salix viminalis</i>						
cu o treaptă	0.273	0.000	-0.011	1.000	0.055	0.007
cu două trepte	0.229	0.000	-0.003	1.000	0.056	0.007
cu trei trepte	0.247	0.000	-0.006	1.000	0.054	0.010
cu colț teșit	0.349	0.000	0.018	0.922	0.045	0.006

6.5. Studiul optimizării procesului de mărunțire privind consumul de energie

6.5.1. Estimarea funcțiilor obiectiv energetice pentru biomasă de miscanthus

a. **Funcția obiectiv de gradul al doilea în combinația ipotetică (6.19).** Deși nu rezultă o astfel de dependență din estimările statistice din subcapitolul 6.2, se consideră totuși o funcție obiectiv pentru variația energiei de gradul al doilea de tipul:

$$E = c_0 + c_1 \frac{v q}{d_s} + c_2 \left(\frac{v q}{d_s} \right)^2 \quad (6.20)$$

datorită unei intuiții care ducă către aceasta. Pentru identificarea coeficienților c_0 , c_1 și c_2 , se folosește metoda celor mai mici pătrate, minimizând funcționala:

$$\psi = \sum_{i=1}^n \left\{ c_0 + c_1 \frac{v q}{d_s} + c_2 \left(\frac{v q}{d_s} \right)^2 - E_i \right\}^2 \quad (6.21)$$

Anulând derivatele parțiale ale funcționalei (6.21), în raport cu cei trei coeficienți, se obține următoarea formă concretă a funcției obiectiv energetice (6.20):

$$E = E(v, d_s, q) = 407214.521 - 519.604 \frac{v q}{d_s} + 0.514 \left(\frac{v q}{d_s} \right)^2 \quad (6.22)$$

Curba de dependență a energiei (6.22) de argumentul combinat dat în (6.19), este o parabolă care are un punct de minim, de coordonate:

$$\left(\frac{v q}{d_s} \right)_{min} = 480.625 \frac{kg}{m s^2}, \quad E_{min} = 282347.197 J \quad (6.23)$$

Valorile coordonatelor punctului de minim se pot verifica și pe graficul din fig. 6.4.

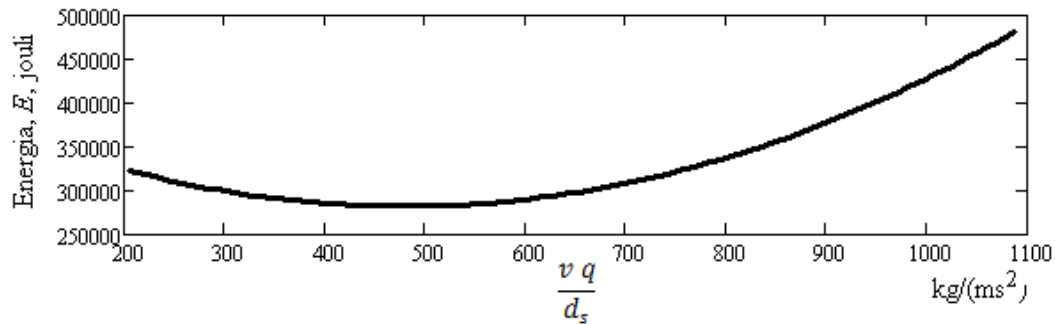


Fig. 6.4 Variția funcției obiectiv energie în raport cu argumentul formulat în (6.19)

b. Funcție obiectiv energetică de gradul al doilea în variabilele d_s , v și q . Se propune o funcție obiectiv de tip energetic de forma polinomială de gradul al doilea cu trei variabile, diametrul găurilor sitei, frecvența rotorului și debitul masic. Pentru calculul coeficienților se urmează aceeași metodă a celor mai mici pătrate folosind aceleași date experimentale ca în paragraful precedent. Se obține următoarea expresie a funcției obiectiv polinomială de gradul al doilea:

$$E = E(v, d_s, q) = E_0 + e_1 d_s + e_2 v + e_3 q + e_{12} v d_s + e_{23} v q + e_{13} q d_s + e_{11} d_s^2 + e_{22} v^2 + e_{33} q^2 \quad (6.25)$$

$$E = E(v, d_s, q) = (1.353 - 64645 d_s - 0.063 v + 8.01 q - 0.61 v d_s - 0.003 v q - 0.179 q d_s + 1754.66 d_s^2 + 0.001 v^2 - 2.88 q^2) \cdot 10^6 \quad (6.25')$$

În valoare absolută, coeficientul dominant aparține termenului în d_s^2 , urmat de termenul în d_s și la mare distanță de termenii în q și q^2 . Restul termenilor au coeficienți ne semnificativi pe lângă aceștia. Totuși, influența lor în valoarea polinomului nu este ne semnificativă deoarece frecvența are valori cuprinse în 40 și 50 Hz, pe când diametrul găurilor are valori cuprinse între 0.007 și 0.025, iar debitul între 0.104 și 0.357. Așadar, influența fiecărei variabile în valoarea energiei, pe forma polinomială adoptată prin ipoteza statistică, este o problema mai complicată.

