



UNIUNEA EUROPEANĂ



Fondul Social European
POSDRU 2007-2013



Instrumente Structurale
2007-2013



OIPOSDRU

MINISTERUL
EDUCAȚIEI ȘI
CERCETĂRII
ȘTIINȚIFICE



Universitatea
TRANSILVANIA
din Brașov

Investește în oameni!

FONDUL SOCIAL EUROPEAN

Programul Operațional Sectorial Dezvoltarea Resurselor Umane 2007 – 2013

Axa prioritară 1 „Educație și formare profesională în sprijinul creșterii economice și dezvoltării societății bazate pe cunoaștere”

Domeniul major de intervenție 1.5. „Programe doctorale și post-doctorale în sprijinul cercetării”

Titlul proiectului: Burse doctorale și postdoctorale pentru cercetare de excelență

Numărul de identificare al contractului: POSDRU/159/1.5/S/134378

Beneficiar: Universitatea Transilvania din Brașov

Partener:

ȘCOALA DOCTORALĂ INTERDISCIPLINARĂ

Facultatea: INGINERIA LEMNULUI

Ing. Vasile-Adrian PETRU

CONTRIBUȚII LA DECORAREA SUPRAFEȚELOR LEMNOASE PRIN

PIROGRAVARE CU LASER

CONTRIBUTIONS TO WOOD SURFACES DECORATION BY LASER

BEAM PYROGRAPHY

REZUMAT / ABSTRACT

Conducător științific

Prof. dr. ing. Aurel LUNGULEASA

BRAȘOV, 2020

D-lui (D-nei)

COMPONENȚA

Comisiei de doctorat

Numită prin ordinul Rectorului Universității Transilvania din Braşov
Nr. 10644 din 23.07.2020

PREȘEDINTE:	Prof. dr. ing. Mihai ISPAS Universitatea <i>Transilvania</i> din Braşov
CONDUCĂTOR ȘTIINȚIFIC:	Prof. dr. ing. Aurel LUNGULEASA Universitatea <i>Transilvania</i> din Braşov
REFERENȚI:	Prof. dr. ing. Camelia COȘEREANU Universitatea <i>Transilvania</i> din Braşov Prof. dr. ing. Dan DOBROTĂ Universitatea <i>Lucian Blaga</i> Sibiu Conf. dr. ing. Laurian GHERMAN Academia Forțelor Aeriene „ <i>Henri Coandă</i> ” Braşov

Data, ora și locul susținerii publice a tezei de doctorat: 30.09.2020, ora 12:00,
<https://bbb.unitbv.ro/lun-bvf-cdi-4pe>

Eventualele aprecieri sau observații asupra conținutului lucrării vor fi transmise electronic, în timp util, pe adresa vasile.petru@unitbv.ro

Totodată, vă invităm să luați parte la ședința publică de susținere a tezei de doctorat.

Vă mulțumim.



CUPRINS

	Pg. teza	Pg. rezumat
Cuprins.....	I	I
Content.....	V	IV
Lista tabelor.....	IX	
Lista figurilor.....	XIII	
Glosar, notații și abrevieri.....	1	1
Glosar.....	1	
Lista de notații.....	2	1
Lista de abrevieri.....	3	2
Introducere în tehnica pirogravării.....	4	3
Definiții.....	4	
Necesitatea temei și contextul alegerii acesteia.....	4	3
Capitolul 1. Stadiul actual al cercetărilor în domeniul pirogravării materialelor lemnoase.....	11	5
1.1 Scurt istoric.....	11	
1.2 Studii privind materialele utilizate pentru pirogravură.....	13	5
1.2.1 Influența proprietăților materialului suport asupra pirogravării.....	13	5
1.2.2 Specii lemnoase și materiale folosite pentru pirogravură.....	14	5
1.3 Studii privind prelucrarea cu laser.....	15	7
1.3.1 Studii privind suprafața prelucrată cu laser.....	16	
1.3.2 Aparatură, instalații și parametri de pirogravare.....	20	
1.3.3 Factorii care influențează prelucrarea lemnului folosind laserul.....	22	
1.4 Cercetări privind optimizarea parametrilor de prelucrare.....	30	
1.5 Cercetări privind măsurarea culorii.....	31	
1.6 Cercetări privind măsurarea adâncimii de pătrundere a laserului în lemn.....	34	
1.7 Concluzii cu privire la stadiul actual al cercetării.....	34	8
Capitolul 2. Obiectivele principale ale tezei.....	35	9
Capitolul 3. Cercetări teoretice și experimentale privind factorii de influență asupra pirogravării cu laser a lemnului.....	36	10
3.1 Obiectivele cercetării experimentale.....	36	10
3.2 Strategii ale cercetării experimentale.....	36	10
3.3 Condiții fizice ale experimentării.....	40	13
3.3.1 Materialul lemnos ca suport pentru pirogravura cu laser.....	40	13
3.3.2 Descrierea echipamentelor.....	42	14
3.4 Metode și mijloace de măsurare a diametrelor urmei prelucrării.....	48	16
3.5 Metode și mijloace de măsurare a adâncimii de gravare a fasciculului laser în lemn.....	49	17
3.5.1 Aparatură.....	49	17
3.5.2 Metoda de lucru.....	50	



	Pg. teza	Pg. rezumat
3.5.3 Compararea rezultatelor obținute prin metoda propusă cu cele măsurate cu aparate existente.....	51	18
3.6 Metode și mijloace de măsurare a puterii efective a laserului.....	53	20
3.6.1 Aparatură.....	54	20
3.6.2 Metoda de lucru.....	55	
3.6.3 Rezultate și discuții.....	56	20
3.7 Metode și mijloace de măsurare a culorii suprafețelor mici și de dimensiuni variabile.....	57	21
3.7.1 Aparatură.....	57	21
3.7.2 Măsurarea propriu-zisă.....	58	
3.7.3 Compararea rezultatelor obținute prin metoda propusă cu cele măsurate cu aparate existente.....	65	21
3.8 Programe de experimentare.....	68	24
3.8.1 Cercetare teoretică privind experimentele preliminare – determinarea intervalului de variație a principalilor parametri de prelucrare (<i>Experimentele E1</i>).....	68	25
3.8.2 Cercetare teoretică privind experimentul principal – determinarea influenței parametrilor principali de prelucrare (<i>Experimentul E2</i>).....	69	26
3.9 Rezultatele cercetării experimentale și interpretarea acestora.....	76	29
3.9.1 Cercetare experimentală preliminară – determinarea intervalului de variație a principalilor parametri de prelucrare (<i>Experimentele E1</i>).....	81	34
3.9.2 Cercetare experimentală principală – determinarea influenței parametrilor principali de prelucrare (<i>Experimentul E2</i>).....	121	46
3.10 Concluzii cu privire la cercetările teoretice și experimentale a factorilor de influență ai pirogravării cu laser.....	169	58
Capitolul 4. Optimizarea regimurilor de lucru.....	174	63
4.1 Noțiuni introductive.....	174	63
4.2 Obiective.....	174	63
4.3 Metoda de lucru.....	174	63
4.3.1 Metodologia de optimizare.....	174	63
4.3.2 Aplicația software pentru optimizarea regimurilor de lucru.....	176	65
4.3.3 Optimizarea regimurilor de lucru folosind alți parametri de lucru (Întocmirea planului experimental redus).....	177	
4.4 Rezultate obținute și interpretarea datelor.....	181	66
4.5 Concluzii cu privire la optimizarea regimurilor de lucru.....	183	67
Capitolul 5. Studii teoretice și cercetări experimentale cu privire la pirogravarea pe suport lemnos a tonurilor de gri și a culorilor.....	184	68
5.1 Obiective.....	184	68
5.2 Studiu teoretic cu privire la informațiile digitale.....	184	
5.2.1 Imaginea digitală.....	184	
5.2.2 Tipuri de imagini digitale.....	184	



	Pg.	Pg.
	teza	rezumat
5.2.3 Modele de producere și reprezentare cromatică a imaginilor digitale	185	
5.2.4 Formate de stocare a imaginilor digitale.....	185	
5.2.5 Conversii.....	189	
5.2.6 Studiu constructiv al tonurilor de culoare.....	190	
5.2.7 Tehnici de prelucrare și ajustări digitale ale unei imagini sursă.....	191	
5.3 Studiu experimental cu privire la transpunerea informației digitale prin pirogravare.....	191	68
5.3.1 Metoda de lucru și aparatura.....	191	68
5.3.2 Experimente test pentru pirogravarea tonurilor de gri pe suport lemnos	193	70
5.3.3 Experimente test pentru pirogravarea unei grile de culori indexate, pe suport lemnos (ET5.3.3).....	209	73
5.3.4 Experimente pentru pirogravarea imaginilor digitale policrome.....	216	78
5.3.5 Experimente aprofundate pentru pirogravarea imaginilor policrome cu referire la E5.3.4. (IPN5).....	228	84
5.3.6 Experimente particularizate pentru pirogravarea imaginilor digitale asemenea procesului de tipărire policromă.....	231	
5.3.7 Experimente particularizate pentru analizarea influenței materialului suport și a culorii acestuia asupra pirogravării imaginilor digitale.....	236	
5.3.8 Experimente particularizate pentru definirea rezoluției optime în pirogravarea imaginilor digitale.....	240	87
5.4 Concluzii cu privire a pirogravarea imaginilor pe suprafețe lemnoase....	243	90
5.5,Aplicații practice.....	245	91
Capitolul 6. Concluzii generale, contribuții originale și direcții viitoare de cercetare	250	95
6.1 Concluzii generale.....	250	95
6.2 Contribuții originale.....	251	96
6.3 Direcții viitoare de cercetare.....	252	97
Bibliografie.....	254	99
Anexa 1. Specii lemnoase folosite pentru pirogravură.....	1-1	
Anexa 2. Ecuții de regresie primare: Diametrul urmei rezultate în urma interacțiunii dintre laser și lemn.....	2-1	
Anexa 3. Cercetări experimentale cu privire la pirogravarea pe suport lemnos a tonurilor de gri și a culorilor.....	3-1	
Scurt rezumat.....	4-1	103
Short abstract.....	4-1	103



CONTENT

	Thesis pg.	Abstract pg.
Cuprins.....	I	I
Content.....	V	IV
List of tables.....	IX	
List of figures.....	XIII	
Glossary, notations and abbreviations.....	1	1
Glossary.....	1	
List of notations.....	2	1
List of abbreviations.....	3	2
Introduction to pyrography technique.....	4	3
Definitions.....	4	
Necessity of the theme and the context of its choice.....	4	3
Chapter 1. The current state of research in the domain of pyrography of wood materials.....	11	5
1.1 Brief history.....	11	
1.2 Studies about materials used for pyrography.....	13	5
1.2.1 The influence of the properties of the support material on the pyrography.....	13	5
1.2.2 Wood species and materials used for pyrography.....	14	5
1.3 Studies about the laser processing.....	15	7
1.3.1 Studies about the laser processed surface.....	16	
1.3.2 Equipments, installations and parameters for pyrography.....	20	
1.3.3 Factors that influence the wood laser processing.....	22	
1.4 Research on the optimization of processing parameters.....	30	
1.5 Research on color measurement.....	31	
1.6 Research on measuring the depth of penetration of the laser into wood	34	
1.7 Conclusions on the current state of research.....	34	8
Chapter 2. The main objectives of the thesis.....	35	9
Chapter 3. Theoretical and experimental research on the influencing factors on laser pyrography of wood.....	36	10
3.1 Objectives of the experimental research.....	36	10
3.2 Experimental research strategies.....	36	10
3.3 Physical conditions of the experiment.....	40	13
3.3.1 Wood material as a support for laser pyrography.....	40	13
3.3.2 Equipment description.....	42	
3.4 Methods and means of measuring the diameters of the processing trace	48	16
3.5 Methods and means of measuring the depth of penetration of the laser beam into wood.....	49	17
3.5.1 Apparatus.....	49	17
3.5.2 Working method.....	50	

	Thesis pg.	Abstract pg.
3.5.3 Comparison between the results obtained by the proposed method and those measured with existing devices.....	51	18
3.6 Methods and means of measuring the effective power of the laser.....	53	20
3.6.1 Apparatus.....	54	20
3.6.2 Working method.....	55	
3.6.3 Results and discussions.....	56	20
3.7 Methods and means of measuring the color of small and variable-sized surfaces.....	57	21
3.7.1 Apparatus.....	57	21
3.7.2 The effective measurement.....	58	
3.7.3 Comparison between the results obtained by the proposed method and those measured with existing devices.....	65	21
3.8 Experimentation programs.....	68	24
3.8.1 Theoretical research on preliminary experiments – determination of the variation intervals of the main processing parameters (<i>Experiments E1</i>).....	68	25
3.8.2 Theoretical research on the main experiment – determination of the influence of the main processing parameters (<i>Experiment E2</i>).....	69	26
3.9 The results of experimental research and their interpretation.....	76	29
3.9.1 Preliminary experiments – determination of the variation intervals of the main processing parameters (<i>Experiments E1</i>).....	81	34
3.9.2 Main experiment – determination of the influence of the main processing parameters (<i>Experiment E2</i>).....	121	46
3.10 Conclusions on the theoretical and experimental researches of the influencing factors of laser pyrography.....	169	58
Chapter 4. Optimization of operating parameters.....	174	63
4.1 Introduction.....	174	63
4.2 Objectives.....	174	63
4.3 Working method.....	174	63
4.3.1 Optimization methodology.....	174	63
4.3.2 The software application for optimizing operating parameters.....	176	65
4.3.3 The optimization of the work regimes using other parameters (Preparation of the reduced experimental plan).....	177	
4.4 Obtained results and interpretation of data.....	181	66
4.5 Conclusions on the optimization of operating parameters.....	183	67
Chapter 5. Theoretical studies and experimental research on wood pyrography of grayscales and colors.....	184	68
5.1 Objectives.....	184	68
5.2 Theoretical study on digital information.....	184	
5.2.1 The digital image.....	184	
5.2.2 Types of digital images.....	184	



	Thesis PG·	Abstract PG·
5.2.3 Models for the production and chromatic representation of digital images.....	185	
5.2.4 Digital image storage formats.....	185	
5.2.5 Conversions.....	189	
5.2.6 Constructive study of color tones.....	190	
5.2.7 Digital processing techniques and adjustments of an image source	191	
5.3 Experimental study on the transposition of digital information by pyrography.....	191	68
5.3.1 Working method and equipment.....	191	68
5.3.2 Test experiments for pyrography of grayscales on wood.....	193	70
5.3.3 Test experiments for pyrography of an indexed color grid on wood (ET5.3.3).....	209	73
5.3.4 Experiments for pyrography of polychrome digital images.....	216	78
5.3.5 In-depth experiments for pyrography of polychrome images with reference to E5.3.4. (IPN5).....	228	84
5.3.6 Customized experiments for pyrography of digital images such as the polychrome printing process.....	231	
5.3.7 Customized experiments for analyzing the influence of the support material and its color on the pyrography of digital images.....	236	
5.3.8 Customized experiments for defining the optimal resolution in the pyrography of digital images.....	240	87
5.4 Conclusions on the pyrography of images on wooden surfaces.....	243	90
5.5 Practical applications.....	245	91
Chapter 6. General conclusions, original contributions and new research directions.....	250	95
6.1 General conclusions.....	250	95
6.2 Original contributions.....	251	96
6.3 New research directions.....	252	97
Bibliography.....	254	99
Appendix 1. Wood species used for pyrography.....	1-1	
Appendix 2. Primary regression equations: The diameter of the trace resulting from the interaction between laser and wood.....	2-1	
Appendix 3. Experimental research on wood pyrography of grayscale and colors	3-1	
Scurt rezumat.....	4-1	103
Short abstract.....	4-1	103

GLOSAR, NOTAȚII ȘI ABREVIERI

Lista de notații

	Descrierea	U.M.
a*	Componentă a sistemului tricromatic <i>CIEL*a*b*</i> care definește intervalul verde-roșu	uCIE
b*	Componentă a sistemului tricromatic <i>CIEL*a*b*</i> care definește intervalul albastru-galben	uCIE
b_{ij}	Coeficienții modelului matematic polinomial	
d_i	Diametrul urmei măsurat în lungul fibrei lemnului	mm
d_m	Diametrul mediu al urmei	mm
d_p	Diametrul urmei măsurat perpendicular pe fibra lemnului	mm
d_{pf}	Diametrul petei focale	mm
d_z	Distincția zonelor iradiate	(uCIE*mm) ⁻¹
e	Baza logaritmului natural (numărul lui Euler)	
E	Energia	J
E_i	Energia liniară	J/mm
F	Distanța focală	mm
f	Frecvența de pulsare	Hz
h	Adâncimea de gravare	mm
j	Raport abstract care consideră primii 3 parametri tehnologici ai prelucrării cu laser în ceea ce privește efectul asupra colorării lemnului: puterea medie a fasciculului laser, viteza de avans și pasul capului de lucru	uCIE
L*	Componentă a sistemului de culoare <i>CIEL*a*b*</i> care reprezintă luminozitatea	uCIE
N₂	Molecula de azot	
p	Pasul, deplasarea capului de lucru pe axa Y	mm
P	Puterea medie a fasciculului laser	W
ppf	Poziția planului focal	mm
R²	Coeficientul de determinare a funcției obiectiv	-
uCIE	Unitate de măsură a sistemului de reprezentare a culorii <i>CIEL*a*b*</i>	
uHSL	Unitate de măsură a sistemului de reprezentare a culorii <i>HSL</i>	
u_z	Uniformitatea zonei iradiate	uCIE
v	Viteza de avans, viteza de deplasare pe axa X	mm/s
Y_i	Funcția obiectiv	
δ	Defocalizarea (distanța dintre planul focal și lentilă)	mm
η	Productivitatea procesului de pirogravare	mm ² /uCIE
λ	Lungimea de undă a radiației laser	μm
ρ	Densitatea	kg/m ³
σ	Abaterea standard	-

**Lista de abrevieri**

CO₂	Dioxidul de carbon
DPI	Numărul de pixeli/inch dintr-o imagine bitmap (engl. Dots Per Inch)
engl.	Termen provenit din limba engleză
E1	Experimente preliminare
E2	Experiment principal
E2C	Experiment principal clasic
E2F	Experiment principal factorial
FO	Funcție obiectiv
Nd: YAG	Laserul cu granat de ytriu-aluminiu dopat cu neodim Sursa specificată nu este validă.
PC	Calculator personal (engl. Personal Computer)
PPI	Numărul de puncte/inch dintr-o imagine tipărită (engl. Points Per Inch)
px	Pixel
Raportul F	Raportul pentru testul statistic Fisher
R² (adj. for d. f.)	Coeficientul de determinare multiplă corectat pentru diferență
U.M.	Unitate de măsură
XeCl	Monoclorura de xenon
zit	Zona influențată termic

INTRODUCERE ÎN TEHNICA PIROGRAVĂRII

Necesitatea temei și contextul alegerii acesteia

Dezvoltarea societății sub toate aspectele sale, oferă oportunități imense de inovare și cercetare în domeniul prelucrărilor considerate, cel puțin până în acest moment, „neconvenționale”. Dezvoltarea de tehnologii bazate pe cele mai noi descoperiri oferă posibilitatea unor prelucrări inovatoare care nu pot fi realizate folosindu-se tehnologiile tradiționale, sau care pot fi realizate cu un consum mare de resurse.

Prezenta teză abordează o tematică din domeniul decorării suprafețelor lemnoase. Decorarea suprafețelor lemnoase este o practică veche de înfrumusețare a unor părți componente ale elementelor din lemn folosite ca repere pentru mobilier, dar și pentru alte produse finite din lemn. Din punct de vedere al raportării la spațiu, formele decorative pot fi: bidimensionale (plane) și tridimensionale (spațiale) (Cismaru & Coșoreanu, 2016). Dintre tehnicile de ornamentare plană se remarcă: pictura, intarsia, marchetăria, pirogravura. Dintre tehnicile enumerate anterior, pirogravura prezintă câteva avantaje care au fost ignorate până acum, dar care sunt tot mai apreciate în contextul economic, al protecției mediului și al impactului negativ asupra sănătății umane, decorarea făcându-se doar prin expunerea la căldură a suprafeței lemnului. Aceasta este o tehnologie:

- ieftină, deoarece nu necesită materii prime (costisitoare în cazul marchetăriei și al intarsiei) și materiale tehnologice suplimentare așa cum este cazul celorlalte tehnici;
- rapidă, deoarece nu necesită timpi de așteptare între etapele de lucru cum se întâmplă în cazul picturii și al marchetăriei;
- ecologică, deoarece folosește ca suport un material regenerabil și prietenos cu mediul, sporind valoarea unor specii inferioare din punct de vedere estetic;

Evoluțiile tehnologice și cerințele noi ale pieței, combinate cu un mediu în continuă schimbare a tehnologiilor de fabricație, conduc la necesitatea îmbunătățiri continue a proceselor de fabricație. Având în vedere aceste aspecte se preconizează că tehnica pirogravării cu laser a lemnului reprezintă o preocupare de perspectivă.

Pirogravarea cu mijloace tradiționale de lemn este larg utilizată, iar în unele cazuri rezultatul este apreciat ca o operă de artă. Studiile privind utilizarea laserului pentru pirogravarea lemnului sunt puține la număr în comparație cu aplicațiile laser pentru prelucrarea altor materiale.

Avantajele prelucrării materialelor cu laser impun folosirea acestei tehnologii în tot mai multe domenii de activitate, înlocuind tehnologii neperformante sau dezvoltând prelucrări imposibil de realizat prin metode tradiționale. Dezavantajele prelucrării materialelor cu laser se reduc tot mai mult prin dezvoltarea echipamentelor care prezintă randamente tot mai mari, dar și prin automatizarea instalațiilor de prelucrare.

În acest context, teza de doctorat CONTRIBUȚII LA DECORAREA SUPRAFETELOR LEMNOASE PRIN PIROGRAVARE CU LASER reprezintă o abordare științifică și tehnologică originală a unor probleme importante și actuale, care condiționează funcționalitatea și eficiența proceselor de ardere superficială a lemnului folosind laser cu CO_2 . Dificultățile unei asemenea abordări sunt legate de:



- structura eterogenă a materialului lemnos și de reacția diferită a componentelor acestuia la iradierea și încălzirea susținută de laser;
- caracterul instabil și de cunoaștere insuficientă, teoretică și mai ales practică, a proceselor de transfer de energie și masă dezvoltate în condițiile date și a efectelor tehnologice induse de acestea.

Necesitatea temei reiese din aplicațiile multiple ale acesteia, respectiv în domeniile:

- Decorațiuni interioare:
 - Placări și structuri decorative în ambient interior / exterior;
 - Elemente și structuri complexe diverse.
- Mobilier;
- Creație de obiecte:
 - Decorative;
 - Obiecte personalizate: de protocol, identitate de vizuală, cărți de vizită, hoteluri, restaurante etc.

Direcția stabilită de conjunctura actuală de pe piața decorațiunilor este aceea de a obține produse cât mai ieftine cu un consum de materie primă și materiale cât mai scăzut, într-un timp cât mai scurt, obținând efect decorativ maxim.

Lucrarea de față abordează problematica pirogravării lemnului folosind o tehnologie inovativă cum este prelucrarea fonică cu ajutorul laserului, atât sub aspect tehnologic, prin studierea principalilor factori de influență ai prelucrării, prin optimizarea regimurilor de lucru, cât și sub aspect compozițional al informației grafice. Cercetarea s-a axat în mod special pe optimizarea regimurilor de lucru având ca și criteriu obținerea unei anumite nuanțe în timpul cel mai scurt.

Domeniul pirogravurii lemnului este unul de perspectivă, atât în ceea ce privește pirogravura tradițională (prin contact) cât și în ceea ce privește metodele moderne de pirogravură non-contact.

Cercetările prezentate în teza de doctorat au pornit de la faptul că cercetările în domeniul laserelor au avansat foarte mult, aplicabilitatea acestor studii, în special în domeniul tehnologic și în particular în domeniul prelucrării lemnului este deficitar.

Această cercetare reprezintă, pentru literatura de specialitate, și prima încercare teoretico-experimentală în domeniul pirogravării lemnului folosind tehnologii neconvenționale.

Cercetarea doctorală a inclus și o modelare analitică, primară și aproximativă, a unora dintre procesele termice specifice pirogravării cu laser, pe baza căreia pot fi estimate orientativ condițiile de iradiere capabile să asigure colorarea materialului. Această etapă s-a finalizat cu un program de optimizare a regimurilor de lucru.

În fine, ultima etapă a cercetării s-a axat pe reproducerea unui conținut grafic digital prin pirogravare folosind tehnologia laser.

CAPITOLUL 1. STADIUL ACTUAL AL CERCETĂRILOR ÎN DOMENIUL PIROGRAVĂRII MATERIALELOR LEMNOASE

1.2. Studii privind materialele utilizate pentru pirogravură

Pearscă *et al.* (2006) afirmă că în prelucrările cu laser duritatea materialului nu are nicio influență, condiția esențială fiind ca materialului să fie suficient de receptiv la absorbția radiației. Astfel, utilizarea laserului este posibilă pentru prelucrarea oricărui material.

Unii cercetători au analizat posibilitatea de reproducere a texturii lemnului pe MDF (Howard, *et al.*, 2014), pe când alții au utilizat furnirul în vederea gravării cu laser pentru producția de masă (Chernykh, *et al.*, 2018).

1.2.1. Influența proprietăților materialului suport asupra pirogravării

Barnekov *et al.* (1986) au observat că interacțiunea dintre proprietățile materialului și lumina laser este complexă. În general, capacitatea luminii laser de a prelucra lemnul implică absorbția luminii, transformarea energiei luminii în căldură, distribuția și viteza transferului de căldură în cadrul lucrărilor, precum și rata de vaporizare în zona de radiație. Două proprietăți optice fundamentale ale lemnului sunt importante – absorbția și transmisivitatea. De exemplu, se consideră două mostre de lemn de la aceeași specie și densitate, primul umed și al doilea uscat. Pentru lumina de 10,6 μm , coeficientul de absorbție a apei este mai mic decât cea a lemnului. Astfel, coeficientul global de absorbție pentru proba de lemn verde este mai mică decât pentru proba de lemn uscat, pentru că este prezentă mai multă apă. Prin urmare, este nevoie de mai multă putere pentru a prelucra lemnul umed decât este necesar pentru lemnul uscat, în cazul în care viteza de avans este menținută constantă. De asemenea energia totală absorbită este determinată cantitatea de lumină absorbită în cursul unei anumite perioade de timp. Această energie este transformată în căldură în zona de radiații și sunt generate temperaturi foarte ridicate. Distribuția energiei în piesa de prelucrat poate fi exprimată ca suma energiilor necesare pentru a încălzi materialul adiacent zonei de vaporizare, pentru a topi materiale și pentru a muta această zonă într-o direcție paralelă cu fasciculul. Energia necesară pentru încălzirea lemnului este o funcție pozitivă a conductivității și temperatura necesară pentru a realiza vaporizarea. Energia necesară pentru a topi materialul este dependentă de energia specifică de vaporizare, care este în principal legat de densitate, conținutul de umiditate și de specie. Energia necesară pentru a deplasa zona de vaporizare este o funcție a gradientului de temperatură care depinde de direcția fibrelor și de alți factori legați de specii. Acest model poate explica influența proprietăților, cum ar fi densitatea și direcția fibrelor asupra capacității laserelor de a tăia lemnul.

1.2.2. Specii lemnoase și materiale folosite pentru pirogravură

Unul dintre cele mai studiate aspecte privind pirogravura, îl reprezintă materialul suport, respectiv lemnul ale cărui proprietăți au fost deja determinate de numeroși cercetători. Studiul privind speciile lemnoase și proprietățile acestora este prezentat în anexa lucrării.

Fiecare material oferă propriile sale avantaje și provocări. Petutschnigg *et al.* (2013) au observat o



tendență globală în utilizarea laserelor pentru speciile de lemn cu creștere rapidă. Aceste specii sunt considerate inferioare din punct de vedere al proprietăților fizice și mecanice, precum și al calităților estetice. O altă posibilitate de creștere a valorii estetice a acestor materiale este arderea estetică (Filipovici, 1965). Spre deosebire de alte tehnici de decorare, pirogravura are avantajul de a fi o tehnică ieftină, ecologică și disponibilă.

Tabelul 1.1 Materiale propuse pentru pirogravură

Materiale pentru pirogravură	Referință bibliografică
Lemn, piele, hârtie, tigve, coajă, nuci și fildeș	(Walters, 2014)
Piele, tigve, cârpă, hârtie și lemn	(Irish, 2012)
MDF	(Howard, et al., 2014)

Multe specii lemnoase pot fi arse, dar unele sunt mai potrivite pentru pirogravat decât altele. Lemnul deschis la culoare permite cel mai bun contrast dintre imaginea pirogravată și suprafața de fond. Lemnul de culoare închisă poate fi de asemenea folosit, dar imaginea pirogravată tinde să se piardă în fundal, mai ales după lăcuire. Cei mai mulți oameni preferă lemnul cu cât mai puține fibre posibil pentru a asigura un tablou alb pentru ardere. Lemnul masiv cu fibre este mai mult decât o provocare, dar în cazul în care fibrele sunt încorporate în design, rezultatele pot fi dramatice. Cu un aparat de pirogravat puternic, cel mai greu poate fi pirogravat lemnul, dar cele de esență moale și cu textură uniformă sunt mai consistente pentru pirogravură și, de asemenea, permite peniței să facă o impresie ușor în lemn, dacă se dorește o colorare puternică. În literatura studiată au fost folosite speciile lemnoase prezentate în anexa lucrării.

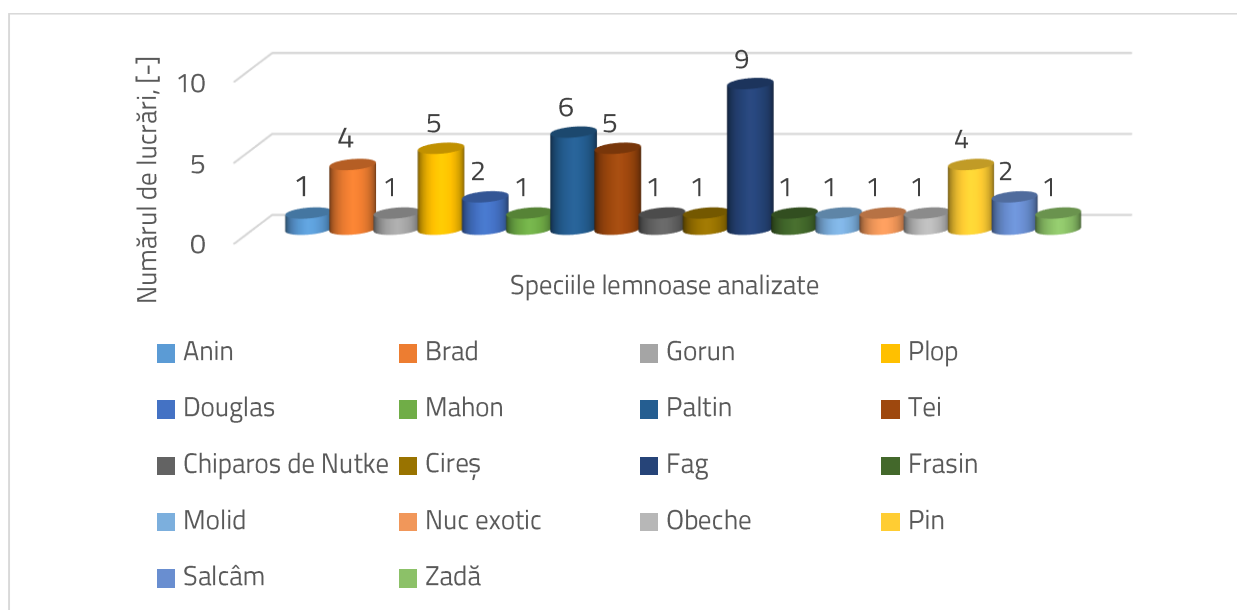


Figura 1.1 Graficul prezenței speciilor lemnoase în literatura de specialitate

După cum se poate observa în Figura 1.1, raportul dintre numărul speciilor lemnoase analizate și numărul publicațiilor este supraunitar, se poate afirma că practic nu există un criteriu clar de alegere a speciilor lemnoase în funcție de proprietățile acestora. Singurul criteriu este cel economic, respectiv fiecare autor a folosit specia pe care a considerat-o ca fiind potrivită pentru experiment, fără a da informații suplimentare. Din aceeași figură rezultă că speciile de rășinoase sunt cel mai bine reprezentate. Aceste specii reprezintă o bună prelucrabilitate prin pirogravură deoarece au densitate mică, iar acestea nu se pretează pentru alte tipuri de ornamente cum sunt cele în relief. Majoritatea



speciilor au o apariție singulară, excepție făcând speciile precum sunt fagul, bradul și paltinii.

În Figura 1.2 este reprezentată ponderea fiecărei specii lemnoase din literatura studiată. Se poate observa că specia cu ponderea cea mai mare este fagul (19%). Această specie prezintă proprietăți fizice care o recomandă pentru pirogravură, respectiv: densitate mare ($0,7 \text{ g/cm}^3$), conținut mare de lignină, textură fină, culoare deschisă (alb-roșiatic). De asemenea se mai observă că speciile de rășinoase brad și pin au o pondere însemnată, de 9% fiecare, iar cumulat se apropie de ponderea fagului.

Din analiza proprietăților fizice și tehnologice ale acestor specii se poate modela o specie teoretică care să conțină proprietățile medii ale speciilor lemnoase analizate. Această specie lemnoasă ideală trebuie să aibă următoarele proprietăți:

- Densitatea pentru lemnul uscat la aer $12\% \dots 15\% = 0,61 \text{ g/cm}^3$;
- Densitatea absolută = $0,57 \text{ g/cm}^3$;
- Culoare deschisă;
- Textura fină;
- Desen uniform.

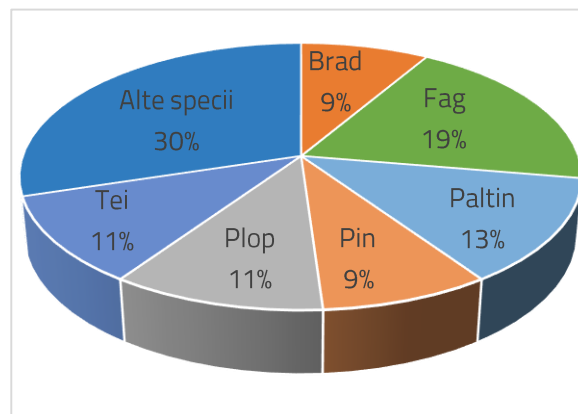


Figura 1.2 Ponderea speciilor lemnoase analizate în literatura de specialitate

Deși lucrările de specialitate în domeniul pirogravării lemnului sunt puține ca număr, iar autorii lor se feresc să folosească cuvântul cheie pirogravură, studiind domeniile conexe și anume prelucrarea lemnului cu laser în special debitarea lemnului, arderea superficială etc., se poate realiza o bază de date care să reprezinte punctul de pornire pentru o cercetare în domeniul pirogravării lemnului. Caracteristicile speciilor lemnoase folosite la pirogravură este prezentat în anexa lucrării. Cercetarea în domeniul pirogravării lemnului se poate extinde și cu alte specii lemnoase, sau prin folosirea altor parametri de lucru.

1.3. Studii privind prelucrarea cu laser

Studiile privind utilizarea laserului pentru pirogravarea lemnului sunt puține în număr în comparație cu alte studii ale aplicațiilor de prelucrare cu laser a lemnului (Gurău, et al., 2017). Totuși modificarea luminozității suprafețelor lemnoase cu ajutorul laserului a fost studiată în mai multe lucrări. Prezentarea acestor lucrări se va face în subcapitolele următoare. Tipul de laser utilizat cu precădere pentru pirogravare este laserul cu CO_2 , acesta fiind folosit pe specii lemnoase variate. În Tabelul 1.2 sunt prezentate speciile lemnoase analizate cât și parametri de lucru analizați de diverși specialiști.

Studiile experimentale și teoretice ale lui Dubey și Yadava (2008), au arătat că performanța procesului poate fi îmbunătățită considerabil prin selectarea corespunzătoare a parametrilor laserului, a materialului și a parametrilor de funcționare. Concluziile rezultate în urma experimentelor sunt confirmate și de Wairimu (2011):

- Prelucrarea cu radiație laser este o metodă de prelucrare puternică pentru prelucrarea profilurilor complexe într-o gamă largă de materiale. Cu toate acestea, principalul dezavantaj al acestui proces este eficiența scăzută a energiei în timpul prelucrării;
- Prelucrarea cu radiație laser este potrivită pentru prelucrarea precisă a detaliilor. Găuri de



diametre foarte mici, pot fi perforate cu precizie folosind frecvență de nanosecundă. Decuparea foliilor subțiri de până la 4 mm grosime a fost realizată cu succes cu lățime a tăieturii de ordin microscopic;

- Procesul de prelucrare cu fascicul laser este caracterizat de un număr mare de parametri de proces care determină eficiența, economia și calitatea întregului proces.

Tabelul 1.2 Speciile lemnoase și parametri analizați folosind laserul cu CO₂

Specia lemnoasă	Parametri analizați	Referință bibliografică
Pin scoțian	Modificări chimice și structurale	(Barcikowski, et al., 2006)
Moso bamboo	Adâncimea de gravare și a culoarea rezultată	(Lin, et al., 2008)
Fag (<i>Fagus sylvatica</i> L.)	Colorarea lemnului funcție de puterea medie a laserului	(Petru & Lunguleasa, 2015)
	Colorarea suprafeței și rugozitatea funcție de viteza de avans și puterea medie a laserului	(Gurău, et al., 2017)
Paltin de câmp (<i>Acer pseudoplatanus</i> L.)	Energia laserului	(Kubovský & Kačík, 2009)
	Colorarea lemnului funcție de viteza de avans a capului de lucru	(Petru & Lunguleasa, 2017)
	Rugozitatea suprafeței funcție de viteza de avans și de puterea medie a laserului	(Gurău & Petru, 2018)
	Colorarea lemnului funcție de numărului de treceri peste aceeași suprafață a capului de lucru	(Petru & Boboescu, 2019)

Prin urmare, cercetătorii au încercat să optimizeze procesul pe bază experiment, pe analiză și inteligență artificială bazate pe tehnici de modelare și optimizare pentru a găsi parametri de proces optimi și apropiați de optimi. Cu toate acestea, modelarea și optimizarea prelucrării cu fascicul laser, cu abordare hibridă și multi-obiectiv sunt inexistente în literatura de specialitate.

1.7. Concluzii cu privire la stadiul actual al cercetării

În urma cercetărilor bibliografice se observă că:

- Speciile lemnoase cele mai utilizate ca suport pentru pirogravură sunt: fag, paltin, plop, tei;
- Sursele de energie cele mai utilizate sunt cele cu laser, în special cele cu CO₂ și amestecuri ale acestuia;
- Optimizarea folosind metodele studiate (analiza relațională gri, metoda Taguchi) s-a dovedit a fi dezavantajoasă pentru tema tezei, motiv pentru care s-a ales *metoda simulării regimurilor de lucru pe baza datelor experimentale*;
- S-a demonstrat că măsurarea culorii în sistem computerizat este cea mai avantajoasă;
- Măsurarea adâncimii cu ajutorul proiecteurului de profil prezintă dezavantajul numărului mare de măsurători de realizat, ca atare s-a ales în teză măsurarea cu traductorul incremental;
- S-au ales parametri de lucru la pirogravarea cu laser (factorii de influență): puterea medie, frecvența laserului, viteza de avans, pasul, direcția de avans a capului de lucru, poziția planului focal, numărul de treceri și parametri analizați (funcțiile obiectiv) ca rezultat al prelucrării cu laser: culoarea, adâncimea, diametrul.

CAPITOLUL 2. OBIECTIVELE PRINCIPALE ALE TEZEI

Având în vedere potențialul de dezvoltare a tehnologiilor laser și a informației digitale, posibilitățile de prelucrare specifice acestor tehnologii, lipsa studiilor în domeniu, s-a impus abordarea unei metodologii de creștere a valorii estetice a suprafețelor lemnoase în cazul speciilor fără valoare estetică deosebită, folosind o tehnologie ecologică și disponibilă prin perspectiva prețului de achiziție în scădere al echipamentelor laser.

Problema propusă este de investigare a posibilităților de reproducere cât mai fidelă a informației grafice digitale folosind pirogravarea cu laser, având următoarele activități specifice:

- Cercetări experimentale privind factorii de influență asupra pirogravării lemnului din specia paltin de câmp (*Acer platanoides* L.), folosind laserul cu CO_2 :
 - Crearea unei metode de măsurare și analizare a culorii pentru suprafețe mici;
 - Crearea metodelor de măsurare a dimensiunilor prelucrării având în vedere particularitățile acestora;
 - Cercetări teoretice și experimentale privind influența principalilor factori de pirogravare cu laser asupra colorării lemnului:
 - Legile de variație.
 - Intervalele de variație.
 - Analizare date.
 - Stabilirea interdependențelor dintre principalii factori de influență ai procesului de pirogravare cu laser prin modelare matematică;
- Optimizarea regimurilor de prelucrare, folosindu-se pirogravarea cu laser, prin impunerea unui ton de culoare;
- Studii teoretice și experimentale privind reproducerea diferitelor tipuri de informații grafice prin pirogravare cu laser, respectiv întocmirea unei metodologii de reproducere a unui conținut grafic prin metoda pirogravării cu laser:
 - Redarea imaginilor se face prin variația intensității de ardere a suportului în nuanțe de culoare din gama marourilor.
 - Determinarea unei informații digitale de tip grafic (compusă din valori ale griurilor).

Pentru atingerea obiectivului propus a fost necesară parcurgerea mai multor etape de cercetare specifice unei teze de doctorat:

- Cercetare bibliografică – documentare în vederea stabilirii posibilităților de rezolvare a temei de doctorat, ținând cont de stadiul actual al cercetărilor;
- Cercetare experimentală – stabilirea unei metodologii de experimentare fundamentată științific și aplicarea acesteia;
- Cercetare fundamentală – determinarea legilor de variație ale parametrilor studiați;
- Cercetare aplicativă – verificarea experimentală a soluțiilor propuse în vederea evaluării eficienței și a corectitudinii lor, având în vedere gradul ridicat de nouitate a temei abordate.
- Abordarea interdisciplinară: anatomia și fizica lemnului și a materialelor pe bază de lemn, fizica laserelor, grafică, prelucrarea statistică a datelor experimentale, automatizare, informatică etc.

CAPITOLUL 3. CERCETĂRI TEORETICE ȘI EXPERIMENTALE PRIVIND FACTORII DE INFLUENȚĂ ASUPRA PIROGRAVĂRII CU LASER A LEMNULUI

3.1. Obiectivele cercetării experimentale

Programul de cercetare experimentală a avut ca scop investigarea pirogravării lemnului folosind laserul cu CO_2 în vederea optimizării regimurilor de lucru.

Cercetări experimentale privind:

- Stabilirea factorilor de influență asupra procesului de pirogravare cu laser a suprafețelor lemnoase;
- Stabilirea legăturilor și interdependențelor dintre acești factori și procesul de pirogravare cu laser prin modelare matematică.