Minimizarea prin metode numerice (folosind programul Mathcad), conduce, pentru varianta de moară cu ciocane cu colțuri teșite, la coordonatele unui proces de lucru inclus în intervalul tridimensional experimental ($d_{smin}=0.007$ m, $v_{min}=40$ Hz, $q_{min}=0.357$ kg/s) cu o energie corespunzătoare $E_{min}= 29932.549$ J.

c. Funcție energetică având ca argument combinația parametrică rezultată din interpretările statistice. În acest paragraf se obține o formă a funcției energie consumată în procesul de mărunțire, exact în același fel ca în paragraful 6.5.1, cu singura modificare dată de combinația de parametri care constituie argumentul funcției de gradul al doilea. În locul combinației (6.19), se considera combinația (6.27):

$$E: \frac{v}{q d_s} \quad (6.27)$$

Această combinație este indicată de raționamentele statistice din subcapitolul 6.2. Procedând exact ca mai înainte, se obține următoarea expresie a funcției energetice:

$$E = E(v, d_s, q) = 265589.123 - 0.135 \frac{v}{q d_s} + 0.00007686 \left(\frac{v}{q d_s} \right)^2 \quad (6.28)$$

d. Modelarea statistică a energiei consumate prin funcții politrope. Una dintre cele mai folosite variante de modelare statistică a rezultatelor experimentale este modelarea prin funcții politrope. Aceste funcții sunt de forma produselor unor puteri reale ale variabilelor și au preluat numele particular din termodinamică, unde sunt folosite la formularea unor legi ale proceselor politropice. Forma generală a funcțiilor politrope este:

$$f(x_1, x_2, \dots, x_n) = a \prod_{i=1}^n x_i^{c_i}, \quad x_i > 0, c_i \in R \quad (6.31)$$

Forma concretă a funcției politrope, pentru moara cu ciocane dotată cu ciocan cu o treaptă, este:

$$E(v, d_s, q) = 2.002 d_s^{a-0.175} v^{2.495} q^{c-0.918} \quad (6.34)$$

6.5.2. Estimarea funcțiilor obiectiv energetice pentru biomasa de salcie

În acest subcapitol se dau tabelele cu rezultate sintetice obținute pentru tulpinile (biomasa) de salcie, exact după aceeași metodologie ca în cazul datelor experimentale corespunzătoare tulpinilor (biomasa) de miscanthus.

Tabelul 6.8 Coeficienții și performanțele funcției obiectiv energetice (6.25) pentru cele patru variante de ciocane folosite la morile care au tocat tulpini de salcie

$\times 10^6$	Ciocan o treapta	Ciocan doua trepte	Ciocan trei trepte	Ciocan cu dreptunghi
E_0	-2.324	-0.678	1.972	-0.144
e_1	38.011	-34.6	-84.685	-5.706
e_2	0.115	0.055	-0.097	0.012
e_3	-1.627	-1.509	4.929	-0.537
e_{12}	-0.527	0.834	1.336	0.467
e_{23}	-0	-0	-0	0
e_{13}	0.032	0.011	-0.127	-0.042
e_{11}	-806.328	-421.372	941.138	-745.843
e_{22}	-0.001	-0.001	0.001	0
e_{33}	-0.671	0.599	0.605	3.352
Corelația cu datele experimentale	0.963	0.944	0.940	0.959
Eroarea maxima,%	13.463	10.982	20.431	20.083
Coeficient de regresie	0.928	0.891	0.884	0.919
$d_{s,min}$	0.016	0.021	0.009	0.016
v_{min}	40	62.388	50	40
q_{min}	0.417	0.665	0.444	0.332
E_{min}	65561.282*	127949.998	46173.837**	20944.201***

*Valoare care este un minim pe frontieră deoarece extremumul global se obține pentru debit negativ.

**Valoare obținută prin minimizare, pe frontiera domeniului. Punctul critic rezultat prin anularea sistemului de ecuații cu derivate parțiale nu este un punct de extremum ci, un punct șa.

***Valoare minimă situată pe frontieră, obținută prin minimizare numerică. Punctul de extremum obținut prin anularea derivatelor parțiale nu este un minim și se află în afara domeniului mărginit de extremele datelor experimentale.

Coeficientul dominant, în toate cele patru cazuri (tabelul 6.8), este coeficientul termenului în d_s^2 , urmat de termenul în d_s și la mare distanță de termenii în q și q^2 .

Totuși influența lor în valoarea polinomului nu este nesemnificativă deoarece frecvența are valori cuprinse în 40 și 50 Hz, pe când diametrul găurilor are valori cuprinse între 0.007 și 0.025, iar debitul între 0.104 și 0.357. Așadar influența fiecărei variabile în valoarea energiei, pe forma polinomială adoptată prin ipoteza statistică, este o problemă mai complicată.

În tabelul 6.8 se dau și performanțele procesului modelat, în termenii energiilor optime (minime) și coordonatelor (parametrilor de reglaj) punctului optimal. Se poate observa că trei dintre variantele de ciocane prezintă puncte de minim de valori energetice apropiate (între 20944 J și 127950 J): ciocanul cu colțuri teșite și ciocanul cu două trepte.

6.6. Analiza de regresie pentru funcția energetică a mărunțirii biomasei

Pentru a opera cât mai compact și în limitele unor algoritmi de lucru standardizați și confirmați prin largă utilizare, am folosit algoritmul de analiza regresiei din [21,47]. Calculul complet se dă pentru funcția energetică corespunzătoare morii echipate cu ciocan cu o treaptă. Rezultatele se dau sintetic pentru celelalte șapte cazuri examinate. Datele inițiale necesare calculului sunt, ca și la celelalte metode aplicate, vectorii datelor experimentale, variabilele independente, d_s , v , q , respectiv variabila dependentă, E , adică energia consumată pentru

desfășurarea procesului. Corelația dintre șirul datelor empirice (energiile) și șirul datelor prognozate are valoarea 0.882, eroarea maximă, 38.8%.

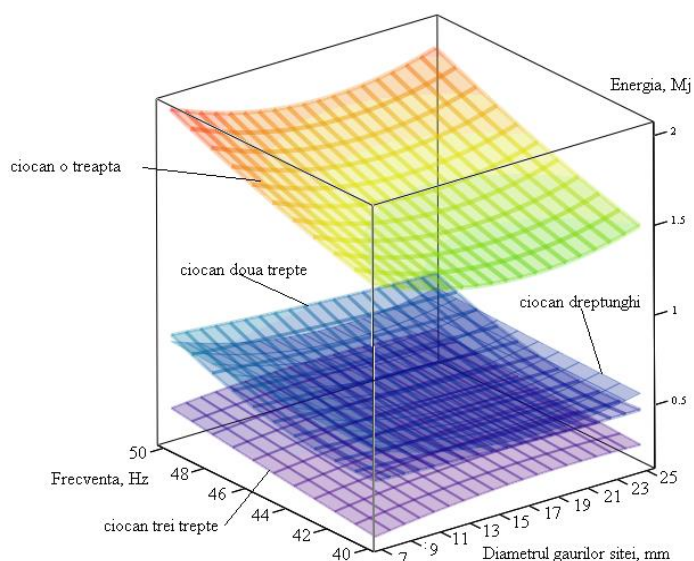


Fig.6.10 Reprezentarea ca suprafață în spațiul tridimensional a funcției energetice, ca funcție parțială de diametrul găurilor sitei și de frecvență. Reprezentarea corespunde pentru debitul de tulpini de miscanthus constant egal cu 0.166 kg/s.

În cazul funcțiilor energetice calculate prin analiza regresiei, cele mai mari valori ale energiei consumate în procesul mărunțirii biomasei de miscanthus, se obțin pentru varianta cu ciocane cu două trepte, dar regula nu este valabilă pe întreg intervalul de lucru.

Capitolul 7 - Concluzii generale; Contribuții; Recomandări; Perspective

7.1. Concluzii generale privind cercetările teoretice și experimentale

1. Procesul de mărunțire are ca principale utilități: reducerea volumului biomasei recoltate și pregătirea materialului pentru de procesul de peletizare. Articolele de specialitate subliniază faptul că gradul de mărunțire ideal diferă în funcție de materialul folosit, atât în consumul energetic din procesul de peletizare, cât și în calitatea peleților rezultați. Astfel, se observă o necesitate foarte mare privind studierea particularităților diferitelor tipuri de materiale trecute prin fluxul tehnologic de producție a peleților.
2. Miscanthus este considerată una dintre principalele plante cu potențial ridicat pentru utilizarea ca materie primă de obținere peleți. Ca atuuiri principale putem enumera: plantare relativ ieftină, posibilitatea creșterii culturilor de Miscanthus în locuri în care alte culturi nu ar putea supraviețui, cantitatea foarte mare de biomasă care este produsă, și producția unor peleți de calitate.
3. Salcia energetică – *Salix viminalis* este o salcie cu caracteristici energetice, utilizată în producția de biomasă. Salcia energetică, după Miscanthus, este cea de-a doua plantă ca popularitate în studiile și cercetările de specialitate, în special datorită proprietăților. Dintre principalele atuuiri care fac din salcia energetică o bună sursă pentru producția de biomasă

putem enumera: creșterea de 3 – 3.5 cm/zi, rezistența la boli și la condiții climatice, o putere calorică de circa 5000 kca/kg, ciclul de viață al unei culturi este de 25-30 ani.

7.2. Contribuții personale și originale ale lucrării

1. Referitor la echilibrarea la șoc a ciocanelor s-a putut constata că datorită unor dimensiuni identice ale ciocanelor de tip A, B, C și D valorile calculate ale lui l , c și f sunt și ele identice;
2. S-a realizat o modelare matematică a procesului de lucru al morilor cu ciocane, prin analiză dimensională utilizând teorema Π . Această analiză a urmărit anticiparea puterii necesare de acționare a morii atât pentru mărunțirea biomasei de *miscanthus* cât și pentru mărunțirea de salcie energetică.
3. S-a realizat simularea solicitărilor în organele de lucru ale morilor cu ciocane prin aplicarea metodei cu element finit cu ajutorul programului SolidWorks 2016 Premium. S-a constatat o deformare maximă de 0,036 mm la vârful ciocanelor datorată forței centrifuge din timpul funcționării.
4. S-a aflat funcția obiectiv care descrie calitatea procesului de lucru al morilor cu ciocane destinate mărunțirii materialului vegetal. S-a încercat formarea unei funcții direct pe datele existente normalizate, deci prin interpolarea densității de probabilitate. Interpolarea a dat rezultate nesatisfăcătoare (corelația între datele originale și cele obținute prin interpolare a fost 0.671, iar eroarea maximă a ajuns la aproape 65%). Pentru aceste motive, s-a făcut același tip de interpolare pentru probabilitatea de a obține tocătură cu dimensiunea mai mică decât dimensiunea x , propusă de beneficiar. S-a obținut funcția (6.14') a cărei corelație cu datele experimentale este 0.921, eroarea maximă fiind de 29.59%, considerate ca valori acceptabile.
5. Pornind de la relațiile consacrate ale lui Kick, Bond și Rittinger care descriu consumul de energie la mărunțire s-au determinat coeficienții acestor relații având în vedere valori reale (determinate experimental) pentru energia de mărunțire a biomasei;
6. Pentru biomasa de *miscanthus* s-a concluzionat faptul că:
 - pentru ciocanul de tip A, la turația de 2550 rot/min, coeficientul C_k are valori cuprinse între 21.68 kJ/kg la sita $\phi 16$ mm și 29.66 kJ/kg la sita de $\phi 25$ mm,
 - coeficientul C_R , din relația lui Rittinger, variază în limitele 0.82 – 2.69 kJ·m/kg, în funcție de tipul ciocanului și turația rotorului, pentru sita de $\phi 25$ mm, respectiv 0.71 – 2.02 kJ·m/kg, pentru sita de $\phi 16$ mm, și între 0.45 – 1.34 kJ·m/kg pentru sita de $\phi 10$ mm,
7. Pentru biomasa de salcie energetică se poate spune că:
 - coeficientului C_B în valoare de 6.52 kJ·m^{0.5}/kg pentru ciocanul de tip A și turația de 2400 rot/min și un minim de 2.57 kJ·m^{0.5}/kg pentru ciocanul de tip C și turația de 2400 rot/min;
8. S-a realizat determinarea distribuției materialului mărunțit pe clase de dimensiuni și s-a corelat cu legea Rosin – Rammler.