3.2. Strategii ale cercetării experimentale

Modelarea matematică a procesului de prelucrare cu fascicul laser are ca scop elaborarea unui program preliminar de tehnologie asistată de calculator, stabilit pe baza unui algoritm, care să reprezinte corelația dintre parametrii de lucru și parametrii tehnologici corespunzători procesului de pirogravare a lemnului folosind fascicul laser cu CO_2 , în special a puterii medii a laserului și mărimilor dependente de aceasta. Astfel, există posibilitatea creării unei baze de date care să conțină informații despre parametrii de lucru și cei tehnologici pentru o gamă diversă de specii lemnoase, precum și a unui program de calcul a acestor parametri prin introducerea unor date inițiale legate de condițiile în care se dorește a se efectua prelucrarea, dar și programarea automată a mașinii de pirogravat cu laser.

La baza elaborării algoritmului matematic al procesului de pirogravare cu fascicul laser a lemnului va sta construirea unui model fizic al procesului de prelucrare și, respectiv, verificarea sa experimentală.

Parametrii regimului de prelucrare cu laser sunt:

- Caracteristicile radiației laser;
- Viteza de avans a capului de lucru;
- Pasul capului de lucru;
- Direcția de avans raportată la orientarea fibrei lemnului;
- Numărul de treceri peste aceeași suprafață prelucrată.

Dintre acești parametri, caracteristicile radiației laser sunt cei mai importanți din două motive:

1. Fără aportul radiației laser nu se pot face prelucrări;
2. Parametrii fasciculului laser nu sunt cunoscuți deoarece:
 - Aceștia variază în timp (în special caracteristicile mediului activ)
 - Informațiile furnizate de producătorul echipamentelor sunt incomplete.

Cunoașterea parametrilor radiației laser este un factor important în determinarea regimurilor de lucru optime.



Din punct de vedere strategic, la conceperea programului experimental s-au folosit cele două metode de principiu ale structurării, organizării și prelucrării datelor unei cercetări experimentale și anume (Nichici, 2004):

- metoda Gauss-Seidel „un factor la un moment dat” (Figura 3.1.a.);
- metoda Box-Wilson „toți factorii în fiecare moment” (Figura 3.1.b.).

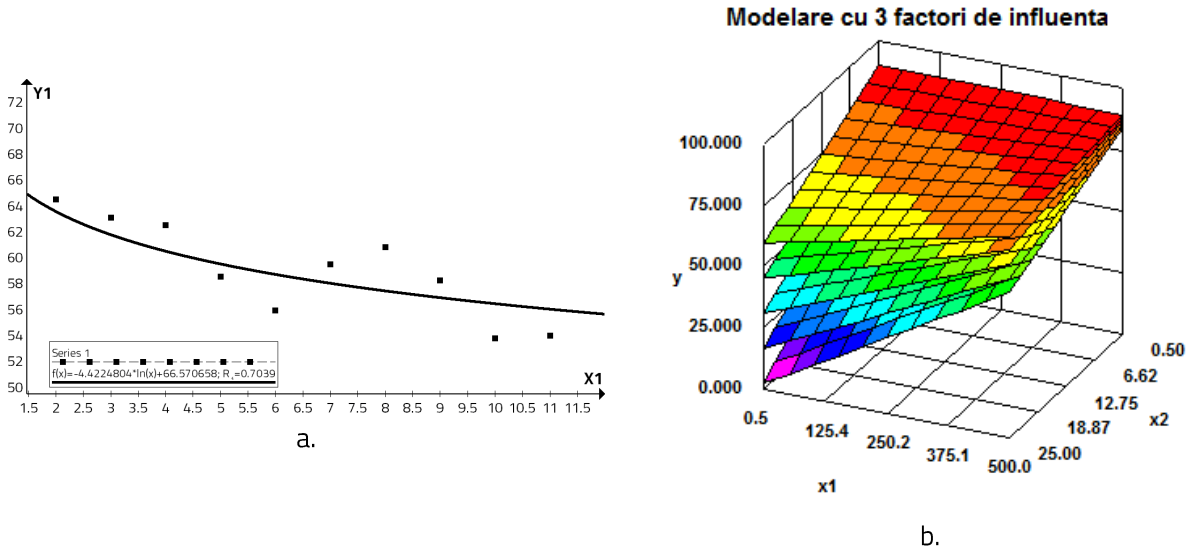


Figura 3.1 Metode de modelare experimentală:

a. - metoda Gauss-Seidel; b. - metoda Box-Wilson

Avantajele experimentului factorial față de experimentul clasic sunt multiple, cele mai importante fiind următoarele:

- reducerea numărului de încercări și implicit reducerea costurilor experimentării;
- posibilitatea identificării influenței directe a fiecărui factor de influență asupra ecuației de regresie.

În concluzie, experimentul factorial este caracterizat prin faptul că la fiecare încercare experimentală se modifică valoarea tuturor factorilor de influență, deci influența fiecărui factor asupra valorilor ecuației de regresie este determinată de toate încercările efectuate. Prin aceasta, volumul experimentării și costurile asociate acesteia se reduc considerabil. Principalul dezavantaj al unui experiment factorial îl reprezintă faptul că, dacă un factor este ales eronat, acesta va influența negativ calitatea experimentului, fără a putea fi corectat deoarece informațiile despre parametrii sunt puține.

În consecință, din considerente strategice, dar și pragmatice, programul experimental al cercetării doctorale a fost astfel structurat încât să:

- cuprindă două etape succesive, denumite convențional *preliminar* și *principal*;
- permită aplicarea metodelor de experimentare *clasică* și *factorială*.

Etapa preliminară E1 este alcătuită din mai multe experimente clasice și a avut ca scop studiul efectelor factorilor care influențează colorarea în procesul de pirogravare cu laser. Volumul etapei preliminare cuprinde 7 seturi de încercări, iar logica acestuia a fost de explorare a domeniilor experimentale în ceea ce privește evoluția și controlabilitatea procesului de pirogravare folosind fascicul laser cu CO_2 .

Descrierea pe larg a experimentelor preliminare, inclusiv matricea program concretă, este prezentată în paragraful 3.8.1.

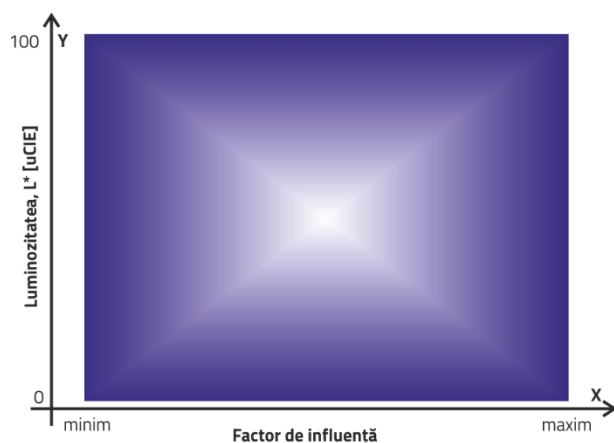


Figura 3.3 Domeniul experimental pentru experimentele din etapa preliminară

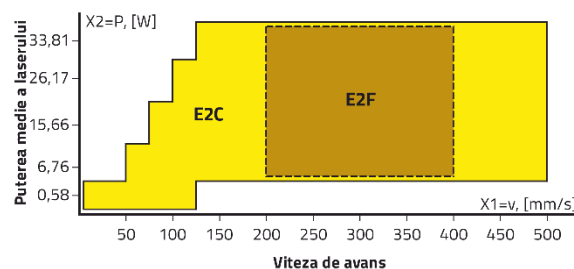


Figura 3.4 Domeniul de variație a puterii medii și a vitezei de avans pentru experimentul principal

Experimentul principal *E2* este un experiment complex, constituit dintr-un experiment clasic *E2C*, alcătuit din 31 de regimuri diferite pentru fiecare dintre cei cinci pași și dintr-un experiment factorial *E2F*, realizat pe baza planului experimental clasic. Volumul experimentului principal a cuprinde $31 \times 5 \times 5 = 775$ încercări, respectiv 31 de combinații între putere și viteză, 5 pași și 5 replici pentru fiecare experiment.

Experimentul principal a lărgit aria de investigație specifică experimentelor preliminare și a aprofundat, prin aplicarea simultană a metodelor de experimentare clasică și factorială, identificarea și cunoașterea procesului de pirogravare folosind fascicul laser cu CO_2 a lemnului. Descrierea pe larg a experimentului principal, alături de matricea program concretă este prezentată în paragraful 3.8.2. O vedere de ansamblu a localizării programului experimental principal și a programelor constitutive ale acestuia în spațiul multifactorial supus investigației este oferită de Figura 3.4.

În Figura 3.3 și Figura 3.4. reprezentările grafice sunt realizate în coordonate Luminozitate – Factor de influență și putere laser – viteză de avans. În urma programului experimental preliminar s-au ales trei parametri de lucru a căror variație influențează cel mai mult colorarea lemnului. Acești parametri sunt: puterea medie a laserului, viteza de avans și pasul capului de lucru. Domeniul experimental prezentat în Figura 3.4 a fost repetat pentru fiecare pas analizat.

În condițiile cercetării doctorale s-au aplicat regimuri de pirogravare folosind laserul cu CO_2 caracterizate prin intervale de reglare a factorilor de influență, după cum se prezintă în Tabelul 3.2. criteriile care au stat la baza ierarhizării importanței factorilor sunt următoarele:

- obținerea rezultatului favorabil în cel mai scurt timp;
- influența variației parametrilor asupra colorării lemnului;
- posibilitățile de automatizare a reglării.

În urma rezultatelor experimentelor și a observațiilor din etapa preliminară intervalele de variație a factorilor de influență au fost reduse după cum sunt prezentate în Tabelul 3.2.

Așa cum se prezintă în continuare (paragraful 3.4) în cadrul programului experimental complex urmează a fi realizate un număr de 775 teste, necesare și suficiente pentru modelarea matematică a ecuațiilor

de regresie ale pirogravării folosind laser cu CO_2 , pentru o singură specie lemnoasă, în condițiile date.

Tabelul 3.2 Domeniile de variație și importanța parametrilor de proces aplicate în pirogravarea lemnului de paltin, folosind laser cu CO_2 (scara 1-7, cu 1 cel mai important)

Factor de influență	Experimentele E1		Experimentul E2		Importanța
	Minim	Maxim	Minim	Maxim	
Puterea medie a laserului, P , în W	0	34	0,58	33,81	3
Viteza capului de lucru, v , în mm/s	5	500	10	500	1
Pasul capului de lucru, p , în mm	0,0254	0,8128	0,0254	0,4124	2
Frecvența de pulsație a laserului, f , în Hz	200	200000	20000		7
Poziția planului focal al laserului, ppf , în mm	50	111	73		5
Direcția de avans a capului de lucru raportată la orientarea fibrei lemnului	Paralelă	Perpendiculară	Paralelă		6
Numărul de treceri peste aceeași suprafață prelucrată	1	11	1		4

3.3. Condiții fizice ale experimentării

Eficiența prelucrării unui material cu ajutorul laserului depinde de proprietățile fizice ale materialului, inclusiv conducția de căldură, schimbarea de fază, formarea plasmei, absorbția de suprafață și a fluxului stratului topit. Aceste fenomene duc la formarea de zone influențate termic mici.

3.3.1. Materialul lemnos ca suport pentru pirogravura cu laser

Având în vedere observațiile din analiza literaturii de specialitate, s-au ales pentru analiza factorilor de influență asupra pirogravării cu laser, materialele prezentate în Tabelul 3.3. Caracteristicile și etapele tehnologice de pregătire a acestor materiale sunt enumerate în același tabel. Acestea sunt materiale utilizate preponderent în producția de mobilier. Criteriile care au stat la baza alegerii acestor materiale sunt următoarele:

- Specia cel mai des întâlnită în literatura de specialitate;
- Proprietățile fizice ale speciei (aspect, culoare, umiditate) preluate din literatura de specialitate;
- Disponibilitatea speciei respective.

Tabelul 3.3 Materialele utilizate pentru experimentele privind factorii de influență asupra pirogravării lemnului

Semifabricat:	Lemn masiv
Specie lemnoasă:	Paltin de câmp (<i>Acer platanoides</i> L.)
Secțiune:	Longitudinală
Caracteristici	Culoare alb sau alb-gălbui. Textura fină și uniformă. Prezintă des fibră ondulată și noduri mici, grupate, care dau desene deosebit de apreciate (paltin creț, măzărăt, coadă de păun, ochi de vultur etc.) (Cismaru & Cismaru, 2007). Se poate încerca să se pirograveze (Irish, 2012). Bun pentru utilizare la pirogravură (Easton, 2010).



Pregătire	Debitarea lemnului rotund în cherestea; Uscarea cherestelei; Îndreptarea unei fețe și a unui cant; Rindeluirea la grosime; Calibrare prin șlefuire mecanică cu hârtie abrazivă cu granulația de 80. Această operație tehnologică, deși este recomandată pentru panouri, a fost folosită deoarece prelucrarea cu laser necesită suprafețe plane, drepte și fără defecte de prelucrare; Formatizare; Șlefuire manuală cu hârtie abrazivă cu granulația de 120.	
	Experiment	Dimensiuni epruvete, [mm]
	<i>Intervalul de variație a puterii medii</i>	300x55x13 335x60x10 (x2 buc)
	<i>Intervalul de variație a vitezei de avans a capului de lucru</i>	150x55x13
	<i>Mărimea pasului capului de lucru</i>	105x160x12 305x55x12
	<i>Intervalul de variație a frecvenței de pulsație</i>	90x220x11
	<i>Intervalul de influență a poziției planului focal al laserului</i>	205x115x11
	<i>Direcția de avans raportată la orientarea fibrei lemnului</i>	300x160x12
	<i>Influența numărului de treceri</i>	300x55x12
	<i>Experiment principal</i>	100x200x12
	<i>Definirea rezoluției optime în pirogravarea imaginilor digitale</i>	150x60x12

Condiționarea materialelor s-a făcut prin depozitare în condiții atmosferice normale: temperatura de 20°C, umiditatea relativă a aerului de 65% (Cismaru, 2003). Epruvetele a fost supradimensionate pentru a se măsura culoarea naturală a lemnului și pentru a se putea exclude eventualele zone cu defecte.

Se observă că, din cauza tehnologiei de prelucrare, dar și a structurii neomogene a lemnului, omogenitatea macroscopică și precizia dimensională a lemnului prezintă abateri aleatorii inevitabile, care totuși nu pot influența semnificativ caracteristicile geometrice ale prelucrărilor laser realizate în cadrul experimentării.

Alegerea dimensiunilor materialului a ținut seama de:

- tehnologia de obținere a materialului lemnos și de dimensiunile standardizate ale cherestelei;
- caracteristicile dimensionale ale mesei de lucru și posibilitățile tehnologice ale echipamentului laser folosit în experimentare;
- numărul și dimensiunile minime necesare ale suprafețelor pirogravate cu laser realizate din punct de vedere al obiectivelor cercetării experimentale din teza de doctorat.

3.3.2. Descrierea echipamentelor

Echipamentele utilizate sunt compuse din:

1. Mașina de pirogravat cu laser *SLG-4030*;



2. Echipamentul multifuncțional *HP LaserJet 3055 all-in-one* pentru scanarea imaginilor;
3. PC pentru procesarea și analiza imaginilor;
4. Traductor de deplasare incremental și circuit electronic specific pentru măsurarea adâncimii de gravare;
5. Radiometru și senzor de putere pentru măsurarea puterii efective a laserului.

3.3.2.1. Echipamentul laser



a - vedere interioară



b - vedere frontală exterioară

Figura 3.5 Mașina de pirogravat folosind laser cu CO_2 de tip *SLG-4030*

Pentru realizarea experimentelor s-a folosit Gravatorul laser *SLG-4030*, furnizat de firma *Spot Line*. Vederi de ansamblu ale echipamentului de prelucrare folosind laser cu CO_2 utilizat în programul experimental al cercetării doctorale, sunt prezentate în Figura 3.5.

Stabilirea mărimilor fizice cu rol de factori de influență prin care se controlează regimul de iradiere a suprafeței supuse iradierii cu laser, în condițiile experimentării date, trebuie să aibă în vedere particularitățile funcționale ale laserelor cu CO_2 , dintre care se amintesc lungimea de undă $\lambda = 10,6 \mu m$, orientarea fasciculului laser emis cu ajutorul oglinzilor de reflexie și regimul de funcționare pulsant pentru pirogravare.

Încercările experimentale s-au efectuat pe un echipament tehnologic care folosește laserul cu CO_2 cu puterea maximă de 40 W, prezentat în continuare. Schema bloc a unui echipament tehnologic care folosește laserul cu gaz este prezentată în Figura 3.6. Principalele blocuri constructiv – funcționale ale unui asemenea echipament sunt:

- sursa laser;
- sistemul de ghidare a radiației laser;
- capul de lucru;
- obiectul prelucrat.

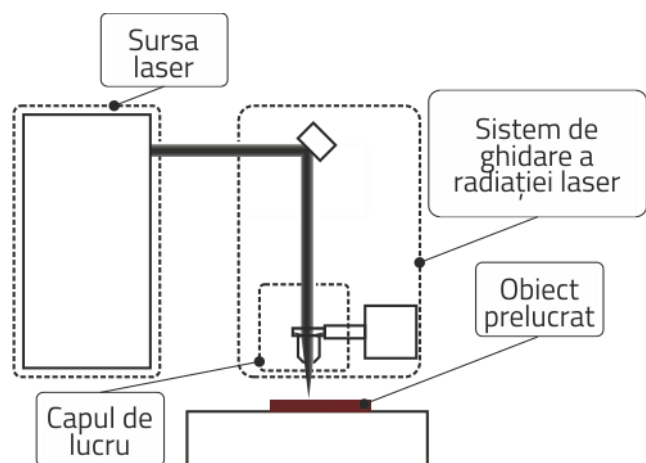


Figura 3.6 Schema bloc a unui echipament tehnologic laser



3.3.2. Echipamentul multifuncțional HP LaserJet 3055 all-in-one pentru scanarea imaginilor

Pentru a măsura culoarea și diametrele urmelor laserului pe material, probele prelucrate au fost scanate utilizând un scanner de birou comun. Prezentarea echipamentului se face în Figura 3.21. Caracteristicile tehnice ale imprimantei HP LaserJet 3055 all-in-one, fax, copiator, scanner pentru scanare sunt: rezoluție: 600 PPI, scanare full-color pe 24 de biți.

3.4. Metode și mijloace de măsurare a diametrelor urmei prelucrării

Pentru prelucrările realizate în cadrul experimentelor E2 au fost măsurate diametrele urmelor pe două direcții: una paralelă cu fibra lemnului și una perpendiculară pe fibră. Determinarea diametrului urmei laserului măsurat pe cele două direcții raportate la fibra lemnului s-a făcut prin măsurarea unei laturi a suprafeței prelucrate, apoi cunoscându-se că latura prelucrată este de 15 mm, s-a scăzut această valoare din cea măsurată obținându-se astfel diametrul urmei. Prelucrările sunt rectangulare, cele două valori măsurate au fost mediate aritmetic pentru a obține diametrul mediu al urmei laserului. Pentru fiecare regim de lucru s-au făcut cinci măsurători pe fiecare direcție.

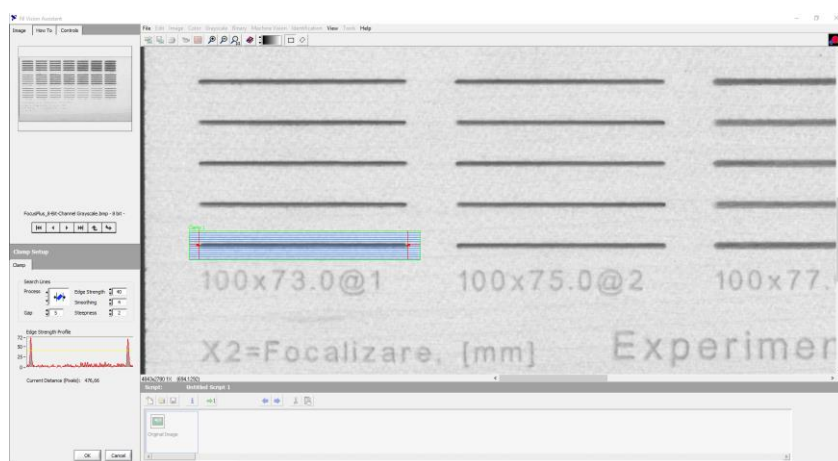


Figura 3.14 Măsurarea dimensională cu ajutorul programului National Instrument Vision Assistant

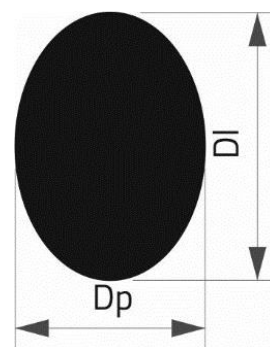


Figura 3.15 Schema unei urme datorate interacțiunii laserului cu materialul

Măsurările au fost realizate cu ajutorul aplicației software National Instrument Vision Assistant (Figura 3.14) care conține instrumentul Clamp. Acest instrument permite măsurarea distanței dintre două puncte identificate prin aceeași nuanță de gri. Datorită acestei caracteristici instrumentul este potrivit pentru măsurători deoarece se cunoaște faptul că urma laserului pe material nu este uniformă. În cazul de față s-a setat inițial toleranța de culoare, iar programul a determinat pixelii între care a făcut măsurătorile. Măsurarea s-a făcut în pixeli, iar apoi valorile obținute au fost transformate în mm.

Avantajele acestei metode sunt:

- Precizia mare de poziționare a măsurării;
- Posibilitatea de setare a toleranței uniformității culorii.

Dezavantajele acestei metode sunt:

- Programul returnează numărul de pixeli:
 - această valoare trebuie transformată în mm. Acest neajuns poate fi redus prin dezvoltarea



unei aplicații software dedicate;

- numărul de pixeli este un șir discret de valori. Acest inconvenient poate fi redus prin creșterea rezoluției imaginii analizate.

Măsurarea se face prin încărcarea imaginii în program și selectarea unui punct de pe suprafața care trebuie măsurată (Figura 3.14), atât pe direcție paralelă cu fibra lemnului cât și pe direcție perpendiculară cu aceasta.

Rezultatele directe ale măsurătorilor asupra diametrului urmei sunt: diametrul urmei măsurat în direcție paralelă cu fibra lemnului d_l [mm] și diametrul urmei măsurat în direcție perpendiculară cu fibra lemnului d_p [mm]. S-a considerat o formă ideală pentru aspectul urmei. Astfel s-a considerat o formă eliptică (Figura 3.15). S-a calculat diametrul mediu a urmei laserului pe lemn d_m [mm].

3.5. Metode și mijloace de măsurare a adâncimii de gravare a fasciculului laser în lemn

Altă provocare a cercetării experimentale o reprezintă măsurarea adâncimii de gravare a laserului în lemn. Dificultatea acestei măsurători constă în:

- ▣ Precizia de măsurare trebuie să fie foarte mare;
- ▣ Suprafața prelucrată nu este uniformă.

3.5.1. Aparatură



Figura 3.16 Traductorul de deplasare inductiv, pe principiu optic folosit pentru măsurarea adâncimii de gravare

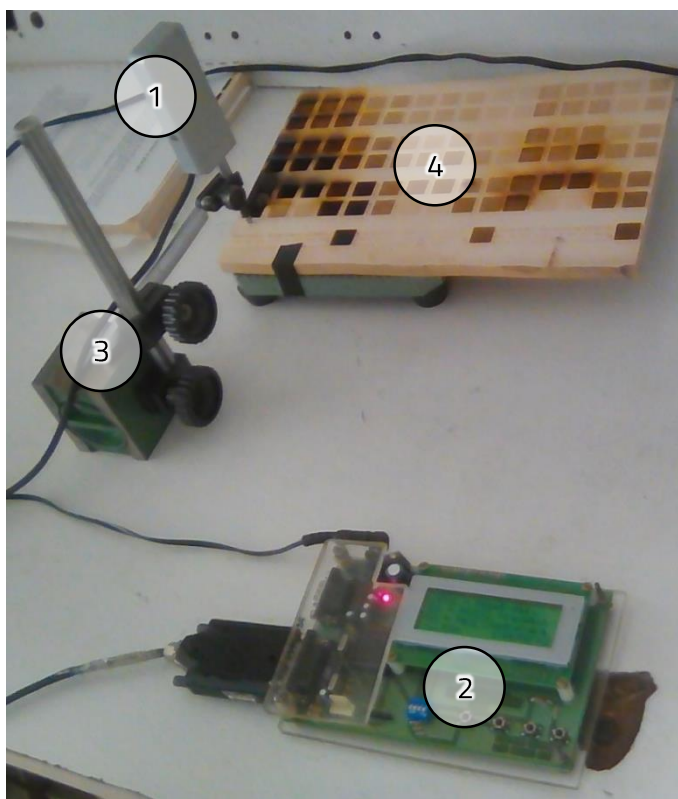


Figura 3.17 Montajul folosit pentru măsurarea adâncimii de gravare

1 – Traductorul de deplasare incremental; 2 – Montajul electronic; 3 – Dispozitivul de fixare a traductorului; 4 – Piesa analizată.



O serie de măsurători dimensionale a urmelor laserului asupra materialului lemnos o reprezintă adâncimea de gravare. Pentru acest scop s-a folosit montajul ilustrat în Figura 3.17.

Echipamentul de măsurare este format din:

1. Traductor de deplasare incremental;
2. Montaj electronic;
3. Dispozitiv de fixare a traductorului.

Traductorul de deplasare incremental, seria *MT 2751*, prezentat în Figura 3.16, funcționează pe principiul optic și a fost produs de firma *HEIDENHAIN* (Germania).

3.5.3. Compararea rezultatelor obținute prin metoda propusă cu cele măsurate cu aparate existente

În vederea verificării corectitudinii măsurătorilor prin metoda propusă, s-a făcut o comparare a valorilor obținute prin aceasta cu valori măsurate în aceleași puncte dar folosindu-se un șubler pentru măsurarea adâncimii. Comparațiile s-au făcut doar în intervalul de precizie comun a celor două aparate de măsură.

3.5.3.1. Măsurarea adâncimii de gravare folosind șublerul electronic

Aceste măsurători s-au efectuat cu ajutorul unui șubler digital.

Pentru experimente s-au păstrat constanți: $p = 0,0254$ mm, $P = 33,81$ W și $f = 20000$ Hz, iar variabila a fost viteza de avans.

Măsurătorile s-au făcut în câte 4 puncte pentru fiecare regim de lucru, iar pentru reprezentare grafică s-a făcut media măsurătorilor pentru fiecare regim tehnologic.

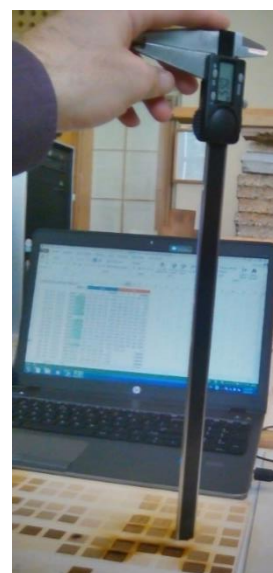


Figura 3.18 Măsurarea adâncimii cu ajutorul șublerului electronic

3.5.3.2. Măsurarea adâncimii folosind traductorul de deplasare incremental

Înainte de începerea măsurătorilor propriu-zise, s-a făcut fixarea, reglarea și calibrarea instrumentului. Măsurătorile s-au făcut pe cât posibil în aceleași locuri în care s-au făcut cele cu șublerul electronic.

3.5.3.3. Rezultate și discuții

Măsurătorile folosind șublerul electronic și traductorul de deplasare incremental au fost centralizate tabelar. Valorile culorii măsurate prin cele două metode sunt prezentate în Tabelul 3.6.

Reprezentarea grafică a variației adâncimii de gravare este prezentată în Figura 3.19. După cum se poate observa în acest grafic, chiar dacă valorile măsurate nu sunt identice, există o strânsă legătură între valorile măsurate cu ajutorul celor două metode; respectiv legea de variație este aceeași indiferent de metoda folosită.

Diferențele valorilor măsurate prin cele două metode se datorează diferenței de precizie dintre cele două aparate de măsură.

Avantajele folosirii traductorului de deplasare incremental prezentat în lucrare sunt:

- Precizia superioară de măsurare;
- Rezultatele se pot obține rapid prin salvarea pe disc a datelor măsurate și transferul acestora către alte aplicații software în vederea prelucrării acestora;
- Metoda este economică din punct de vedere financiar comparativ cu aparatele de măsură existente pe piață.

Tabelul 3.6 Valorile măsurate pentru adâncime folosind cele două metode de măsurare

Parametri de lucru: $P= 33,81W$, $p= 0,0254mm$, $f= 20000Hz$

v , [mm/s]	Adâncimea, h [mm]	
	Șubler	Traductor
125	2,96	3,5475
150	2,48	2,8260
200	2,08	2,5681
300	1,44	1,9309
400	1,14	1,5597
500	1,04	1,3506

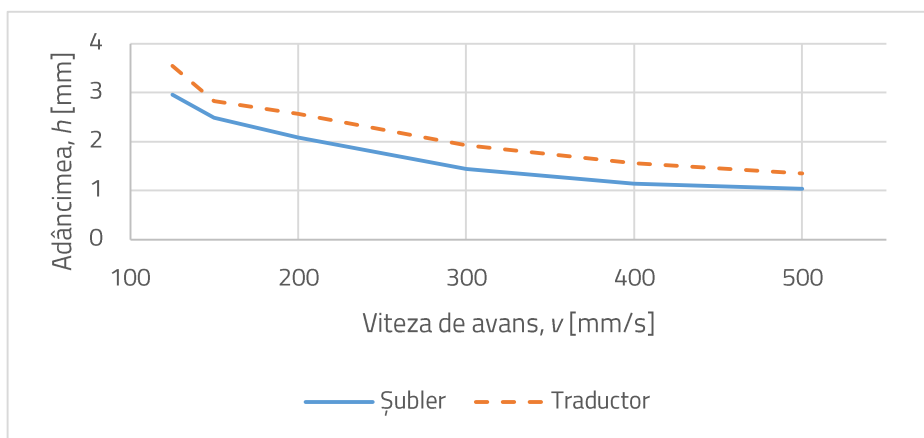


Figura 3.19 Reprezentarea grafică a variației adâncimii măsurată folosind cele două metode pentru $P= 33,81 W$

3.5.3.4. Analiza experimentului

Rezultatele metodei de măsurare propuse folosind traductorul de deplasare incremental este comparabilă cu cea folosind echipamente specializate de măsurare.

Chiar dacă metoda de măsurare a fost concepută pentru măsurarea adâncimii, aceasta poate fi folosită pentru orice altă măsurare dimensională.

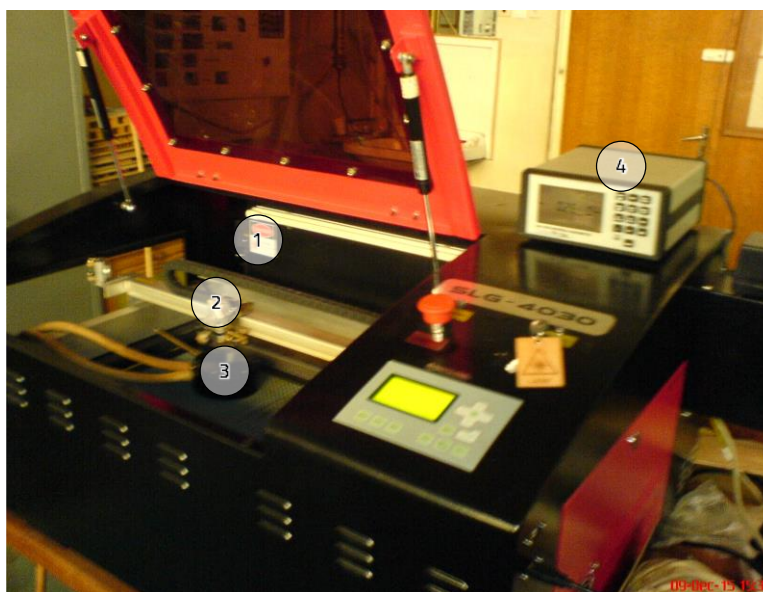


Figura 3.20 Măsurarea puterii efective a laserului:

1- Generator laser; 2- Cap de lucru (dispozitiv de focalizare); 3- Senzor de putere; 4- Radiometru.



3.6. Metode și mijloace de măsurare a puterii efective a laserului

3.6.1. Aparatură

Puterea radiației laser a fost măsurată folosind *Radiometrul universal Rm-3700*. Acestui aparat i-a fost conectat senzorul de putere *RKT-1500 W-CAL H*, așa cum se prezintă în Figura 3.20.

3.6.3. Rezultate și discuții

Valorile puterii măsurate în cele 5 puncte și media aritmetică a acestora, în W sunt prezentate în Tabelul 3.8.

Tabelul 3.8. Valorile puterii măsurate în cele 5 puncte și media aritmetică a acestora, în W

Puterea	Punctul 1	Punctul 2	Punctul 3	Punctul 4	Punctul 5	Media
10%	0,25	0,15	0,15	0,15	0,1	0,16
20%	1,9	1,55	1,55	1,4	1,3	1,54
30%	4,8	4,7	5,55	5	4,7	4,95
40%	9,75	8,7	9,6	9,9	8,4	9,27
50%	18,1	19,2	18,15	19,4	16,75	18,32
60%	20,8	21,9	25,3	23,1	22,25	22,67
70%	27,45	27,55	31,4	30,4	28,8	29,12
80%	31,65	32,25	34,95	34,5	31,5	32,97
90%	33,3	34,7	36,35	35,35	32,5	34,44
100%	33,2	33,85	37,3	36,2	32,85	34,68

Datele obținute au fost prelucrate cu ajutorul programului *DataFit®* de la *Oakdale Engineering*, determinându-se ecuația de regresie.

$$P_W = 0,00000984 \cdot 0,9565^{P\%} \cdot P_{\%}^{4,2392} \quad (3.2)$$

- În care:
- P_W reprezintă puterea rezultată, exprimată în W;
 - $P_{\%}$ reprezintă puterea setată a tubului laser, exprimată în %.

R^2 , care reprezintă gradul de fidelitate a valorilor experimentale pentru formula de mai sus este 0,998.

Folosind această ecuație se pot determina valorile puterii exprimate în W, pentru orice putere exprimată în %.

În Tabelul 3.9 sunt prezentate câteva exemple de conversie a puterii medii între cele două sisteme.

Rezultatele acestei metode de măsurare pot fi folosite și pentru determinarea energiei laserului. Măsurarea indirectă a energiei prezintă avantajul de a putea determina și analiza mai multe energii (liniară, pe suprafață).

Tabelul 3.9 Exemple de conversie a puterii

Puterea, în %	Puterea, în W
84,51	33,81
64,47	26,17
48,1	15,66
34,04	6,76
15,71	0,58



3.7. Metode și mijloace de măsurare a culorii suprafețelor mici și de dimensiuni variabile

Pentru a evalua modificările estetice, au fost aplicate măsurătorile de culoare $CIE L^*a^*b^*$ (1976). Acest sistem de măsurare constă din trei componente: L^* , a^* , și b^* . L^* reprezintă luminozitatea pe o scală de la 0 la 100, unde $L^*= 100$ este alb și $L^*= 0$ este negru. Parametrul a^* caracterizează valorile de verde (valori negative) și de roșu (valori pozitive). Parametrul b^* caracterizează valorile de albastru (valori negative) și de galben (valori pozitive).



Figura 3.21 Echipamentul pentru măsurarea culorii folosind metoda computerizată:

1- Multifuncțional HP LaserJet 3055 all-in-one; 2 - PC Pentium 4.

3.7.1. Aparatură

Având în vedere neajunsurile prezentate mai sus privitoare la măsurarea culorii, s-a impus dezvoltarea unei aplicații software care să diminueze aceste inconveniente. Programul a fost realizat în mediul de programare *Lazarus* (Lazarus, 2014), folosind limbajul *Turbo Pascal* (Laurenzi, 2012). Aceasta este o metodă originală de măsurare a culorii. Echipamentul de măsurare prezentat în Figura 3.21 este format din:

- PC Pentium 4;
- Multifuncțional *HP LaserJet 3055 all-in-one*;
- Aplicație software pentru măsurarea și analizarea datelor (Figura 3.22). Această aplicație a fost dezvoltată pe baza ecuațiilor (3.3)...(3.8).

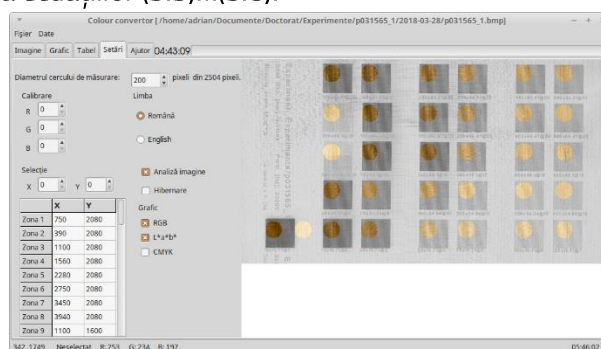


Figura 3.22 Tab-ul Setări

3.7.3. Compararea rezultatelor obținute prin metoda propusă cu cele măsurate cu aparate existente

Pentru a verifica metoda de măsurare prezentată anterior, s-a făcut următorul experiment. S-a folosit



o bucată de lemn masiv cu dimensiunile 350x105x8 mm (Figura 3.32). Înainte de începerea lucrului, epruveta a fost condiționată la temperatura de 20°C și umiditatea relativă a aerului de 65%, pentru a ajunge la umiditate mai mică de 12% (Cismaru, 2003).

Suprafața epruvetei a fost împărțită în 30 de careuri dintre care 20 au fost prelucrate prin iradiere cu laser, iar 10 au fost păstrate de referință. Forma epruvetei folosite pentru măsurarea culorii. este prezentată în Figura 3.16. Pentru ardere s-a folosit următorul regim de lucru:

- Puterea medie a laserului a fost păstrată constantă la 0,5 W;
- Pasul a fost păstrat constant la 0,0254 mm;
- Viteza de avans a variat de la 100 mm/s la 500 mm/s din 100 în 100 mm/s.
- Direcția de avans a fost în lungul fibrei lemnului pentru toate regimurile de lucru.

Careurile prelucrate au fost așezate pe două rânduri astfel încât să fie acoperită o suprafață cât mai eterogenă; având în vedere că există diferențe între fibrele lemnului. Pentru fiecare regim de lucru s-au ars 4 careuri așezate astfel încât să fie prelucrate câte 2 din ambele rânduri.

Culoarea a fost măsurată prin două metode:

1. folosind spectrofotometrul AVANTES AvaSpec-2048-USB2;
2. folosind metoda computerizată.



Figura 3.32 Forma epruvetei folosite pentru măsurarea culorii

3.7.3.1. Măsurarea folosind spectrofotometrul AVANTES AvaSpec-2048-USB2

În Figura 3.33 este prezentat echipamentul format din:

- spectrofotometru AVANTES AvaSpec-2048-USB2;
- sursă de lumină AvaLigth - HAL (S) conectată prin fibră optică;
- generator optic cu lungimea focală de 75 mm;
- PC pentru stocarea și prelucrarea datelor, prevăzut cu software pentru aplicații de culoare AVA SPEC 7.7.

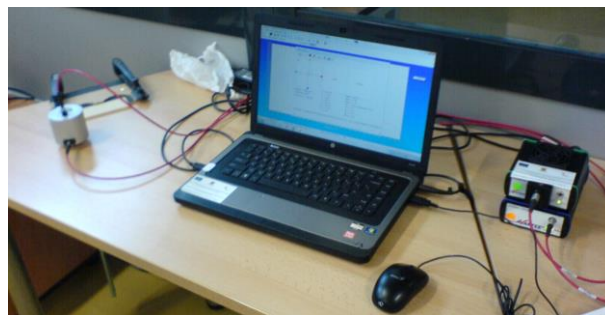


Figura 3.33 Echipamentul pentru măsurarea culorii

Măsurătorile s-au făcut în câte 4 puncte pentru fiecare regim de lucru, iar pentru reprezentare grafică s-a făcut media măsurătorilor pentru fiecare regim tehnologic.

3.7.3.2. Măsurarea culorii folosind metoda computerizată

Epruvetele au fost scanate și imaginile obținute au fost apoi analizate cu aplicația software creată special pentru acest lucru.

Înainte de începerea măsurătorilor propriu-zise, s-a făcut calibrarea programului. Acest lucru este



posibil datorită funcției de calibrare a programului.

Măsurătorile s-au făcut pe cât posibil în aceleași locuri în care s-au făcut cele cu spectrofotometrul.

Măsurătorile s-au făcut în sistemul *RGB* și apoi au fost convertite în sistemul *CIEL*a*b** pentru a putea fi comparate cu valorile obținute cu spectrofotometrul.

3.7.3.3. Rezultate și discuții

Măsurătorile folosind spectrofotometrul și prin metoda computerizată au fost centralizate tabelar. Valorile culorii măsurate prin cele două metode sunt prezentate în Tabelul 3.10.

Reprezentarea grafică a variației parametrilor de culoare măsurați în sistemul *CIEL*a*b** este prezentată în Figura 3.34. După cum se poate observa în acest grafic, chiar dacă valorile măsurate nu sunt identice, există o strânsă legătură între parametrii omonimi măsurați cu ajutorul celor două metode; respectiv legea de variație este aceeași indiferent de metoda folosită.

Tabelul 3.10 Valorile măsurate pentru culoare folosind cele două metode

Viteza, <i>v</i> [mm/s]	Spectrofotometru			Metoda computerizată		
	<i>L*</i>	<i>a*</i>	<i>b*</i>	<i>L*</i>	<i>a*</i>	<i>b*</i>
0	82,21	4,99	16,79	90,69	2,79	18,21
100	63,23	8,79	23,14	72,51	7,33	28,32
200	65,41	8,61	20,76	73,44	6,95	26,04
300	70,81	7,84	20,88	78,70	6,16	24,83
400	72,62	7,62	20,48	81,24	5,88	24,56
500	76,29	7,04	18,77	86,10	4,57	21,18

Diferențele valorilor măsurate prin cele două metode se datorează faptului că metoda folosind spectrofotometrul este mai puțin precisă din următoarele motive:

- Suprafața de măsurare este fixă;
- Poziționarea detectorului este dificilă datorită dimensiunilor sferei de măsurare.