9. S-a realizat gradul de influență al parametrilor constructivi ai morii (diametrul orificiilor sitei și tipul ciocanului) asupra consumului de energie la mărunțire și asupra calității materialului mărunțit.
10. Referitor la influența tipului de ciocan asupra dimensiunilor medii ale particulelor mărunțite pentru sita de $\phi 25$ mm s-a constatat o variație a valorilor în limite largi pentru ciocanul de tip A (14 -23 mm) și pentru ciocanul de tip B (16 – 21 mm) comparativ cu ciocanele de tip C și D pentru care dimensiunile particulelor sunt între 21 – 24 mm, respectiv 22.5 – 24.5 mm.
11. Pentru cazul utilizării site de $\phi 16$ mm variația dimensiunii particulelor de material mărunțit (*salix viminalis*) se prezintă în limitele 9 – 12 mm indiferent de turația rotorului sau tipul ciocanului. Cel mai mare grad de mărunțire este dat de ciocanul de tip A la turație de 2850 rot/min, iar cel mai mic grad de mărunțire este dat de ciocanul de tip D la turația de 2700 rot/min.

7.3. Recomandări și perspective viitoare de cercetare

Pentru activități de cercetare viitoare se recomandă:

1. Continuarea cercetărilor privind procesul de lucru al morilor cu ciocane prin testarea morii cu ciocane folosind și alte tipuri de biomasă în vederea corelării datelor referitoare la influența diferiților parametri constructivi și funcționali ai morii cu ciocane asupra consumului energetic și asupra calității materialului măcinat.
2. Rezolvarea problemelor de echilibrare a ciocanelor și a rotorului în vederea asigurării unei funcționări uniforme;
3. Continuarea și extinderea cercetărilor privind comportarea plantelor energetice în timpul procesului de mărunțire.
4. Realizarea unor modele de lucru ale procesului de mărunțire a biomasei prin analize de modelare și simulare privind procesul de lucru al morilor cu ciocane.

BIBLIOGRAFIE SELECTIVĂ

- [1.] Bitra V.S.P., Womac A. R., Chevanan N., Miu P.I., Igathinathane C., Sokhansanj Sh., Smith D.R., *Direct mechanical energy measures of hammer mill comminution of switchgrass, wheat straw, and corn stover and analysis of their particle size distributions*, Powder Technology, vol. 193, Issue 1, 2009, p. 32-45
- [2.] Ioan Budacan, Ioan Deac – *Numerical Modeling of CFD model Applied to a Hammer mill*, Buletin USAMV seria Agriculture 70 (1)/2013, pag. 273 -282, ISSN 1843 – 5246
- [3.] Mihai Chitoiu, Gheorghe Voicu, Georgiana Moiceanu, Gigel Paraschiv, Mirela Dinca, Valentin Vladut, Paula Tudor – *Energy consumption analysis on energetic plant biomass grinding using hammer mills*, Scientific Buletin of UPB, Series D, acceptat spre publicare.
- [4.] Carte tehnica MC 22 Bontida - <http://tractorul.ro/moara-cu-ciocane-mc-22.html>
- [5.] Cafferty K.G., Jacobson J., Searcy E., Yancey N.A., *Feedstock Supply System Design and Economics for Conversion of Lignocellulosic Biomass to Hydrocarbon Fuels. Conversion Pathway: Fast Pyrolysis and Hydrotreating Bio-oil Pathway: The 2017 Design Case*, Report

- number: INL/EXT-14-31211, Affiliation: Idaho National Laboratory, U.S. Department of Energy, Bioenergy Technologies Office, 2014
- [6.] Chenchen Liu, Liang Xiao, Jianxiong Jiang, Wangxia Wang, Feng Gu, Dongliang Song, Zili Yi, Yongcan Jin, Laige - *Biomass properties from different Miscanthus species*, *Food and Energy Security*, Vol 2, No 1, may 2013, pag 12 -19, DOI: 10.1002/fes3.19 (*Food and Energy Security* 2013; 2(1): 36–43)
- [7.] Chelemen, I. (1983). *Masini si instalatii zootehnice - Partea II – CAP. 2, 3, 4*
- [8.] **Dabbour M.I., Bahnasawy A., Ali S., El-Haddad Z.**, *Grinding Parameters and their Effects on the Quality of Corn for Feed Processing*, *Journal of Food Processing & Technology*, 2015
- [9.] Darlington R. B., Hayes F. A., *Regression Analysis and Linear Models, Concepts, Applications, and Implementation*, The Guilford Press, 2017 – CAP. 6
- [10.] Ioan Drocas, Marian Ovidiu, Ovidiu Ranta, Mircea Valentin Muntean - *Determination of Specific Energy Consumption and Grain Size for Corn Grinding Using the Hammer Mill MB7.5*, *Buletinul USAMV seria Agriculture 71 (2)*, 2014, ISSN 1843 – 5246, DOI: 10.15835/bussvmcn-agr:10888
- [11.] Ghorbani Z., Masoumi A. A., Hemmat A., *Specific energy consumption for reducing the size of alfalfa chops using a hammer mill*, *Biosystems Engineering*, vol 105, 2010, p. 34-40
- [12.] Hajratwala B. R., *Particle Size Reduction by Hammer Mill: Effect of Output Screen Size, Feed Particle Size, and Mill Speed*, *Journal of Pharmaceutical Sciences*, vol. 71, Issue 2, 1982, p. 188-190
- [13.] Macmanus Ndukwu, N. N. (2016, Iulie 28). *Measurement of energy requirements for size reduction of palm kernel and groundnut shells for downstream bioenergy generation*. *Journal of Engineering and Technology Research*
- [14.] P. I. Miu, A. R. Womac, I. Cannayen, S. Sokhansanj, “*Analysis of Biomass Comminution and Separation Processes in Rotary Equipment – A Review*”, ASABE Meeting Presentation, 2006
- [15.] Moiceanu G., Voicu Gh., Paraschiv G., Dinca M.1), Chitoiu M., Vlăduț V., *Mechanical properties of energetic plant stems – review*, *INMATEH*, no. 1/2015
- [16.] Moiceanu G., Voicu Gh., Chițoiu, Paraschiv G., Dincă M., Vlăduț V. - *Modifying equilibration conditions according to rotor rotation angle on mc 22 hammer mill*, *International Symposium ISB-INMATEH 2017*
- [17.] Alicia Murphy, Cherie Collins, Andrew Philpotts, Alice Bunyan, Dave Henman – *Influence of hammer mill screen size and grain (wheat or sorghum) on the growth performance of male grower pigs*, Report prepared for the Co-operative Research Centre for an Internationally Competitive Pork Industry, may 2009;
- [18.] Mg Shashidhar, M. Krishna, Girish Gh.G., Manohar B., *Grinding of Coriander Seeds: Modeling of Particle Size Distribution and Energy Studies*, *Particulate Science And Technology* 31(5), 2013
- [19.] Shi F., *A review of the application of the JK size-dependnt breakage model part 3: Comminution equipment modelling*, *International Journal of Mineral Processing*, vol. 157, 2016, p. 60-72
- [20.] Gh. Voicu, T. C. (1995). *Utilaje pentru morarit si panificatie*
- [21.] Gh. Voicu, G. Moiceanu, M. Chițoiu, G. Paraschiv, D.C. Carp-Ciocârdia - *A study into hammer mill rotor and hammer construction and shock equilibration*, *The 7th International Conference on Computational Mechanics and Virtual Engineering COMEC 2017 Brasov, ROMANIA*, 16-17 November 2017

LISTA DE LUCRĂRI
Drd. Ing. Mihai CHIȚOIU

1. Gheorghe Voicu, Georgiana Moiceanu, Mihai Chitoiu, Petru Cardei - Some statistical grinding parameters of hammer mill for miscanthus giganteus and salix viminalis stalks, *Engineering for rural development*, Jelgava 23 – 25.05.2018 – *trimis spre acceptare*
2. Mihai CHIȚOIU , Gheorghe VOICU, Georgiana MOICEANU, Gigel PARASCHIV, Mirela DINCĂ, Valentin VLADUȚ , Paula TUDOR - Energy consumption analysis on energetic plant biomass grinding using hammer mills, *trimis spre acceptare la Buletinul Universității Politehnica din București*, 2018
3. Moiceanu G., Voicu Gh., Chitoiu M., Paraschiv G., Dincă M., Vlăduț V. - modifying equilibration conditions according to rotor rotation angle on mc 22 hammer mill, , *International Symposium ISB-INMA TEH Agricultural and Mechanical Engineering*, 2017, 26-28 October 2017, Bucharest, Romania, ISSN 2344-4118, pag. 829 – 834,
4. Simion G.A.C, Dincă M., Moiceanu G., Chitoiu M., - Renewable energy in context of stable development, *International Symposium ISB-INMA TEH Agricultural and Mechanical Engineering*, 2017, 26-28 October 2017, Bucharest, Romania, ISSN 2344-4118, pag. 347 – 352,
5. G. Moiceanu, M. Chitoiu, G. Voicu, G. Paraschiv, V. Vlăduț, I. Găgeanu, M. Dincă, - Comparison between miscanthus and willow energy consumption during grinding, 46 th *International Symposium “Actual Tasks on Agricultural Engineering”*, 27th February – 1 st March 2018, pag. 369 – 378, ISSN 1848-4425, <http://atae.agr.hr>, (ISI Proceedings, ISI - Index to Scientific and Technical Proceedings, CAB International – Agricultural Engineering Abstracts, Cambridge Scientific Abstracts – InterDok).
6. Chitoiu M., Moiceanu G., Voicu Gh., Paraschiv G., Vlăduț V., Găgeanu I., aspects regarding biomass from energetic plants (energetic willow – salix minimalis) grinding process for pelletization, *Annals of the University of Craiova – Agriculture, Montanology, Cadastre Series*. Vol. XLVII/2, Working group no. 4 – Management, agriculture mechanization and cadastre, pp. 295-301, ISSN 1841-8317, ISSN CD-ROM 2066-950X (B+, cod CNCSIS 502)
7. Găgeanu I., Chitoiu M., Gageanu G., Vladut V., Voicu Gh., Bunduchi G., Grigore I. – Aspects on obtaining the raw material for pelletizing, *Analele Universitatii din Craiova, seria Agricultură – Montanologie – Cadastru (annals of the University of Craiova – Agriculture, Montanology, Cadastre Series)* Vol XLVI 2016, pag 379 – 382.
8. Voicu Gh., Moiceanu G, Chitoiu M., Paraschiv G., Carp – Ciocârdia D.C. – A study into hammer mill rotor and hammer construction and shock equilibration, *The 7th International Conference on Computational Mechanics and Virtual Engineering COMEC 2017 Brasov, ROMANIA*, 16-17 November 2017vol.I; pag. 104-109
9. Moiceanu, Gh. Voicu, M. Ferdes, G. Paraschiv, M. Dincă, V. Vladuț, I. Gageanu, M. Chitoiu - Comparative study on biogas production using cow and swine manure mixed with Miscanthus x giganteus as substrate, *Romanian Biotechnological Letters*, Vol. 21 (5), pp. 11968-11973, 2016, F.I. = 0.404, ISSN 1224 – 5984, WOS:000387969500020