Avantajele metodei computerizate prezentate în lucrare sunt:

- În cele mai multe cazuri este necesar să se măsoare diferența de culoare prin două sau mai multe măsurători în același loc. Pentru aceasta trebuie să se cunoască locația exactă a zonei măsurate, cu atât mai mult în cazul lemnului care este un material eterogen, iar o poziționare greșită a zonei de măsurare afectează măsurătorile. De obicei se folosește marcarea zonei cu un creion pentru a se poziționa sfera de măsurare în același loc (Olărescu, 2015), dar această metodă afectează rezultatele. Altă metodă de poziționare presupune utilizarea unui șablon din Plexiglas (Millis, 2013), dar această metodă este costisitoare deoarece presupune confecționarea a câte unui dispozitiv tehnologic pentru fiecare formă și mărime de epruvetă. Metoda propusă elimină aceste dezavantaje deoarece nu necesită nici însemnarea pe material a zonelor de măsurare și nici folosirea vreunui dispozitiv tehnologic;
- Rezultatele se pot obține rapid prin salvarea pe disc a datelor măsurate și transferul acestora către alte aplicații software în vederea prelucrării;
- Datele salvate pe disc privind suprafețele măsurate pot fi folosite ulterior pentru alte



măsurători ale aceleiași epruvete, dacă se dorește studierea variației culorii în timp sau în urma unui tratament, sau se pot folosi pentru măsurarea altor epruvete similare;

- Metoda este economică din punct de vedere financiar;

- Este o metodă simplă și accesibilă. Aparatura utilizată este la îndemâna oricărui utilizator;

- Un avantaj important îl reprezintă posibilitatea de a măsura culoarea pe suprafețe foarte mici. Acest lucru nu este posibil folosind aparatele specializate deoarece acestea măsoară pe o suprafață mai mare. Suprafața de măsurare este determinată și limitată de posibilitățile tehnologice;

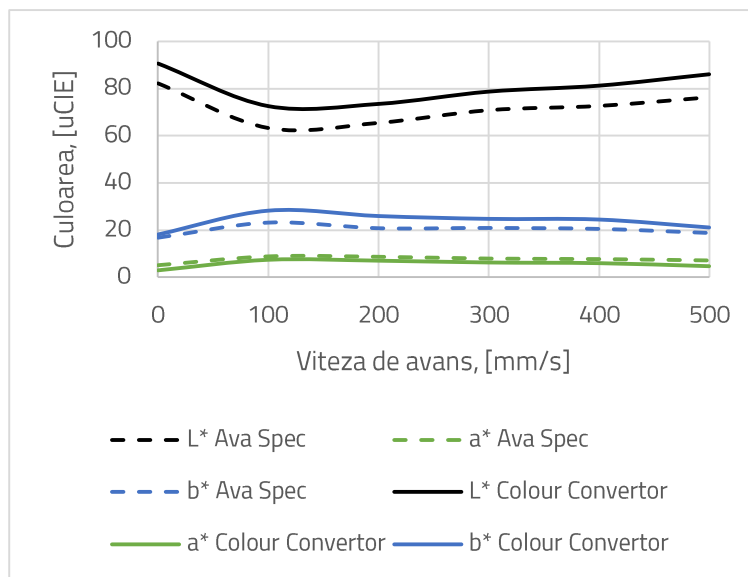


Figura 3.34 Représentarea grafică a variației parametrilor de culoare măsurați cu cele două metode

- Folosind alte aplicații software comerciale se poate măsura culoarea pe suprafețe de mărimi predefinite. De exemplu Popa & Popa (2008), observă că, folosind programul *CorelDRAW®12* se poate măsura culoarea doar pentru suprafețe de 1x1pixeli; 2x2pixeli și 5x5pixeli. Aplicația propusă permite selectarea mărimii suprafeței de măsurare de la 1x1pixeli până la dimensiunea cea mai mică a imaginii.

Dintre dezavantajele metodei computerizate concepute pentru această lucrare, enumerăm:

- măsurarea este influențată de proprietățile scannerului. Acest inconvenient poate fi diminuat prin folosirea aceluiași scanner pentru toate măsurătorile și prin folosirea opțiunii de calibrare a aplicației software.
- rezoluția de scanare a imaginii influențează măsurarea, dar nu semnificativ deoarece între pixeli nu există spații libere. Pentru ca rezoluția să influențeze măsurarea trebuie ca aceasta să fie foarte mică, lucru care este tot mai puțin probabil datorită dezvoltării tehnologiei digitale care permite obținerea de rezoluții din ce în ce mai mari și spații de stocare a imaginilor tot mai generoase.

3.8. Programe de experimentare

Aranjarea experimentelor pe materialul lemnos s-a făcut, pe cât posibil, pe o linie paralelă cu fibra lemnului. Folosind acest mod de aranjare, au fost evitate o serie de erori legate de neomogenitatea lemnului cum ar fi: lățimea inelelor anuale, proporție de lemn târziu și de lemn timpuriu etc., dar și neajunsuri legate de pregătirea materialului cum ar fi: direcția de debitare, direcția fibrelor etc. Toate acestea influențează în principal culoarea suprafeței lemnului. Printre suprafețele prelucrate au fost lăsate și zone neprelucrate în ideea de a avea suprafețe de referință cât mai apropiate din punct de vedere al poziționării față de cele prelucrate.



Pentru experimente au fost folosite următoarele condiții experimentale generale:

- placă din lemn masiv de paltin de câmp cu grosimea de 12 mm;
- iradiere folosind laser cu CO_2 , lungimea de undă, $\lambda = 10,6 \mu\text{m}$;
- transmiterea radiației laser s-a realizat prin sistem optic cu oglinzi de reflexie totală;
- spotul laser are forma circulară, cu diametrul în pata focală, $d_{pf} = 0,0254 \text{ mm}$;
- gazul de asistare utilizat a fost aerul comprimat;
- distanța focală a lentilei de focalizare a fost de 73 mm, excepție făcând doar experimentele care au studiat influența acestui parametru asupra prelucrării;
- distanța dintre duza de suflare a gazului și piesă a fost de 50 mm, excepție făcând doar experimentele care au studiat influența acestui parametru asupra prelucrării;
- gazul de asistare a fost suflat către piesă coaxial cu fasciculul laser;
- focalizarea radiației a fost realizată la suprafața piesei, respectiv $\delta = 0 \text{ mm}$, excepție făcând doar experimentele care au studiat influența acestui parametru asupra prelucrării;
- iradierea a fost realizată în regim pulsant folosind frecvența $f = 20000 \text{ Hz}$, excepție făcând doar experimentele care au studiat influența acestui parametru asupra prelucrării.

3.8.1. Cercetare teoretică privind experimentele preliminare – determinarea intervalelor de variație a principalilor parametri de prelucrare (Experimentele E1)

Etapă de experimente *E1* (numită și etapă preliminară) are ca scop studiul efectelor factorilor care controlează iradierea asupra procesului de pirogravare cu fascicul laser.

Această etapă urmărește obținerea unor modele matematice experimentale pentru factorii principali care se presupune că influențează pirogravarea cu laser și determinarea intervalelor de variație a acestora. În urma analizelor primare efectuate asupra procesului, s-a optat pentru modelarea prin experimente clasice complete. Volumul experimental este adaptat pentru fiecare factor analizat, au fost realizate 7 planuri experimentale notate cu *E1*. Factorii de influență sunt:

1. Puterea medie a fasciculului laser, $P [W]$;
2. Viteza de avans a capului de lucru, $v [mm/s]$;
3. Pasul capului de lucru, $p [mm]$;
4. Frecvența de pulsație, $f [Hz]$;
5. Poziția planului focal (defocalizarea), $ppf (\delta) [mm]$;
6. Direcția de avans a capului laser raportată la orientarea fibrei lemnului;
7. Numărul de treceri.

Pe baza informației apriorice din literatura de specialitate au fost stabilite intervalele de variație pentru fiecare factor de influență, rezultând valorile nivelelor superior și inferior pentru fiecare factor de influență. Ceilalți factori au fost menținuți constanți pentru aceste experimente. Valorile numerice folosite sunt indicate în Tabelul 3.2.

3.8.2. Cercetare teoretică privind experimentul principal – determinarea influenței parametrilor principali de prelucrare (*Experimentul E2*)

În acest paragraf se va prezenta Experimentul 2 (*E2C* și *E2F*), care prezintă o cercetare extinsă a procesului de pirogravare cu laser a lemnului. Experimentele au fost realizate pe același echipament de prelucrare cu laser prezentat în lucrare și folosindu-se aceeași specie lemnoasă ca în cazul experimentelor preliminare, respectiv paltinul de câmp.

3.8.2.1. Experimentul E2C

Planul experimental constă din serii experimentale clasice pentru variația puterii medii, a vitezei de avans și a pasului capului de lucru. S-a fixat frecvența de pulsație. Variația puterii medii s-a realizat prin variația energiei de alimentare a tubului laser. Pentru fiecare experiment s-au realizat cinci replici pentru aceleași condiții experimentale dar așezate în poziții diferite pe masa de lucru: câte una în fiecare din cele patru colțuri și una în centru. Factorii de influență variați au fost următorii:

- Viteza de avans a capului de lucru, v [mm/s];
- Puterea medie a laserului, P [W];
- Pasul capului de lucru, p [mm].

Experimentul principal este alcătuit dintr-un experiment clasic cu 3 variabile a câte minimum 5 puncte de măsurare. Pentru fiecare regim de lucru s-au făcut 5 replici pentru fiecare regim s-a calculat valoarea medie a replicilor. În ideea interpretării cât mai exacte a datelor experimentale, din acest plan experimental a fost întocmit planul experimental factorial.

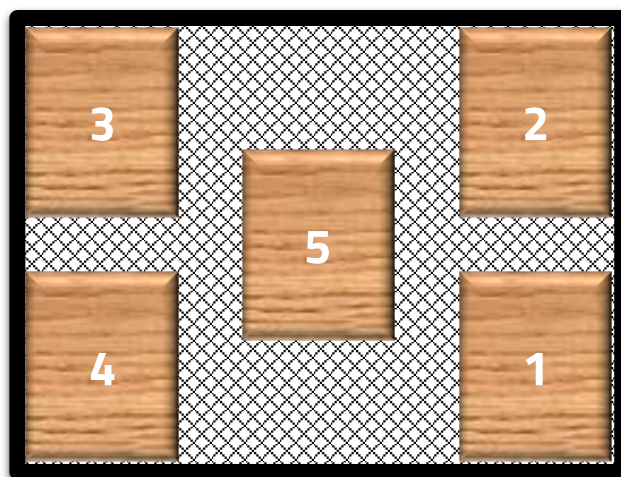


Figura 3.35 Modul de aranjare a materialului de prelucrat pe masa mașinii

Planurile experimentale pentru 2 factori, respectiv viteza de avans și puterea laserului, sunt prezentate în Tabelul 3.11. După cum se poate observa, au fost stabilite 31 de regimuri de lucru la care se adaugă o suprafață neprelucrată, care este considerată de referință.

Tabelul 3.11 Regimurile de lucru pentru planurile experimentale cu viteza de avans și cu puterea laserului

Puterea, P [W]	Viteza de avans, v [mm/s]											
	10	15	20	50	75	100	125	150	200	300	400	500
0,5	√	√	√	√	√	√	√					
8,5				√	√	√			√	√	√	√
16,5					√	√			√	√	√	√
24,5						√			√	√	√	√
32,5							√	√	√	√	√	√

La planul experimental de mai sus se adaugă cel de-al treilea factor, anume pasul capului de lucru. În cazul acestui factor, intervalul de variație a fost stabilit pe baza experimentelor anterioare. Acest

interval a fost împărțit în 4 părți egale, respectiv 5 puncte de măsurare. Întregul plan experimental a totalizat $31 \times 5 = 155$ experimente. Din dorința de a se evita erorile experimentale cauzate de sistemul optic de transfer a radiației de la sursa laser la materialul de prelucrat, dar și pentru că energia activă a laserului care ajunge la material este diferită, chiar dacă parametrii de lucru sunt aceiași, datorită influenței distanțelor pe care radiația le parcurge de la generatorul laser la material, fiecare experiment a fost repetat de 5 ori în 5 puncte diferite pe masa de lucru, rezultând astfel $155 \times 5 = 775$ prelucrări. Amplasarea punctelor de prelucrare pe masa mașinii este prezentată în Figura 3.35.

Experimentul *E2C* a considerat alte condiții experimentale față de experimentele *E1*. Principala deosebire o reprezintă varierea a trei factori cu cel puțin cinci valori pentru fiecare dintre aceștia. Planul experimental principal a fost valorificat prin analiza directă a variațiilor ecuațiilor de regresie după seriile experimentale clasice. Încercările de la experimentul principal sunt suficient de multe pentru a fi întocmit și analizat un plan experimental factorial.

3.8.2.2. Experimentul E2F

Pentru a analiza cât mai eficient variabilele cheie care afectează în mod semnificativ variabilele de răspuns și pentru a investiga interdependența parametrilor de prelucrare asupra acestora, a fost efectuată o modelare factorială 2^3 . Planul experimental se bazează pe datele planului experimental clasic. Această abordare a fost realizată în scopul de a reduce numărul de experimente în timpul obținerii de rezultate fiabile în intervalul de parametri de proces selectați. Au fost investigate două niveluri pentru fiecare dintre cei trei parametri de procesare.

În vederea verificării datelor experimentale și pentru a genera un algoritm de proiectare optim, a fost utilizată aplicația software *Statgraphics® Centurion* versiunea XVI, marcă înregistrată de *StatPoint Technologies, Inc.* Algoritm de proiectare optim a fost ales cel cu 10 experimente care formează un plan factorial 2^3 , cu două puncte centrale de verificare. Analiza cu considerarea interacțiunilor de ordinul 2 pare a fi cea mai bună în comparație cu cele care conțin interacțiuni de ordinul 1 și 3. Aici se poate observa că parametrii au fost variați în intervale de operare limitate. Aceste intervale au fost selectate în urma experimentelor anterioare din această lucrare.

Factorii analizați sunt următorii:

Cele mai importante elemente analizate sunt următoarele:

- Tabelul ANOVA;
- Modelul matematic;
- Diagrama Pareto;
- Suprafața de răspuns.
- X_1 reprezintă viteza de avans, v , deplasarea pe axa X , exprimată în mm/s;
- X_2 reprezintă puterea medie a laserului, P , exprimată în W;
- X_3 reprezintă pasul, p , deplasarea pe axa Y , exprimată în mm;
- Y_1 reprezintă luminozitatea, L^* , exprimată în uCIE;
- Y_2 reprezintă adâncimea de gravare, h , exprimată în mm;
- Y_3 reprezintă diametrul mediu al urmei rezultate în urma interacțiunii dintre laser și lemn, d_m , exprimat în mm.

Pe baza observațiilor din experimentul clasic au fost stabilite coordonatele punctului central al experimentului și intervalele de variație ale celor 3 factori de influență, rezultând valorile nivelurilor superior și inferior pentru fiecare factor de influență. Valorile numerice rezultate sunt prezentate în



Tabelul 3.12.

Pentru modelarea factorială s-au folosit datele de la experimentele E2C. Deoarece în experimentele clasice nu s-au făcut determinări pentru punctul central al puterii medii, respectiv la $P= 20,92$ W, s-au folosit datele experimentale de la punctele adiacente punctului central, respectiv de la $P= 15,66$ W și, respectiv $P= 26,17$ W.

Tabelul 3.12 Nivelurile factorilor de influență

Factor de influență	Valori codate	Valori fizice		
		v , [mm/s]	P , [W]	p , [mm]
Punctul central	0	300	20,92	0,2189
Intervalul de variație	Δj	2	12,89	0,1935
Nivel inferior	-1	200	6,76	0,0254
Nivel superior	+1	400	33,81	0,4124

Cei trei factori variați în experiment caracterizează condițiile de iradiere ale materialului. Puterea medie influențează intensitatea fasciculului laser la suprafața piesei iar viteza și pasul capului de lucru influențează timpul de interacțiune între radiația laser și material. Pentru putere s-a ales valoarea nivelului superior generată de echipamentul laser, iar pentru nivelul inferior s-a ales valoarea nivelului inferior apropiată de valoarea minimă experimentată pentru care s-au făcut deja experimente. Pentru viteza de avans limitele s-au stabilit la valorile inferioară și superioară la cele învecinate limitelor analizate în cazul experimentului clasic. Pentru pasul capului de lucru, sau stabilit ambele limite la nivelurile celor din experimentele clasice.

O sinteză a relațiilor de transformare între cele două sisteme de valori pentru factorii de influență este prezentată în Tabelul 3.13.

Structura planului este cea corespunzătoare unui experiment factorial complet 2^3 , cu o încercare în punctul central. Factorilor de influență, pas, putere și viteză le-au fost atribuite câte două niveluri de variație pentru explorarea spațiului multifactorial. Dimensiunile acestui spațiu au fost stabilite pe baza experimentului clasic.

Tabelul 3.13 Funcțiile de transformare între valorile reale ale factorilor de influență și cele din sistemul codificat pentru experimentul E2F

Mărimea	Funcția directă	Funcția inversă
Viteza, v	$A=0,01 \cdot v - 3[-]$	$v = 100 \cdot A + 300[\text{mm/s}]$
Puterea, P	$B=0,073937 \cdot P - 1,499815[-]$	$P = 13,52503 \cdot B + 20,28504[\text{W}]$
Pasul, p	$C=5,16795 \cdot p - 1,131262[-]$	$p = 0,1935 \cdot C + 0,2189[\text{mm}]$

Valorile fizice și codificate alocate celor 3 factori în cadrul experimentului sunt sintetizate în Tabelul 3.13, amplasarea punctelor experimentale sunt prezentate în Figura 3.36, iar structura matricii programului experimental în Tabelul 3.23. Legătura dintre valorile fizice și cele codificate ale unei ecuații de regresie este definită de relația (3.13), (Cicală, 1999) citat de (Laslău, 2012):

$$x_{\text{icod}} = \frac{x_{\text{ifiz}} - x_{\text{ifiz0}}}{I}, [-] \quad (3.13)$$

în care: x_{icod} reprezintă valoarea codificată a factorilor de influență;

x_{ifiz} este valoarea fizică a factorilor de influență;

x_{ifiz0} este valoarea fizică în punctul central;

I este intervalul de variație al factorilor.

Pentru determinarea erorii experimentale asociată funcțiilor de răspuns, pe lângă cele 8 încercări, s-au mai efectuat două încercări în jurul punctului de coordonate ($p=0,2189$ mm; $P=20$ W; $v=300$ mm/s), considerat punctul central al experimentului factorial. Deoarece planul experimental clasic nu a inclus și $P=20$ W, s-au considerat 2 puteri în jurul acestei valori, respectiv $P=15,66$ W și $P=26,17$ W.

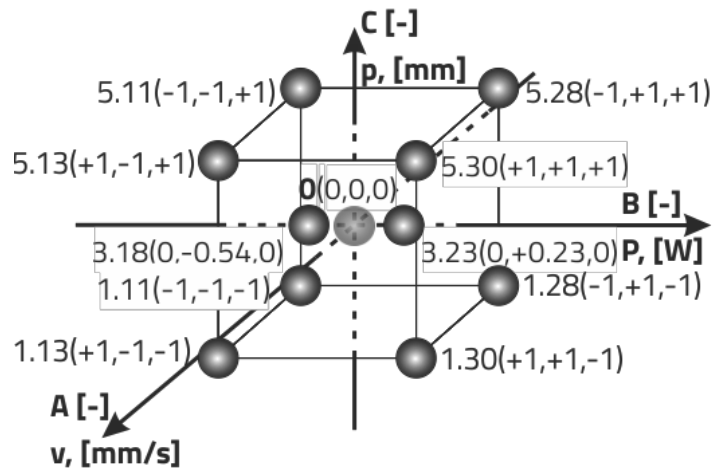


Figura 3.36 Dispunerea punctelor experimentale în spațiul multifactorial pentru planul experimental factorial E2F

Diagrama Pareto, este un tip de diagramă care conține atât bare, cât și un grafic liniar, unde valorile individuale sunt reprezentate, în ordine descrescătoare, prin bare, iar totalul cumulat este reprezentat de linie. Scopul diagramei Pareto este de a evidenția cele mai importante dintre seturile de factori (de obicei mari). În controlul calității, acesta reprezintă adesea cele mai frecvente surse de defecte, cel mai mare defect care apare, sau cele mai frecvente motive pentru plângerile clienților și așa mai departe.

În cazul de față acest tip de diagramă s-a folosit pentru a evidenția gradul de influență asupra luminozității a fiecărui factor separat, dar și a interacțiunii dintre doi factori.

3.8.2.3. Măsurarea luminozității, L^*

Măsurarea luminozității în cadrul experimentului principal s-a făcut după următoarea procedură:

- Fiecare suprafață pirogravată a fost scanată cu rezoluția 600 DPI. La aceste suprafețe s-au adăugat câte o suprafață analizată într-o zonă neprelucrată pentru fiecare epruvetă realizată. Această suprafață a fost folosită ca suprafață de referință;
- S-a analizat fiecare suprafață scanată folosindu-se metoda prezentată în această lucrare, setându-se diametrul suprafeței de măsurare la 200 pixeli, totalizând 31987 pixeli măsurați pentru fiecare suprafață analizată. Valoarea L^* a fost calculată ca medie aritmetică a tuturor pixelilor măsurați de pe o suprafață;
- Datele exprimate în sistemul $CIE L^*a^*b^*$, care exprimă direct luminozitatea, au fost exportate și analizate cu ajutorul programelor software specializate.

3.9. Rezultatele cercetării experimentale și interpretarea acestora

Pentru atingerea obiectivelor tezei de doctorat a fost proiectat și pus în aplicare un program experimental complex, care integrează experimente clasice și factoriale, realizate la nivel de fază preliminară (prin varierea unui singur parametru de prelucrare) și la nivel de fază principală (prin

variarea simultană celor mai importanți parametri de prelucrare).

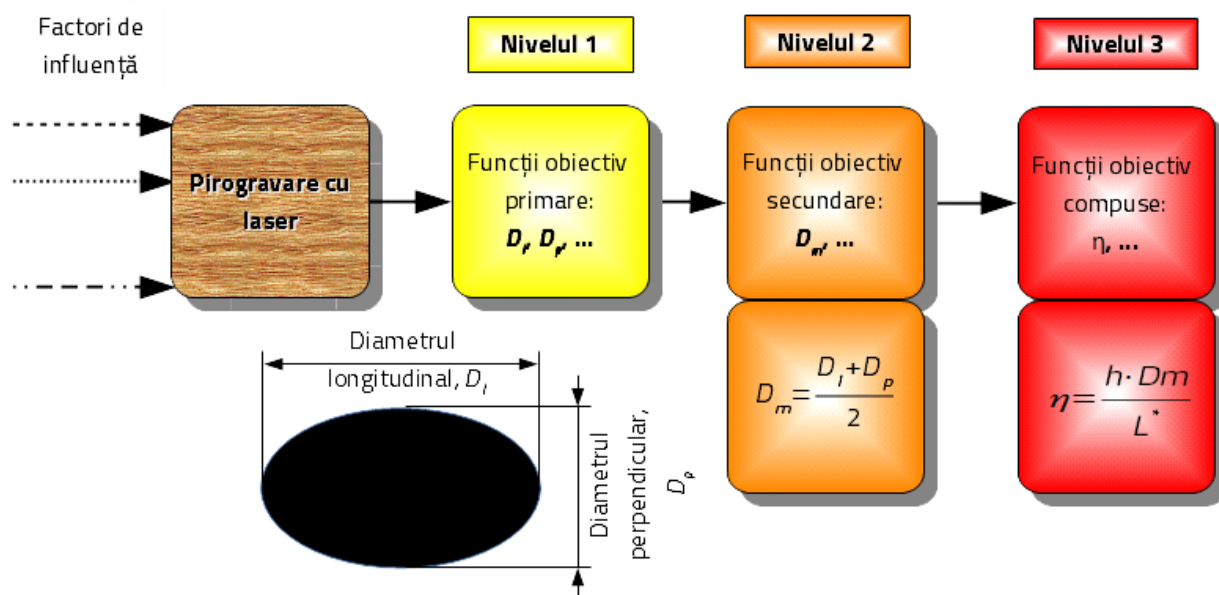


Figura 3.38 Schema procesării datelor experimentale

A acțiunile enumerate au ca premisă logică faptul că principalul purtător de informație asupra evoluției, efectelor induse și eficienței proceselor de prelucrare investigate este arderea fizică, efectiv realizată în urma interacțiunii laserului cu materialul. Această prelucrare poate fi caracterizată din următoarele puncte de vedere:

- geometric (formă, dimensiuni, poziție relativă);
- fizic (modificări de culoare pe suprafețele prelucrate);
- tehnico-economic (obținerea rezultatului dorit în timpul cel mai scurt).

- Luminozitatea $Y_1 = L^* [\text{uCIE}]$;
- Adâncimea de gravare $Y_2 = h [\text{mm}]$;
- Diametrul urmei fasciculului pe material măsurat în lungul fibrei lemnului $Y_3 = d_l [\text{mm}]$;
- Diametrul urmei fasciculului pe material măsurat perpendicular pe fibra lemnului $Y_4 = d_p [\text{mm}]$;

- Diametrul mediu al urmei fasciculului pe materialul lemnos $Y_5 = d_m [\text{mm}]$;

- Productivitatea procesului de pirogravare, $Y_6 = \eta [\text{mm}^2/\text{uCIE}]$;
- Distincția zonelor iradiate, $Y_7 = d_z [(\text{uCIE} \cdot \text{mm})^{-1}]$;
- Uniformitatea zonei iradiate, $Y_8 = u_z [\text{uCIE}]$;
- Energia liniară, $Y_9 = E_l [\text{J}/\text{mm}]$;
- Raportul abstract, $Y_{10} = j, [\text{J}/\text{mm}^2]$.

Figura 3.39 Prezentarea ecuațiilor de regresie pe niveluri

În contextul descris, stabilirea ecuațiilor de regresie și selecția factorilor de influență semnificativi ai

proceselor de pirogravare cu laser investigate s-au raportat la aceeași specie lemnoasă. O imagine de ansamblu a structurii și succesiunii logice a procesării datelor experimentale în condițiile specifice cercetării efectuate este prezentată în Figura 3.38.

Ecuțiile de regresie (simbolizate în tabele și grafice cu Y_i), asumate ca expresii ale legăturilor de cauzalitate dintre factorii de influență și efectele de interes tehnologic, în condițiile date, sunt prezentate în Figura 3.39.

Ecuțiile de regresie care urmează a fi studiate au fost definite și calculate funcție de luminozitate și de forma prelucrării. Din măsurători directe s-au determinat: Luminozitatea L^* [uCIE], adâncimea de gravare, h [mm] și diametrul urmei fasciculului laser pe material măsurat în lungul fibrei lemnului d_l [mm], respectiv diametrul urmei fasciculului laser pe material măsurat perpendicular pe fibra lemnului d_p [mm]. Alături de aceste ecuații de regresie determinate direct prin măsurare, s-au determinat prin calcul și celelalte ecuații de regresie considerate care sunt următoarele:

1. **Diametrul mediu al urmei spotului laser pe material, d_m [mm]**, reprezintă media aritmetică dintre urmei fasciculului laser pe material măsurat în lungul fibrei lemnului și diametrul urmei fasciculului laser pe material măsurat perpendicular pe fibra lemnului (Figura 3.40). Diametrul mediu caracterizează în mod unitar prelucrarea realizată fără a lua în considerare specifică direcția de măsurare raportată la orientarea fibrei lemnului.

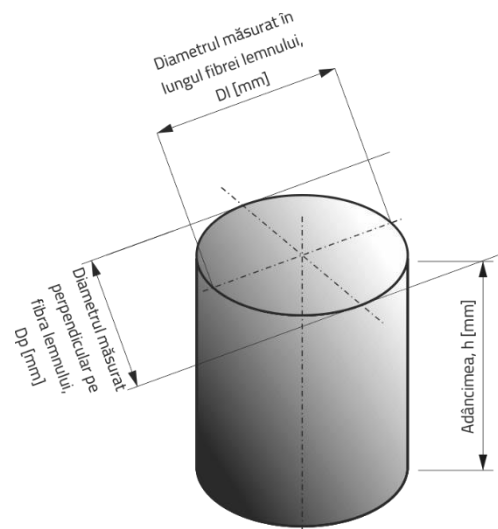


Figura 3.40 Forma generală a urmei laserului pe material

$$d_m = \frac{d_l + d_p}{2} \text{ [mm]} \quad (3.28)$$

2. **Productivitatea procesului de pirogravare, η [mm²/uCIE]**, se definește ca fiind o mărime direct proporțională cu h și cu d_m și invers proporțională cu L^* . Are dimensiunea unei suprafețe și ar reprezenta aria secțiunii penetrate în interiorul materialului. Această mărime arată consumarea energiei iradiate pentru a înnegri și pentru a arde material, adică un proces tehnologic util. Variația acestei mărimi poate fi studiată în funcție de putere, viteză și pas. Însă dependența care interesează cel mai mult este cea între η și viteză. Creșterea vitezei în condițiile menținerii unui rezultat bun al procesului de prelucrare înseamnă scăderea timpului în care funcționează mașina laser.

$$\eta = \frac{h \cdot d_m}{L^*}, \left[\frac{\text{mm}^2}{\text{uCIE}} \right] \quad (3.29)$$

3. **Distincția zonelor iradiate, d_z [(uCIE*mm)⁻¹]** este direct proporțională cu modificarea culorii și invers proporțională cu d_m . O d_z bună este asociată cu pirogravarea unui model cu multe detalii.



$$d_z = \frac{1}{L \cdot d_m}, \left[\frac{1}{uCIE \cdot mm} \right] \quad (3.30)$$

4. **Uniformitatea zonei iradiate, u_z [uCIE]** arată posibilitatea inversă cazului anterior și anume schimbarea culorii unei zone largi fără a produce diferențe. Aceasta este invers proporțională cu d_z și cu h .

$$u_z = \frac{L \cdot d_m}{h}, [uCIE] \quad (3.31)$$

5. **Energia liniară, E_l [J/mm]** reprezintă raportul dintre puterea medie a laserului și viteza de avans a capului de lucru.

$$E_l = \frac{P}{v}, \left[\frac{J}{mm} \right] \quad (3.32)$$

6. **Raportul abstract j , [J/mm²]** consideră depărtarea iradierilor și are dimensiunea unei radianțe:

$$j = \frac{E_l}{pas}, \left[\frac{J}{mm^2} \right] \quad (3.33)$$

7. Model al reflectanței suprafeței lemnului în funcție de parametrii de lucru:

$$L^* = \frac{45,394 - 26,099 \cdot (P/v_t)}{5,529 + 177,603 \cdot (P/v_t)} (9,528 + 0,103 \cdot P), [uCIE] \quad (3.34)$$

În care: $v_t = v \cdot \sqrt{1 + 572,248 \cdot p^2}, \left[\frac{mm}{s} \right]$

Principalii factori de influență controlabili, luați în considerare în condițiile programului experimental efectuat, au fost: energia liniară E_l [J/mm] (dependentă de puterea medie a radiației laser P [W], și viteza de avans v [mm/s]) și pasul capului de lucru p [mm].

În Figura 3.38 este evidențiat caracterul secvențial, etapizat al metodicii de procesare a datelor experimentale, aplicate în prezenta cercetare. Acest caracter este determinat de natura intrinsecă a ecuațiilor de regresie urmărite: primare, secundare, integratoare; dar și de succesiunea logică a relațiilor de calcul aplicate.

Procesarea datelor experimentale nu este însă un scop în sine. Ea reprezintă un mijloc esențial de tranziție de la rezultatele nemijlocite ale programelor experimentale la o bază de date, informații și cunoștințe pertinente. O asemenea bază este absolut necesară pentru analiza, interpretarea și valorificarea rezultatelor globale ale cercetării doctorale. Aprofundarea acțiunii de procesare a datelor experimentale prin prisma finalității acesteia, este posibilă prin dezvoltarea unui model cibernetice intrări-ieșiri, care va fi aplicat fiecărei ecuații de regresie, definite anterior, în parte. Schema de analiză a unei ecuații de regresie, cu ajutorul acestui model cibernetice, este reprezentată în Figura 3.41.

Reprezentarea schematică din Figura 3.41, ca formă generalizată a metodicii de procesare a datelor experimentale specifice fiecărei ecuații de regresie individuale investigate în cadrul lucrării, are o importanță deosebită pe mai multe planuri:



1. Primul plan este reprezentat de faptul că procesarea datelor experimentale se finalizează printr-o mulțime de elemente morfologice de natură informațională, între care modele matematice polinomiale, diagrame Pareto, suprafețe de răspuns și reprezentări grafice clasice. Caracterul sintetic, real, validat statistic al acestor elemente le conferă și o semnificație științifică de netăgăduit.
2. Al doilea plan important al schemei prezentate în Figura 3.41, este faptul că, prin analiza și interpretarea datelor experimentale, dar și corelate cu legile fizicii și rezultatele altor cercetători, pot fi dezvoltate modele mai generale. Aceste modele au o arie de aplicabilitate largă dar și o capacitate de predicție sporită, inclusiv pentru identificarea unor stări limită, cum ar fi, de exemplu, stările de blocaj, avarie sau cazuri în care prelucrarea nu este posibilă.

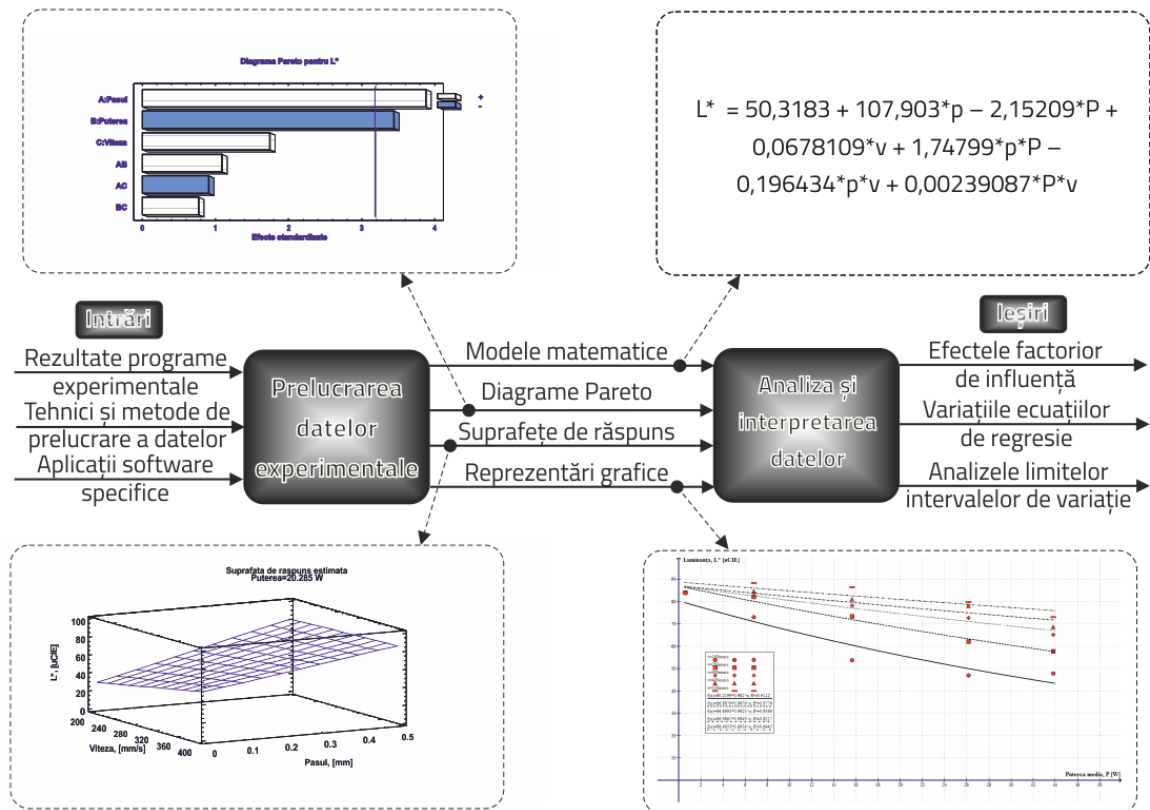


Figura 3.41 Schema de analiză a unei ecuații de regresie

În continuare, sunt prezentate și analizate elementele morfologice informaționale particulare, concrete, furnizate de procesarea datelor specifice ecuațiilor de regresie investigate. În final, se va încerca optimizarea regimurilor de lucru prin simularea proceselor tehnologice bazate pe modelele matematice determinate.

Condițiile generale de desfășurare a programului experimental, inclusiv sistemul de achiziție a datelor de măsurare primare, au fost prezentate în detaliu în subcapitolul care dezbate metoda de lucru.

În Figura 3.3 și Figura 3.4 sunt indicate domeniile spațiului multifactorial în care au fost localizate planurile experimentale preliminare și principal, cu componentele lor structurale clasice E1 și E2C și, respectiv, factoriale E2F. Metodele și mijloacele de măsurare a caracteristicilor (culoare, dimensiuni) pirogravurilor realizate prin programul experimental efectuat au fost redată, în extenso, în paragrafele 3.4, 3.5 și 3.7.



3.9.1. Cercetare experimentală preliminară – determinarea intervalelor de variație a principalilor parametri de prelucrare (*Experimentele E1*)

3.9.1.2. Determinarea influenței puterii medii a laserului asupra colorării lemnului

Puterea laserului este unul dintre parametrii importanți în cadrul procesului de gravare deoarece acesta influențează nuanța obținută. Posibilitatea de reglare a acestui parametru este deosebit de largă, aceasta pornind de la 0% și poate să ajungă la 100%. Producătorii de echipamente laser preferă acest mod de exprimare a puterii, în % și nu în W din următoarele considerente:

- Puterea laserului nu este constantă pe toată durata de viață a tubului laser;
- Se pot folosi tuburi laser de puteri diferite utilizându-se același microcontroler.

Din moment ce prelucrarea cu laser a lemnului este de natură termică, factorii care modifică aportul de energie cu laser afectează în mod semnificativ procesul.

Rezultate și discuții

În studiul de față s-a făcut comparație între o suprafață de lemn neprelucrată (sau prelucrată cu puterea laserului reglată la 0%), de pe același material, care este considerată suprafața de referință și suprafețele prelucrate.

În Figura 3.44 sunt prezentate variațiile medii de culoare ale celor 3 componente măsurate în sistemul $CIE L^*a^*b^*$. După cum se poate observa, parametrul L^* este influențat cel mai mult de variația puterii laserului. L^* variază invers proporțional cu creșterea puterii laserului. Parametrii a^* și b^* sunt influențați neesențial în comparație cu parametrul L^* .

Din acest motiv interpretarea datelor se va face în continuare ținând cont doar de acest parametru. De asemenea se poate observa că la puteri mici apar modificări neesențiale ale culorii. Aceste variații sunt influențate de structura eterogenă a lemnului care influențează

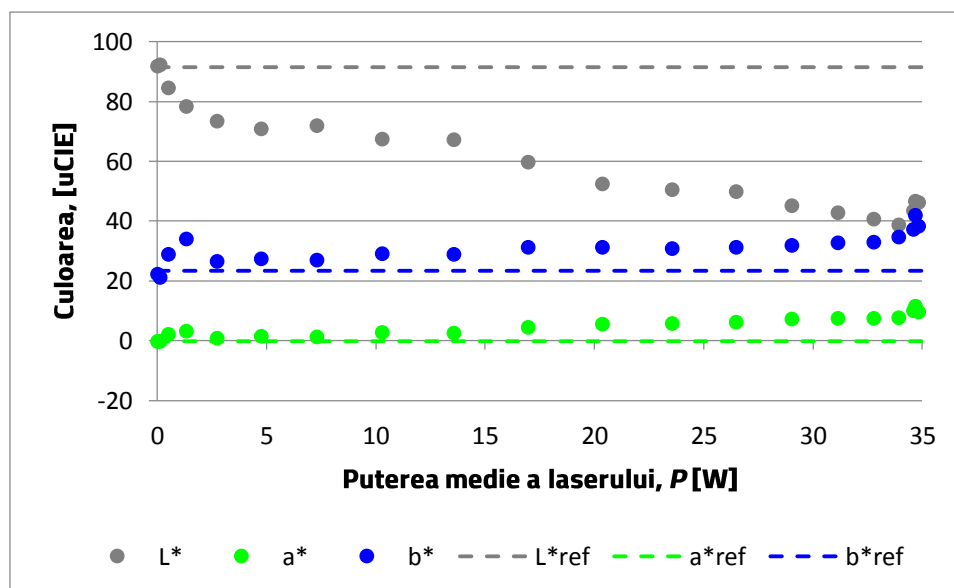


Figura 3.44 Variația culorii în funcție de putere pentru planul experimental extins



culoarea.

La puteri mari se observă o scădere a L^* . Această scădere poate avea mai multe cauze:

- Lemnul este foarte degradat din cauza temperaturii ridicate a interacțiunii suprafeței cu radiația laser încât sunt eliminate elemente anatomice din material, iar cele rămase nu mai au energie să se ardă astfel încât să producă un efect de întunecare mai mare;
- Erorile de măsurare a culorii. Prelucrarea se face în adâncime, iar între suprafața prelucrată și dispozitivul de măsură pătrunde lumina.

Oricare ar fi cauza reală a scăderii L^* a suprafețelor la puteri mari ale laserului, se recomandă ca acestea să fie evitate deoarece scăderea L^* este observabilă și cu ochiul liber, iar suprafața este foarte degradată.

În Figura 3.44 se poate observa că variația componentei L^* nu mai este liniară pe întregul interval, ci poate fi asemănată cu o variație exponențială, care tinde către L^* maximă la puteri mici și care se plafonează către $L^*=0$ (culoarea neagră) la puteri mari. O modelare a variației L^* după forma acestei funcții este de preferat deoarece mărginirea ei la capete limitează domeniul de variație (intervalul de putere) al funcției, stabilind limite clare între care valorile puterii medii a laserului influențează culoarea lemnului tratat.

Pornind de la această observație, datele experimentale au fost prelucrate cu ajutorul aplicației *DataFit*® de la *Oakdale Engineering*. Acest program permite analizarea datelor experimentale după o funcție impusă de utilizator. Ecuația generată de program este:

$$L^*(P) = 68,193 \cdot P^{-0,0416} \cdot e^{-0,109 \cdot P} \quad (3.35)$$

În care:

- L^* este luminozitatea, în uClE;
- P este puterea medie a laserului, în W.

Analiza experimentului

R^2 pentru L^* este 0,98, rezultă că modelul matematic este unul bun. Având în vedere că și tendința planului experimental este una plafonabilă rezultă că acesta este ales corect, iar din această tendință poate fi definit intervalul de variație.

Variația L^* nu este liniară pe întregul interval de putere studiat. Acest lucru confirmă presupunerile teoretice, conform cărora *zit* crește odată cu creșterea puterii laserului. Acest lucru poate fi atribuit faptului că materialele văd mai multă căldură laser cu creșterea puterii laserului.

Intervalul de variație a puterii medii a laserului a fost definit între 0,5 și 34W.

Echipamentul laser a fost corect ales deoarece intervalul de variație se încadrează în posibilitățile de prelucrare.

S-a făcut o analiză detaliată a influenței puterii medii a laserului asupra materialului lemnos.



3.9.1.3. Determinarea influenței vitezei de avans a capului de lucru asupra colorării lemnului

Viteza de deplasare a capului de lucru pe direcția X , denumită în continuare viteză de avans sau viteză și notată cu v , este unul dintre parametrii importanți în cadrul procesului de gravare deoarece aceasta influențează productivitatea. Posibilitatea de reglare a acestui parametru este deosebit de largă, aceasta pornind de la $v=0$ mm/s, dacă se urmărește realizarea doar a unor puncte și poate să ajungă la $v=500$ mm/s. Valoarea maximă a fost impusă de posibilitățile tehnice ale echipamentului. Este evident faptul că pentru gravare nu se folosește $v=0$ mm/s, deoarece având în vedere diametrul spotului laser, suprafața prelucrată ar fi foarte mică, dificil de observat cu ochiul liber. Pe de altă parte principiul de funcționare al echipamentului, în rastru, implică deplasarea capului de lucru cu o viteză oricât de mică, dar mai mare de 0 mm/s.

Mai mulți autori au propus diferite formule de calcul a vitezei maxime de avans pentru debitare. Formulele nu pot fi aplicate pentru pirogravură datorită diferențelor de prelucrare, dar abordarea problemei poate fi luată în calcul.

După cum se poate observa din studiul bibliografic și tehnic, lucrările de specialitate tratează superficial acest parametru, în special pentru pirogravură, în principal din cauza următoarelor aspecte:

- Bibliografia în domeniul arderii superficiale cu laser a lemnului este destul de puțină;
- Majoritatea echipamentelor existente la ora actuală pe piață nu permit varierea acestui parametru pentru modul de funcționare rastru.

Obiectiv

Scopul acestui studiu este acela de a determina intervalul și ecuația de variație a vitezei de avans în care se produce o modificare a culorii superficiale a lemnului fără degradarea accentuată a materialului.

Rezultate și discuții

Rezultatele din planurile experimentale 1.1, 1.2 și 1.3 (în care $P=0,5$ W) au fost analizate împreună. În total au fost analizate 30 de experimente. Variațiile de culoare în sistemul $CIEL^*a^*b^*$ sunt prezentate în Figura 3.55.

După cum se poate observa, parametrul L^* , este influențat cel mai mult de variația vitezei de avans a capului de lucru. L^* variază direct proporțional cu creșterea vitezei de avans, respectiv pe măsură ce crește viteza de avans, suprafața prelucrată este mai luminată. Parametrii a^* și b^* sunt influențați nesemnificativ în comparație cu L^* . Din acest motiv interpretarea datelor se va face în continuare ținând cont doar de acest parametru.

De asemenea în Figura 3.55 se poate observa că la viteze de avans mari apar modificări nesemnificative ale culorii. Aceste diferențe sunt puse în evidență prin compararea culorii cu cea a suprafeței de referință. Culoarea de referință nu este egală cu 100 uCIE deoarece culoarea naturală a lemnului nu este nici albă și nici uniformă.

Tot în Figura 3.55 se observă că L^* la regimul cel mai blând (cu energia de suprafață minimă), adică la $v=500$ mm/s se apropie foarte mult de culoarea naturală a lemnului, dar distinct de aceasta. Diferența



dintre L^* naturală a lemnului și cea a lemnului iradiat la $v= 500$ mm/s este $L^*= 1,67$ uCIE.

La viteze de avans mici se observă o scădere accentuată a L^* . Această scădere nu poate fi oricât de mare deoarece nici viteza nu poate fi 0 mm/s.

Se recomandă evitarea vitezelor mici din următoarele considerente:

- Productivitatea este scăzută;
- Viteza mică provoacă încălzirea și uzura excesivă a mecanismului de angrenare a capului de lucru.

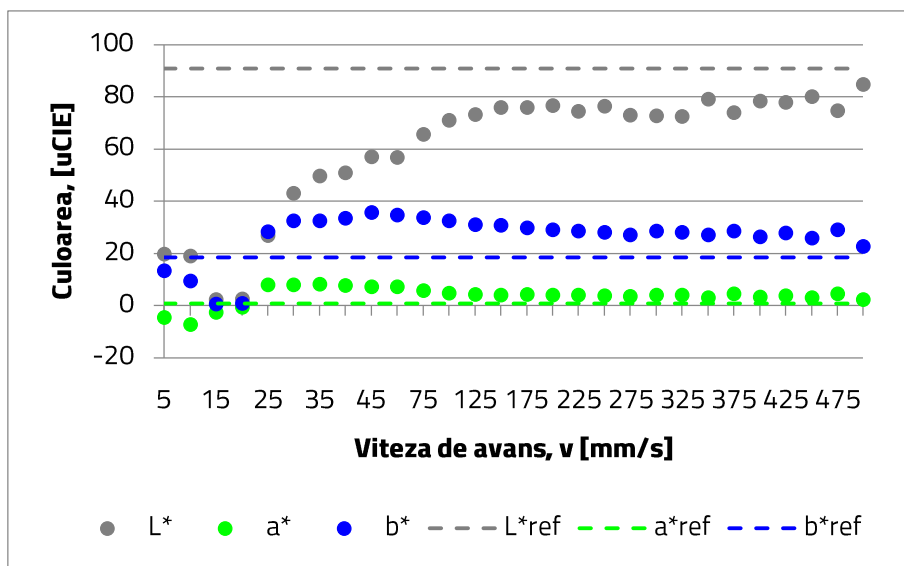


Figura 3.55 Variația culorii în funcție de viteza de avans pentru planurile experimentale 1.1, 1.2 și 1.3

După cum se poate observa în Figura 3.56, folosind mai multe valori, variația L^* nu este liniară, ci are o zonă constantă la mijloc, încadrată de două zone în care L^* se modifică semnificativ. Pentru $P= 0,5$ W se observă o modificare majoră de culoare la $v < 100$ mm/s, mult mai pronunțată decât în cazul $v > 450$ mm/s. L^* are variația cea mai mare și este crește direct proporțional cu creșterea vitezei de avans pentru $P= 9,03$ W. Variațiile seriilor pentru $P= 17$ W și $P= 33,9$ W au aceeași pantă.

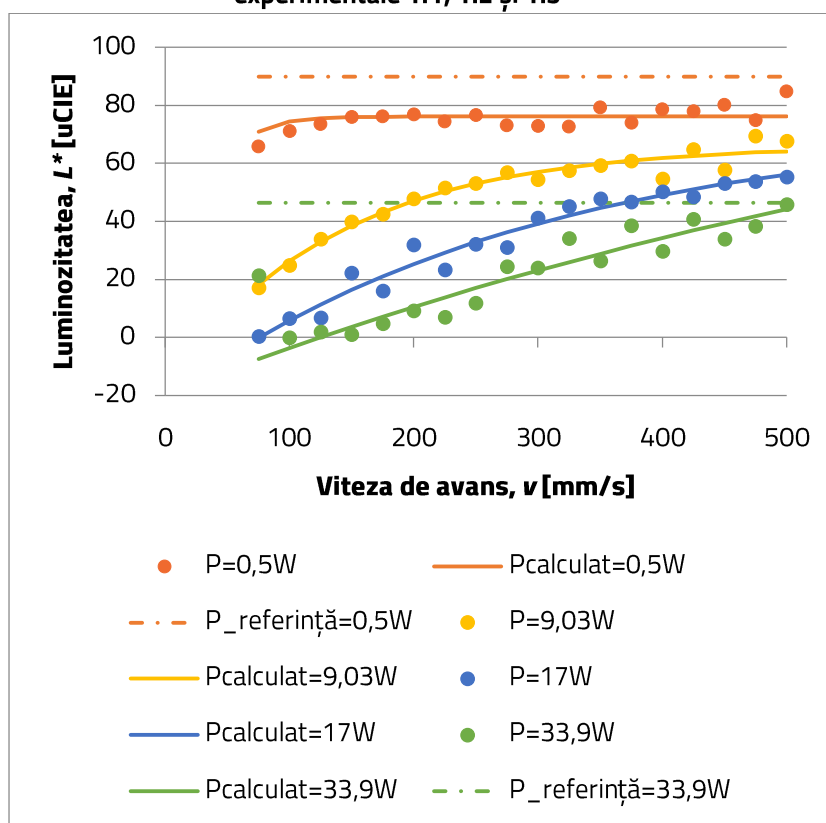


Figura 3.56 Variația L^* după valorile măsurate și reprezentarea teoretică în funcție de viteza de avans

De asemenea în Figura 3.56 se observă că, pentru $P= 17$ W, L^* la regimul cel mai blând (cu energia de suprafață minimă), adică la $v= 500$ mm/s este destul de departe de culoarea naturală a lemnului, dar mai aproape decât regimul care folosește aceeași viteză de avans, dar cu $P= 33,9$ W. În același timp L^* la regimurile cele mai severe (cu energia de suprafață maximă), adică la $v < 125$ mm/s este destul de



departe de culoarea neagră, adică de $L^* = 0$ uCIE care se poate obține cu $P = 33,9$ W.

Tot în Figura 3.56 se observă că, pentru $P = 33,9$ W, L^* la regimul cel mai blând (cu energia de suprafață minimă), adică la $v = 500$ mm/s este destul de departe de culoarea naturală a lemnului.

În Figura 3.56 se poate observa că variația componentei L^* are trei intervale distincte de variație asemănătoare pentru fiecare serie de putere medie, dar la alte intervale de viteză. Descrierea acestor intervale este prezentată în Tabelul 3.15.

Tabelul 3.15 Analiza variației componentei L^* la intervale de viteză diferite în funcție de putere, așa cum reiese din graficul prezentat în Figura 3.56

P , [W]	Intervale de variație a vitezei de avans, v		
	1	2	3
0,5	<p>$v < 10$ mm/s: L^* este constantă.</p> <p>Se observă o degradare majoră a materialului prin: crăpături superficiale, evidențierea compușilor chimici secundari anorganici ai lemnului care nu se descompun prin ardere.</p> <p><i>Se recomandă evitarea acestor regimuri.</i></p>	<p>$v > 10$ mm/s: L^* scade, ajungând la aproape 0 uCIE pentru $v = 15$ mm/s, => s-a obținut negrul absolut la această viteză. Astfel s-a determinat valoarea minimă a vitezei la 15 mm/s.</p>	<p>$v > 15$ mm/s: L^* crește, variația acesteia din urmă putând fi asemănată cu o variație exponențială.</p> <p>Acest interval de viteză va fi luat în considerare în continuare.</p>
9,03	<p>L^* crește pe întregul interval de viteză analizat, variația acesteia din urmă putând fi asemănată cu o variație exponențială. Acest interval de viteză va fi luat în considerare în continuare.</p>		
17	<p>$v \leq 50$ mm/s: lemnul se aprinde. Rezultatele obținute în aceste cazuri au fost excluse din studiu.</p>	<p>$v < 125$ mm/s: L^* este constantă. Regimurile de lucru cu viteze mai mici de această valoare nu se recomandă deoarece nu se obține o înnegrire mai accentuată a suprafeței ci numai o creștere nejustificată a timpului de lucru.</p>	<p>$v > 125$ mm/s: L^* crește, variația acesteia din urmă putând fi asemănată cu o variație exponențială.</p> <p>Acest interval de viteză va fi luat în considerare în continuare.</p>
33,9	<p>$v \leq 75$ mm/s: lemnul se aprinde. Rezultatele obținute în aceste cazuri au fost excluse din studiu.</p>	<p>$v < 150$ mm/s: L^* este constantă. Regimurile de lucru cu viteze mai mici de această valoare nu se recomandă deoarece nu se obține o înnegrire mai mare a suprafeței ci numai o creștere nejustificată a timpului de lucru.</p>	<p>$v > 150$ mm/s: L^* crește, variația fiind exponențială.</p> <p>Acest interval de viteză va fi luat în considerare în continuare.</p>



Comparând cele trei șiruri experimentale se pot formula următoarele observații cu privire la mărimile măsurate (Figura 3.56):

- L^* este influențată și de putere deoarece graficele nu se suprapun;
- L^* la regimul cel mai blând (cu energia de suprafață minimă), adică la $v= 500$ mm/s și $P= 0,5$ W se apropie foarte mult de culoarea naturală a lemnului, dar distinct de aceasta.
- L^* la regimul cel mai sever (cu energia de suprafață maximă) pentru $P= 0,5$ W, adică la $v= 15$ mm/s se apropie foarte mult de culoarea neagră ($L^*= 2,5$ uCIE). Se recomandă evitarea acestui regim de lucru deoarece nu este economic, viteza de avans fiind foarte mică timpul de prelucrare fiind foarte lung, iar rezultate chiar mai bune în ceea ce privește obținerea culorii negre (cu $L^*= 0$ uCIE) se pot obține cu viteze mai mari dar, în același timp și cu puteri mai mari;
- L^* la regimul cel mai blând (cu energia de suprafață minimă) pentru $P= 33,9$ W, adică la $v= 500$ mm/s este destul de departe de culoarea naturală a lemnului;
- L^* la regimul cel mai sever (cu energia de suprafață maximă) pentru $P= 33,9$ W, adică la $v= 100$ mm/s se apropie foarte mult de culoarea neagră ($L^*= 0,15$ uCIE), fiind nuanța cea mai întunecată care se poate obține pentru specia de lemn studiată;
- Intervalele de variație pentru cele trei puteri se suprapun doar pentru două dintre ele, respectiv pentru $P= 17$ W și $P= 33,9$ W. Din acest motiv, dacă se dorește extinderea planului experimental cu mai multe puteri ale laserului, dacă se aleg valori între $P= 17$ W și $P= 33,9$ W, nu mai sunt necesare privind intervalele de variație a vitezei de avans care influențează colorarea lemnului. Dacă se aleg valori între $P= 0,5$ W și $P= 17$ W, sunt necesare experimente preliminare suplimentare deoarece cele intervalele de variație a celor două grafice nu se suprapun.

O modelare a variației L^* după forma funcției exponențiale este de preferat deoarece mărginirea ei limitează domeniul de variație (intervalul de viteză) al funcției, stabilind limita superioară a intervalului de variație a vitezei de avans a capului laser care influențează culoarea lemnului tratat.

Având în vedere definirea unei ecuații care să definească cât mai fidel fenomenele fizice de modificare a culorii lemnului prin variația vitezei de avans a capului de lucru a laserului, s-a propus analizarea datelor experimentale folosind programul *DataFit®* de la *Oakdale Engineering*. Acest program permite analizarea datelor experimentale după o funcție impusă de utilizator.

Tendența de variație a L^* este una exponențială pentru toate seriile de puteri medii ale laserului analizate. Încercarea de modelare a variației L^* după forma funcției exponențiale asemănătoare tuturor modelelor pentru puterile studiate este de preferat deoarece potrivirea ar confirma experimentele realizate anterior.

Legea de variație este dată de ecuația:

$$L^*(v) = c + a \cdot e^{(-v/b)} \quad (3.36)$$

În care:

- v reprezintă viteza de avans, în mm/s;
- L^* reprezintă luminozitatea, în uCIE;
- a , b și c sunt constante a căror valori obținute cu ajutorul programului *DataFit®* de la *Oakdale Engineering* sunt prezentate în Tabelul 3.16.

R^2 variază între 0,92 și 0,97, ceea ce înseamnă că aproximarea rezultatelor experimentale cu această lege de variație este foarte bună, în special pentru un material neomogen cum este lemnul.

Legea de variație este dată de (3.36) pentru cele patru puteri analizate, cu mențiunea că parametrii



constanți au alte valori. Acest lucru confirmă faptul că ecuația teoretică este determinată corect. Alte determinări suplimentare privind această lege de variație sunt necesare doar dacă se dorește determinarea parametrilor constanți.

Tabelul 3.16 Valorile constantelor și R^2 ale funcțiilor de regresie pentru viteza de avans la puteri diferite

Puterea, P [W]	a	b	c	R^2
0,5	-152,6379045	22,22932194	76,09366055	0,96
9,03	-83,38216763	136,2427381	66,27664136	0,97
17	-95,018018	295,805228	73,66874047	0,96
33,9	-142,7160102	847,8445385	123,2770891	0,92

Analiza experimentului

Au fost identificate și definite 3 intervale de variație a L^* în raport cu viteza de avans. Dintre acestea, doar un singur interval îndeplinește condițiile necesare pentru a obține L^* diferite folosite la pirogravură. Intervalul de variație a vitezei de avans s-a definit între 15 și 500 mm/s, chiar dacă au apărut probleme cu energia excesivă dezvoltată cu unele regimuri de lucru, acestea vor putea fi caracterizate ca necorespunzătoare și eliminate din studiile ulterioare. La alegerea acestuia au stat considerentele de mai jos.

Teoretic viteza de avans poate varia în limite foarte largi de la 0 mm/s până la valori foarte mari. Practic acest interval este limitat de mai mulți factori:

- Posibilitățile tehnologice – echipamentele de prelucrare;
- Posibilitățile de prelucrare – fenomenele fizice care influențează prelucrarea;
- Productivitate – obținerea efectului dorit în cel mai scurt timp.

La $v < 15$ mm/s se produce o degradare mare a materialului, prin care se observă o creștere a L^* . Prin acest lucru se înțelege că L^* care se obțin la $v < 15$ mm/s se pot obține și cu viteze mai mari. Din această observație rezultă că folosirea unor $v < 15$ mm/s nu se recomandă deoarece este neproductivă.

Stabilirea vitezei maxime de avans a fost condiționată de posibilitățile de prelucrare ale echipamentului din dotare, dar și de observațiile experimentale că la viteze mai mari nu se mai produce o modificare accentuată a culorii, chiar la $v > 475$ mm/s se observă o creștere a L^* . Această creștere este pusă pe seama timpului insuficient de iradiere, neputându-se realiza prelucrarea. Același efect putând fi obținut prin folosirea unei puteri mai mici a laserului.

Echipamentul laser a fost corect ales deoarece intervalul de variație se încadrează în posibilitățile de prelucrare.

S-a făcut o analiză detaliată a influenței vitezei de avans a laserului asupra materialului lemnos.

S-a verificat ipoteza conform căreia variația L^* în raport cu viteza de avans este una exponențială.

Datorită neajunsurilor legate de productivitatea scăzută la viteze mici, se recomandă și varierea altor factori.

Structura materialul suport poate influența prelucrarea, de aceea s-a determinat, pentru fiecare suprafață măsurată în parte, abaterea medie standard a valorilor măsurate.



Având în vedere diferențele dintre speciile lemnoase cu valoare economică, rezultatele obținute sunt valabile doar pentru specia paltin, dar metoda de lucru poate constitui baza de cercetare și pentru alte specii lemnoase.

Au fost definite ecuațiile de regresie a L^* în funcție de viteza de avans pentru fiecare putere studiată. Se observă că ecuația de variație a L^* în funcție de viteza de avans este aceeași indiferent de putere. Acest lucru înseamnă că legea de variație este verificată și este corectă. Folosindu-se aceste ecuații se pot determina L^* și pentru alți parametri de lucru.

3.9.1.4. Determinarea influenței mărimii pasului capului de lucru asupra colorării lemnului

Pasul capului de lucru este un parametru important în cadrul procesului de gravare deoarece acesta influențează atât nuanța obținută cât și timpul de prelucrare. De asemenea acest parametru influențează și calitatea (fidelitatea) de reproducere a informației grafice. Posibilitatea de reglare a acestui parametru este deosebit de largă, aceasta pornind de la 0,0254 mm, care este egală cu dimensiunea spotului laser la distanța focală. Valoarea maximă a pasului este influențată de dimensiunea imaginii reproduse.

Obiectiv

Determinarea valorii maxime a pasului capului de lucru. Această valoare fiind cea mai mare valoare a pasului la care se observă o modificare acceptabilă a culorii în urma pirogravării.

Aparatură

Pentru măsurători s-a folosit aplicația software National Instruments Vision Assistant. Această aplicație permite realizarea de histograme de culoare. Valorile acestor grafice pot fi salvate în memoria ROM a unui PC în format text sau tabelar și pot fi prelucrate ulterior.

Histograma de culoare este un grafic care indică numărul de pixeli corespunzători unui canal de culoare. În funcție de tipul imaginii (respectiv spațiul de culori - *RGB*, *HSL*, $L^*a^*b^*$ etc.) se pot afișa graficele corespunzătoare fiecărui canal al unei imagini. Pentru o imagine pe 8 biți, histograma va afișa numărul de pixeli pentru fiecare valoare de culoare posibilă (256 valori).

Acest mod de abordare a problemei permite analizarea culorii din punct de vedere al tuturor valorilor care influențează o anumită culoare, putând să se determine statistic dacă există diferențe de culoare între două probe.

Valorile măsurate au fost înregistrate și pentru fiecare pas a fost generată histograma de culoare. Datele obținute au fost prelucrate cu ajutorul programului *Excel*, determinându-se ecuația de regresie.

Rezultate și discuții

În studiul de față s-a făcut comparație între o suprafață de lemn neprelucrată, de pe același material, care este considerată suprafața de referință și suprafețele prelucrate.

În Figura 3.68 sunt prezentate comparativ histogramele canalului de luminozitate, obținute pentru cele 32 regimuri de prelucrare și pentru suprafața de referință. În această reprezentare grafică se pot



observa următoarele:

- Culoarea cea mai luminată este definită de suprafața neprelucrată. Un regim de lucru a cărui valori de culoare se află în această zonă nu se recomandă deoarece nu se obține o modificare semnificativă a culorii. Prin studiile prezentate în această lucrare se urmărește întunecarea culorii pornindu-se de la culoarea suprafeței de referință;
- Curbele de culoare au puncte de maxim începând cu $L = 185$ uHSL, pentru regimul cu $p = 0,0254$ mm până la $L = 230$ uHSL, pentru pasul maxim studiat, $p = 0,8128$ mm. Această valoare poate să crească până la maximum atins de suprafața neprelucrată, respectiv $L = 236$ uHSL. Se observă o creștere a luminozității culorii direct proporțională cu creșterea pasului capului de lucru;
- Formele curbelor de variație sunt mai evazate pentru valori mici ale pasului și mai adunate pentru valori mari ale acestuia. Determinarea statistică a abaterii standard a valorilor și variația acestora definesc limitele teoretice ale intervalului de variație a pasului capului de lucru;
- Culoarea se mai poate închide prin varierea celorlalți parametri de lucru.

Variația luminozității în funcție de mărimea pasului este prezentată în Figura 3.69. Pe acest grafic se poate observa că variația nu este uniformă. Se presupune că această dispersie este cauzată de structura eterogenă a materialului suport, deoarece la pași mari prelucrarea lasă să se vadă tot mai mult structura materialului. Având în vedere aceste lucruri, s-a considerat necesară studierea materialului suport fără prelucrare. Valorile medii măsurate sunt prezentate în Figura 3.69. Din valorile măsurate se observă că există diferențe între suprafețele care vor fi prelucrate, mai mari în cazul celei de a doua epruvete. Comparăția între cele două șiruri de nuanțe, pentru suprafețele prelucrate și neprelucrate sunt prezentate în Figura 3.69. Aici se observă că la valori mai ale pasului variația de culoare a lemnului neprelucrat are aceeași formă cu cea a lemnului prelucrat, ceea ce înseamnă că influența arderii asupra culorii lemnului nu mai este semnificativă.

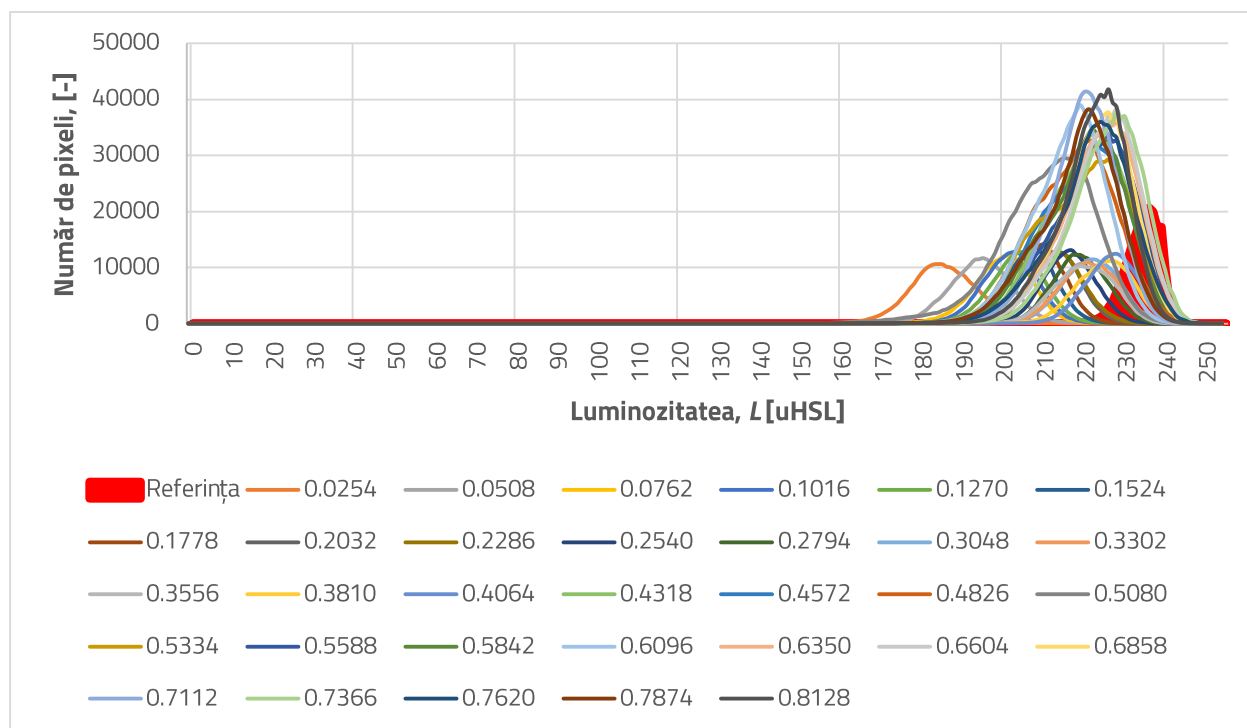


Figura 3.68 Histogramele pentru luminozitățile obținute folosind pași diferiți

În Figura 3.69 se poate observa că, variația poate fi aproximată cu o dreaptă deoarece la $p > 0,4$ mm



apare fenomenul de saturație a culorii. Acest lucru confirmă presupunerile teoretice anterioare.

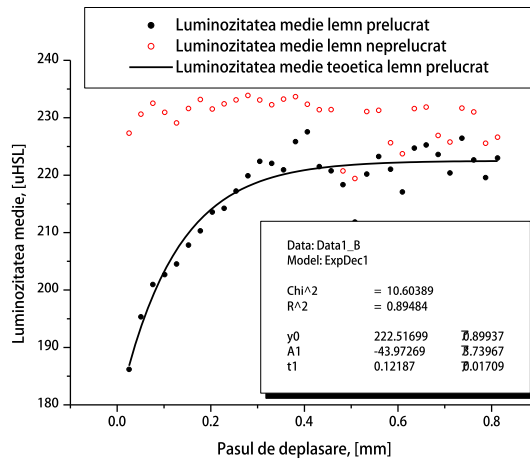


Figura 3.69 Variația luminozităților medii în funcție de pas pentru planul experimental extins

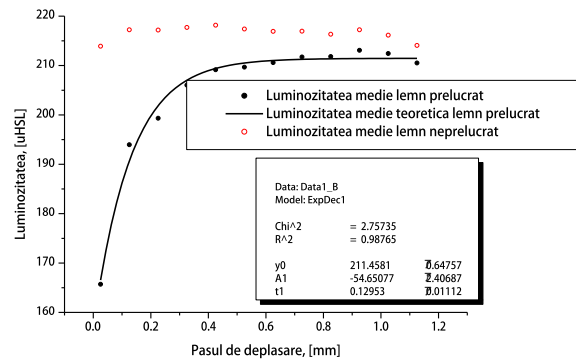


Figura 3.70 Variația luminozităților medii în funcție de pas pentru planul experimental de verificare

În aceeași figură se poate observa că pentru $p > 0,4$ mm nu mai apar modificări semnificative ale luminozității suprafeței, ci doar se pierde informația grafică. La $p > 0,5$ mm variația luminozității suprafeței prelucrate are aceeași formă cu cea a lemnului neprelucrat.

În ideea de a exprima matematic legea variației rezultate în funcție de pas, s-a încercat aproximarea acesteia cu o lege de variație exponențială. Pentru aceasta s-a folosit aplicația *Microcal Origin* care permite generarea de legi de variație pentru diferite șiruri de date experimentale. Relația de calcul rezultată este:

$$L(p) = y_0 + A_1 \cdot e^{(-p/t_1)} \quad (3.37)$$

În care: L reprezintă luminozitatea, în uHSL;

p reprezintă pasul, în mm;

Ceilalți parametri sunt constantele a căror valori se găsesc în Figura 3.69 și în Figura 3.70.

Analiza experimentului

Valoarea minimă a pasului a fost stabilită în funcție de posibilitățile tehnologice.

Prin folosirea a două planuri experimentale și a unei singure metode de analiză a datelor experimentale s-a putut determina pasul maxim de prelucrare.

Datorită faptului valorile rezultate sunt apropiate, rezultă că toate abordările sunt pertinente, atât din punct de vedere statistic cât și experimental.

Ecuțiile exponențiale pentru cele două experimente sunt identice. Aceasta înseamnă că nu se justifică continuarea experimentelor cu pași mai mari deoarece variația nu se modifică semnificativ.

Diferențele dintre valorile calculate sunt justificate din următoarele motive:

- La valori mici ale pasului variația este liniară, iar dreapta de variație ajunge mai repede la valoarea maximă;
- La valori mari ale pasului apare fenomenul de saturație a luminozității, variația fiind tot liniară, dar mult mai mică;



- Analizând întreg șirul de valori, se observă că o analiză doar pe un segment de variație este o abordare greșită.

Planul experimental liniar trebuie aplicat cu moderație deoarece în practică se întâlnește rar lemn cu inele anuale de aceeași lățime pe întreaga suprafață.

Pentru experimentele ulterioare se recomandă alegerea unui pas maxim care să acopere valoarea pasului maxim din acest studiu.

Valoarea maximă a pasului a fost stabilită la valoarea $p= 0,4124$ mm folosind metoda prezentată anterior.

3.9.1.9. Analiza experimentelor preliminare

Acest set de experimente au fost efectuate cu un singur factor care variază la un moment dat. Intervalele de variație a parametrilor de pirogravare sunt prezentate în Tabelul 3.2. Pentru a compara rezultatele, experimentele au fost realizate pe suprafețe rectangulare uniforme și folosindu-se aceeași specie lemnoasă pentru toate experimentele, respectiv paltinul de câmp, așa cum rezultă și din Tabelul 3.3.

În urma acestor experimente s-au analizat principalii factori care influențează arderea superficială a lemnului prin iradiere cu laser. Aceștia sunt:

- Puterea medie a laserului;
- Viteza de deplasare pe axa X (viteza de avans a capului de lucru);
- Deplasarea pe axa Y (pasul capului de lucru);
- Frecvența de pulsație a laserului;
- Poziția planului focal;
- Direcția de avans raportată la orientarea fibrei lemnului;
- Numărul de treceri peste aceeași suprafață prelucrată.

Determinarea intervalului de variație a parametrilor de lucru s-a făcut în urma unor experimente care au avut ca scop folosirea la maximum a posibilităților tehnologice actuale și analizarea efectelor de întunecare a culorii în urma aplicării diferitelor tratamente. Acești parametri au fost aleși ținându-se cont de influența variației lor asupra întunecării culorii lemnului.

Datele experimentale obținute prin măsurarea culorii au fost analizate prin metode specifice prezentate în lucrare, determinându-se intervalele de variație al acestora. Aceste intervale de variație s-au stabilit în funcție de zona de influență maximă asupra L^* lemnului iradiat. Intervalele de variație sunt prezentate centralizat în Tabelul 3.2.

În Tabelul 3.22 sunt prezentate limitele și mărimile intervalelor de variație a L^* pentru fiecare dintre factorii de influență analizați. Se observă că, prin varierea, factoriilor precum puterea medie a laserului și viteza de avans se obțin intervale largi de L^* . Pentru ceilalți factori se obțin intervale înguste de L^* , mai mici de 20%. Acest criteriu a stat la baza selecției factorilor de influență pentru experimentul principal.

Frecvența de pulsație a laserului a fost exclusă din studiul următor datorită faptului că pe intervalul



analizat, influențat de posibilitățile de prelucrare a echipamentului, nu se observă modificări importante ale culorii. Mărima intervalului a fost influențată în proporție mare de materialul suport.

Tabelul 3.22 Limitele și mărimile intervalelor de variație a L^* [uCIE] funcție de factorii de influență analizați

Factor de influență	Limite interval		Mărime interval		Influență >15%
	Minim	Maxim	Minim	Maxim	
Puterea medie	1,33	83,64	82,31		Da
Viteza de avans	0,15	84,90	45,74	82,36	Da
Pasul	68	89	13	17	Da
Frecvența de pulsație	40,81	52,42	11,61		Nu
Poziționarea planului focal	50,17	63,43	11,81	13,26	Nu
Direcția de avans	În funcție de parametrii de lucru		0	4	Nu
Numărul de treceri	53,70	64,65	10,65		Nu

Poziția planului focal se preferă să rămână constantă deoarece:

- Variația pe întregul interval este mică, fiind mai mare doar în jurul punctului focal;
- Prin varierea acestui parametru se pierde din acuratețea informației grafice reproduse.

În ceea ce privește direcția de avans s-a demonstrat că aceasta nu influențează prelucrarea, totuși orientarea fibrei lemnului paralelă cu direcția de avans produce un efect pozitiv prin faptul că lemnul târziu contribuie la uniformitatea culorii. Din acest motiv s-a ales direcția paralelă cu fibra lemnului.

Deși s-a demonstrat că numărul de treceri influențează culoarea obținută, s-a preferat păstrarea constantă a acestui parametru din rațiuni economice.

Aceste rezultate preliminare sugerează ca fiind justificată continuarea cercetărilor privind pirogravarea cu laser a lemnului.

După alegerea principalilor factori de influență regimurilor de prelucrare cu laser asupra L^* lemnului și determinarea intervalului de variație a acestora, s-a trecut la alegerea valorilor la care se vor realiza experimente. Acest lucru este dificil datorită faptului că:

- Legile de variație a L^* în funcție de acești parametrii nu sunt liniare. Această observație califică ca fiind greșită împărțirea intervalelor de variație în intervale egale;
- Intervalele de variație sunt dependente de variația celorlalți factori;
- Planul experimental trebuie să fie unitar pentru a se putea modela matematic.
- Există și alte caracteristici importante ale suprafeței pirogravate, cum ar fi gradul de finețe și de carbonizare care nu au fost analizate în acest studiu.
- Modelele matematice pentru fiecare factor de influență prezintă abateri de la valorile experimentale. Totuși aceste abateri nu influențează decisiv experimentele următoare deoarece au fost concepute planuri experimentale noi.

În urma experimentelor efectuate în cadrul acestui capitol s-au putut determina cu exactitate planurile experimentale. Experimentele s-au făcut doar în acele puncte în care a fost posibilă prelucrarea și în care au existat variații de culoare, respectiv L^* .



3.9.2. Cercetare experimentală principală – determinarea influenței parametrilor principali de prelucrare (*Experimentul E2*)

Pentru a analiza cât mai eficient variabilele cheie care afectează în mod semnificativ variabilele de răspuns și pentru a investiga interdependența parametrilor de prelucrare asupra acestora, a fost efectuată o modelare clasică și una factorială 2^3 .

Cele mai importante elemente analizate sunt următoarele:

- Cu ajutorul planului experimental clasic:
 - Variațiile variabilelor de răspuns în funcție de parametrii tehnologici;
- Cu ajutorul planului experimental factorial:
 - Tabelul ANOVA;
 - Modelul matematic;
 - Diagrama Pareto;
 - Suprafața de răspuns.

Factorii analizați sunt următorii:

- Factori de influență:
 - X_1 reprezintă viteza de avans, v , deplasarea pe axa X , exprimată în mm/s;
 - X_2 reprezintă puterea medie a laserului, P , exprimată în W;
 - X_3 reprezintă pasul, p , deplasarea pe axa Y , exprimată în mm;
- Factori de dependență:
 - Y_1 reprezintă luminozitatea, L^* , exprimată în uCIE;
 - Y_2 reprezintă adâncimea de gravare, h , exprimată în mm;
 - Y_3 reprezintă diametrul urmei laserului pe material măsurat în direcție perpendiculară pe fibra lemnului, d_p , exprimat în mm;
 - Y_4 reprezintă diametrul urmei laserului pe material măsurat în direcție paralelă cu fibra lemnului, d_l , exprimat în mm;
 - Y_5 reprezintă diametrul mediu al urmei laserului pe material calculat ca medie aritmetică între d_p și d_l , d_m , exprimat în mm;
 - Y_6 reprezintă productivitatea procesului de pirogravare, η , exprimată în mm^2/uCIE ;
 - Y_7 reprezintă distincția zonelor iradiate, d_z , exprimată în $(\text{uCIE} \cdot \text{mm})^{-1}$;
 - Y_8 reprezintă uniformitatea zonei iradiate, u_z , exprimată în uCIE.

Analiza datelor experimentale s-a făcut separat pentru luminozitate, diametrele urmei laserului pe material și pentru adâncimea de gravare.

Valorile η , care reprezintă energia consumată pentru a înnegri materialul, sunt cuprinse în intervalul 0,0000000010...1,36 mm^2/uCIE , cele mai mici valori obținându-se pentru E_l mici, iar cele mai mari valori s-au obținut pentru E_l mari. Această observație confirmă ipoteza că η este direct proporțională cu E_l .

Valorile d_z , care reprezintă detaliile modelului care pot fi reproduse pe material, sunt cuprinse în intervalul 0,052...2,133 $(\text{uCIE} \cdot \text{mm})^{-1}$, cele mai mici valori obținându-se pentru E_l mari, iar cele mai mari valori s-au obținut pentru E_l mici. Intervalul de variație al acestei mărimi este mult mai mic decât cel al

η .

Valorile u_z , care reprezintă schimbarea culorii unei zone largi fără a produce diferențe, sunt cuprinse în intervalul 0,25...187645,6 uClE, cele mai mici valori obținându-se pentru E_l mari, iar cele mai mari valori s-au obținut pentru E_l mici.

În continuare vor fi prezentate și analizate elementele morfologice tip, corespunzătoare ecuațiilor de regresie primare și compuse definite anterior (Figura 3.41). Prezentarea va începe cu experimentul clasic $E2C$ și se va încheia cu experimentul factorial $E2F$.

3.9.2.1. Experiment clasic $E2C$

Analizarea experimentului clasic s-a făcut prin determinarea ecuațiilor matematice de regresie pentru fiecare ecuație de regresie raportată la cei 3 parametri de prelucrare analizați.

Ecuatii de regresie primare: Luminozitatea, L^*

Ecuațiile de regresie au fost ajustate la datele analizate. Ecuațiile (3.53)...(3.57) reprezintă modelele clasice pentru L^* generate cu ajutorul aplicației *DataFit®* de la *Oakdale Engineering*.

$$L^* = 16,587 + 0,300 \cdot v - 2,713 \cdot P + 250,397 \cdot p + 0,00097 \cdot v \cdot P - 0,120 \cdot v \cdot p + 1,263 \cdot P \cdot p - 0,00035 \cdot v^2 + 0,031 \cdot P^2 - 372.803 \cdot p^2 \quad (3.53)$$

$$L^* = 33,713 + 0,116 \cdot v - 1,164 \cdot P + 87,184 \cdot p + 0,000027 \cdot v \cdot P - 0,120 \cdot v \cdot p + 1,263 \cdot P \cdot p \quad (3.54)$$

$$L^* = 0,090 \cdot v - 0,882 \cdot P + 80,545 \cdot p + 35,107 \quad (3.55)$$

$$L^* = e^{0,0013 \cdot v - 0,013 \cdot P + 1,16 \cdot p + 3,73} \quad (3.56)$$

$$L^* = 0,127 \cdot v - 0,490 \cdot P + 149,598 \cdot p \quad (3.57)$$

Analizând ecuațiile (3.53)...(3.57) se poate observa că, datorită semnului pozitiv al coeficienților respectivi, L^* crește cu viteza de avans și pasul capului de lucru, în timp ce puterea medie a laserului influențează negativ acest parametru. Analizând ecuațiile (3.53) și (3.54) se poate observa că, datorită semnului pozitiv al coeficienților respectivi, L^* crește cu interacțiunile dintre puterea medie și ceilalți factori, în timp ce interacțiunea dintre viteza de avans și pasul capului de lucru influențează negativ acest parametru.

În Tabelul 3.24 sunt analizate modelele matematice pentru L^* , rezultate cu datele experimentului clasic. Se observă că majoritatea modelelor (cu excepția (3.57)) au R^2 destul de mari, dacă se are în vedere faptul că modelarea se face după 3 factori de influență și pentru un material eterogen cum este lemnul.

Tabelul 3.24 Analiza modelelor matematice pentru L^* , rezultate cu datele experimentului clasic

Ecuatia	R^2	R^2 ajustat	Eroarea Standard Estimată	Statistica Durbin-Watson
(3.53)	0,87	0,86	7,86088	0,7929
(3.54)	0,70	0,69	11,74909	0,6153
(3.55)	0,69	0,68	11,91334	0,6348
(3.56)	0,61	0,60	13,37057	0,6865
(3.57)	0,23	0,22	18,77276	0,2897



De asemenea și ceilalți factori statistici au valori apropiate între ele, cu excepția (3.57) care este o ecuație liniară simplă.

În continuare sunt analizate influențele principalilor factori de influență asupra L^* modelate după experimentele clasice.