10. Dincă M., Paraschiv G., Voicu Gh., Moiceanu G., Ungureanu N., **Chitoiu M.**, Prevention measures of environmental risks generated by uncontrolled storage of wastes – a review, *Journal of Engineering Studies and Research*, Vol. 21 (3), pp. 22-27, 2015, ISSN 2068-7559 (indexed and abstracted in the International Data Bases: ProQuest CSA (SUA), VINITI (RUSIA), EBSCO, Index Copernicus, Academic Journals Database, Directory of Research Journal Indexing (DRJI)).
11. Moiceanu G., Voicu Gh., G. Mușuroi, G. Paraschiv, M.N. Dincă, G. Ipate, **M. Chitoiu**, Energy consumption evaluation during mechanical processing of agricultural vegetal biomass, *University Politehnica of Bucharest Scientific Bulletin, Series D: Mechanical Engineering*, Vol. 78, Iss. 3, pp.215 – 222, 2016, ISSN 1454-2358 (Ulrich`s International Periodicals Directory, Scopus, Inspec, Metadex, Elsevier sciencess bibliographic databases, Engineering village, Cambridge scientific abstracts, Compendex).
12. Moiceanu G., Voicu Gh., Paraschiv G., Dinca M., Chitoiu M., Vladut V., **Mechanical properties of energetic plant stems – review**, *INMATEH – Agricultural Engineering*, Vol. 45, No.1, pp. 149 – 156, 2015, ISSN e. 2068-2239.
13. Chitoiu M., Voicu Gh., Paraschiv G., Moiceanu G., Vlăduț V., Matache M., Grigore I., Bunduchi G., Vocea I., Găgeanu I., **Comparison of energy consumption of a hammer mill during chopping miscanthus stalks and energetic willow**, *Proceedings of the 45th Symposium "Actual Tasks on Agricultural Engineering"*, Opatija, Croatia, pp. 259-267, 2017, ISSN 1848-4425, <http://atae.agr.hr>, (ISI Proceedings, ISI - Index to Scientific and Technical Proceedings, CAB International – Agricultural Engineering Abstracts, Cambridge Scientific Abstracts – InterDok).
14. Chitoiu M., Voicu Gh., Moiceanu G., Paraschiv G., Dincă M., Găgeanu I., Vlăduț V., **The influence of the speed of revolution of a hammer mill on energetic willow chippings**, *Proceedings of 6th International Conference on Thermal Equipment, Renewable Energy and Rural Development TE-RE-RD 2017*, pp.337-342, 2017, ISSN 2457 – 3302, ISSN-L 2457 – 3302 (Indexed Copernicus – BDI, EBSCO Publishing Data Bases).
15. Chitoiu M., Voicu Gh., Paraschiv G., Moiceanu G., Dincă M., Bunduchi G., Grigore I., Găgeanu G., Vlăduț V., **Variation of Miscanthus and energetic willow chippings depending on two functional parameters**, *International Symposium ISB-INMA TEH - Agricultural and Mechanical Engineering*, pag. 785-790, 27-29 oct. 2016, Bucharest
16. Chitoiu M., Voicu Gh., Paraschiv G., Moiceanu G., Vlăduț V., Matache M., Marin E., Bunduchi G., Danciu A., Vocea I, Găgeanu I. **Energy consumption of a hammer mill when chopping mischantus stalks**, *Proceedings of the 44 th.Symposium „Actual Tasks on Agricultural Engineering”*, Opatija, Croatia, 23 - 26 February 2016, pp.215-224, ISSN 1848-4425; (Thomson Reuters: Conference Proceedings Citation Index and ISTP, CAB International - Agricultural Engineering Abstracts.) <http://atae.agr.hr>.
17. Georgiana Moiceanu, Gh. Voicu, G. Paraschiv, M. Dinca, M. Ferdes, **M. Chitoiu**, G. A. Constantin, G. Musuroi **Energy consumption to the formation of solid-liquid system based on vegetal biomass** *Proceedings of the 43rd.Symposium „Actual Tasks on Agricultural Engineering”*, Opatija, Croatia, 24 - 27 February 2015, pp.645- 656, ISSN 1848-4425; (Thomson Reuters: Conference

Proceedings Citation Index and ISTP, CAB International - Agricultural Engineering Abstracts.), WOS:000373450700059 <http://atae.agr.hr>.