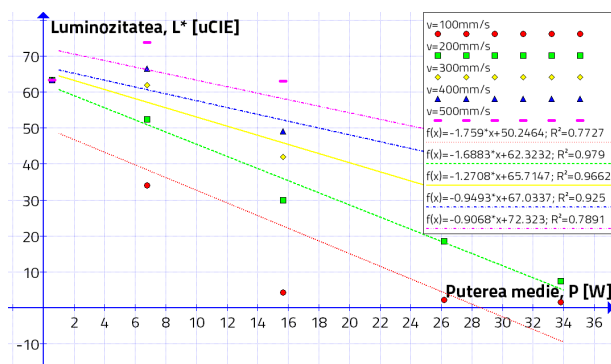


Figura 3.94 Variația L^* cu puterea la viteze diferite și $p = 0,0254$ mm

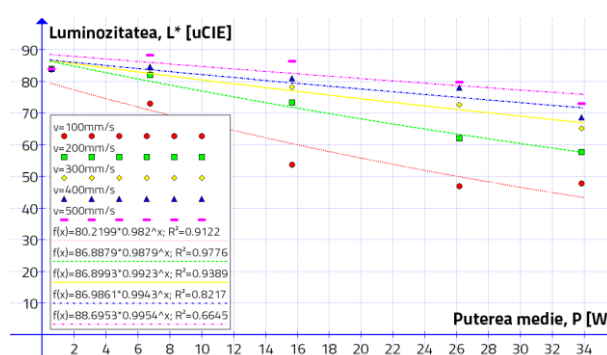


Figura 3.95 Variația L^* cu puterea la viteze diferite și $p = 0,4124$ mm

Tabelul 3.25 Analiza influenței puterii asupra L^* la viteze diferite

Pasul, p [mm]	0,0254	0,4124
Grafic	Figura 3.94	Figura 3.95
Nivel de variație	La viteze mici scăderea este mai accentuată comparativ cu scăderea rezultată la viteze mari.	L^* la viteze mici scade de până la de 3 ori comparativ cu scăderea rezultată la viteze mari.
Observații	<p>Tendențele de variație sunt convergente la putere mică, punct în care prelucrarea se face cu dificultate.</p> <p>Proportional cu creșterea puterii crește și diferența dintre L^* la viteze diferite.</p> <p>Panta liniei de tendință la viteze mici este mai mare decât cea de la viteze mari.</p>	<p>Tendențele de variație sunt convergente la putere mică, punct în care prelucrarea se face cu dificultate.</p> <p>Proportional cu creșterea puterii crește și diferența dintre L^* la viteze diferite.</p> <p>Panta liniei de tendință la viteze mici este mai mare decât cea de la viteze mari.</p>
Comparații	<p>Tendențele de variație sunt similare; ecuațiile matematice sunt liniare în ambele cazuri.</p> <p>Diferențele dintre cele două valori ale pasului sunt caracterizate de intervalul de variație al L^* și mărimea proporțională a acestui interval.</p> <p>Creșterea L^* cu pasul se explică prin scăderea energiei specifice, rezultată în urma creșterii pasului.</p>	
Analiza experimentelor	<p>Ecuațiile găsite definesc corect fenomenul de întunecare a suprafeței lemnului chiar dacă R^2 au valori mici, deoarece variațiile sunt similare la ambele capete a intervalului analizat. Intervalele de variație se completează reciproc.</p>	



Ecuții de regresie terțiare: Productivitatea procesului de pirogravare, η

Productivitatea procesului de pirogravare a fost denumită ecuație de regresie terțiară, deoarece calculul ei se bazează pe ecuațiile de regresie primare: h și L^* , dar și secundare cum este d_m .

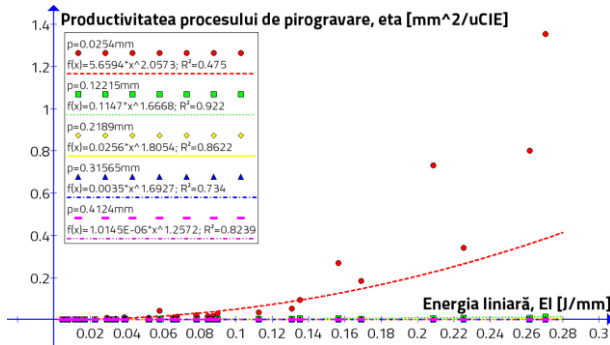


Figura 3.118 Variațiile η cu E_l , modelate cu funcții putere

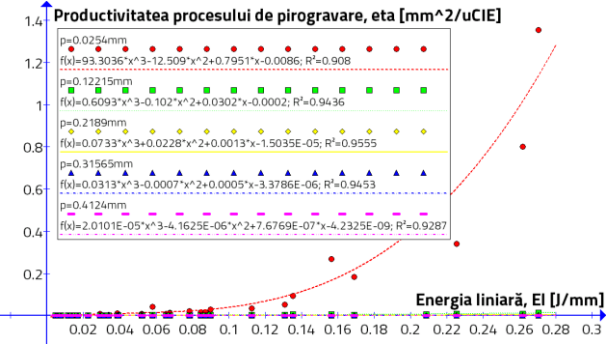


Figura 3.119 Variațiile η cu E_l , modelate cu funcții polinomiale de ordinul 3

Tabelul 3.39 Variațiile η cu E_l la pași diferiți

Grafic	Figura 3.118	Figura 3.119
Nivel de variație	<p>η la E_l mari crește de până la de 3906769 ori comparativ cu creșterea rezultată la E_l mici.</p> <p>În ceea ce privește variațiile pentru pași diferiți, exceptând seria de date pentru $p= 0,0254$ mm, valorile celorlalte serii sunt în apropierea lui zero.</p>	
Observații	<p>Creșterea este nesemnificativă la valori mici ale E_l și accentuată la valori mari ale E_l. Aceasta reprezintă tipul variației care poate fi asociată cu fenomenul de pirogravare a lemnului.</p> <p>Creșterea η se explică prin faptul că folosirea E_l mari au ca rezultat h și d_m mari, combinate cu L^* scăzute. Creșterea η are la bază creșterea h direct proporțional cu puterea. h mari nu sunt recomandate pentru pirogravură deoarece aceasta provoacă degradarea suprafeței și scăderea rezistențelor mecanice. În aceeași ordine de idei, scăderea vitezei are ca efect aparent scăderea η, dar se pare că influența celorlalți parametrii de lucru este mai importantă.</p>	
Comparații	<p>Domeniul de variație al R^2 reprezintă, din punct de vedere statistic, un interval mare de determinare, ceea ce înseamnă că erorile pentru acest tip de funcție sunt mari. Cel mai mic R^2 (pentru $p= 0,0254$ mm) se situează sub limita de acceptabilitate statistică. Valoarea exponentului din formulele prezentate în Figura 3.118 este cuprins între 1 și 2.</p>	<p>Intervalul mic de variație al R^2 înseamnă că erorile pentru acest tip de funcție sunt mici. Cel mai mic R^2 (pentru $p= 0,0254$ mm) se situează peste limita de acceptabilitate statistică, acesta fiind considerat chiar foarte bun pentru experimentele care analizează un material eterogen cum este lemnul.</p>
Analiza experimentelor	<p>Ecuțiile găsite nu definesc corect fenomenul de degradare a suprafeței lemnului deoarece R^2 pentru funcția putere au valori mici, iar modelarea după o funcție polinomială nu definește fenomenul de degradare. Pentru</p>	



definirea corectă a fenomenului sunt necesare experimente suplimentare.

Ecuatii de regresie terțiară: Distincția zonelor iradiate, d_z

Distincția zonelor iradiate a fost denumită ecuație de regresie terțiară, deoarece calculul ei se bazează pe ecuația de regresie primară L^* și pe ecuația de regresie secundară d_m .

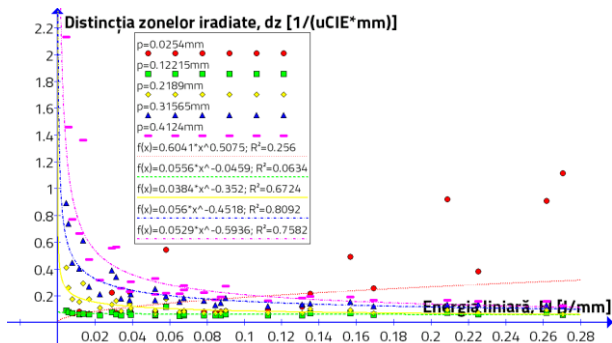


Figura 3.123 Variațiile d_z cu E_l , modelate cu funcții putere

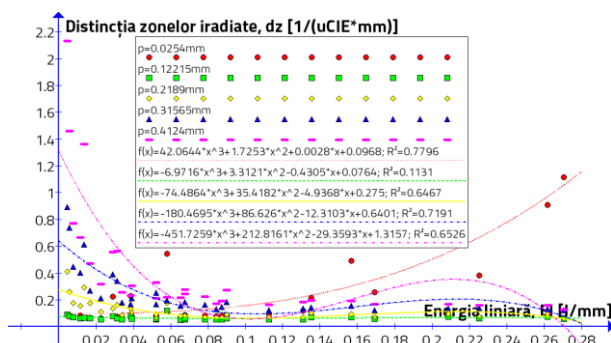


Figura 3.124 Variațiile d_z cu E_l , modelate cu funcții polinomiale de ordinul 3

Tabelul 3.42 Variațiile d_z cu E_l la pași diferiți

Grafic	Figura 3.123	Figura 3.124
Nivel de variație	d_z la pași mari variază de până la de 18 ori comparativ cu variația rezultată la pași mici.	
Observații	<p>Variația nu este similară pentru toți pașii. La pași mici ($p= 0,0254$ mm), d_z crește cu E_l, variația putând fi asemănată cu una exponențială, cu variații neglijabile la E_l mici și cu variații mari la E_l mari.</p> <p>Pentru ceilalți pași variația d_z este invers proporțională cu E_l. În acest caz se observă o scădere accentuată a d_z până în jurul $E_l= 0,1$ J/mm, după care aceasta are o creștere ușoară până în jurul $E_l= 0,21$ J/mm, iar apoi scade din nou.</p> <p>Tendența generală de scădere a d_z se explică prin faptul că folosirea E_l mari au ca rezultat și d_m mari, combinate cu L^* scăzute. Acest fenomen se explică prin faptul că la pași mici urmele rezultate în urma iradierii lemnului cu laser se suprapun, iar la pași mari între urme rămân zone neprelucrate care contribuie la creșterea d_z.</p> <p>Variația este de tip putere, fiind nesemnificativă la E_l scăzute și accentuată la E_l ridicate. Aceasta reprezintă tipul variației care poate fi asociată cu fenomenul de pirogravare a lemnului.</p> <p>Pasul influențează mărimea intervalului de variație, totuși intervalul cel mai mic s-a obținut la $p= 0,12215$ mm.</p>	
Comparații	Modelarea matematică după o funcție de tip putere are un $R^2= 0,26$, acesta situându-se sub limita de acceptabilitate statistică. Valoarea exponentului din formulele prezentate în Figura 3.123 este între -0,6 și 0,5.	Valorile R^2 sunt cuprinse între 0,11 și 0,78. De remarcat faptul că valoarea cea mai mică a R^2 este pentru $p= 0,12215$ mm. Pentru acest șir de valori R^2 , deși mic, este cel mai bun dintre toate modelele matematice analizate. Excluzând șirul de valori pentru $p=$



	Valorile R^2 reprezintă, din punct de vedere statistic, un interval mare de determinare, ceea ce înseamnă că erorile pentru acest tip de funcție sunt mari.	0,12215 mm, se observă că celelalte șiruri de valori au R^2 acceptabili pentru experimentele care analizează un material eterogen cum este lemnul.
Analiza experimentelor	Ecuțiile găsite nu definesc corect fenomenul de degradare a suprafeței lemnului deoarece R^2 pentru funcția putere au valori mici, iar modelarea după o funcție polinomială nu definește fenomenul de degradare. Pentru definirea corectă a fenomenului sunt necesare experimente suplimentare.	

Ecuții de regresie terțiare: Uniformitatea zonei iradiate, u_z

Uniformitatea zonei iradiate a fost denumită ecuație de regresie terțiară, deoarece calculul ei se bazează atât pe ecuațiile de regresie primare: h și L^* , cât și pe d_m , care este o ecuație de regresie secundară.

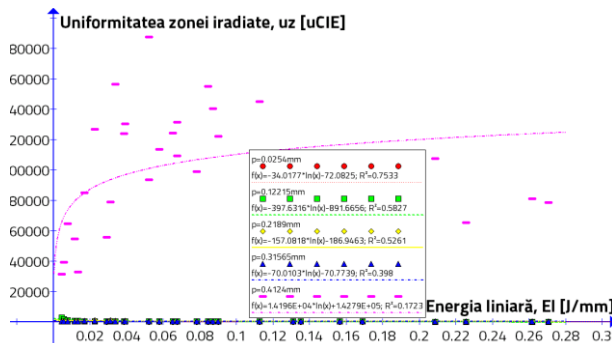


Figura 3.128 Variațiile u_z cu E_i , modelate cu funcții logaritmice

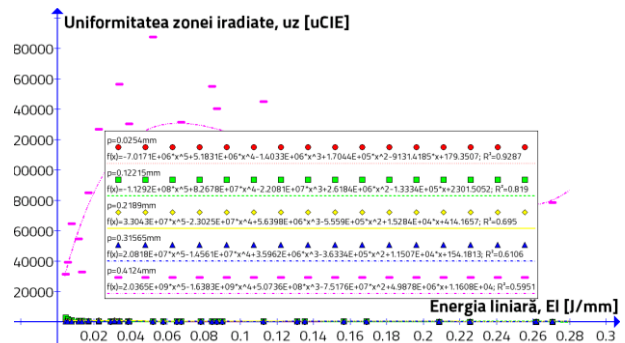


Figura 3.129 Variațiile u_z cu E_i , modelate cu funcții polinomiale de ordinul 5

Tabelul 3.45 Variațiile u_z cu E_i

Grafic	Figura 3.128	Figura 3.129
Nivel de variație	u_z la pași mari crește de până la de 933 ori comparativ cu creșterea rezultată la pași mici.	
Observații	Pe domeniul experimental analizat se observă că diferența dintre pasul cel mai mare ($p=0,4124$ mm) și ceilalți pași este foarte mare. Practic pe grafic se observă doar prima serie, celelalte suprapunându-se în apropierea abscisei graficului. Aceasta reprezintă tipul variației care poate fi asociată cu fenomenul de pirogravare a lemnului. Această variație se explică prin faptul că la E_i mici sunt insuficiente pentru a arde uniform lemnul, fenomen care se produce la E_i mai mari până la un anumit punct la care se presupune că se produce colorarea uniformă și completă datorită saturației. Acest punct nu poate fi stabilit cu certitudine în urma acestor experimente.	Pentru $p=0,4124$ mm variația u_z poate fi observată cel mai bine, aceasta având cea mai importantă variație. În cazul $p=0,4124$ mm u_z crește brusc până pe la $E_i=0,06$ J/mm, după care aceasta are o scădere aproape liniară până în jurul $E_i=0,26$ J/mm, iar apoi crește din nou.
Comparații	Modelarea matematică are R^2 cu valorile cele mai mari spre pași mai mici. Majoritatea acestora,	Modelele matematice au R^2 acceptabili pentru



	exceptându-l pe $p=0,254$ mm pentru care $R^2=0,75$, se situează sub limita de acceptabilitate statistică. Acest lucru reprezintă, din punct de vedere statistic, un interval mare de determinare, ceea ce înseamnă că erorile pentru acest tip de funcție sunt mari.	experimentele care analizează un material eterogen cum este lemnul.
Analiza experimentelor	Ecuțiile găsite nu definesc corect fenomenul de degradare a suprafeței lemnului deoarece R^2 pentru funcția logaritmică au valori mici, iar modelarea după o funcție polinomială nu definește fenomenul de degradare. Pentru definirea corectă a fenomenului sunt necesare experimente suplimentare.	

3.9.2.2. Experiment factorial E2F

După cum s-a menționat anterior, parametrii de prelucrare influențează global rezultatul pirogravării. Prin urmare, a fost utilizat un model factorial 2^3 complet pentru a modela eficient variabilele cheie care afectează în mod semnificativ atât L^* cât și dimensiunile urmei laserului pe material. În continuare sunt prezentate și analizate modelele matematice, tabelele ANOVA și răspunsurile optime pentru L^* , h și d_m .

Ecuții de regresie primare: Luminozitatea, L^*

Luminozitatea, notată cu L^* , așa cum este definită în sistemul tricromatic $CIE L^*a^*b^*$, reprezintă componenta tricromatică a culorii care este influențată cel mai mult prin ardere cu laser. Ca termen generic, L^* este unul dintre cei mai importanți indicatori de performanță ai proceselor de pirogravare cu laser. Ideal, se dorește o L^* cât mai mică a pirogravurii, ceea ce înseamnă o zonă prelucrată intens. În condiții reale, L^* este condiționată de conținutul grafic al imaginii reproduse și obținerea unui număr cât mai mare de valori a L^* crește fidelitatea de reproducere a imaginii respective. Controlul L^* și, indirect, al geometriei urmei lăsate pe material de către un impuls reprezintă unul din obiectivele prioritare ale optimizării proceselor de pirogravare cu laser.

Ecuția de regresie a fost ajustată la datele analizate. Ecuția (3.68) reprezintă ecuația modelului factorial pentru L^* .

$$L^* = 48,6392 + 0,0712091 \cdot v - 2,00341 \cdot P + 101,686 \cdot p + 0,00188 \cdot v \cdot P - 0,178042 \cdot v \cdot p + 1,855 \cdot P \cdot p \quad (3.68)$$

Analizând ecuația (3.68) se poate observa că, datorită semnului pozitiv al coeficienților respectivi, L^* crește cu viteza de avans și pasul capului de lucru, în timp ce puterea medie a laserului influențează negativ acest parametru, acest lucru se poate observa și în diagrama Pareto standardizată corespunzătoare L^* din Figura 3.134. Se observă că primul efect este cel datorat pasului capului de lucru, urmat de cel al puterii medii a laserului. Cele două efecte au semnificație statistică semnificativă. Puterea medie a laserului produce un efect de scădere a L^* , fiind și singurul efect care scade L^* . Se mai observă că, mărirea L^* cu pasul este aproape compensată de scăderea puterii. Mai mult, efectul de scădere nu este prezent și la cele două interacțiuni ale puterii. Primele două efecte: cel al vitezei de avans și cel al puterii ating pragul de semnificație statistică.

Se observă că L^* crește în principal cu pasul, la care se adaugă un efect mai redus de creștere prin interacțiunea acestuia cu puterea și un efect de scădere prin interacțiunea cu viteza de avans.



Viteza are un efect de creștere și interacțiunea dintre viteză și putere are un efect de scădere. Existența unui echilibru între efectul puterii și cel al pasului influențează sensibilitatea L^* la variațiile provocate de viteză.

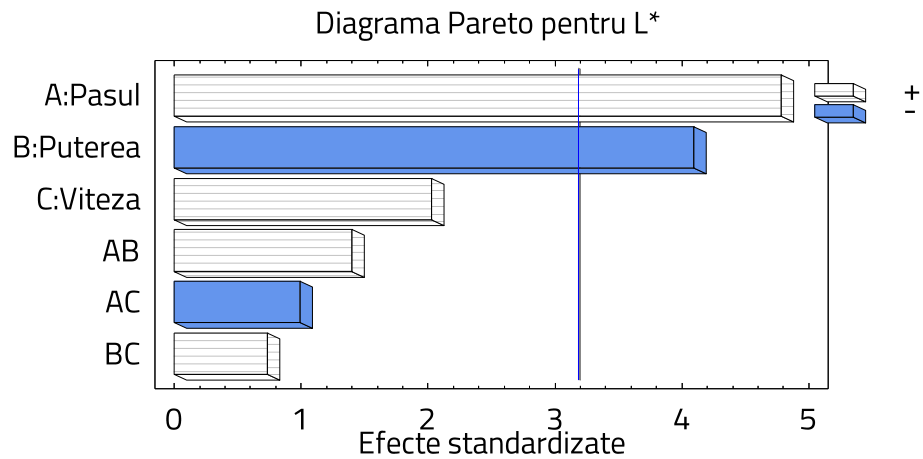


Figura 3.134 Diagrama Pareto pentru L^*

Creșterea vitezei scade timpul de interacțiune dintre radiația laser și material, astfel viteza crește L^* așa cum arată diagrama Pareto.

Se observă că efectele produse de factorii de influență sunt mai mari decât cele produse de interacțiunile dintre ei.

Se remarcă, că prin efect propriu puterea acționează în sensul scăderii L^* , iar prin interacțiunile cu ceilalți factori acționează în sensul creșterii L^* . De asemenea, pasul acționează atât prin efect propriu cât și prin interacțiunea cu puterea, în sensul creșterii L^* , iar prin interacțiunea cu viteza în sensul scăderii L^* .

În ceea ce privește influența factorilor de lucru asupra L^* , pe primul loc este situat efectul pasului capului de lucru, urmat de puterea medie a laserului și viteza de avans. Influențele combinate ale factorilor sunt crescătoare în cazul interacțiunilor pas-putere și viteză-putere și descrescătoare în cazul interacțiunii dintre pas și viteză. Din punct de vedere al mărimii influenței asupra L^* se observă că influențele combinate ale factorilor sunt aproximativ egale.

Analizând influențele combinate se observă că interacțiunea dintre pas și viteză are efect negativ asupra L^* , chiar dacă, analizate separat, cei doi factori au efecte pozitive asupra L^* . Acest fenomen este posibil datorită diferenței de mărime dintre cei doi parametri.

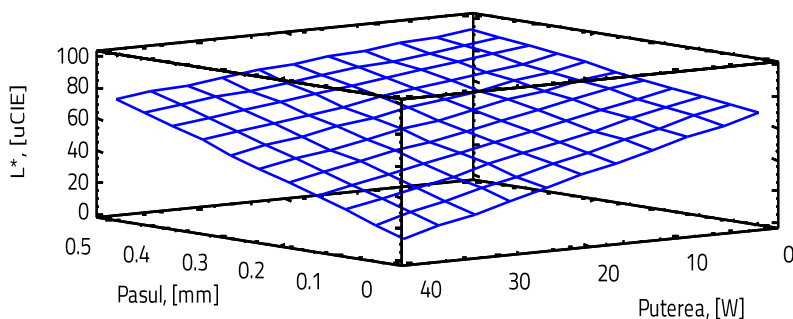


Figura 3.135 Suprafața de răspuns pentru L^* , la $v=300$ mm/s

În aceeași ordine de idei, chiar dacă analizată separat, puterea are o influență negativă asupra L^* , interacțiunea acesteia cu oricare dintre ceilalți factori conduce la influențe pozitive.

Factorul principal care influențează L^* este pasul, efectul acestuia fiind mai mare decât cel al factorului putere care controlează laserul. Se confirmă astfel că suprafața de interacțiune dintre radiație și material are primul rol în descompunerea termică a materialului. Aceste observații conturează ideea că



întunecarea suprafeței lemnoase este un proces în timp, respectiv arderea nu se face brusc ci prin interacțiunea laserului cu lemnul, acesta din urmă se aprinde chiar și pentru o perioadă scurtă.

În Figura 3.135 și Figura 3.136 sunt reprezentate diagramele suprafeței de răspuns care reflectă dependența dintre L^* , pasul capului de lucru și puterea medie a laserului.

Din analiza figurii Figura 3.135 se observă că L^* crește cu pasul și scade cu puterea medie a laserului. Această variație se menține pe tot domeniul experimental. Valorile minime pentru L^* se obțin la pas minim și putere maximă. Se observă că variația L^* influențată de pas și de puterea medie a laserului pe domeniul experimental analizat se situează în intervalul 10...95 uCIE. Variația prezentată de suprafața de răspuns este cantitativ mare. Astfel, se pot recomanda anumite valori pentru factorii de influență variați, pas sau putere.

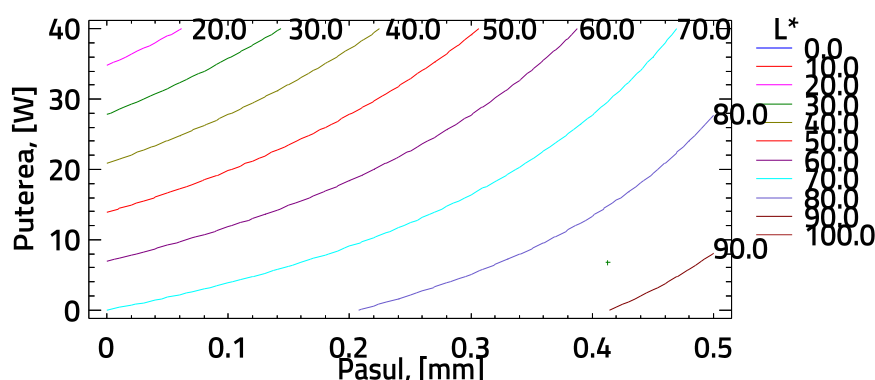


Figura 3.136 Contururile suprafeței de răspuns estimate pentru L^* , la $v= 300$ mm/s

Valorile minime ale L^* se obțin pentru pas minim și putere maximă. Utilizarea regimurilor de lucru cu valori ridicate ale puterii și valori scăzute ale pasului duce la creșterea drastică a timpului de execuție a pirogravurii.

Influența variației puterii asupra L^* este mai mare la pași de scanare mici. Se arată astfel că pentru L^* intensitatea fascicului laser are un rol mai mare decât mărimea suprafeței iradiate. Se observă că, creșterea pasului asociată cu scăderea puterii duce la nerealizarea arderii superficiale. Cazul contrar, pasul mic și puterea crescută duce la obținerea de L^* mici care nu vor prezenta o calitate bună a suprafețelor, acestea fiind prea arse.

Suprafața de răspuns pentru L^* influențată de putere și de pas, arată o comportare tip care poate fi identificată atât la pirogravare cât și la alte procese de prelucrare cu fascicul laser în ceea ce privește condițiile de iradiere. Aceasta se formulează ca: valoarea ecuației de regresie scade cu puterea medie a laserului și crește cu pasul.

Compararea ecuațiilor de regresie ale experimentului factorial

Comparația între diagramele Pareto prezentate în Figura 3.134, Figura 3.141 și Figura 3,148 arată că funcțiile analizate sunt dependente primordial de pas. Cel de al doilea factor de influență pentru L^* și pentru d_m este puterea medie a laserului, iar pentru h este interacțiunea dintre putere și pas. Se observă așadar că cel de al doilea factor de influență este oarecum pasul.

Analizați individual, factorii de influență ai ecuațiilor de regresie analizate sunt, în ordine:

1. Pasul capului de lucru;
2. Puterea medie a laserului;
3. Viteza de avans a capului de lucru.

În aceeași ordine de idei, interacțiunile dintre factorii de influență pentru ecuațiile de regresie analizate sunt, în ordine:

1. Pasul capului de lucru – Puterea medie a laserului;
2. Pasul capului de lucru – Viteza capului de lucru;
3. Puterea medie a laserului – Viteza capului de lucru.

Analizând suprafețele de răspuns se observă că ecuațiile de regresie analizate pot fi grupate după influența factorilor analizați astfel: ecuații de regresie dimensionale (d_m și h) au aceeași tendință de variație, iar comparativ cu L^* , aceste funcții sunt influențate opus de factorii analizați. Dacă un factor influențează un factor în sens pozitiv, pe celălalt îl influențează negativ.

Aceste rezultate confirmă studiul anterior privind alegerea limitelor de variație a intervalului de variație a principalilor parametri tehnologici care influențează pirogravarea cu laser.

Analiza cu interacțiuni de ordinul 2

Analiza ANOVA pentru factorul L^* este prezentată în Tabelul 3.48.

Tabelul 3.48 Analiza variației pentru L^*

Sursa	Suma pătratelor	Df	Media pătratică	Raportul F	Valoarea P
A:Pasul	2209,92	1	2209,92	22,85	0,0174
B:Puterea	1619,22	1	1619,22	16,74	0,0264
C:Viteza	396,994	1	396,994	4,10	0,1359
AB	188,457	1	188,457	1,95	0,2571
AC	94,9501	1	94,9501	0,98	0,3948
BC	51,9207	1	51,9207	0,54	0,5168
Eroarea totală	290,14	3	96,7133		
Total (corectat)	4851,6	9			

Tabelul ANOVA prezintă variabilitatea L^* împărțită în zone separate pentru fiecare dintre efectele analizate. Apoi testează semnificația statistică a fiecărui efect prin compararea mediei pătratice a acestora față de o estimare a erorii experimentale. În acest caz, două efecte au o valoare P mai mică de 0,05, ceea ce indică faptul că acestea sunt semnificativ diferite de zero, cu un nivel de încredere de 95,0%.

Tabelul 3.49 Analiza modelului matematic pentru L^* , rezultat în urma experimentului factorial

R^2	R^2 (ajustat pentru Df)	Eroarea Standard Estimată	Eroarea medie absolută	Statistica Durbin-Watson	Autocorelația reziduală Lag 1
0,94	0,82	9,83429	4,23071	0,649244 (P=0,0226)	0,422914

Din punct de vedere statistic, R^2 indică faptul că modelul, ajustat, explică 94% din variabilitatea L^* . Din punct de vedere statistic R^2 ajustat, care este mai potrivit pentru compararea modelelor cu număr diferit de variabile independente este de 82%. Eroarea standard a estimării arată că deviația standard a reziduurilor este 9,83429. Eroarea medie absolută (EMA) de 4,23071 reprezintă valoarea medie a reziduurilor. Statisticile Durbin-Watson (DW) testează reziduurile pentru a determina dacă există vreo corelație semnificativă în funcție de ordinea în care sunt prezentate datele. Deoarece valoarea P este



mai mică de 5,0%, se poate afirma că pentru corelație este posibil un nivel de semnificație a seriei de 5,0%. Trasându-se reziduurile versus ordinele pe rând se poate observa dacă există poate fi detectat orice model existent.

Analiza ANOVA pentru factorul adâncimea de gravare este prezentată în Tabelul 3.50.

Tabelul 3.50 Analiza variației pentru h

Sursa	Suma pătratelor	Df	Media pătratică	Raportul F	Valoarea P
A:Pasul	3,187	1	3,187	14,68	0,0313
B:Puterea	1,20568	1	1,20568	5,55	0,0997
C:Viteza	0,231257	1	0,231257	1,07	0,3780
AB	1,28478	1	1,28478	5,92	0,0931
AC	0,231244	1	0,231244	1,06	0,3780
BC	0,0538852	1	0,0538852	0,25	0,6526
Eroarea totală	0,651399	3	0,217133		
Total (corectat)	6,84524	9			

Tabelul ANOVA împarte variabilitatea h în zone separate pentru fiecare dintre efectele analizate. Apoi testează semnificația statistică a fiecărui efect prin compararea mediei pătratice a acestora față de o estimare a erorii experimentale. În acest caz, un efect are o valoare a lui P mai mică de 0,05, ceea ce indică faptul că aceasta este semnificativ diferită de zero, cu un nivel de încredere de 95,0 %.

Tabelul 3.51 Analiza modelului matematic pentru h

R^2	R^2 (ajustat pentru Df)	Eroarea Standard Estimată	Eroarea medie absolută	Statistica Durbin-Watson	Autocorelația reziduală Lag 1
0,905	0,715	0,465975	0,187817	0,858463 ($P=0,0528$)	0,254193

Din punct de vedere statistic, R^2 indică faptul că modelul, ajustat, explică 90,48% din variabilitatea planului experimental. Din punct de vedere statistic R^2 ajustat, care este mai potrivit pentru compararea modelelor cu număr diferit de variabile independente este de 71,45 %. Eroarea standard a estimării arată că deviația standard a reziduurilor este 0,4665975. Eroarea medie absolută (EMA) de 0,187817 reprezintă valoarea medie a reziduurilor. Reziduurile de testare Durbin-Watson (DW), pentru a determina dacă există vreă corelație semnificativă în funcție de ordinea în care sunt prezentate datele. Deoarece valoarea lui P este mai mare de 5,0 %, nu există nici un indiciu de autocorelare a seriei în reziduurile cu un nivel de semnificație de 5,0 %.

Analiza ANOVA pentru factorul d_m este prezentată în Tabelul 3.52.

Tabelul ANOVA împarte variabilitatea d_m în zone separate pentru fiecare dintre efectele analizate. Apoi testează semnificația statistică a fiecărui efect prin compararea mediei pătratice a acestora față de o estimare a erorii experimentale. În acest caz, 5 efecte au o valoare a lui P mai mică de 0,05, ceea ce indică faptul că acestea sunt semnificativ diferite de zero, cu un nivel de încredere de 95,0 %.

Din punct de vedere statistic, R^2 indică faptul că modelul, ajustat, explică 99,41 % din variabilitatea planului experimental. Din punct de vedere statistic R^2 ajustat, care este mai potrivit pentru compararea modelelor cu număr diferit de variabile independente este de 98,22 %. Eroarea standard a estimării

arată că deviația standard a reziduurilor este 0,0211379. Eroarea medie absolută (EMA) de 0,0110749 reprezintă valoarea medie a reziduurilor. Reziduurile de testare Durbin-Watson (DW), pentru a determina dacă există vreo corelație semnificativă în funcție de ordinea în care sunt prezentate datele. Deoarece valoarea lui P este mai mare de 5,0 %, nu există nici un indiciu de autocorelare a seriei în reziduurile cu un nivel de semnificație de 5,0 %.

Tabelul 3.52 Analiza variației pentru d_m

Sursa	Suma pătratelor	Df	Media pătratică	Raportul F	Valoarea P
A:Pasul	0,172986	1	0,172986	387,16	0,0003
B:Puterea	0,0256717	1	0,0256717	57,46	0,0048
C:Viteza	0,0117239	1	0,0117239	26,24	0,0144
AB	0,00677951	1	0,00677951	15,17	0,0300
AC	0,00625781	1	0,00625781	14,01	0,0333
BC	0,000611691	1	0,000611691	1,37	0,3265
Eroarea totală	0,00134043	3	0,00044681		
Total (corectat)	0,225371	9			

Tabelul 3.53 Analiza modelului matematic pentru d_m

R^2	R^2 (ajustat pentru Df)	Eroarea Standard Estimată	Eroarea medie absolută	Statistica Durbin-Watson	Autocorelația reziduală Lag 1
0,994	0,982	0,0211379	0,0110749	2,12847 (P=0.6416)	-0,250903

Răspunsul optim

Valorile optime de răspuns sunt prezentate în Tabelul 3.54. În același tabel se observă scopurile pentru fiecare ecuație de regresie. Se observă că pentru toate funcțiile se impune minimizarea răspunsului.

Tabelul 3.54 Răspunsul optim

Scopul	Valoarea optimă
minimizarea L^*	11,1535 uCIE
minimizarea h	0,219162 mm
minimizarea d_m	0,0453975 mm

Combi-nația optimă a parametrilor de lucru este prezentată în Tabelul 3.55. Acest tabel prezintă combinația de niveluri care optimizează factorii de răspuns pentru regiunea indicată. Se observă că pentru a optimiza răspunsurile ecuațiilor de regresie, există regimuri optime diferite pentru fiecare ecuație de regresie.

Răspunsul optim pentru L^* , respectiv suprafața cea mai întunecată, se obține când pasul și viteza sunt minime, iar puterea este maximă.

Tabelul 3.55 Răspunsurile în funcție de variațiile factorilor

Factor	Inferior	Superior	Optim		
			L^*	h	d_m
Pasul, [mm]	0,0254	0,4124	0,0254	0,4124	0,4124
Puterea, [W]	6,76	33,81	33,81	33,81	6,76
Viteza, [mm/s]	200,0	400,0	200,0	400,0	400,0

În ceea ce privește h , răspunsul optim este cel preconizat, respectiv pentru a obține o pătrundere



minimă a laserului în lemn este nevoie toți parametrii de lucru analizați să aibă valori mari.

Răspunsul optim pentru d_m , respectiv rezoluția cea mai bună pentru reproducerea imaginilor, se obține când pasul și viteza sunt maxime, iar puterea este minimă.

3.10. Concluzii cu privire la cercetările teoretice și experimentale a factorilor de influență ai pirogravării cu laser

S-au prezentat programele experimentale realizate, acordându-se o atenție deosebită caracterizării avansate a materialului supus prelucrării și sistemelor tehnologice care folosesc laserul cu CO_2 . S-au detaliat metodele și mijloacele de măsurare a elementelor geometrice și fizice ale prelucrărilor realizate, principalul purtător de informație asupra eficienței pirogravării folosind laserul. S-au analizat caracteristicile materialului lemnos prelucrat și caracteristicile sistemului tehnologic cu laser utilizat în experimente.

S-a implementat o metodă și o procedură, prin metoda analizei imaginilor, pentru măsurarea diametrelor urmelor atât pe direcție paralelă cu fibra lemnului cât și pe direcție perpendiculară cu aceasta. Această metodă originală a fost verificată folosindu-se o metodă clasică, respectiv șublerul electronic acolo unde a fost posibil, respectiv la prelucrările cu regimuri de lucru severe.

S-a implementat o metodă și o procedură pentru măsurarea adâncimii de gravare a laserului în lemn. Această metodă a fost verificată folosindu-se o metodă clasică, respectiv șublerul electronic acolo unde a fost posibil, respectiv la prelucrările cu regimuri de lucru severe.

S-a implementat o metodă și o procedură pentru măsurarea culorii pe suprafețe cu dimensiuni mici și variabile. Procedura a constat în dezvoltarea unei aplicații software care analizează imaginile capturate de pe suprafețele care urmează să fie măsurate și apoi prelucrează datele astfel obținute. Această metodă originală a fost verificată folosindu-se o metodă clasică, respectiv colorimetrul acolo unde a fost posibil, respectiv la prelucrările pe suprafețe mari. Chiar dacă metoda de măsurare a fost concepută pentru măsurarea culorii lemnului, aceasta poate fi folosită pentru orice tip de material. Singura condiție fiind aceea ca suprafața care este măsurată să fie transformată în imagine digitală. Deoarece culoarea este o senzație, aceasta este greu de cuantificat.

Metoda propusă permite măsurări multiple pe aceeași suprafață fără folosirea vreunui dispozitiv tehnologic care ar putea îngreuna măsurarea. Poziționarea pe aceeași suprafață de măsurare se face prin folosirea unui șablon software care stochează coordonatele tuturor punctelor de măsurare.

Rezultatele obținute folosind metodele de măsurare propuse sunt comparabile cu aparatele de măsură specializate. Coeficienții de determinare ridicați (peste 0,95) demonstrează că metodele de măsurare propuse sunt corecte, iar măsurătorile sunt precise.

Din punct de vedere al corectitudinii rezultatelor se poate afirma că metodele de măsurare pot fi ierarhizate din punct de vedere al preciziei după cum urmează:

1. Măsurarea diametrului;
2. Măsurarea culorii. Aceasta se situează pe această poziție datorită neuniformității culorii lemnului;
3. Măsurarea adâncimii de gravare. Aceasta se situează pe această poziție datorită preciziei mici



de măsurare a traductorului folosit.

S-au realizat două serii de experimente de pirogravare folosind laserul pe epruvete din lemn masiv de paltin de câmp:

- Experimentele 1 au constat din planuri experimentale de tip clasic la care s-a variat doar un singur parametru, iar încercările au fost realizate cu scopul de a determina atât limitele intervalelor de variație a parametrilor de lucru cât și legile de variație a acestora. Aceste experimente au avut un caracter explorator în care s-au variat următorii factori care controlează iradierea:
 - Puterea medie a laserului,
 - Viteza de avans a capului de lucru,
 - Pasul capului de lucru,
 - Frecvența de pulsație a laserului,
 - Poziția planului focal al laserului,
 - Direcția de avans raportată la orientarea fibrei lemnului,
 - Numărul de treceri a laserului peste aceeași suprafață prelucrată.
- Experimentul 2 este format dintr-un experiment clasic *E2C* și un experiment factorial *E2F*. Planul experimental a constat dintr-o serie experimentală clasică cu cel puțin 5 puncte experimentale. Pentru acest plan experimental s-a folosit aceeași specie lemnoasă ca și în cazul experimentelor preliminare, respectiv paltinul de câmp, după cum rezultă și din Tabelul 3.3. Acesta este un experiment extins în care s-au analizat influențele a trei factori, rezultați cei mai importanți în urma experimentelor *E1*, în ceea ce privește modificarea culorii superficiale a lemnului și anume:
 - Puterea medie a laserului,
 - Viteza de avans a capului de lucru,
 - Pasul capului de lucru.

S-au prezentat mărimile care caracterizează prelucrarea cu laser. Acestea s-au determinat pe baza valorilor factorilor de influență variați, însă reprezintă mult mai bine efectul iradierii asupra materialului lemnos.

S-a determinat intervalul de variație a puterii medii a laserului și mărimea acestui interval. Valorile sunt prezentate în Tabelul 3.22. S-a definit ecuația de regresie (3.35) care definește interdependența $L^*=f(P)$.

S-a determinat intervalul de variație a vitezei de avans a capului de lucru și mărimea acestui interval. Valorile sunt prezentate în Tabelul 3.22. S-a definit ecuația de regresie (3.36) care definește interdependența $L^*=f(v)$.

S-a determinat intervalul de variație a pasului capului de lucru și mărimea acestui interval, folosindu-se o metodă originală de analiză a datelor experimentale care combină histogramele de culoare cu interpretarea abaterii medii standard. Valorile sunt prezentate în Tabelul 3.22. S-a definit ecuația de regresie (3.37) care definește interdependența $L^*=f(p)$.

S-a studiat intervalul de variație a frecvenței de pulsație a laserului. Rezultatele experimentale au arătat că, pe intervalul studiat, nu există o tendință de variație clară a L^* . Valorile sunt prezentate în



Tabelul 3.22.

S-a studiat intervalul de variație a influenței poziției planului focal al fasciculului laser asupra colorării lemnului. Rezultatele experimentale au arătat că, există o tendință de variație hiperbolică a L^* doar în jurul punctului focal. Valorile sunt prezentate în Tabelul 3.22. S-a definit ecuația de regresie care definește interdependența $L^*=f(ppf)$.

S-a studiat influența direcției de avans a fasciculului laser, raportată la orientarea fibrei lemnului, asupra colorării. Rezultatele experimentale au arătat că diferența dintre cele două direcții principale (paralelă și perpendiculară) este mai mică de 5%. Valorile sunt prezentate în Tabelul 3.22. totuși pentru experimentul principal s-a preferat direcția paralelă deoarece fibrele lemnului contribuie la colorarea uniformă a suprafeței prelucrate.

S-a studiat influența numărului de treceri a fasciculului laser peste aceeași suprafață prelucrată a lemnului asupra colorării. Rezultatele experimentale au arătat că, prin treceri repetate nu se obțin rezultate spectaculoase. Aceleași rezultate se pot obține într-un timp mai scurt prin varierea altor factori de influență. Valorile sunt prezentate în Tabelul 3.22.

În urma experimentelor 1, s-au ales factorii care influențează cel mai mult colorarea lemnului. Acești factori au stat la baza dezvoltării planului experimental principal. În urma acestor experimente se desprind următoarele concluzii:

- Factorii de influență pot fi clasificați după mărimea influenței asupra L^* :
 - Mare (peste 20%): puterea medie a laserului și viteza de avans;
 - Medie (între 10 și 20%): poziționarea planului focal, frecvența de pulsație a laserului și pasul capului de lucru;
 - Mică (sub 10%): direcția de avans raportată la orientarea fibrei lemnului.
- Rezultatele asemănătoare celor obținute prin varierea altor factori de influență cum sunt: poziționarea planului focal, numărul de treceri și direcția de avans raportată la orientarea fibrei lemnului pot fi obținute și prin varierea pasului, motiv pentru care acești factori au fost excluși din experimentul principal;
- Clasificarea factorilor de influență după ușurința cu care se poate regla acel factor:
 - Reglare facilă: puterea medie a laserului, viteza de avans, frecvența de pulsație a laserului, numărul de treceri și pasul capului de lucru. Acești factori pot fi calculați și reglați cu ajutorul aplicațiilor software specializate, putând fi reglate pe suprafețe foarte mici;
 - Reglare dificilă: poziționarea planului focal și direcția de avans raportată la orientarea fibrei lemnului. Acești factori se reglează la începutul lucrului, modificarea lor nefiind posibilă în timpul prelucrării.
- Datorită analizei mărimilor intervalelor de variație și a ușurinței gestionării acestor factori s-au putut selecta factorii cei mai importanți pentru experimentul principal.

În cadrul experimentului 2 clasic au fost analizați:

- Factorii de dependență primari:
 - Luminozitatea,
 - Adâncimea de gravare,
 - Diametrul urmei laserului măsurat în direcție perpendiculară cu fibra lemnului,

- Diametrul urmei laserului măsurat în direcție paralelă cu fibra lemnului,
- Factorul de dependență secundar diametrul mediu a urmei laserului pe material,
- Factorii de dependență terțiari:
 - Productivitatea procesului de pirogravare,
 - Distincția zonelor iradiate,
 - Uniformitatea zonelor iradiate.

Aceste funcții au fost analizate avându-se în vedere influența principalilor factori de prelucrare asupra lor.

- Pentru majoritatea ecuațiilor de regresie primare, modelele matematice găsite definesc corect fenomenele care se produc în lemn deoarece majoritatea coeficienților de determinare ai modelelor matematice au valori mari, majoritatea variațiilor sunt similare la ambele capete a intervalului analizat chiar dacă acest lucru nu este întotdeauna clar evidențiat grafic. În cele mai multe cazuri intervalele de variație se completează reciproc. În unele situații, pentru definirea corectă a fenomenelor care se produc în lemn, sunt necesare experimente suplimentare;
- Pentru majoritatea ecuațiilor de regresie secundare și terțiare, modelele matematice găsite nu definesc corect fenomenele care se produc în lemn deoarece majoritatea coeficienților de determinare ai modelelor matematice au valori mici, fiind necesară modelarea după funcții polinomiale. În aceste situații, pentru definirea corectă a fenomenelor care se produc în lemn, sunt necesare experimente suplimentare.
- Limitele intervalelor de variație a L^* suprafeței, funcție de factorii de influență analizați (puterea medie a laserului, viteza și pasul) sunt cuprinse între 1,53 și 88,36 uCIE. Mărimile intervalelor de variație a L^* suprafeței, funcție de parametrii de lucru analizați sunt cuprinse între 41,48 și 72,7 uCIE.
- Limitele intervalelor de variație a h , funcție de factorii de influență analizați (puterea medie a laserului, viteza și pasul) sunt cuprinse între 0,00002 și 3,5 mm. Mărimile intervalelor de variație a h , funcție de parametrii de lucru analizați sunt cuprinse între 0,00008 și 3,5 mm.
- Limitele intervalelor de variație a d_m , funcție de factorii de influență analizați (puterea medie a laserului, viteza și pasul) sunt cuprinse între 0,0056 și 0,59 mm. Mărimile intervalelor de variație a d_m , funcție de parametrii de lucru analizați sunt cuprinse între 0,1616 și 0,534 mm.
- Limitele intervalelor de variație a η , funcție de factorii de influență analizați (E_i , raportul j și pasul) sunt cuprinse între 0,0000000099 și $1,36 (\text{uCIE} \cdot \text{mm})^{-1}$. Mărimea intervalului de variație a η , funcție de parametrii de lucru analizați este $1,36 (\text{uCIE} \cdot \text{mm})^{-1}$.
- Limitele intervalelor de variație a d_z , funcție de factorii de influență analizați (E_i , raportul j și pasul) sunt cuprinse între 0,052 și $2,13 \text{ mm}^2/\text{uCIE}$. Mărimea intervalului de variație a d_z , funcție de parametrii de lucru analizați este $2,078 \text{ mm}^2/\text{uCIE}$.
- Limitele intervalelor de variație a u_z , funcție de factorii de influență analizați (E_i , raportul j și pasul) sunt cuprinse între 0,25 și 187645,58 uCIE. Mărimea intervalului de variație a u_z , funcție de parametrii de lucru analizați este 187645,33 uCIE.

În urma experimentului 2 factorial au fost analizați:

- Factorii de dependență primari:
 - Luminozitatea,
 - Adâncimea de gravare,



- Diametrul urmei laserului măsurat în direcție perpendiculară cu fibra lemnului,
- Diametrul urmei laserului măsurat în direcție paralelă cu fibra lemnului,
- Factorul de dependență secundar diametrul mediu a urmei laserului pe material.

Interpretarea rezultatelor experimentului s-a făcut prin:

- Compararea ecuațiilor de regresie,
- Analiza cu interacțiuni de ordinul 2,
- Răspunsul optim.

Comparând modelele matematice ale ecuațiilor de regresie analizate, respectiv ecuațiile (3.68),(3.69) și (3.70) se observă că acestea pot fi grupate în funcție de modul de influență a factorilor de influență astfel: ecuații de regresie dimensionale (h și d_m) sunt influențate în același mod, dar, comparativ cu L^* , acestea sunt invers proporționale, respectiv un parametru care influențează pozitiv un factor, îl influențează negativ pe celălalt factor.

Din diagramele Pareto se observă că funcțiile analizate sunt influențate în primul rând de pasul capului de lucru. Acest factor de influență este singurul care atinge pragul de semnificație statistică pentru toate cele trei funcții.

În urma observațiilor de la răspunsul optim se poate concluziona că stabilirea unui regim optim pentru pirogravare este dificil de realizat urmărind mai multe ecuații de regresie, fiind necesare adăugarea și a altor criterii.

Comparația dintre variația L^* funcție de viteza de avans și variația L^* funcție de viteza totală demonstrează existența unei influențe asupra L^* a deplasării spotului laser pe axa Y mai mici decât cea a deplasării pe axa X.

Verificarea corectitudinii metodelor de măsurare inedite prezentate în lucrare s-a făcut și prin valoarea R^2 pentru ecuațiile de regresie analizate, pentru care s-au obținut valori mari. Rezultatele obținute în cadrul experimentului principal verifică corectitudinea abordării și rezultatele experimentelor preliminare.

CAPITOLUL 4. OPTIMIZAREA REGIMURILOR DE LUCRU

4.1. Noțiuni introductive

Performanțele laserelor cu CO_2 pot fi optimizate în mai multe moduri prin controlul parametrilor implicați. Numeroșii parametri intercorelați în pirogravarea cu laser face dificil de prezis parametrii optimi de ieșire necesari pentru un anumit proces de prelucrare din cauza lipsei unei relații universale. Acești parametri de ieșire includ: culoarea rezultată, diametrul urmei, adâncimea de gravare, forma urmei. Acest lucru a necesitat o bună înțelegere, în scopul de a simula parametrii necesari.

Acest capitol prezintă o analiză privind optimizarea regimurilor de lucru în cazul pirogravării lemnului folosind laserul cu CO_2 . În ceea ce privește factorii multipli care influențează procesul de ardere superficială cu laser a lemnului, găsirea combinației optime a parametrilor de proces este necesară pentru a atinge calitatea bună și eficiența ridicată a procesului. În acest studiu au fost utilizate proiectarea experimentelor și modelarea matematică pentru a investiga parametrii de proces semnificativi și a interacțiunilor dintre aceștia. Parametrii investigați pentru optimizarea regimurilor de lucru sunt puterea medie a laserului, viteza de avans și pasul capului de lucru; aceștia fiind considerați cei mai importanți factori deoarece, variația lor are cea mai mare influență asupra colorării lemnului cu ajutorul laserului. Aceste concluzii au fost prezentate deja în lucrare la capitolul dedicat factorilor de influență în cadrul procesului de pirogravare a lemnului cu ajutorul laserului.

Rezultatele experimentale comparate pentru răspunsurile de proces au fost definirea eficienței (adică culoarea obținută și timpul necesar prelucrării) și calitatea suprafeței rezultate (adică adâncimea de gravare). S-a constatat că procesul de pirogravare cu laser este afectat în principal de viteza de avans a capului de lucru, puterea medie a laserului, urmate de numărul de treceri și de direcția de avans raportată la fibrele lemnului.

Cea mai bună productivitate posibilă poate fi asigurată prin optimizarea tuturor parametrilor care influențează prelucrarea cu laser.

4.2. Obiective

- Optimizarea regimurilor de lucru astfel încât să se obțină un anumit ton de culoare în timpul cel mai scurt și la cea mai bună calitate:
 - Întocmirea metodologiei de optimizare;
 - Dezvoltarea unei aplicații software pentru optimizarea regimurilor de lucru prin simulare.
- Întocmirea unui plan experimental redus bazat pe regimurile optime de lucru;
- Transferarea regimurilor de lucru ale planului experimental redus la mașina de pirogravat cu laser.

4.3. Metoda de lucru

4.3.1. Metodologia de optimizare

Metoda constă în mai multe etape:



1. Identificarea principalilor factori care influențează pirogravarea cu laser;
2. Definirea intervalelor de variație a principalilor factori care influențează pirogravarea cu laser;
3. Ierarhizarea influenței principalilor factori care definesc pirogravarea cu laser;
4. Alegerea parametrilor de ieșire;
5. Stabilirea domeniului de variație a parametrilor de ieșire;
6. Stabilirea criteriilor de optimizare;
7. Simularea regimurilor de lucru;
8. Compararea L^* cu limitele minim și maxim;
9. Ordonarea rezultatelor după criteriile de optimizare.

Etapele de optimizare 1...5 au fost prezentate detaliat în capitolul anterior al tezei. Celelalte etape sunt prezentate detaliat în continuare:

Tabelul 4.1 Intervalele de variație, incremenții și ierarhizarea parametrilor de proces aplicate în pirogravarea lemnului, folosind laserul cu CO_2 (scara 1-3, cu 1 cel mai important)

Parametrul	Limita inferioară	Limita superioară	Incrementul	Ierarhizarea
Puterea, P [W]	0,58	33,81	3,4	3
Viteza, v [mm/s]	10	500	49	1
Pasul, p [mm]	0,0254	0,4124	0,0774	2

6. Criteriile de optimizare sunt:
 - Maximizarea vitezei de avans a capului de pirogravare pentru obținerea unui ton de culoare impus;
 - Minimizarea adâncimii de gravare pentru obținerea unui ton de culoare impus.
7. Optimizarea s-a făcut prin simularea procesului de pirogravare și calcularea parametrilor de ieșire. Pentru obținerea regimurilor optime se face simularea modelelor matematice (3.53)...(3.57) și (3.68) a parametrului de ieșire (factorul dependent) L^* , obținute în capitolul 3 în condițiile criteriilor de optimizare și se obțin valorile factorilor de influență de la valorile minime la valorile maxime cu un anumit pas (increment). Varierea parametrilor de proces s-a făcut prin incrementarea valorilor cu pași diferiți pentru fiecare parametru. Mărimile incremenților sunt prezentate și ele în Tabelul 4.1.
 - $L^* = f(v, P, p), 0 \geq L[uCIE] \leq 100$;

În același tabel sunt prezentate limitele intervalelor de variație a parametrilor tehnologici, care au generat următoarele restricții:

- $0,58 \geq P[W] \leq 33,81$;
 - $10 \geq v[m/s] \leq 500$;
 - $0,0254 \geq p[mm] \leq 0,4124$.
8. Valorile calculate ale parametrului de ieșire L^* se compară cu valorile minime și maxime ale criteriului de optimizare, respectiv $0 \dots L^*_{max} uCIE$, unde L^*_{max} reprezintă L^* culorii naturale a lemnului, care variază în funcție de specie. Valorile factorilor de influență și a parametrului de ieșire L^* care îndeplinesc condițiile criteriului de optimizare se afișează într-un tabel. Pentru fiecare regim de lucru din tabel (pentru fiecare L^*) se calculează parametrii de ieșire h și d_m , cu ajutorul ecuațiilor de regresie pentru h și pentru d_m . Acestea din urmă au fost alese având



coeficientul de determinare cel mai mare.

- În urma simulării regimurilor de lucru se obțin mai multe regimuri posibile pentru aceeași L^* . Aplicând primul criteriu de optimizare (viteza maximă) pentru majoritatea L^* se obține regimul optim. Pentru celelalte L^* este necesar să se aplice și al doilea criteriu de optimizare (adâncimea minimă), deoarece prin combinarea parametrilor pasul capului de lucru și puterea medie a laserului, dar pentru aceeași viteză de avans se obține aceeași L^* . Prin aplicarea celui de al doilea criteriu se poate arăta clar care este regimul optim, deoarece din multitudinea de posibilități rămâne doar un regim care îndeplinește toate criteriile de optimizare.

4.3.2. Aplicația software pentru optimizarea regimurilor de lucru

Deoarece metodologia care stă la baza optimizării regimurilor de lucru este unul anevoios, a fost elaborată o aplicație software care, pe baza datelor inițiale: specie lemnoasă, ecuație de regresie pentru L^* , limitele intervalelor de variație pentru parametri de intrare, pașii de incrementare; simulează toate combinațiile posibile. Dintre aceste combinații sunt eliminate cele imposibile, respectiv cele care nu se încadrează în posibilitățile tehnice de prelucrare. Aplicația software pentru optimizarea regimurilor de lucru a fost dezvoltată în mediul de programare *Lazarus*, folosindu-se limbajul de programare *Turbo Pascal*. Interfața aplicației software este prezentată în Figura 4.1.

Pentru a determina un regim optim de prelucrare prin simulare se parcurg următoarele etape:

- Se alege specia lemnoasă;
- Se selectează ecuația matematică care să fie folosită pentru calculul L^* . Unul dintre criteriile de alegere a ecuației matematice o reprezintă R^2 , care este afișat în lista de selecție. Utilizatorul poate alege orice ecuație dorește;

	Viteza, [mm/s]	Puterea, [%]	Puterea, [W]	Pasul [mm]	L^* , [uCIE]	Ad
203	108	57.50	20.709	0.4124	49	
204	10	32.00	4.660	0.4124	49	
205	10	32.00	4.660	0.2576	49	
206	304	49.00	15.807	0.0254	50	
207	206	83.00	31.766	0.1802	50	
208	206	91.50	31.944	0.1802	50	
209	206	100.00	32.803	0.1802	50	
210	157	83.00	31.766	0.2576	50	
211	157	91.50	31.944	0.2576	50	
212	157	100.00	32.803	0.2576	50	
213	108	57.50	20.709	0.3350	50	
214	59	40.50	10.119	0.2576	50	

Figura 4.1 Interfața aplicației software pentru optimizarea regimurilor de lucru

- După apăsarea butonului **Calculează**, programul începe să simuleze diferite regimuri de lucru pornind de la valorile minime ale factorilor de intrare până la cele maxime, acestea fiind modificate (crescute) cu incremenți diferiți pentru fiecare factor. Valorile incremenților sunt prezentate în Tabelul 4.1;
- După generarea tuturor variantelor posibile de regimuri de lucru se trece la optimizarea lor. Pentru fiecare L^* în parte, regimurile sunt ordonate descrescător în funcție de viteza de avans și de pas și crescător în funcție de adâncimea de gravare;
- Prin alegerea L^* dorite, programul afișează regimul optim. Acest regim poate fi luat ca atare sau se poate alege alt regim din tabel, dacă se consideră și alte criterii de optimizare preferate de utilizator.



4.4. Rezultate obținute și interpretarea datelor

În urma simulării regimurilor de lucru se observă că au fost generate câteva sute de variante posibile, în funcție de funcția obiectiv aleasă, ceea ce înseamnă că pentru obținerea unei singure nuanțe sunt posibile, în medie, mai multe regimuri de lucru, deoarece numărul de nuanțe este limitat la 101. Tabelul 4.2 prezintă parametrii optimi de proces rezultați la pirogravarea lemnului de paltin și plop, folosind laserul cu CO_2 , împreună cu valorile de răspuns estimate obținute din modelele matematice. Pentru a verifica dacă parametrii de lucru sunt aleși corect pentru modelarea matematică a proceselor tehnologice s-a optat pentru schimbarea unui parametru care până acum a fost menținut constant și anume a speciei lemnoase. Datele din Tabelul 4.2 arată că factorii de influență (puterea medie a laserului și deplasările capului de lucru pe cele două axe), au impus diferite combinații de parametri de proces pentru a satisface randamentul și calitatea obiectivelor procesului de pirogravare. Tabelul 4.2 listează, de asemenea, valorile experimentelor de confirmare efectuate pentru fiecare set de parametri de proces (definit de factorii de influență) pentru a valida previziunile modelului. Aceste rezultate de confirmare arată aproximație aproape de previziunile modelului. Cu toate acestea, unele răspunsuri prezintă diferențe mai mari cu valorile anticipate; acest lucru poate fi atribuit importanței atribuite factorilor și a răspunsurilor în procesul de optimizare și eterogenitatea naturală a materialului. Totuși aceste modele sunt utile pentru analiza parametrilor de proces care afectează pirogravarea lemnului.

Tabelul 4.2 Experimentele de confirmare și valorile estimate ale combinațiilor optime ale parametrilor de proces pentru pirogravarea lemnului de paltin și plop, folosind laserul cu CO_2

Nr. regim de lucru	Parametri			Valori	Măsurători					
	Puterea, P [W]	Pasul, p [mm]	Viteza, v [mm/s]		Adâncimea, h [mm]		Luminozitatea, L^* [uCIE]		Diametrul mediu, d_m [mm]	
					Paltin	Plop	Paltin	Plop	Paltin	Plop
1	34,65	0,0254	108	Obținut	3,695	5,435	10,300	6,610	0,93	0,7050
				Estimat	3,592	5,113	13,474	25,339	0,917	0,7054
				Eroare %	2,778	5,928	-30,808	-283,34	1,351	-0,060
2	34,65	0,0254	206	Obținut	2,713	2,8975	1,492	22,359	0,835	0,5700
				Estimat	2,878	3,5079	20,692	33,777	0,835	0,5185
				Eroare %	-6,100	-21,066	-1286,6	-51,065	0,011	9,0357
3	34,70	0,1028	206	Obținut	0,765	0,7075	43,757	62,409	0,685	0,2350
				Estimat	0,833	0,8133	30,628	43,392	0,718	0,3445
				Eroare %	-8,847	-14,954	30,006	30,471	-4,855	-46,61
4	34,65	0,1802	206	Obținut	0,392	0,3725	49,790	67,222	0,615	0,285
				Estimat	0,240	0,18791	40,552	52,968	0,598	0,2293
				Eroare %	38,86	49,555	18,555	21,205	2,704	19,543
5	27,01	0,0254	353	Obținut	1,525	1,5250	32,778	49,647	0,605	0,3600
				Estimat	1,519	1,53023	30,653	43,409	0,605	0,3673
				Eroare %	0,374	-0,343	6,483	12,563	-0,072	-2,024
6	34,65	0,0254	500	Obținut	1,5725	1,6075	34,069	50,911	0,595	0,185
				Estimat	1,480	1,13293	42,348	59,090	0,587	0,2059
				Eroare %	5,895	29,522	-24,299	-16,065	1,289	-11,29
7	30,92	0,1028	500	Obținut	0,315	0,295	66,725	78,426	0,565	0,165
				Estimat	0,368	0,23045	51,854	67,209	0,571	0,1450

Nr. regim de lucru	Parametri			Valori	Măsurători					
	Puterea, P [W]	Pasul, p [mm]	Viteza, v [mm/s]		Adâncimea, h [mm]		Luminozitatea, L^* [uCIE]		Diametrul mediu, d_m [mm]	
					Paltin	Plop	Paltin	Plop	Paltin	Plop
				Eroare %	-16,81	21,882	22,287	14,302	-1,126	12,139
8	33,50	0,2576	500	Obținut	0,055	0,055	66,836	79,334	0,55	0,1
				Estimat	0,034	0,01350	72,007	87,422	0,548	0,0616
				Eroare %	38,144	75,458	-7,737	-10,195	0,334	38,371
9	16,27	0,2576	500	Obținut	0,025	0,0125	76,679	87,063	0,415	0,075
				Estimat	0,017	0,00743	70,052	80,602	0,412	0,0802
				Eroare %	31,790	40,529	8,643	7,421	0,660	-6,982
10	16,27	0,4124	500	Obținut	0,0125	0,00125	79,741	89,021	0,275	0,055
				Estimat	0,001	0,00040	89,911	99,793	0,276	0,0355
				Eroare %	88,62	68,143	-12,753	-12,100	-0,535	35,483

Deoarece simularea s-a făcut pornind de la valorile experimentale, rezultatele ar trebui să fie reproductibile. Totuși, datorită multitudinii de factori care influențează prelucrarea, este dificil de afirmat că acestea pot fi reproduse cu certitudine. Pentru a înlătura acest neajuns se propune întocmirea unui plan experimental restrâns pentru fiecare caz în care se schimbă condițiile de lucru. Acest plan experimental pornește de la valorile optime pentru fiecare nuanță de culoare și poate varia în funcție de dorințele utilizatorilor de la 1 la 10 experimente.

4.5. Concluzii cu privire la optimizarea regimurilor de lucru

S-a stabilit o metodologie pentru optimizarea prin simulare a regimurilor de lucru privind pirogravarea cu laser. S-au definit criteriile de optimizare pentru pirogravarea lemnului cu laser.

S-a dezvoltat o aplicație software care urmărește metodologia pentru optimizarea regimurilor de lucru prin simulare.

În urma metodologiei de optimizare s-a stabilit un plan experimental redus, având în vedere particularitățile prelucrării: grad mare de noutate, caracteristicile lemnului (neomogenitate, higroscopicitate). Acest plan experimental poate fi folosit pe orice material indiferent de condițiile de lucru pentru a se alege nuanța dorită.

Folosind acest mod de simulare se pot alege parametrii optimi nu doar valorile studiate și experimentate ci și alte valori care se încadrează în intervalele de variație, dar care nu îndeplinesc toate criteriile de optimizare.

Având în vedere faptul că cele mai multe experimente s-au făcut pe specia paltin de câmp, se recomandă să se aleagă această specie lemnoasă. Folosirea planului experimental redus și rezultatele experimentale au verificat modelele matematice și pentru plop. Rezultatele experimentale prezentate în Tabelul 4.2 arată existența unor asemănări între cele două specii lemnoase studiate. Aceste asemănări sunt confirmate și de modelele matematice apropiate obținute în urma prelucrării rezultatelor.

S-a implementat o soluție tehnică de întocmire automată a desenului tabelar redus cu ajutorul programului *AutoCAD*®, în limbaj *AutoLISP*. S-a propus și implementat o soluție tehnică de transfer automat a planului experimental redus la mașina de pirogravat, fără modificarea directă a codului G.

CAPITOLUL 5. STUDII TEORETICE ȘI CERCETĂRI EXPERIMENTALE CU PRIVIRE LA PIROGRAVAREA PE SUPORT LEMNOS A TONURILOR DE GRI ȘI A CULORILOR

5.1. Obiective

- Studiarea informației digitale ca material grafic-vizual și prelucrarea acestui conținut.
- Studiarea și prezentarea sintetică a noțiunii de culoare și a elementelor definitorii.
- Cercetarea posibilităților de pirogravare a unei informații grafice test ca valori de gri și tonuri cromatice pe suport lemnos.
- Cercetarea posibilităților de pirogravare a unei informații grafice ca imagine policromă pe suport lemnos.
- Cercetarea posibilităților de prelucrare a imaginilor policrome și rezultatul pirogravării acestora pe suport lemnos.

5.3. Studiu experimental cu privire la transpunerea informației digitale prin pirogravare

5.3.1. Metoda de lucru și aparatura

Transferul imaginii digitale pe suport prin tehnologia pirogravării laser este influențată covârșitor de următorii factori:

- Informația grafică digital prin tipul, posibilitățile de prelucrare și calitatea acesteia;
- Metoda de transfer a informației grafice;
- Caracteristicile de reglare și controlul parametrilor echipamentului;
- Natura și caracteristicile suportului fizic pe care se pirogravează.

5.3.1.1. Definirea procesului de lucru pe niveluri și conținutul acestora pentru transpunerea informației digitale

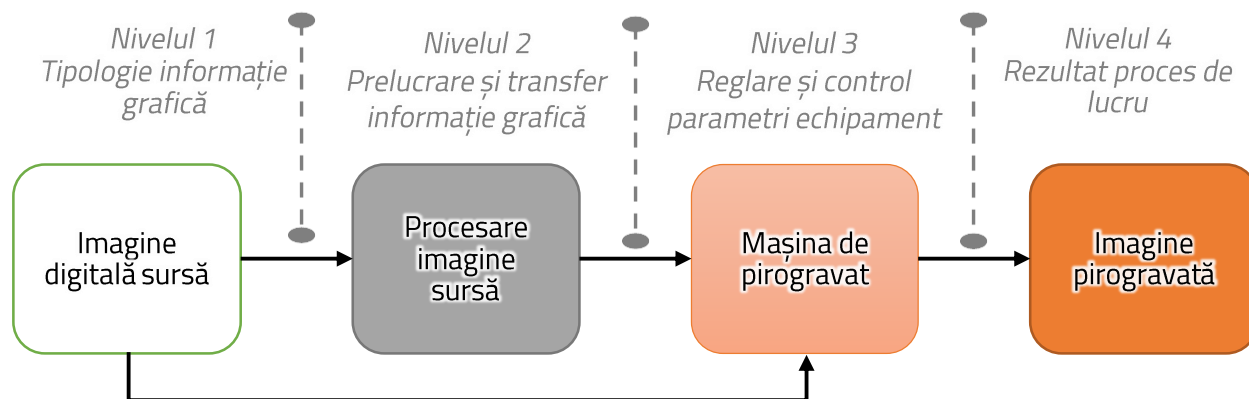


Figura 5.1 Schema de principiu a procesului de lucru

Procesul de lucru este definit ca o succesiune de niveluri necesare pentru trecerea de la informația digitală la informația grafică pirogravată. Schema de principiu a acestui proces este formulată și

La nivelurile 1 și 2, imaginea sursă și prelucrarea ei presupune o varietate de informație digitală, care este specificată și descrisă punctual în cadrul fiecărui set de experimente.

La nivelul 3, echipamentul de prelucrare cu laser a fost reglat și folosit cu precădere în aceeași parametri tehnologici, rezultați din studiile anterioare. Alte reglaje ale parametrilor tehnologici au fost dictate de schimbarea materialului suport și de problematica unor cercetări experimentale aprofundate. Se reamintește faptul că echipamentul de prelucrare cu laser recunoaște informația digitală și o prelucrează doar formatată pe 1 bit.

5.3.1.2. Aparatura folosită

Prelucrările s-au realizat folosindu-se echipamentul de prelucrare cu laser SLG-4030. Parametrii optimi de lucru ai echipamentului laser au fost stabiliți în capitolul referitor la studiul regimurilor de prelucrare, și au valorile prezentate în Tabelul 5.2.

Tabelul 5.2 Parametrii de lucru pentru experimente

Experiment	Puterea, P [W]	Poziționarea planului focal, ppf [mm]	Viteza, v [mm/s]	Pasul, p [mm]
5.3.2, 5.3.4, 5.3.5	0,5	73	400	0,0254
Pirogravarea unei grile de culori indexate	0,5	73	500	0,0254
5.3.6, 5.3.7, 5.3.8	7	73	400	0,0254

Pentru experimentele cu imagini realizate rezultatele au fost analizate vizual: fie prin control direct, fie cu ajutorul instrumentarului specific. Imaginile analizate au fost: test sau policrome. Datorită eterogenității experimentelor găsirea și implementarea unei proceduri de analiză unitară pentru toate experimentele este dificilă.

Aprecierea rezultatelor experimentelor s-a făcut prin utilizarea a trei sisteme tehnologice:

1. Control vizual direct;
2. Lupa pentru citit cu factor de mărire 2x;
3. Microscop optic.

Control vizual direct

Deși reprezintă o modalitate de lucru rudimentară, această analiză s-a folosit deoarece reprezintă un instrument de analiză la îndemâna oricui și impresia vizuală este cea care primează atunci când se analizează un obiect din punct de vedere artistic.

Lupa pentru citit

Acest instrument prezintă avantajul de a face observații suplimentare față de controlul vizual direct, dar nu atât de amănunțite ca în cazul microscopului optic. Factorul de mărire al acestui instrument este de 2x.

Imaginile rezultate prin pirogravare cu laser au fost analizate cu ajutorul lupei pentru citit (Figura 5.2), care se compune dintr-un suport care susține lupa. Piesa care urmează să fie analizată se poziționează manual astfel încât claritatea să fie optimă. Iluminarea piesei se face cu ajutorul unei surse de lumină poziționată în jurul lupei.



Figura 5.2 Analizarea cu ajutorul lupei pentru citit



Figura 5.3 Analizarea cu ajutorul microscopului electronic

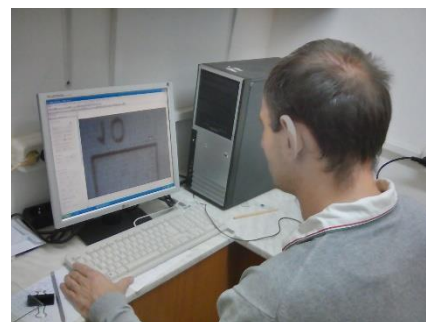


Figura 5.4 Capturarea imaginii analizate cu microscopul electronic

Microscopul optic

Microscopul optic reprezintă cea mai precisă metodă de observație folosită în această lucrare. Totuși din dorința de a analiza doar suprafața prelucrată, fără a se observa elemente microscopice, factorul de mărire a fost stabilit la 14x.

Imaginile rezultate prin pirogravare cu laser au fost analizate cu ajutorul Stereomicroscopului ID856 (Figura 5.3), care se compune dintr-un batiu solid, prevăzut cu mecanism de calare pentru aducerea în poziție orizontală. Pe batiu se așază piesa care urmează să fie analizată. Iluminarea piesei se face cu ajutorul a două spoturi luminoase poziționate deasupra piesei și care emit radiații concurente în punctul central de observare.

Analizarea se face prin așezarea piesei pe masa microscopului (Figura 5.3) și capturarea acesteia prin intermediul camerei digitale orientate identic cu obiectivul ocular al microscopului.

Capturarea imaginii s-a făcut cu ajutorul programului *Optika™ Vision Pro*. Acesta conține instrumente pentru analizarea imaginii și stocarea acesteia.

5.3.2. Experimente test pentru pirogravarea tonurilor de gri pe suport lemnos

În cadrul acestor experimente, nivelurile procesului de lucru conțin mai multe planuri experimentale. Aceste planuri experimentale se dezvoltă de asemenea ca trasee diferite care sunt evidențiate ca și conținut în schemele experimentale din Figura 5.6 Schema experimentală pentru pirogravarea tonurilor de gri *CMY* și Figura 5.20 Schema experimentală pentru pirogravarea tonurilor de gri Alb-Negru.

Pentru realizarea experimentelor s-a pornit de la o informație digitală generată ca scară de gri în aplicația *CorelDRAW®*. Această scară de gri poate fi obținută prin două metode:

1. Tonuri de gri ca scară de valori proporționale între Alb și Negru, variantă aplicată în cadrul planurilor experimentale indexate prin *K*;
2. Tonuri de gri ca scară de valori între alb și negru, generate de Cyan-Magenta-Galben (*CMY*) în proporții egale, variantă aplicată în cadrul planurilor experimentale indexate prin *CMY*;

Cele două tipuri de scale, sunt denumite în continuare imagini sursă și reprezintă conținutul nivelului 1. Din punct de vedere constructiv ele se prezintă sub forma unei trame, compusă din 101 suprafețe

pătrate aranjate pe rânduri și coloane. Fiecare suprafață a fost numerotată de la 0 la 100, fiecare număr reprezentând proporția de gri de la 0 la 100%.

În cadrul nivelului 2 informația grafică a fost convertită în următoarele moduri de reprezentare:

- *CMYK-32 biți;*
- *Paletted-8 biți;*
- *Grayscale-8 biți;*
- *Floyd-Steinberg-1 bit.*

În modul *CMYK* griurile inițiale sunt reprezentate pe o scală cu 101 valori. În modurile *Grayscale* și *Paletted* griurile inițiale sunt reprezentate pe o scală cu 256 valori. Modul de reprezentare *Floyd-Steinberg* a fost ales ca o echivalență a conversiei compusă din două valori pe 1 bit aplicată de echipamentul de pirogravat.

Pentru formatul de stocare au fost alese variantele **.bmp* și **.tif*, acestea fiind considerate formatele cele mai indicate într-o prelucrare grafică. Formatul **.bmp* este asemănător cu modul de lucru al echipamentului, Formatul **.tif* este formatul care conține cea mai multă informație grafică. Au fost excluse din studiu formate care comprimă imaginea în detrimentul calității acesteia (**.jpg* sau **.gmp*).

În cadrul transferului informației grafice către echipament s-au folosit trei variante și anume:

- Transfer direct;
- Transfer prin *Conversie mașină-1 bit;*
- Transfer prin conversie în aplicația *Corel Photo-Paint™*.

Rezultatele obținute în urma acestor seturi de experimente au fost analizate și interpretate prin control vizual direct, control instrumental și control microscopic.

În concluzie specia de paltin nu a dat rezultate satisfăcătoare pentru analiza imaginilor și s-a ales plopul și alte materiale pe bază de lemn pentru a efectua aceste analize experimentale. În continuare s-au efectuat experimente pe specia plop, dacă nu este specificat alt material. Caracteristicile, tehnologia de obținere și dimensiunile a epruvetelor sunt prezentate în Tabelul 5.4. Totuși, pentru compararea rezultatelor obținute în cadrul capitolelor anterioare, unele experimente s-au făcut comparativ și pe paltin de câmp.

Tabelul 5.4 Materialele utilizate pentru experimentele cu privire la transpunerea informației digitale prin pirogravare

Semifabricat: Furnir Specie lemnoasă: Plop (<i>Populus</i> <i>spp.</i>) Secțiune: Tangențială	Caracteristici	Culoare: duramen: gălbui-roșiatic la gălbui-brun; Alburn: mai deschis decât duramenul (Filipovici, 1964). Textura fină până la mijlocie și uniformă (Walters, 2005), fără desene (Cismaru & Cismaru, 2007). Una dintre cele mai populare specii lemnoase folosite pentru pirogravură. Dezvoltă tonuri închise la temperaturi joase (Irish, 2012).
	Pregătire	Derulare longitudinală; Uscare până la umiditatea de 12%; Formatare prin debitare plană cu ghilotina; Suprafața șlefuită manual cu hârtie abrazivă cu granulație 120.
	Experiment	Dimensiuni epruvete, [mm]



	<i>Pirogravarea tonurilor de gri</i>		185x100 (1 buc.)
	<i>Pirogravarea unei grile de culori indexate</i>		100x100 (2 buc.)
	<i>Pirogravarea imaginilor digitale policrome</i>		210x150 (2 buc.)
	<i>Definirea rezoluției optime în pirogravarea imaginilor digitale</i>		150x60x12
Semifabricat: Compozit pe bază de lemn	Caracteristici	Compoziție: 90% polivinil, 5% praf de lemn, 5% praf de cretă. Suprafețele sunt colorate uniform. Colorare în masă într-o gamă largă de culori.	
	Pregătire	Formatizare	
		Experiment	Dimensiuni epruvete, [mm]
	<i>Analizarea influenței materialului suport și a culorii acestuia</i>	150x60x12 – albastru 150x60x15 – gri 150x60x18 – alb 150x60x20 – verde	

5.3.2.3. Interpretarea rezultatelor experimentelor test 5.3.2

Datorită similitudinilor experimentelor 5.3.2, se pot face comparații între planurile experimentale grupate după cum urmează:

- CMY4 cu K1;
- CMY5 cu K2;
- CMY6 cu K3.

Comparație între planurile experimentale CMY4 și K1

- Mod identic de reprezentare a culorii – *Grayscale*;
- Sistem identic de stocare – pe 8 biți;
- Sistem identic de codificare – *.bmp;
- Metodă identică de conversie – *Conversie mașină-1 bit*;
- Modalități diferite de combinare:
 - CMY4 = Cyan + Magenta + Galben;
 - K1 = Negru.

În concluzie – modalitatea de compoziție cromatică prin combinarea culorilor pigment Cyan, Magenta și Galben influențează rezultatul pirogravat. Combinarea policromă este mai avantajoasă pentru eficiența pirogravării tonurilor de gri.

Comparație între planurile experimentale CMY5 și K2

- Mod identic de reprezentare a culorii – *Grayscale*;
- Sistem identic de stocare – pe 8 biți;
- Sistem identic de codificare – *.tif;
- Metodă identică de conversie – *Conversie mașină-1 bit*;
- Modalități diferite de combinare:
 - CMY5 = Cyan + Magenta + Galben;



- $K2 = \text{Negru}$.

Aceste planuri experimentale sunt cele mai eficiente dintre seriile de planuri din care fac parte. Cu ajutorul acestei comparații se poate determina cel mai eficient plan experimental dintre aceste teste.

Planul experimental *CMY5* prezintă un prag mai mic decât planul *K2*, diferența este mai mare prin control vizual și prin control instrumental, dar este 1% în cazul controlului microscopic.

Comparația dintre planurile experimentale *CMY2* și *K2* nu mai prezintă interes deoarece s-a stabilit că planul *CMY2* este asemănător ca rezultat cu *CMY5*, dar din punct de vedere tehnic este inefficient, acesta ocupând mai mult spațiu de stocare.

Comparație între planurile experimentale *CMY6* și *K3*

- Mod identic de reprezentare a culorii – *Grayscale*;
- Sistem identic de stocare – pe 8 biți;
- Sistem identic de codificare – **.tif*;
- Metodă identică de conversie – *Floyd-Steinberg-1 bit*;
- Modalități diferite de combinare:
 - $CMY6 = \text{Cyan} + \text{Magenta} + \text{Galben}$;
 - $K3 = \text{Negru}$.

Planul experimental *CMY6* prezintă un prag mai mic decât planul *K3*, diferența este mai mare prin control vizual și prin control instrumental, dar este 1% în cazul controlului microscopic.

Comparația dintre planurile experimentale *CMY2* și *K2* nu se mai face deoarece s-a stabilit că planul *CMY2* este asemănător ca rezultat cu *CMY5*, dar din punct de vedere tehnic este inefficient, acesta ocupând mai mult spațiu de stocare.

Din analiza valorilor măsurate în cadrul acestor experimente se observă următoarele aspecte:

Compararea mediilor aritmetice dintre planurile experimentale *K1-K3* și *CMY4-CMY6* centralizate în Tabelul 5.5 și Tabelul 5.6, respectiv 11 și 8,33, indică planurile *CMY* ca fiind soluțiile optime pentru pirogravarea tonurilor de gri. În Tabelul 5.20 sunt ilustrate planurile experimentale ideale pentru fiecare dintre cele 4 grupe de experimente;

- Pragurile planurilor experimentale *CMY* sunt mai coborâte decât în cazul celor *K* (5 față de 6);
- Nivelurile pragurilor de reproducere a valorilor tonale pe material sunt influențate de mai mulți factori dintre care: modul de reprezentare a culorii, sistemul de stocare, sistemul de codificare, metoda de conversie, modalitatea de combinare a culorilor;
- Rezultatul pirogravării unei imagini convertite față de o imagine fără conversie este un rezultat adecvat, prin faptul că se reproduc un număr mai mare de tonuri de gri;
- Conversia *Floyd-Steinberg-1 bit* nu se recomandă pentru suprafețe uniform colorate;
- Scala de gri generată în planurile experimentale 5.3.2.1 (*CMY*) redă tonurile mai închise față de scala de gri generată în planurile experimentale 5.3.2.2 (*K*).

5.3.3. Experimente test pentru pirogravarea unei grile de culori indexate, pe suport lemnos (ET5.3.3)

Acest set de experimente pornește de la generarea unei grile standard de culori (tonuri colorate) în care



sunt incluse tonurile de culoare fundamentale, secundare și un număr de tonuri indexate ca tonuri colorate.

Scopul acestui experiment este acela de a determina modul în care se pot pirograva anumite tonuri de culoare alese ca și culori standard. În acest sens sau ales următoarele grupe de culori:

- Culorile primare – roșu, galben și albastru;
- Culorile din domeniul tipografic – magenta și cyan;
- Culorile secundare – portocaliu, violet și verde;
- Culori terțiare (tonuri colorate) – turcoaz, violet roșcat, cărămiziu închis, verde gălbui, galben portocaliu, galben verzui și roz;
- Culori grizate (tonuri rupte) – gri-violet, gri-albăstrui, gri-ocru, gri-verzui și gri-marونی.

Această grupă de culori formează imaginea sursă. Ea este prezentată în Figura 5.27 și este compusă din 20 suprafețe pătrate care formează o grilă standard. Fiecare suprafață a fost umplută uniform cu câte o culoare diferită, fiind un model grafic procesat de calculator. Grila standard de culori ca imagine sursă a fost realizat folosind programul *CorelDRAW®*.

În Figura 5.28 este prezentată Schema experimentală pentru pirogravarea grilei de culori indexate. După cum se poate observa, planul experimental a fost structurat pe mai multe etape:

- Conceperea și realizarea desenului sursă în sistemul *CMYK-32 biți* cu ajutorul aplicației software *CorelDRAW®*;
- Salvarea desenului transformat în format **.tif*;
- Conversia imaginii color în imagine alb-negru pe 1 bit prin diferite metode predefinite de aplicația software *Corel® Photo Paint™*. În cadrul conversiei *Halftone black and white-1 bit* au fost folosite cele șase tipuri de rastru predefinite de program. Experimentele care folosesc conversia *Halftone black and white-1 bit* sunt prezentate ca experimente aprofundate în anexa tezei;
- Transferul imaginii sursă către mașina de pirogravat.