18. G. Moiceanu, Gh. Voicu, G. Mușuroi, G. Paraschiv, M.N. Dincă, G. Ipate, **M. Chițoiu**, Energy consumption evaluation during mechanical processing of agricultural vegetal biomass, University Politehnica of Bucharest Scientific Bulletin, Series D: Mechanical Engineering, Vol. 78, Iss. 3, pp.215 – 222, 2016, ISSN 1454-2358 (Ulrich`s International Periodicals Directory, Scopus, Inspec, Metadex, Elsevier sciencess bibliographic databases, Engineering village, Cambridge scientific abstracts, Compendex).

19. G. Moiceanu, Gh. Voicu, G. Paraschiv, M. Dinca, **M. Chitoiu** Preliminary researches regarding Miscanthus stalks grinding with centrifugal impact mill 4th International Conference on Thermal Equipment, Renewable Energy and Rural Development TE-RE-RD, 4-6 June 2015, Argeș. ISSN 2359-7941 (EBSCO Publishing).

20. **Chițoiu M.**, Voicu Gh., Moiceanu G., Vlăduț V., Danciu A., Grigore I, Considerations regarding the work process of drum/disk type vegetal mass grinding apparatus - Research People and Actual Tasks on Multidisciplinary Sciences, Proceedings of the Fifth International Conference, 2015, Vol. 1, pp. 222- 226, Lozenec, Bulgaria, 24-28 June 2015.

21. Moiceanu G., Voicu Gh., Dincă M., Paraschiv G., **Chitoiu M.**, Aspects regarding shearing cutting blades features of energetic plants strains for laboratory testing, The 6th International Conference on Computational Mechanics and Virtual Engineering - COMEC2015, p.355 - 360, 15-16 October 2015, Brașov, România.

22. Moiceanu G., Voicu Gh., Paraschiv G., **Chitoiu M.**, Dincă M., Mușuroi G., Biomass (energy crops) pretreatment to improve anaerobic digestion process – review, International Symposium ISB-INMA TEH Agricultural and Mechanical Engineering, 2015, pp. 311 – 318, 29-31 October 2015, Bucharest, Romania, ISSN 2344-4118

23. Moiceanu G., Dinca M., Paraschiv G., Voicu Gh., **Chițoiu M.**, Biogas, the future of modern society, 3rd International Conference on Thermal Equipment, Renewable Energy and Rural Development, TE-RE-RD 2014, pp. 273 – 278, Mamaia, România, 2014, ISSN 2359 – 7941.

24. Moiceanu G., Voicu Gh., Paraschiv G.,Dinca M., **Chițoiu M.**, Vladut V., Mechanical properties of energetic plant stem - review, International Symposium ISBTEH – INMATEH Agricultural and Mechanical Engineering, 2014, pp. 543-550, București, România, ISSN 2344-4118.

25. **Chițoiu M.**, Moiceanu G., Voicu Gh., Paraschiv G., Dincă M., Voicea I., Biomass grinding/milling resistance and energy consumption – review, International Symposium ISBTEH – INMATEH Agricultural and Mechanical Engineering, 2014, pp.579-584, București, România, ISSN 2344-4118.

26. Moiceanu G., Voicu P., Paraschiv G., Voicu Gh., **Chițoiu M.**, Miscanthus plant energy consumption during grinding with a lab mill Grindomix GM 200, 2nd International Conference on Thermal Equipment, Renewable Energy and Rural Development, TE-RE-RD 2013, pp. 203-209, 20 - 22 June 2013, Băile Olănești, România, ISSN 1843 –3359.

27. Moiceanu G., Paraschiv G., Voicu Gh., Dincă M., **Chițoiu M.**, Comparative analysis of energy consumption at grinding multiple types of vegetal biomass, Second International

Conference on NATURAL AND ANTHROPIC RISKS ICNAR2014, 04-07 June 2014, Bacău, România