Figura 5.27 Imaginea sursă folosită la planul experimental *ET5.3.3*

Conversia imaginii color în imagine alb-negru pe 1 bit s-a făcut prin următoarele metode predefinite de aplicația software *Corel® Photo Paint™*:

- | | |
|-------------------------------------|-------------------------------|
| ■ <i>Line Art</i> , | ■ <i>Halftone Cross</i> , |
| ■ <i>Ordered</i> , | ■ <i>Halftone Square</i> , |
| ■ <i>Jarvis</i> , | ■ <i>Halftone Fixed 4x4</i> , |
| ■ <i>Stucki</i> , | ■ <i>Halftone Fixed 8x8</i> , |
| ■ <i>Cardinality-Distribution</i> , | ■ <i>Halftone Line</i> , |
| ■ <i>Floyd-Steinberg</i> , | ■ <i>Halftone Round</i> . |

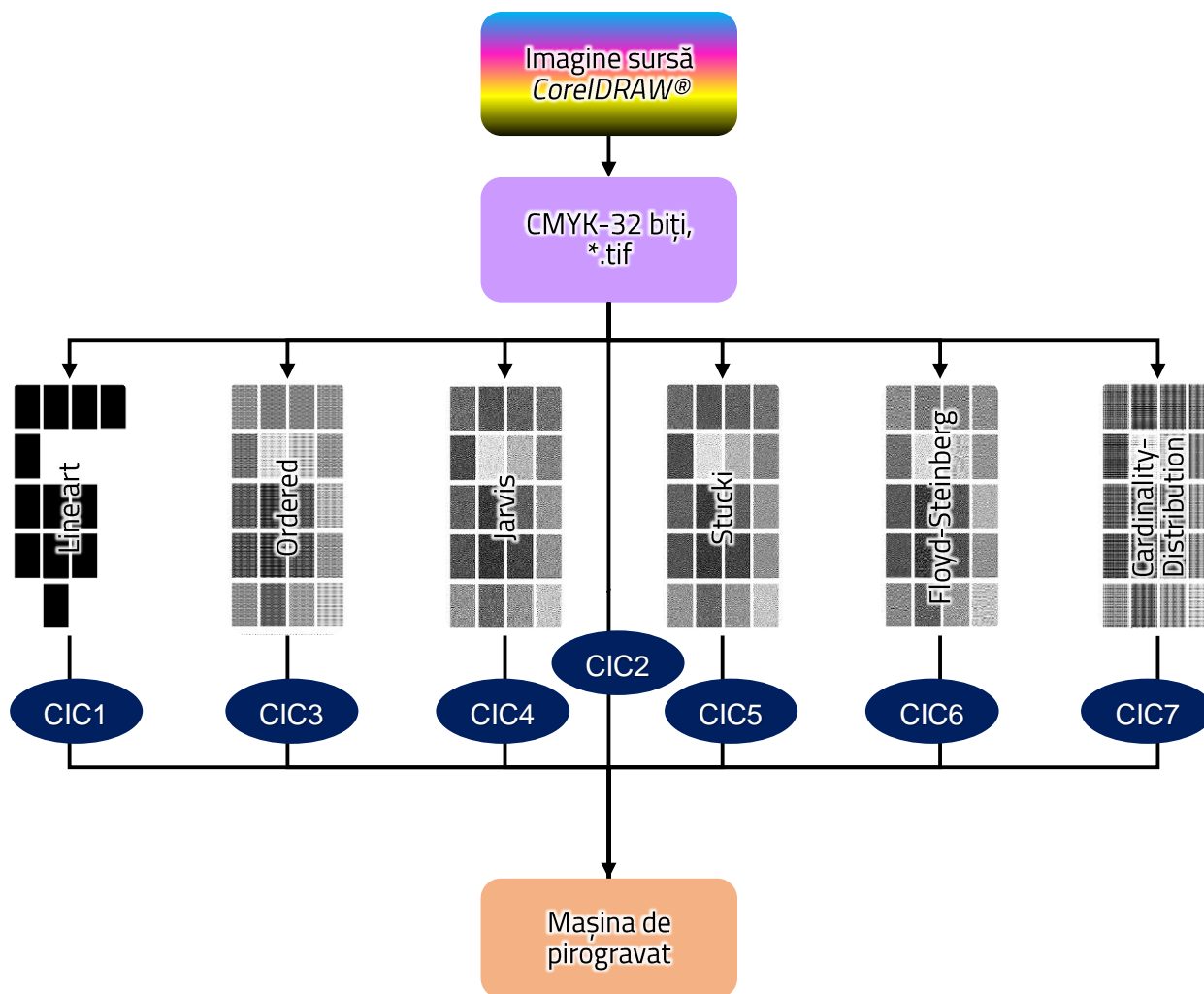


Figura 5.28 Schema experimentală pentru pirogravarea grilei de culori indexate

Fiecare imagine convertită în mod diferit a fost trimisă la mașina de pirogravat. La aceste metode s-a adăugat trimiterea directă la mașina de pirogravat.

Procesul de lucru din Figura 5.28 cuprinde trasee de desfășurare, care se pot identifica în schemă ca următoarele planuri experimentale:

- CIC1** Imaginea sursă salvată în format *.tif -> Convertită prin metoda *Line Art-1 bit* -> Trimisă la mașina de pirogravat;
- CIC2** Imaginea sursă salvată în format *.tif -> Trimisă la mașina de pirogravat;
- CIC3** Imaginea sursă salvată în format *.tif -> Convertită prin metoda *Ordered-1 bit* -> Trimisă la mașina de pirogravat;
- CIC4** Imaginea sursă salvată în format *.tif -> Convertită prin metoda *Jarvis-1 bit* -> Trimisă la mașina de pirogravat;
- CIC5** Imaginea sursă salvată în format *.tif -> Convertită prin metoda *Stucki-1 bit* -> Trimisă la mașina de pirogravat;
- CIC6** Imaginea sursă salvată în format *.tif -> Convertită prin metoda *Floyd-Steinberg-1 bit* -> Trimisă la mașina de pirogravat;
- CIC7** Imaginea sursă salvată în format *.tif -> Convertită prin metoda *Cardinality-Distribution-1 bit* -> Trimisă la mașina de pirogravat.



Suprafețele gravate au fost scanate cu scannerul *HP LaserJet 3055 all-in-one* cu o rezoluție de 600 DPI în format *Bitmap*. Culoarea a fost măsurată utilizând metoda generală de măsurare. Parametrii utilizați pentru acest studiu au fost:

- Mod color;
- Scala de scanare 1:1.

Pentru a analiza toate imaginile, fișierele cu imaginile scanate au fost transferate pe un computer.

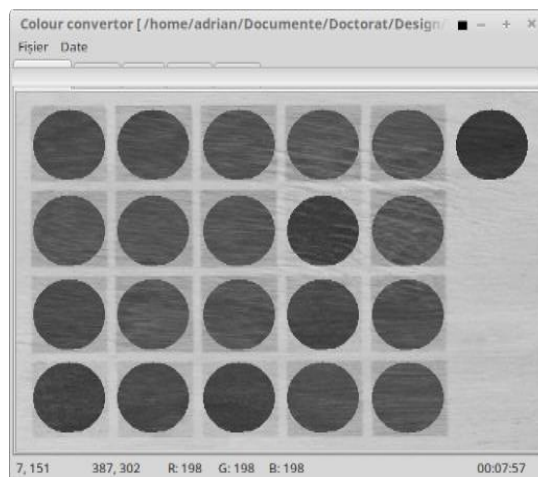


Figura 5.29 Șablonul cu punctele de măsurare pentru ET2

Înainte de a încărca software-ul de măsurare, toate imaginile au fost redimensionate pentru a avea aceleași dimensiuni. Pentru a reduce diferențele dintre imaginile de referință și imaginile pirogravate, toate imaginile au fost convertite în nuanțe *Grayscale*.

În interiorul fiecărui pătrat plin, culoarea a fost măsurată pe o suprafață circulară cu diametrul de 70 pixeli. Au rezultat 3905 pixeli pentru fiecare pătrat și 78100 pixeli măsurați pentru fiecare imagine. Pentru a simplifica toate măsurătorile, s-a făcut un șablon electronic utilizând toți pixelii de măsurare. Fiecare imagine, originală și pirogravată, a fost măsurată utilizând acest șablon (Figura 5.29). Valorile măsurate au fost salvate și exportate în vederea prelucrării lor ulterioare. Pentru fiecare suprafață rotundă măsurată, s-a calculat valoarea medie. Valoarea medie pentru fiecare suprafață rotundă măsurată din imaginea pirogravată a fost comparată cu valoarea corespunzătoare din imaginea de referință. Valoarea cea mai apropiată de valoarea de referință este considerată valoarea optimă. Următorul pas l-a constituit numărarea metodelor de conversie care au fost cele mai apropiate de valoarea de referință. Metoda de conversie care a apărut cel mai adesea la cea mai apropiată valoare a fost considerată cea mai bună. În Figura 5.29 suprafețele măsurate apar sub formă de disc și sunt redatate prin complementarea culorii indexate.

Metodologia constă în teste care utilizează aceeași imagine convertită în mai multe imagini alb-negru, utilizând aplicația software *Corel® Photo Paint™* și păstrând aceiași parametri de lucru.

5.3.3.1. Analiza experimentelor 5.3.3

Din analiza de culoare tricromatică s-a observat că, în sistemul $CIE L^*a^*b^*$ componenta L^* a avut cea mai mare influență asupra culorii. Celelalte două componente, a^* și b^* , au o magnitudine mult mai mică (Tabelul 5.7). Prin urmare, se poate concluziona că analiza simplificată a diferențelor de nuanțe de culoare poate să ia în considerare doar factorul L^* . La prima vedere, s-ar putea crede că această diferență se datorează faptului că imaginile sunt de dimensiuni gri, dar aceleași diferențe în ceea ce privește dimensiunea, au fost înregistrate în cazul măsurătorilor pe imagini colorate. Diferențele de culoare au fost calculate utilizând procedeul de calcul prevăzut în STAS (STAS6880/3-88, 1988).

Din datele prezentate în Tabelul 5.7, metoda de conversie care se potrivește cel mai bine cu culorile este *Halftone Line*, aceasta este prezentată în anexa tezei împreună cu celelalte metode de conversie aprofundate. Această metodă a reprodus cel mai bine tonurile de culoare ale imaginii originale. În



aceiași tabel se observă că metoda de conversie directă care redă cel mai fidel imaginea sursă este metoda *Halftone Square*.

Tabelul 5.7 Valori tricromatice medii exprimate în sistemul CIE L*a*b* pentru toate culorile în diferite metode de conversie

Metoda de conversie	L* mediu	a* mediu	b* mediu	ΔE_{ab}^*	Clasament
Imagine sursă	52,273	-0,00300	0,0060		
<i>Halftone Line</i>	63,992	-0,00376	0,0072	11,719	1
<i>Halftone Fixed4x4</i>	68,464	-0,00398	0,0076	16,191	5
<i>Halftone Fixed8x8</i>	70,074	-0,00393	0,0077	17,801	8
<i>Cardinality-Distribution</i>	70,470	-0,00400	0,0078	18,197	9
<i>Floyd-Steinberg</i>	70,837	-0,00399	0,0078	18,563	10
<i>Stucki</i>	69,519	-0,00397	0,0077	17,246	7
<i>Halftone Round</i>	67,939	-0,00397	0,0075	15,666	3
<i>Halftone Cross</i>	66,576	-0,00393	0,0062	14,303	2
<i>Jarvis</i>	68,224	-0,00398	0,0076	15,951	4
<i>Ordered</i>	68,757	-0,00397	0,0076	16,484	6
<i>Halftone Square</i>	70,939	-0,00400	0,0078	18,666	11

Eficiența fiecărei conversii a fost apreciată prin mărimea intervalului dintre L* maximă obținută și cea minimă. Datele sunt prezentate în Tabelul 5.8. Aici se poate observa că cea mai eficientă metodă de conversie este *Halftone Square* urmată la o diferență mică de *Halftone Line*.

Tabelul 5.8 L* [uCIE] obținute prin pirogravare pe lemn de plop, pentru culori diferite folosindu-se mai multe conversii

PE	CIC1	CIC2	CIC3	CIC4	CIC5	CIC6	CIC7.1	CIC7.2	CIC7.3	CIC7.4	CIC7.5	CIC7.6	
Cul. / Conv.	Line art-Direct	Line art-PhotoPaint	Halftone-Square	Halftone-Round	Halftone-Line	Halftone-Cross	Halftone-Fixed4x4	Halftone-Fixed8x8	Ordered	Jarvis	Stucki	Floyd-Steinberg	Cardinality-Distribution
1	81,03	80,20	81,20	80,38	79,41	80,82	78,94	81,03	82,25	80,45	78,02	79,73	80,54
2	82,61	68,53	70,82	69,33	62,96	65,93	65,66	70,05	71,49	69,93	69,92	71,90	68,62
3	78,31	68,83	68,69	68,51	63,72	67,27	67,58	69,23	69,63	67,63	68,76	70,93	68,27
4	68,25	66,67	69,35	68,28	64,68	66,47	65,80	69,12	70,08	67,55	67,50	68,89	69,40
5	67,43	65,96	69,48	67,28	65,59	67,48	68,68	71,02	70,23	67,46	67,30	67,18	69,66
6	68,31	64,99	69,41	68,31	66,08	68,46	69,12	72,50	71,27	67,85	67,93	68,86	71,34
7	82,25	64,10	69,02	66,79	62,29	66,38	67,72	67,07	67,79	68,27	71,08	68,34	69,46
8	62,65	63,29	70,32	66,17	63,83	64,31	66,78	66,67	67,42	67,70	69,95	68,72	68,70
9	67,05	81,73	70,05	66,11	64,10	63,43	66,61	67,32	66,83	65,68	68,61	68,80	67,96
10	78,99	67,59	78,19	76,14	73,38	74,47	75,32	77,13	73,54	74,97	76,65	76,43	75,02
11	63,34	80,79	70,68	67,79	64,94	67,82	68,69	70,77	67,31	64,96	68,23	67,48	72,65
12	80,08	65,44	72,14	68,07	61,30	65,15	66,57	66,96	68,44	68,04	71,19	72,29	70,31
13	81,12	66,27	69,69	66,64	62,07	63,78	65,81	66,45	66,11	65,02	69,63	68,05	68,39
14	65,67	80,91	71,31	67,46	63,16	64,87	67,68	66,61	66,10	67,47	67,84	69,28	69,96



PE	CIC1		CIC2	CIC3	CIC4	CIC5	CIC6	CIC7.1	CIC7.2	CIC7.3	CIC7.4	CIC7.5	CIC7.6
Cul. / Conv.	Line art-Direct	Line art-PhotoPaint	Halftone-Square	Halftone-Round	Halftone-Line	Halftone-Cross	Halftone-Fixed4x4	Halftone-Fixed8x8	Ordered	Jarvis	Stucki	Floyd-Steinberg	Cardinality-Distribution
15	79,11	65,19	74,52	70,33	67,90	70,20	71,69	73,32	68,85	71,58	70,25	73,88	71,18
16	64,41	78,68	69,70	66,63	64,69	68,35	69,49	71,41	66,80	68,21	66,37	70,74	69,15
17	79,87	79,49	74,27	69,48	60,57	63,31	68,58	69,96	68,93	71,22	74,06	75,32	73,45
18	80,51	79,51	69,70	65,83	59,03	65,21	69,10	70,82	68,17	67,22	69,71	72,99	71,68
19	67,96	80,50	64,21	66,21	61,68	65,86	71,03	72,45	67,88	67,06	68,61	75,17	73,50
20	65,60	78,29	60,17	65,46	63,87	66,20	68,93	72,54	69,51	68,45	67,26	70,66	70,22
Int	19,96	18,44	21,03	14,92	20,38	17,51	13,28	14,58	16,15	15,49	11,65	12,55	12,58
	Valorile marcate reprezintă suprafețe neprelucrate; culorile nu au fost reproduse prin pirogravare.												
Int	Reprezintă mărimea intervalului de variație a L^* calculat ca diferență dintre L^* cea mai mare și cea mai mică, pentru fiecare metodă de conversie.												

5.3.4. Experimente pentru pirogravarea imaginilor digitale policrome

Acest set de experimente pornește de la o imagine capturată cu un aparat de fotografiat digital care conține mai multe tonuri colorate.

Scopul acestui experiment este acela de a determina modul în care se pot pirograva tonurile de culoare și modalitatea de reproducere a diferențelor tonale.

Metoda de lucru constă în parcurgerea unor etape, pornind de la o imagine sursă care este convertită sau nu și transmisă echipamentului de pirogravat.

În Figura 5.35 este prezentată Imaginea sursă pentru pirogravarea imaginilor digitale policrome După cum se poate observa, planul experimental a fost structurat pe mai multe etape:

- Alegerea și capturarea imaginii sursă cu ajutorul unui aparat de fotografiat digital;
- Procesarea imaginii digitale sursă prin conversia acesteia;
- Transferul imaginii sursă către mașina de pirogravat;
- Analizarea pirogravurii rezultate.



Figura 5.35 Imaginea sursă pentru pirogravarea imaginilor digitale policrome

Imaginea digitală aleasă ca imagine sursă, trebuie să îndeplinească următoarele proprietăți:

- Să fie cât mai clară și cu tonuri contrastante;
- Să fie cât mai bogată în informație digitală (număr de pixeli cât mai mare);
- Culorile să fie bine delimitate din punct de vedere al caracteristicilor principale (ton (hue),



saturație, luminozitate).

Imaginea sursă pentru pirogravarea imaginilor digitale policrome, prezentată în Figura 5.35, a fost convertită cu ajutorul programului Photo Paint™ în următoarele moduri de conversie:

- *Line art-1 bit;*
- *Grayscale-16 biți;*
- *RGB-24 biți (imaginea originală);*
- *RGB-48 biți;*
- *CMYK-32 biți;*
- *Lab color-24 biți;*
- *Halftone color-24 biți.*

Metodele de conversie au fost selectate după următoarele criterii:

- Imaginea convertită să fie cât mai aproape de imaginea sursă;
- Conversiile să fie cât mai apropiate de imaginile care folosesc culorile pigment;
- Natura conversiilor să cuprindă o arie cât mai largă a acestora.

Fiecare imagine convertită în mod diferit a fost trimisă la mașina de pirogravat.

Evaluarea imaginilor pirogravate a fost apreciată prin:

- Observație directă. Diferențele dintre tonurile de culoare fiind considerate cele percepute de către ochiul uman;
- Măsurători pe aceleași 3 suprafețe, definite în imaginea sursă și imaginea pirogravată, a tonurilor de culoare existente / cele redată prin pirogravură.



Figura 5.36 Suprafețele alese pentru analizare

Suprafețele analizate sunt prezentate în Figura 5.36. Criteriile care au stat la alegerea acestor suprafețe sunt:

1. O zonă compusă din cât mai multe tonuri colorate. Caracterizarea acestei suprafețe a constituit-o compoziția cromatică din cât mai multe culori primare și secundare. Scopul acestui test fiind acela de a stabili o proporție între tonurile de culoare redată prin pirogravare (cele arse, respectiv închise la culoare) și tonurile de culoare neredate prin pirogravare (cele nearse, respectiv deschise la culoare și care păstrează culoarea naturală a lemnului).
2. O zonă compusă din tonuri închise. Aceste tonuri închise sunt cele redată prin pirogravare. Scopul acestui test este acela de a investiga diferențele dintre tonurile închise din imagine și cele rezultate prin pirogravare.
3. O zonă compusă din două culori: una primară (galben) și una secundară (verde), între acestea existând o zonă de trecere numită degrade de culoare. Scopul acestui test este acela de a analiza modul în care este reprodusă trecerea de la o culoare la alta prin pirogravare.

Culegerea informațiilor de pe suprafețele selectate s-a făcut prin metoda de analiză a imaginii propusă în lucrarea de față și prezentată la măsurarea culorii. Suprafețe analizate sunt circulare cu diametre diferite. Mărimile suprafețelor au fost alese în funcție de suprafețe analizate astfel:

1. Pentru zona cu tonuri colorate, diametrul este de 200 pixeli, iar în urma operației de eliminare



- a pixelilor incompleți de pe circumferință au rezultat 31593 pixeli de analizat;
2. Pentru zona cu tonuri închise, diametrul este de 125 pixeli, iar în urma operației de eliminare a pixelilor incompleți de pe circumferință au rezultat 12197 pixeli de analizat;
 3. Pentru zona cu tonuri între verde și galben, diametrul este de 175 pixeli, iar în urma operației de eliminare a pixelilor incompleți de pe circumferință au rezultat 24485 pixeli de analizat.

Măsurătorile au fost făcute atât pe imaginea sursă cât și pe imaginea convertită în alb și negru prin metoda line art. Această din urmă metodă a fost aleasă deoarece a prezentat cel mai înalt grad de fidelitate dintre toate metodele analizate în urma experimentelor test precedente. Analizarea imaginilor pirogravate a fost exclusă din studiu deoarece introduce o serie de factori perturbatori cum sunt: culoarea inițială a lemnului și factori care țin de capturarea imaginii.

Valorile măsurate au fost analizate prin:

- Sortarea pixelilor în funcție de culoare astfel încât pixelii să fie grupați pe culori;
- Contorizarea pixelilor de culori diferite. Astfel a fost determinat numărul de culori de pe fiecare suprafață. Un interes deosebit pentru acest studiu l-a reprezentat numărul de culori al imaginii sursă, imaginea convertită prezentând, prin definiție doar două tonuri: alb și negru;
- Compararea fiecărui pixel din imaginea convertită cu pixelul omolog din imaginea sursă;
- Raportând numărul de pixeli albi și negri de pe imaginea convertită la numărul total de culori de pe imaginea sursă, s-au determinat proporțiile de înnegrire ale suprafețelor.

Rezultatele au fost analizate și interpretate atât pe modele cromatice din care sunt compuse planurile experimentale, cât și pe suprafețe test.

5.3.4.1. Imagine policromă fără conversie în Line art / Grayscale

În Figura 5.37 este prezentată Schema experimentală pentru pirogravarea unor imagini policrome neconvertite După cum se poate observa, planul experimental a fost structurat pe trei niveluri:

1. Alegerea imaginii sursă;
2. Conversia imaginii sursă în diferite formate de reprezentare;
3. Transferul imaginii sursă către mașina de pirogravat, fără nicio altă prelucrare.

Metodele de conversie reprezintă toate metodele de conversie alb-negru pe 1 bit predefinite de aplicația software *Corel® Photo Paint™*.

Imaginea sursă folosită pentru experimente, prezentată în Figura 5.35, a fost convertită (acolo unde a fost cazul) cu ajutorul programului *Photo Paint™* în următoarele moduri de conversie:

- *RGB-24 biți* – fără conversie;
- *RGB-48 biți*;
- *CMYK-32 biți*;
- *Lab color-24 biți*;
- *Halftone color-24 biți*.

Procesul de lucru din Figura 5.37 cuprinde trasee de desfășurare, care se pot identifica în schemă ca următoarele planuri experimentale:



- IPN1** Imaginea sursă *RGB-24 biți* -> Trimisă la mașina de pirogravat;
- IPN2** Imaginea sursă *RGB-24 biți* -> Convertită *RGB-48 biți* -> Trimisă la mașina de pirogravat;
- IPN3** Imaginea sursă *RGB-24 biți* -> Convertită *Halftone color-24 biți* -> Trimisă la mașina de pirogravat;
- IPN4** Imaginea sursă *RGB-24 biți* -> Convertită *CMYK-32 biți* -> Trimisă la mașina de pirogravat;
- IPN5** Imaginea sursă *RGB-24 biți* -> Convertită *Lab color-24 biți* -> Trimisă la mașina de pirogravat.

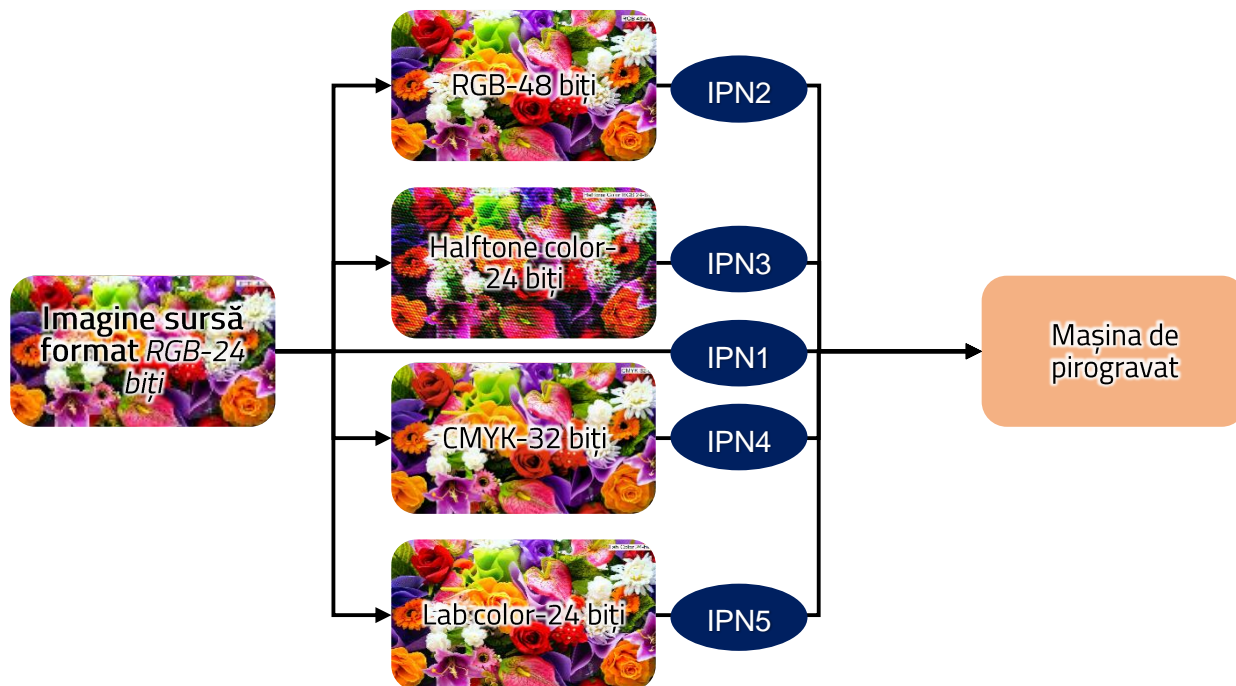


Figura 5.37 Schema experimentală pentru pirogravarea unor imagini policrome neconvertite

Analiza experimentelor 5.3.4.1

Albul și unele tonuri apropiate de acesta sunt tonuri care apar în imaginile pirogravate ca insule pe suprafață în culoarea materialului suport. Toate celelalte tonuri de culori indiferent de caracter și saturație nu mai sunt redată distinct ca valori perceptibile, ele sunt redată ca o suprafață (pattern) uniformă printr-o singură valoare tonală. Diferențele dintre imaginile pirogravate conform planurilor experimentale *IPN1-5* sunt de 4% și nu pot fi luate în considerare ca elemente de influență majoră.

Variația reproducerii tonurilor pentru valorile policrome aparținând planurilor experimentale *IPN1-5* este prezentată în Figura 5.41.

Din datele prezentate în Figura 5.41 se observă următoarele:

- Tonurile policrome redată printr-o singură valoare (negru) considerate ca valori pirogravate în experimentele *IPN1-5*, se înscriu în următoarele proporții: de la 94,53% pentru modelul *Halftone color-24 biți*, la 90,91% pentru modelul *Lab color-24 biți*. Se observă că diferența dintre modelul cromatic *Halftone color-24 biți* și *Lab color-24 biți* este de 3,83%. Această valoare este sub pragul de 5%, considerat ca prag minim de interpretare;
- Tonurile policrome care sunt redată printr-o singură valoare (alb) considerate ca valori care nu sunt pirogravate în experimentele *IPN1-5*, se înscriu în următoarele proporții: de la 9,09%



pentru modelul *Lab color-24 biți*, la 5,47% pentru modelul *Halftone color-24 biți*. Se observă că diferența dintre cele două modele cromatice este de 3,62%. Această valoare este sub pragul de 5%, considerat ca prag minim de interpretare. Dacă raportarea se face doar la intervalul valori tonalei albe, se observă că aceasta are o variație de 39,82%;

- Diferența dintre tonurile nereproduse și cele reproduse, prezentată în toate modelele cromatice analizate, se poate interpreta astfel:
 - Proportia cea mai echilibrată dintre tonurile nereproduse și cele reproduse este dată de modelul *Lab color-24 biți*.
 - Proportia cea mai mare dintre tonurile nereproduse și cele reproduse este dată de modelul *Halftone color-24 biți*. Din acest motiv imaginea de ansamblu este sub-expusă (asemenea fotografiei).
 - Diferența dintre modelele *Lab color-24 biți* și *Halftone color-24 biți*, respectiv cel cu ecartul mai mare dintre cele două tonuri și cel cu ecartul mai mic, este de sub 10% raportat la numărul total de valori tonale;
- Este de remarcat faptul că modelele cromatice extreme, respectiv cel cu cele mai multe și cel cu cele mai puține valori tonale sunt ambele în format pe 24 de biți. Diferența dintre numărul maxim și minim de valori tonale obținute în această zonă pe modelele cromatice studiate este de 36%.

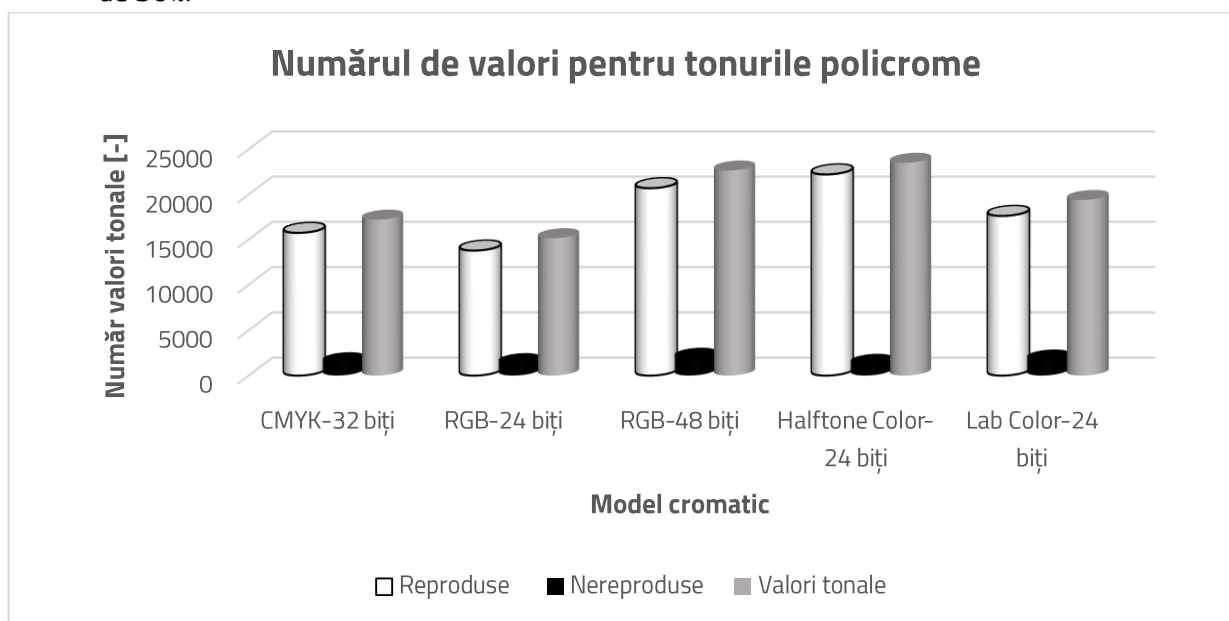


Figura 5.41 Variația reproducerii tonurilor pentru valorile policrome aparținând planurilor experimentale *IPN1-5*

5.3.4.2. Imagine policromă convertită în Line art / Grayscale

În Figura 5.45 este prezentată Schema experimentală pentru pirogravarea unei imagini policrome convertite Line art / Grayscale. După cum se poate observa, planul experimental a fost structurat pe trei niveluri:

1. Alegerea imaginii sursă;
2. Conversia imaginii sursă în diferite formate de reprezentare monocrome;
3. Conversia imaginii Grayscale în format alb-negru prin *Conversie mașină-1 bit*;



4. Transferul imaginii sursă către mașina de pirogravat.

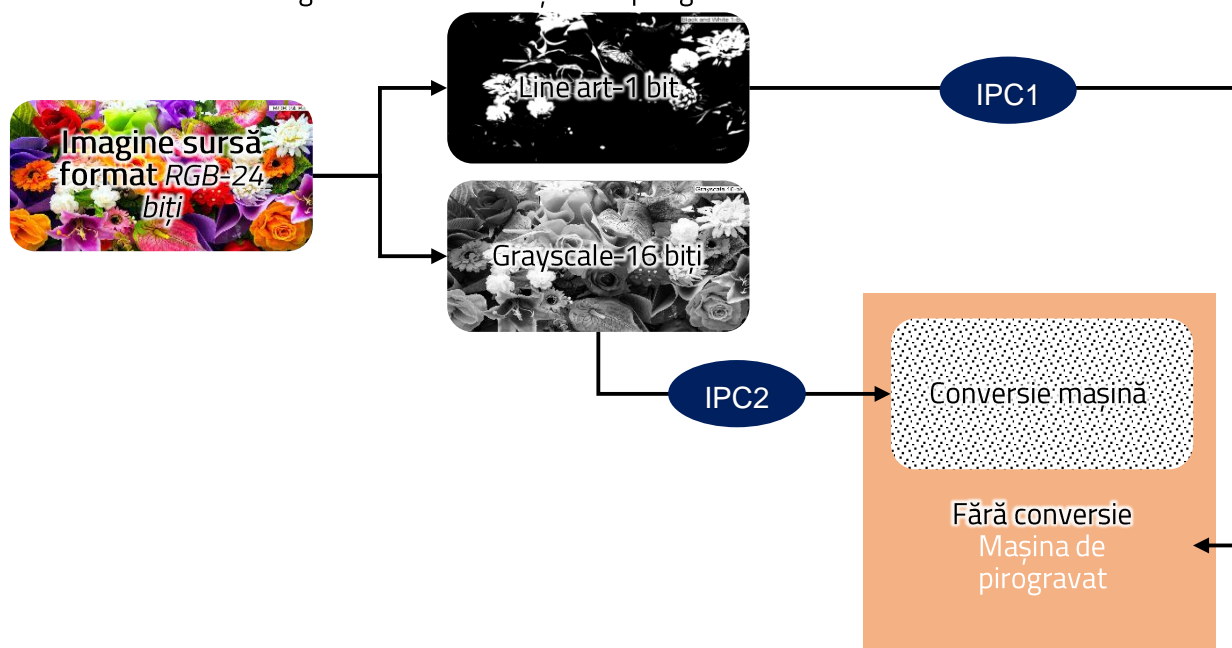


Figura 5.45 Schema experimentală pentru pirogravarea unei imagini policrome convertite *Line art / Grayscale*

Imaginea sursă folosită pentru experimente, prezentată în Figura 5.35, a fost convertită cu ajutorul programului Photo Paint™ în următoarele moduri de conversie:

- *Line art-1 bit;*
- *Grayscale-16 biți.*

Procesul de lucru din Figura 5.45 cuprinde traseele de desfășurare, care se pot identifica în schemă ca planuri experimentale:

- IPC1** Imaginea sursă *RGB-24 biți* -> Convertită *Line Art-1 bit* -> Trimisă la mașina de pirogravat;
- IPC2** Imaginea sursă *RGB-24 biți* -> Convertită *Grayscale-16 biți* -> Trimisă la mașina de pirogravat prin *Conversie mașină-1 bit*.

Analiza experimentelor 5.3.4.2

Diferența dintre planurile experimentale convertite și cele neconvertite constă în faptul că cele convertite în monocromie conțin un număr mai mic de valori tonale. Acest lucru prezintă o serie de avantaje, dar și dezavantaje. Dintre avantaje se remarcă: reprezentarea imaginii pe ecran sau pe hârtie este mai apropiată de imaginea pirogravată; ocupă spațiu mai redus de stocare. Dintre dezavantaje se remarcă: pierderea unor informații despre culoare care influențează reproducerea imaginii prin pirogravare; după cum s-a prezentat deja în această lucrare, prin conversia imaginilor digitale în imagini monocrome valorile tonale deschise sunt reprezentate prin alb sau amestec de alb și negru în care predomină albul, iar valorile tonale închise sunt reprezentate prin negru sau amestec de alb și negru în care predomină negrul; în timp ce prin reproducerea valorilor tonale prin pirogravare se observă că algoritmul este diferit de cel prezentat anterior. Astfel se explică rezultatele diferite obținute prin conversii diferite.



5.3.5. Experimente aprofundate pentru pirogravarea imaginilor policrome cu referire la E5.3.4. (IPN5)

În urma rezultatelor experimentelor precedente s-a hotărât aplicarea unor conversii asupra imaginii sursă. Procesul acestui experiment este structurat și dezvoltat schematic în Figura 5.49. Aici se poate observa că această structurare presupune mai multe etape, după cum urmează:

- Alegerea imaginii sursă;
- Conversia imaginii inițiale în imagine digitală *Lab color-24 biți* sau direct *Grayscale-8 biți*;
- Conversia imaginii *Lab color-24 biți* în imagine *Grayscale-8 și 16 biți*;
- Conversia fiecărei imagini *Grayscale* în imagine alb-negru-1 bit prin metodele de conversie: mașină, *Floyd-Steinberg* sau *Bitmap*;
- Trimiterea imaginilor alb-negru convertite pe 1 bit la mașina de pirogravat.

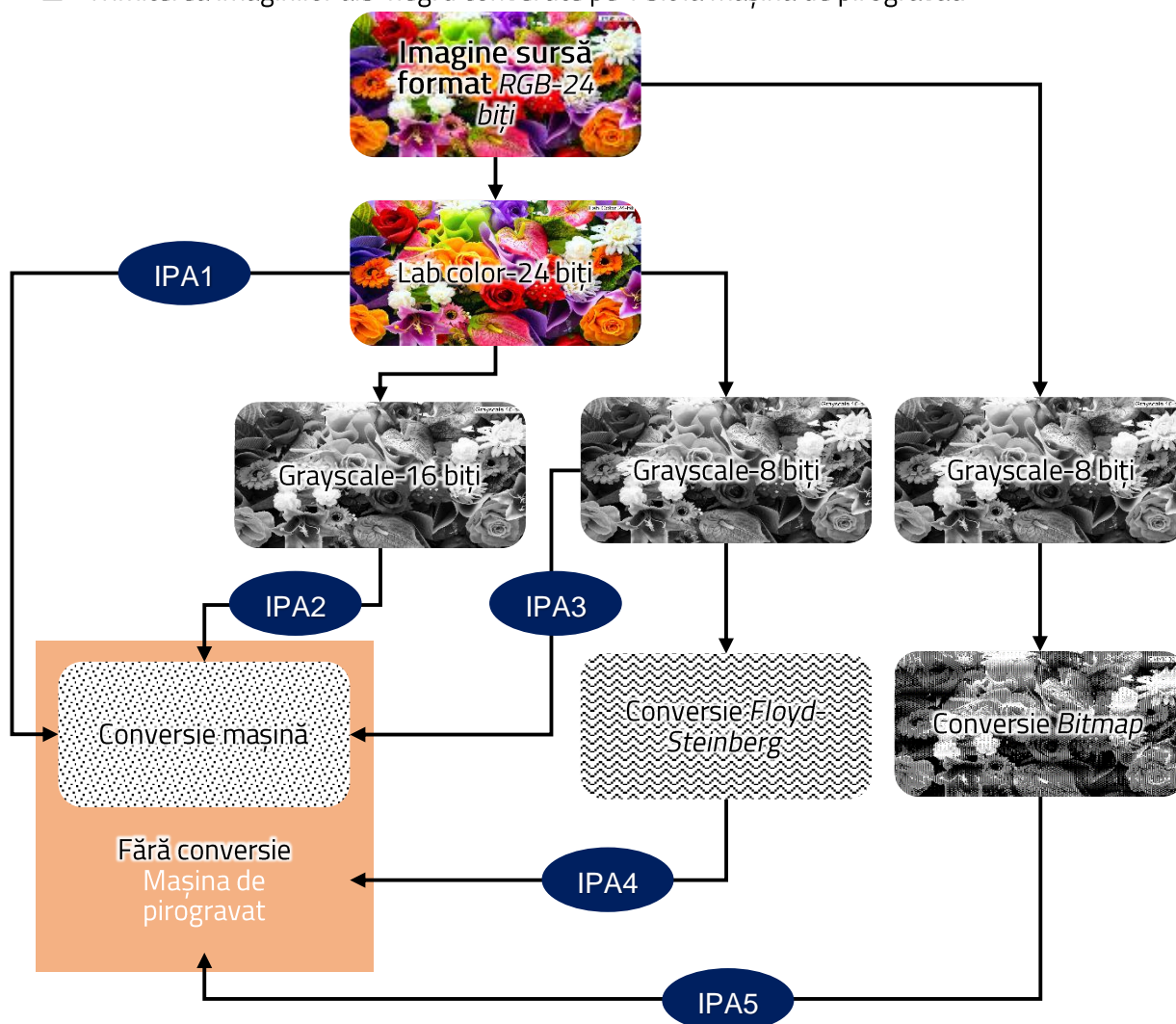


Figura 5.49 Schema experimentală pe etape

Imaginea sursă, folosită pentru experimente, a fost obținută prin conversia imaginii originale *RGB-24 biți* (Figura 5.35) în imagine *Lab color-24 biți*, cu ajutorul programului Photo Paint™.

Procesul de lucru din Figura 5.49 cuprinde trasee de desfășurare, care se pot identifica în schemă ca următoarele planuri experimentale:

- IPA1** Imaginea convertită *Lab color-24 biți* -> Trimisă la mașina de pirogravat prin



Conversie mașină-1 bit;

IPA2 Imaginea convertită *Lab color-24 biți* -> Convertită *Grayscale-16 biți* -> Trimisă la mașina de pirogravat prin *Conversie mașină-1 bit*;

IPA3 Imaginea convertită *Lab color-24 biți* -> Convertită *Grayscale-8 biți* -> Trimisă la mașina de pirogravat prin *Conversie mașină-1 bit*;

IPA4 Imaginea convertită *Lab color-24 biți* -> Convertită *Grayscale-8 biți* -> convertită în imagine alb-negru prin metoda *Floyd-Steinberg-1 bit*;

IPA5 Imaginea convertită *Grayscale-8 biți* -> Convertită alb-negru prin metoda *Bitmap-1 bit*. Având în vedere rezultatele obținute anterior în cadrul experimentelor test, se presupune că imaginea rezultată folosind acest plan experimental este cea care se apropie cel mai mult de varianta optimă.

Aceste planuri experimentale au fost trimise la mașina de pirogravat.

Ca exemplificare a acestor planuri experimentale în continuare este prezentat planul experimental **IPA5**, acesta fiind considerat ca având rezultatele cele mai bune, celelalte planuri fiind prezentate în Anexa 3.

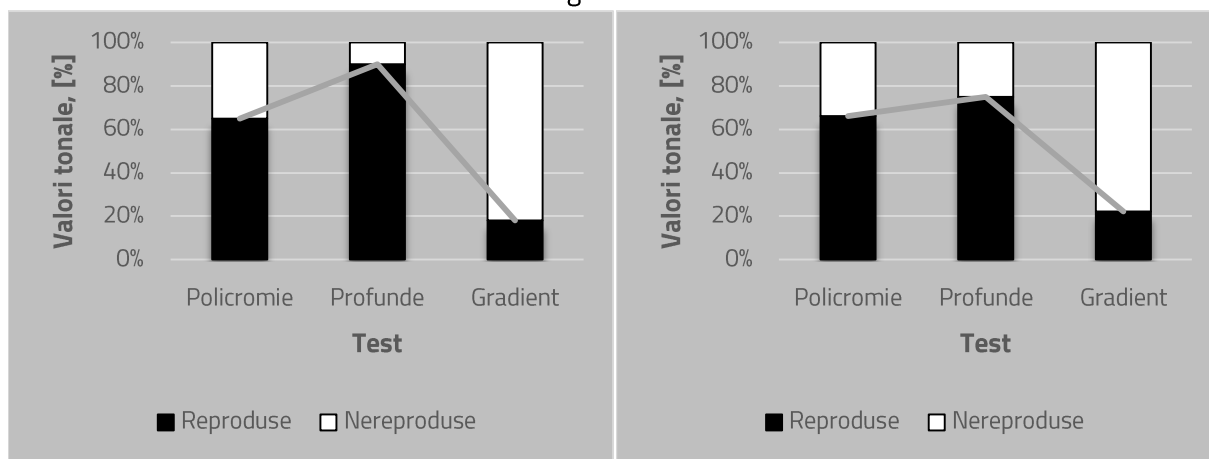
Plan experimental IPA5 - Imaginea convertită în imagine Grayscale pe 8 biți și apoi transformată în imagine în alb-negru prin metoda Bitmap-1 bit

Imaginea a fost obținută în urma conversiilor: 1. Din <i>RGB-24 biți</i> în <i>Grayscale-8 biți</i> ; 2. Din <i>Grayscale-8 biți</i> în <i>Bitmap-1 bit</i> , rastru <i>Halftone screen</i> , formă rotundă.		
<p>a.</p>	<p>a.</p>	<p>a.</p>
<p>b.</p>	<p>b.</p>	<p>b.</p>
<p>Figura 5.50 Imaginea în format <i>Bitmap-1 bit</i>, convertită din <i>Grayscale-8 biți</i>; a. – ansamblu; b. – detaliu la scara 300:1.</p>	<p>Figura 5.51 Pirogravura imaginii <i>Bitmap-1 bit</i>, convertită din <i>Grayscale-8 biți</i>, pe paltin: a. – ansamblu; b. – detaliu la scara 300:1.</p>	<p>Figura 5.52 Pirogravura imaginii <i>Bitmap-1 bit</i>, convertită din <i>Grayscale-8 biți</i>, pe plop: a. – ansamblu; b. – detaliu la scara 300:1.</p>
Numărul de valori tonale obținut, pentru imaginea în format <i>Bitmap-1 bit</i> , pentru cele 3 zone analizate, este prezentat în Tabelul 5.14.		