- 28.** Vlăduț V., **Chițoiu M.**, Danciu A., Militaru M., Lehr C. - The Importance of Humidity on Agricultural and Forestry Biomass in the Process of Pellets and Agri-Pellets Production, cel de-al 9-lea Simpozion Internațional Prospects for the 3-rd Millennium Agriculture, Bulletin of University of Agricultural Sciences and Veterinary Medicine Cluj-Napoca - AGRICULTURE, nr. 67 (1) / 2010, Print ISSN 1843-5246; Electronic ISSN 1843-5386, pag. 292-300, ISI Web of Knowledge (ISI Proceedings, Thomson Reuters Master Journal List, <http://scientific.thomsonreuters.com/mjl/>), CAB Abstracts (<http://www.cabi.org/>), si alte baze de date internationale (EBSCO, CAS, VINITI etc.), Cluj Napoca - România [SI];
- 29.** Militaru M., Postelnicu E., **Chițoiu M.**, Vlăduț V. - Solar Energy Use in Dryers as an Alternative Energy Source in Agriculture, cel de-al 9-lea Simpozion Internațional Prospects for the 3-rd Millennium Agriculture, Bulletin of University of Agricultural Sciences and Veterinary Medicine Cluj-Napoca - AGRICULTURE, nr. 67 (1) / 2010, Print ISSN 1843-5246; Electronic ISSN 1843-5386, pag. 187-193, ISI Web of Knowledge (ISI Proceedings, Thomson Reuters Master Journal List, <http://scientific.thomsonreuters.com/mjl/>), CAB Abstracts (<http://www.cabi.org/>), si alte baze de date internationale (EBSCO, CAS, VINITI etc.), Cluj Napoca - România [SI];
- 30.** **Chițoiu M.**, Vlăduț V., Militaru M., Voicea I. - Vegetal Waste And Animal Manure Processing For Ensuring Agricultural Farms Energy Independence, cel de-al 9-lea Simpozion Internațional Prospects for the 3-rd Millennium Agriculture, Bulletin of University of Agricultural Sciences and Veterinary Medicine Cluj-Napoca - AGRICULTURE, nr. 67 (1) / 2010, Print ISSN 1843-5246; Electronic ISSN 1843-5386, pag. 61-67, ISI Web of Knowledge (ISI Proceedings, Thomson Reuters Master Journal List, <http://scientific.thomsonreuters.com/mjl/>), CAB Abstracts (<http://www.cabi.org/>), si alte baze de date internationale (EBSCO, CAS, VINITI etc.), Cluj Napoca - România [SI];
- 31.** Danciu A., Vlăduț V., **Chițoiu M.**, Militaru M., Găgeanu P., Lehr C. - Giving value to vegetal and forestry waste for agri-pellet production in agricultural farms, Journal CONTEMPORARY AGRICULTURAL ENGINEERING, Vol. 36 (2010), No. 4, pag. 401-410, Novi Sad, Octobre 2010 [P.I.];
- 32.** Danciu A., Vlăduț V., **Chițoiu M.**, Militaru M., Lehr C. - Giving value to vegetal and forestry waste for agri-pellet production in agricultural farms, "DURABLE AGRICULTURE - AGRICULTURE OF THE FUTURE", The six edition, Section 4, ISSN 2066-950X, Craiova, 20-21 November 2010, (ANALELE UNIVERSITĂȚII DIN CRAIOVA - AGRICULTURĂ, MONTANOLOGIE, CADASTRU, vol. XXXIX/B 2010, pag. 480-485, ISSN 1841-8317, Craiova - România) [C.I.]
- 33.** Vlăduț V., Voicea I., Matache M., Militaru M., **Chițoiu M.**, Popa L., Bungescu S., Paraschiv G., Biriș S.Șt., Maican E. Atanasov At. - Determination of Tribology Parameters of The EcoBiodegradable Fluids, Proceedings of the Third International Conference "RESEARCH PEOPLE AND ACTUAL TASKS ON MULTIDISCIPLINARY SCIENCES", vol. 2, pag. 6-13, ISSN 1313-7735, 8-10 Iunie 2011, Lozenec, Bulgaria [C.I.];

Curriculum vitae											
Informații personale											
Nume / Prenume		CHIȚOIU Mihai									
Adresă(e)		Str. Rezervelor Nr. 93, Bl. A, Ap 75, Et. 5, Sat Roșu, Comuna Chiajna, Jud. Ilfov									
Data nașterii		02 August 1985									
Experiența profesională											
Perioada		August 2016 - prezent									
Funcția sau postul ocupat		<i>Sales Representativ</i>									
Numele și adresa angajatorului		CENIT SRL, Calea Chișinăului nr. 103 -104 bis, Iași									
Perioada		Februarie 2013 – martie 2016									
Funcția sau postul ocupat		<i>Account Manager Romstal</i>									
Numele și adresa angajatorului		Romstal, Vitan Barzesti, nr 11A, sector 4, Bucuresti									
Perioada		Aprilie 2011 – februarie 2013									
Funcția sau postul ocupat		<i>Expert implementare proiecte fonduri europene</i>									
Numele și adresa angajatorului		Uniunea Nationala a Studentilor din Romania, Sector 6, Splaiul Independentei, nr 290, Mezanin camin P13-P14									
Perioada		Octombrie 2009 – decembrie 2010									
Funcția sau postul ocupat		<i>Asistent cercetător științific</i>									
Numele și adresa angajatorului		Institutul National de Cercetare-Dezvoltare Masini Agricole, Bdl Ion Ionescu de la Brad, Nr. 6, Sector 1									
Educație și formare											
Perioada		Octombrie 2013 – prezent									
Calificarea / diploma obținută		Doctorand Universitatea POLITEHNICA din București, Facultatea de Ingineria Sistemelor Biotehnice									
Perioada		Octombrie 2009 – Februarie 2011									
Calificarea / diploma obținută		Diplomă de Master Ingineria și Managementul Sistemelor Biotehnice, Facultatea de Ingineria Sistemelor Biotehnice, Universitatea POLITEHNICA din București									
Perioada		Octombrie 2004 – Iulie 2009									
Calificarea / diploma obținută		Diploma de Inginer, Certificat Absolvire Modul Pregătire Personal Didactic, Universitatea POLITEHNICA din București, Facultatea de Ingineria Sistemelor Biotehnice									
Perioada		Septembrie 2000 – Iunie 2004									
Calificarea / diploma obținută		Absolvent Liceu, Grup Școlar Tehnologic Aro, Cîmpulung Muscel, Jud. Argeș.									
Limba(i) maternă(e)		Română									
Limba(i) străină(e) cunoscută(e)											
Autoevaluare		Înțelegere				Vorbire			Scriere		
<i>Nivel european (*)</i>		Ascultare		Citire		Participare la conversație		Discurs oral		Exprimare scrisă	
Engleză		A	Utilizator experimentat	A	Utilizator experimentat	A2	Utilizator experimentat	A	Utilizator experimentat	A1	Utilizator experimentat
		(*) <u>Nivelul Cadrului European Comun de Referință Pentru Limbi Străine</u>									