**Tabelul 5.14 Numărul de valori tonale obținut, pentru imaginea în format Bitmap–1 bit, pe lemn de plop**

Test	Nr. valori tonale	Reproduse		Reproduse, [%]		Nereproduse		Nereproduse, [%]	
		Plop	Paltin	Plop	Paltin	Plop	Paltin	Plop	Paltin
Policromie	17192	11363	11167	66,09	64,95	5829	6025	33,91	35,05
Profunde	2365	1775	2131	75,05	90,11	590	234	24,95	9,89
Gradient	3935	869	712	22,08	18,09	3066	3223	77,92	81,91

Variația reproducerii valorilor tonale pentru imaginea în format Bitmap–1 bit este prezentată în Figura 5.53.



a.

b.

Figura 5.53 Variația reproducerii valorilor tonale pentru imaginea în format Bitmap–1 bit:

a. – paltin de câmp; b. – plop.

Din datele prezentate în Tabelul 5.14 și în Figura 5.53 se observă următoarele:

Tonuri policrome	Echilibru între proporțiile celor reproduse și a celor nereproduse	Proporția cea mai echilibrată dintre tonurile nereproduse și cele reproduse
Tonuri profunde	Reproduse în proporție destul de mare, dar grupate sub forma unei pete uniforme, cu distincție foarte mică între valori	Proporția cea mai mare dintre tonurile nereproduse și cele reproduse. Imaginea de ansamblu este sub-expusă (asemenea fotografiei)
Tonuri în gradienti	Au pierdere foarte mare	

Din compararea celor două specii lemnoase rezultă că tonurile policrome și cele în gradienti sunt asemănătoare, iar în ceea ce privește tonurile profunde acestea au fost reproduse într-un număr mai mare pe paltinul de câmp.

Rezultatele prezintă claritate în imagine și redarea mai bogată a tonurilor lumină, medii și profunde.

Analiza experimentelor 5.3.5

Rezultatele planurilor experimentale aprofundate prezintă o îmbunătățire vizibilă a rezultatelor planurilor experimentale neconvertite și convertite. Această îmbunătățire poate fi observată relativ facil dacă rezultatele planurilor experimentale anterioare se compară cu planul experimental IPA5.



5.3.8. Experimente particularizate pentru definirea rezoluției optime în pirogravarea imaginilor digitale

Acest mod de lucru poate fi sincronizat cu pasul capului de lucru astfel încât să se reducă timpul de prelucrare. Rezoluția este corelată cu diametrul urmei laserului pe material.

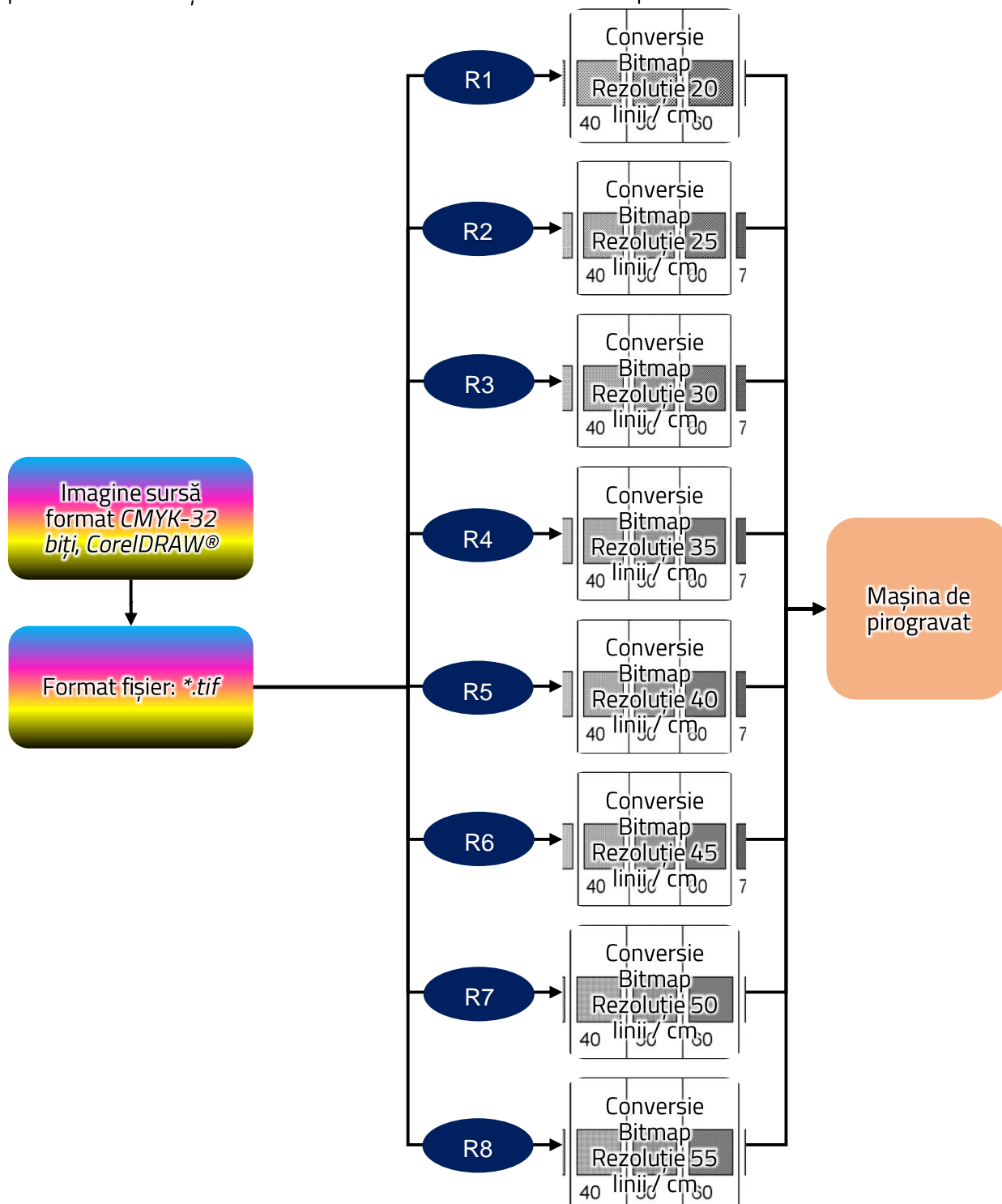


Figura 5.63 Schema experimentală pentru definirea rezoluției optime a imaginii pentru pirogravarea pe suport lemnos

Procesul de lucru al acestui experiment este structurat și dezvoltat schematic în Figura 5.63. Aici se poate observa că această structurare presupune mai multe niveluri, după cum urmează:

- Conceperea imaginii sursă;



- Exportul imaginii sursă și salvarea acesteia în tipul de reprezentare *CMYK-32 biți* și în formatul de stocare **.tif*;
- Conversia imaginii sursă în formatul *Bitmap-1 bit*, la rezoluții diferite. Acest format este recunoscut de echipamentul de prelucrare;
- Trimiterea imaginilor alb-negru convertite pe 1 bit la echipamentul de pirogravare.

Imaginea sursă este compusă din 11 suprafețe pătrate. Deoarece fiecărei suprafețe îi corespunde un ton de gri obținut din amestecul culorilor pigment cyan, magenta, galben și negru, rezultă că s-au obținut 9 tonuri de gri la care se adaugă nonculorile alb și negru (Figura 5.64).

Această simplificare a fost posibilă în principal datorită concluziilor de la experimentele anterioare.

Tonurile de gri au fost obținute prin combinarea culorilor primare cyan, magenta, galben și negru combinate în proporții egale. În urma exportului și salvării în format **.tif* s-a observat că tonurile de gri s-au obținut prin varierea doar a parametrului K (negru).

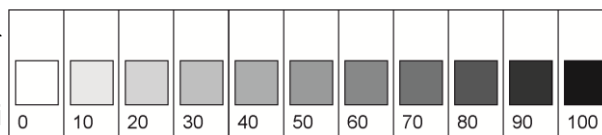


Figura 5.64 Imaginea sursă pentru definirea rezoluției optime a imaginii pentru pirogravarea pe suport lemnos

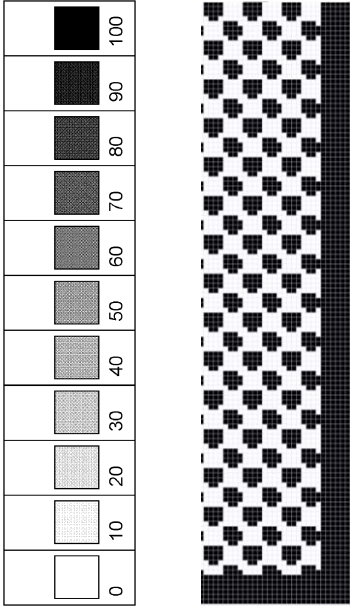
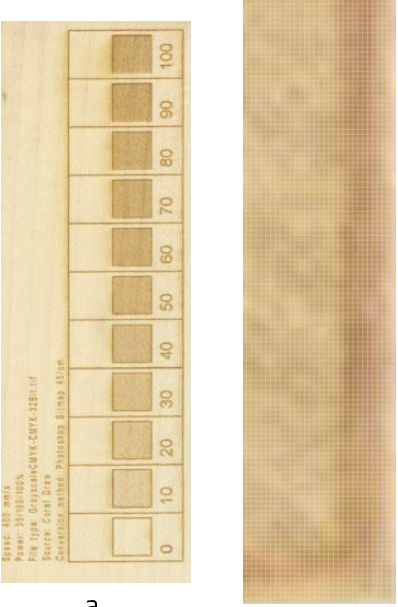
Procesul de lucru din Figura 5.63 cuprinde trasee de desfășurare, care se pot identifica în schemă ca următoarele planuri experimentale:

- R1** Imaginea sursă salvată în format **.tif* -> Convertită prin metoda *Bitmap-1 bit* la rezoluția de *20 linii/cm* -> Trimisă la mașina de pirogravat;
- R2** Imaginea sursă salvată în format **.tif* -> Convertită prin metoda *Bitmap-1 bit* la rezoluția de *25 linii/cm* -> Trimisă la mașina de pirogravat;
- R3** Imaginea sursă salvată în format **.tif* -> Convertită prin metoda *Bitmap-1 bit* la rezoluția de *30 linii/cm* -> Trimisă la mașina de pirogravat;
- R4** Imaginea sursă salvată în format **.tif* -> Convertită prin metoda *Bitmap-1 bit* la rezoluția de *35 linii/cm* -> Trimisă la mașina de pirogravat;
- R5** Imaginea sursă salvată în format **.tif* -> Convertită prin metoda *Bitmap-1 bit* la rezoluția de *40 linii/cm* -> Trimisă la mașina de pirogravat.
- R6** Imaginea sursă salvată în format **.tif* -> Convertită prin metoda *Bitmap-1 bit* la rezoluția de *45 linii/cm* -> Trimisă la mașina de pirogravat.
- R7** Imaginea sursă salvată în format **.tif* -> Convertită prin metoda *Bitmap-1 bit* la rezoluția de *50 linii/cm* -> Trimisă la mașina de pirogravat.
- R8** Imaginea sursă salvată în format **.tif* -> Convertită prin metoda *Bitmap-1 bit* la rezoluția de *55 linii/cm* -> Trimisă la mașina de pirogravat.

Ca exemplificare a acestor planuri experimentale în continuare este prezentat planul experimental **R6**, acesta fiind considerat ca având rezultatele cele mai bune, celelalte planuri fiind prezentate în anexa. Pe lângă specia lemnoasă plop, analizată în acest capitol, s-a impus și efectuarea de experimente pe paltinul de câmp deoarece rezultatele au fost comparate cu cele de la capitolul care analizează factorii de influență asupra pirogravurii.



Plan experimental R6 - Rezoluția de 45 linii/cm

Informație digitală inițială	Rezultatul în urma pirogravării	
 <p data-bbox="215 943 585 1099">Figura 5.65 Imaginea sursă pentru rezoluția de 45 linii/cm: a. – ansamblu; b. – detaliu la scara 800:1.</p>	 <p data-bbox="632 920 1031 1122">Figura 5.66 Pirogravura imaginii pentru rezoluția de 45 linii/cm, pe paltin de câmp: a. – ansamblu; b. – detaliu la scara 800:1.</p>	
<p data-bbox="193 1133 603 1523">Imaginea sursă a fost convertită în imagine pe 1 bit cu rezoluția de 45 linii/cm. În detaliul imaginii sursă se observă că aceasta este formată din suprafețe circulare dispuse ordonat. Comparativ cu rezoluția de 40 linii/cm aceste suprafețe sunt mai mici și mai dese.</p>	<p data-bbox="632 1155 1038 1503">Din analiza vizuală a conținutului pirogravat se observă următoarele:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li data-bbox="632 1290 1038 1368">■ S-au obținut mai multe tonuri de culoare vizibile cu ochiul liber; <li data-bbox="632 1379 1038 1503">■ Tonurile de culoare sunt neuniforme din cauza structurii neomogene a lemnului. 	
<p data-bbox="248 1536 1414 1659">În detaliile prezentate în Figura 5.65b și Figura 5.67b se observă că imaginea pirogravată nu reproduce tocmai fidel imaginea sursă, suprafața pirogravată fiind compusă din suprafețe mici dispuse dezordonat.</p> <p data-bbox="217 1671 1445 1749">În detaliile prezentate în Figura 5.65b și Figura 5.67b se observă că imaginea pirogravată reproduce fidel imaginea sursă, suprafața pirogravată fiind compusă din suprafețe mici dispuse ordonat.</p> <p data-bbox="217 1760 1445 1839">În detaliile prezentate în Figura 5.66b și Figura 5.67b se observă că rezultatele nu sunt identice chiar dacă imaginea sursă este aceeași, imaginea obținută fiind dependentă de specia lemnoasă.</p>		

Analiza experimentelor 5.3.8

Analizând variațiile L^* în funcție de proporția de negru, se preferă ca aceste tendințe să fie liniare deoarece șirul de valori a proporției de negru este unul liniar. O astfel de variație pune cel mai bine în



valoarea proporțiile dintre două proporții alăturate. Analiza comparativă a L^* obținute pentru ele două specii lemnoase analizate este prezentată în Tabelul 5.19.

Tabelul 5.19 Variațiile L^* cu proporția de negru

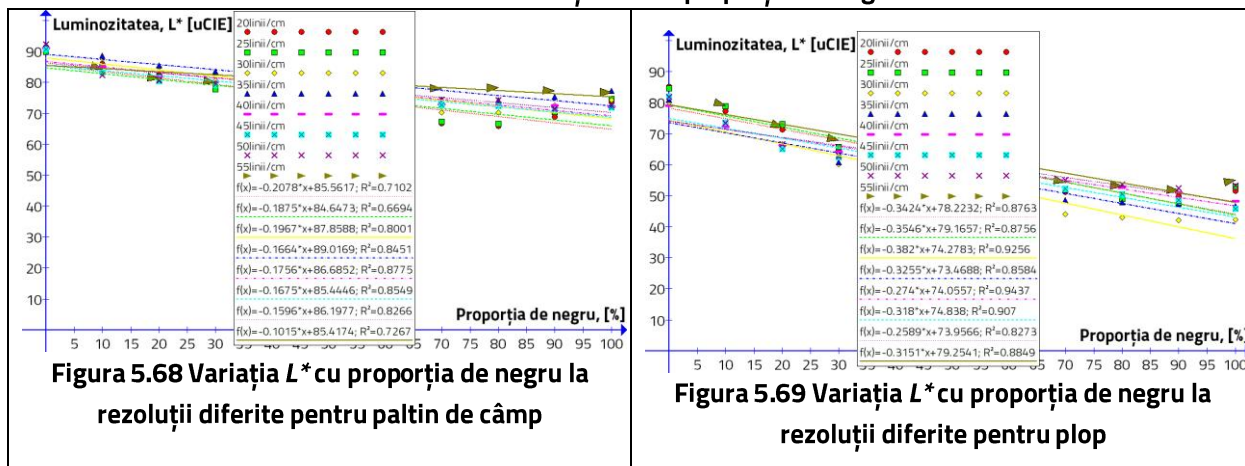


Figura 5.68 Variația L^* cu proporția de negru la rezoluții diferite pentru paltin de câmp

Figura 5.69 Variația L^* cu proporția de negru la rezoluții diferite pentru plop

Specia lemnoasă	Paltin de câmp	Plop
Grafic	Figura 5.68	Figura 5.69
Rezoluția optimă determinată analitic	40 linii/cm	30 linii/cm
R^2	0,88	0,93
d_m	0,225 mm	0,408 mm
Rezoluția calculată	$1 / 0,225 \text{ mm} * 10 = 44 \text{ linii/cm}$	$1 / 0,408 \text{ mm} * 10 = 24 \text{ linii/cm}$

Aceste rezultate confirmă rezultatele anterioare din această lucrare privind dimensiunile urmelor lăstate de radiația laser pe lemn. Respectiv folosind un regim de lucru similar se observă că d_m este aproximativ 0,225 mm pentru paltin ceea ce corespunde unei rezoluții cuprinse în intervalul 40..45 linii/cm ceea ce înseamnă că pasul stabilit la această valoare, sincronizat cu rezoluția imaginii cuprinsă în același interval reprezintă parametrii optimi de lucru.

Deoarece rezoluția imaginii nu este un parametru tehnologic, aceasta nu influențează productivitatea procesului de pirogravare.

Comparând rezultatele obținute pe cele două specii lemnoase se observă că:

- Rezoluția este influențată de specia lemnoasă.
- În cazul plopului, intervalul de variație pentru L^* este mai mic decât la paltinul de câmp.

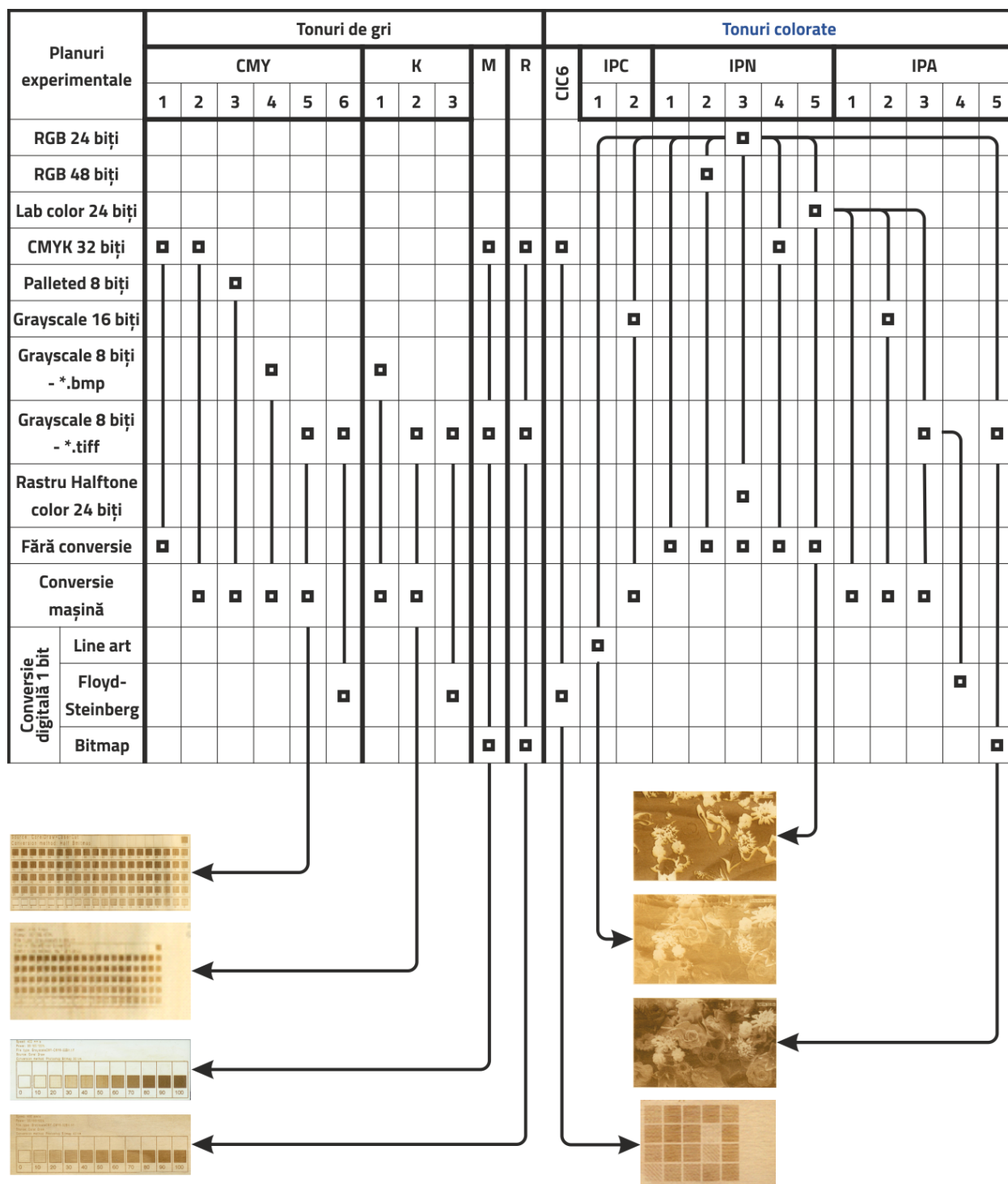
5.4. Concluzii cu privire a pirogravarea imaginilor pe suprafețe lemnoase

În privința stocării informației digitale, formatele uzuale folosite pentru pirogravarea conținutului digital sunt următoarele: *.bmp; *.jpg; *.tif; *.gif; *.png. Dintre acestea în urma studiului teoretic sa optat pentru folosirea formatelor *.bmp și *.tif, pe considerentul că acestea nu prezintă pierderi semnificative de informație în procesul de prelucrare grafică. Formatul *.tif este un format specific domeniului tipografic și a tipării unui conținut digital.

S-a făcut un studiu comparativ cu privire la folosirea a două specii lemnoase. În urma acestui studiu se poate afirma că la alegerea speciei lemnoase trebuie să se țină seama de conținutul grafic al imaginii



Tabelul 5.20 Tabel sinoptic



În urma experimentelor din acest capitol s-au evidențiat următoarele concluzii:

- Paltinul de câmp, deși prezintă un interval mai mare de variație a L^* , nu este recomandat pentru pirogravarea imaginilor digitale datorită celulelor radiale care influențează negativ reproducerea conținutului grafic. Această specie lemnoasă de poate folosi, datorită proprietăților sale de reacție la temperaturi înalte, pentru reproducerea informațiilor grafice cu un număr redus de detalii;
- Plopul are o culoare inițială care este mai întunecată decât paltinul de câmp. Grație structurii sale anatomice mai fine și a celulelor radiale dificil de distins chiar și cu lupa se recomandă a se



folosi pentru reproducerea imaginilor detaliate;

- Tabelul 5.20 prezintă variantele optime pirogravate în urma experimentelor aplicate. Se observă că planurile experimentale cu un număr redus de operații de prelucrare grafică au generat rezultate modeste, iar planurile experimentale complexe au generat rezultate mai bune în funcție de combinațiile folosite;
- Datorită existenței conținuturilor grafice nelimitate, este dificil să se definească o procedură de prelucrare grafică valabilă pentru toate conținuturile grafice. Totuși prin această cercetare s-a încercat găsirea de soluții de procesare pentru o gamă cât mai largă de conținuturi grafice. Aceste proceduri sunt prezentate schematic în Tabelul 5.20. De exemplu, pentru reproducerea unei fotografii digitale color este necesar ca aceasta să îndeplinească următoarele condiții: rezoluția să fie cât mai mare, dimensiunile imaginii să fie cât mai mari (aceste valori sunt dependente de complexitatea imaginii), formatul de stocare trebuie să fie *.tiff sau *.bmp, model de reprezentare cromatică RGB (model predefinit pentru majoritatea aparatelor de fotografiat digitale). Imaginea se convertește în *Grayscale-8 biți* și format *.tif. Apoi se convertește în format Alb-Negru. Urmează trimiterea către mașina de pirogravat și adăugarea regimurilor de lucru. Următorul pas fiind rezultatul pirogravurii;
- Planul experimental *CMY5* și *K2* sunt cele mai eficiente dintre seriile de planuri din care acestea fac parte;
- Planul experimental *CMY6* prezintă un plan prag mai mic decât planul *K3*;
- În acest capitol s-a schimbat specia lemnoasă înlocuind-se paltinul cu plopul deoarece la pirogravare paltinul avea o colorare neuniformă, care influențează negativ rezultatul pirogravării imaginilor.

5.5. Aplicații practice

Pe baza observațiilor anterioare, s-au realizat o serie de aplicații, urmărind procedurile de prelucrare grafică și parametrii tehnologici optimi.



a.



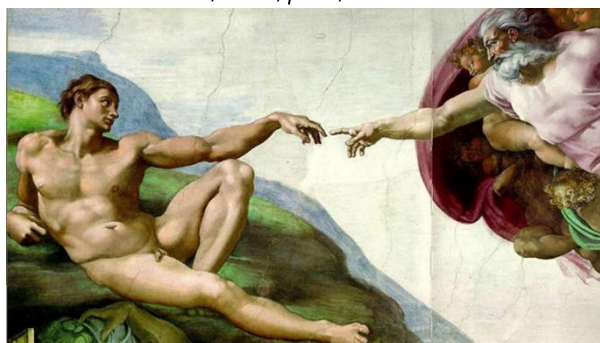
b.



c.

Figura 5.70 Reprezentare grafică în tuș; Compoziție decorativă romanică

a. Imaginea sursă: Friză (<https://www.flickr.com/photos/internetarchivebookimages/14764990452/>); b. Imaginea sursă: Element decorativ (<https://www.flickr.com/photos/internetarchivebookimages/14783318852/>); c. Imaginea pirogravată, aplicată pe tăblia unei fețe de sertar din lemn de *plop*. Procedură grafică: IPN5; Regim de lucru: $v= 402$ mm/s, $P= 1,56$ W, $p= 0,0254$ mm.



a.



b.

Figura 5.71 Lucrare picturală color

a. Imaginea sursă ([https://en.wikipedia.org/wiki/The_Creation_of_Adam#/media/File:Michelangelo_-_Creation_of_Adam_\(cropped\).jpg](https://en.wikipedia.org/wiki/The_Creation_of_Adam#/media/File:Michelangelo_-_Creation_of_Adam_(cropped).jpg)); b. Imaginea pirogravată, aplicată pe tăblia unei fețe de sertar din lemn de *plop*. Procedură grafică: IPA5; Regim de lucru: $v= 402$ mm/s, $P= 29,09$ W, $p= 0,1028$ mm, $d_m= 0,263$ mm.



a.

b.

Figura 5.72 Desen liniar; Jean Mondon – Desen Rococo cu figură chinezească (1736)

a. Imaginea sursă (https://en.wikipedia.org/wiki/Louis_XV_furniture#/media/File:Jean_Mondon_-_Rocaille_Design_with_Chinese_Figure_-_Google_Art_Project.jpg); b. Imaginea pirogravată, aplicată pe două tăblii de uși de dulap din lemn de *plop*. Procedură grafică: IPC1; Regim de lucru: $v= 402$ mm/s, $P= 29,09$ W, $p= 0,1028$ mm, $d_m= 0,263$ mm.



Figura 5.75 Cutii de protocol din lemn de paltin de câmp



CAPITOLUL 6. CONCLUZII GENERALE, CONTRIBUȚII ORIGINALE ȘI DIRECȚII VIITOARE DE CERCETARE

Prin tema abordată, teza de doctorat reprezintă o lucrare de pionierat în domeniul prelucrării cu laser a lemnului, în general și în special a pirogravurii.

Lucrarea este una interdisciplinară cuprinzând domeniile: artă prin folosirea imaginilor, meșteșug prin tehnologia de prelucrare studiată, inginerie prin programele de cercetare dezvoltate, fizică prin explicarea fenomenelor care au loc în urma interacțiunii dintre radiația laser și lemn, matematică prin ecuațiile care definesc procesele fizice, dar și prin aplicațiile software dezvoltate.

Cercetarea oferă răspunsuri legate de problemele alegerii celor mai potrivite și adecvate materiale din lemn folosite ca suport pentru pirogravură, dar în același timp oferă informații privind regimurile tehnologice optime pentru obținerea unei anumite nuanțe și detalii privind conținutul grafic și structural al imaginii.

Se poate aprecia că prin concepție, metodologie și rezultate obținute, prezentate anterior, cercetarea doctorală și teza de doctorat CONTRIBUȚII LA DECORAREA SUPRAFEȚELOR LEMNOASE PRIN PIROGRAVARE CU LASER și-a îndeplinit integral obiectivele asumate.

6.1. Concluzii generale

Lucrarea abordează o temă nouă. Acest lucru se observă și din analiza bibliografică care a oferit un număr redus de informații.

A fost făcut un studiu bibliografic privind definirea noțiunii de pirogravură și a termenilor derivați din această tehnică ornamentală. În urma acestui studiu s-a propus o definiție adăugită și completată a acestui termen. În contextul actual au fost prezentate pe scurt două proiecte majore care implică dezvoltarea tehnologiilor laser. De asemenea a mai fost prezentat un scurt istoric al pirogravurii de la primele tentative de inscripționare pe lemn cu ajutorul unor materiale încinse până la tehnologiile laser.

Studiul bibliografic s-a desfășurat anevoios datorită lipsei informațiilor din literatura de specialitate. Totuși s-a putut face o analogie atât cu alte domenii de tehnologii laser cât și cu aparatele tradiționale de pirogravat.

Din cauza faptului că prelucrarea cu laser este o tehnologie nouă, s-a impus realizarea unui studiu amplu privind posibilitățile de investigare a laserului și a rezultatului prelucrării cu laser.

S-a făcut un studiu complex privind speciile lemnoase utilizate la pirogravură. Studiul cuprinde atât specii indigene cât și specii exotice. Deoarece studiile privind arderea cu laser nu sunt concludente, studiul a fost extins și la speciile lemnoase preferate pentru a fi pirogravate prin tehnicile tradiționale. S-a întocmit o bază de date care cuprinde atât specii indigene cât și specii exotice folosite la pirogravură. În urma acestui studiu a fost definită o specie ideală care a fost folosită ca specie de referință pentru alegerea materialelor suport pentru pirogravură.

Au fost descrise echipamentele de lucru și materialul supus pirogravurii. În cazul echipamentelor s-a pus accent pe acele componente care au fost folosite în studiul experimental. În cazul lemnului, s-au prezentat acele caracteristici care se consideră că influențează prelucrarea cu ajutorul laserului.



Au fost întocmite și descrise cele două etape experimentale: preliminară și principală.

Au fost definite și analizate proceduri pentru măsurarea: dimensiunilor prelucrării (lățime, lungime, adâncime), puterii efective a laserului, culorii suprafețelor mici și variabile.

A fost concepută și realizată o aplicație software pentru măsurarea și analizarea culorii suprafețelor mici și variabile care se bazează pe analiza imaginilor digitale.

S-a realizat un studiu complex privind influența diferiților parametri de proces ai prelucrării cu laser. În urma acestui studiu s-au definit intervalele și legile de variație ai acestor parametri.

S-au analizat influențele cumulate ale principalilor factori rezultați în urma studiilor preliminare din teză și s-a modelat matematic variația acestora.

S-a realizat un studiu complex privind reproducerea informațiilor digitale folosind tehnica pirogravării cu ajutorul laserului. Acest studiu a verificat și confirmat rezultatele studiului anterior cu privire la diametrele urmei laserului pe lemn.

A fost concepută și dezvoltată o tehnologie de utilizare a laserului cu CO_2 .

A fost dezvoltată o aplicație software pentru optimizarea regimurilor de lucru pe baza modelelor matematice și a influenței factorilor de proces. Se propune o metodă inedită de programare a unei mașini cu comandă numerică fără modificarea directă a codului G.

Inovațiile aduse cercetării experimentale au condus la efectuarea unui număr mare de experimente, a unui număr considerabil de măsurători și au crescut precizia acestora.

Această lucrare este susținută de Programul operațional sectorial Dezvoltarea resurselor umane (SOP HRD), ID134378 finanțat din Fondul social european și de către Guvernul României.

6.2. Contribuții originale

- Lucrarea găsește și dezvoltă o aplicabilitate pentru laserele cu gaz, în special pentru laserul cu CO_2 , folosindu-se de avantajele lui (sensibilitate pentru materiale precum este lemnul, posibilitatea de a funcționa atât în undă continuă cât și în impulsuri). Acest tip de laser a fost neglijat în ultima perioadă datorită dezavantajelor lui (dimensiuni, instabilitate).
- Sistematizarea cercetărilor în domeniul pirogravurii.
- Studii teoretice privind:
 - Speciile lemnoase folosite ca suport pentru pirogravură;
 - Formatele de imagini (stocare, conversii), modele de reprezentare;
 - Tehnicile de prelucrare și de ajustare a conținutului digital din punct de vedere cromatic.
- Conceperea unor metode originale de măsurare a rezultatelor pirogravării:
 - **Aplicație software pentru măsurarea culorii suprafețelor mici și cu dimensiuni variabile;**
 - Metode pentru măsurarea dimensiunilor prelucrării;
 - Verificarea metodelor propuse prin compararea rezultatelor cu aparate de măsură clasice.
- Elaborarea planurilor experimentale pentru cele două etape ale cercetărilor privind factorii tehnologici de influență ai pirogravurii și a cercetărilor privind transpunerea informației digitale pe suport lemnos.



- Contribuții cu privire la analiza informației digitale posibilă de prelucrat prin pirogravare cu laser și sistematizarea acesteia pe tipuri de conținut grafic.
- Elaborarea metodelor de lucru pentru analiza transpunerii informației digitale pe suport lemnos.
- Întocmirea rapoartelor experimentale.
- Centralizarea rezultatelor într-o bază de date cu referire la parametri principali de lucru ai procesului de pirogravare cu laser:
 - definirea legilor de variație și a intervalelor de variație pentru factorii principali de influență;
 - interacțiunile dintre parametri principali de lucru.
- Dezvoltarea unei aplicații software de simulare a procesului de pirogravare folosind laserul cu CO_2 , optimizarea regimurilor de lucru și întocmirea unui plan experimental redus pentru teste rapide.
- Elaborarea unui algoritm și a unei aplicații software care permite transferul planurilor experimentale direct la mașina de pirogravat, fără a fi necesară intervenția operatorului uman.
- Diseminarea rezultatelor prin participarea la conferințe științifice internaționale, publicarea de articole în reviste de specialitate indexate în baze de date: Petru & Lunguleasa (2013); Petru & Lunguleasa (2013)a; Petru & Lunguleasa (2014); Petru & Lunguleasa, (2014)a; Petru & Lunguleasa (2014)b; Petru (2015); Petru & Lunguleasa (2015); Gurău, et al. (2017); Gurău & Petru (2017); Petru & Lunguleasa (2017); Gurău & Petru (2018); Petru & Boboescu (2019).

În urma experimentelor prezentate în subcapitolul care analizează dimensiunile urmei laserului pe material, d_m și în subcapitolul privind definirea rezoluției optime pentru pirogravarea imaginilor digitale s-au obținut rezultate asemănătoare cuprinse în intervalul 40...45 linii/cm, chiar dacă metodele de investigație au fost diferite. Având în vedere această observație, se poate concluziona că:

- Se verifică corectitudinea celor două metode de investigație;
- În acest interval se obține d_m , iar găsirea parametrilor tehnologici care conduc la acest rezultat reprezintă soluția optimă de prelucrare.

Au fost dezvoltate tehnologii pentru reproducerea cât mai fidelă a unui conținut grafic digital prin tehnica pirogravurii cu laser pe materialul lemnos.

6.3. Direcții viitoare de cercetare

Având în vedere faptul că tematica analizată nu a fost epuizată complet dar și că dinamica lucrărilor în domeniu are un trend ascendent se propune continuarea studiului bibliografic.

În ceea ce privește debitarea lemnului cu laser au fost analizați de către (Radovanović & Madić, 2011) parametrii de lucru comparativ cu alte materiale, deși autorii au analizat 3 lucrări din 50, care tratează debitarea lemnului cu laser, ei consideră că acest domeniu reprezintă o pondere nesemnificativă în comparație cu alte materiale.

Energia laser se poate folosi pentru a dezvolta și alte tehnologii de prelucrare.

Cercetările ulterioare se pot orienta către folosirea altor specii lemnoase sau a altor secțiuni prin lemn, a altor condiții de prelucrare sau descoperirea altor surse de căldură și folosirea tehnicilor noi de investigare.



În ceea ce privește laserul folosit, se pot investiga efectele altor tipuri de lasere, alte gaze de asistare cu varierea parametrilor (viteză, presiune, direcție de curgere) acestora din urmă.

Pentru a păstra în bune condiții lucrările pirogravate și pentru a evita variațiile de culoare cauzate de expunerea la lumină naturală a lemnului pirogravat, se recomandă protejarea acestora. Se impune un studiu al calității suprafețelor pirogravate, deoarece o prelucrare mecanică ulterioară duce la deteriorarea acestora. De asemenea se poate continua cu îmbunătățirea tehnologiilor de finisare pentru ca acestea să nu deterioreze aspectul vizual al lucrării, dar să realizeze o protecție optimă de durată.

În ceea ce privește măsurarea culorii se pot dezvolta aplicații pentru măsurarea altor tipuri de fișiere. Așa cum s-a prezentat deja în lucrare, măsurarea culorii fișierelor *.tif prezintă un interes deosebit datorită complexității informației stocate în acest format. De asemenea pot fi măsurate și analizate și caracteristici ale unei imagini digitale.

Deși în cadrul tezei s-a realizat unui studiu complex privind influența diferiților factori de proces ai prelucrării cu laser, studiul nu este unul complet, acesta putând fi continuat cu analiza altor factori.

În cadrul cercetării tezei s-a pus accent pe influența parametrilor de proces asupra culorii obținute, dar studiul poate fi continuat cu analiza și a altor parametri de ieșire cum ar fi: rugozitatea suprafețelor, duritatea materialului, rezistența la lumină a suprafeței pirogravate, fragilitatea suprafeței, analiza fizică și chimică a zonelor prelucrate etc.

Deși studiul experimental este complex, el poate fi continuat prin considerarea altor factori de influență și a interacțiunilor dintre aceștia.

Completarea bazei de date cu valori experimentale poate duce la definirea proceselor care au loc în urma interacțiunii dintre laser și materialul lemnos și se pot realiza modelări matematice care simulează cu o precizie mare comportarea materialului în urma aplicării tratamentelor diferite.

Deși în cadrul tezei s-a realizat unui studiu complex privind reproducerea imaginilor digitale folosind tehnologia laser, studiul nu este nici pe departe complet, având în vedere multitudinea de tipuri de fișiere existente, dar și posibilităților multiple de prelucrare a acestora.

Aplicații practice ale cercetărilor cu privire la decorarea și ornamentarea mobilierului folosind tehnica pirogravurii.

Dezvoltarea pirogravurii ca tehnică de exprimare plastic – expresionistă.

Problematika optimizării poate fi abordată și din alte puncte de vedere așa după cum s-a arătat în studiul bibliografic.

Metoda de optimizare poate fi îmbunătățită prin reanalizarea ecuațiilor matematice de variație, dar și prin crearea unei baze de date deschise, în care să poată fi adăugate date relevante.

Rezultatele obținute pot fi folosite și pentru crearea de aplicații software care să simuleze procesul de pirogravare.

BIBLIOGRAFIE SELECTIVĂ

- Barcikowski, S., Koch, G. & Odermatt, J., 2006. Characterisation and modification of the heat affected zone during laser material processing of wood and wood composites. *Holz als Roh- und Werkstoff*, Apr, 64(2), pp. 94-103.
- Barnekov, V., McMillin, C. & Huber, H., 1986. Factors influencing laser cutting of wood. *Forest Products Journal*, 36(01), pp. 55-58.
- Chapman, A., 1995. *Learning the art of pyrography: burning images on wood, paper, and leather*. Atglen; Surrey: Schiffer Publishing.
- Chen, M.-F. și alții, 2011. Optimized laser cutting on light guide plates using grey relational analysis. *Optics and Lasers in Engineering*, 49(2), pp. 222-228.
- Chernykh, M., Kargashina, E. & Stollmann, V., 2018. The use of wood veneer for laser engraving production. *Acta Facultatis Xylogiae Zvolen res Publica Slovaca*, 60(1), pp. 121-127.
- Cismaru, I. & Cismaru, M., 2007. *Mobila stil: artă și tehnologie*. Braşov: Editura Universității Transilvania.
- Cismaru, I. & Coşereanu, C., 2016. *Ornamentica mobilei: concepție și fabricație*. Braşov: Editura Universității Transilvania.
- Cismaru, M., 2003. *Fizica lemnului și a materialelor pe bază de lemn*. Braşov: Editura Universității Transilvania.
- Dogaru, V., 1981. *Așchieria lemnului și scule așchietoare*. București: Editura Didactică și Pedagogică.
- Dogaru, V., 1985. *Bazele tăierii lemnului și a materialelor lemnoase*. București: Editura Tehnică.
- Donțu, O., 1985. *Tehnologii de prelucrare cu laser*. București: Editura Tehnică.
- Dowden, J., 2009. *The Theory of Laser Materials Processing*. Essex(): Springer.
- Dubey, A. K. & Yadava, V., 2008. Laser beam machining—A review. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 48(6), pp. 609-628.
- Dumitraș, D.-C., 1982. *Laseri cu gaz*. București: Editura Academiei Republicii Socialiste România.
- Easton, S., 2010. *Woodburning with style*. East Petersburg: Fox Chapel Publishing.
- Filipovici, J., 1964. *Studiul lemnului – vol. I*. București: Editura Didactică și Pedagogică.
- Filipovici, J., 1965. *Studiul lemnului – vol. II*. București: Editura Didactică și Pedagogică.
- Gregory, N., 2014. *Pyrography Designs*. 9 ed. East Sussex, BN7 1XU United Kingdom: Guild of Master Craftsman Publications Ltd.
- Gurău, L. & **Petru, A.**, 2017. *Surface roughness of beech (Fagus sylvatica) after action of a CO2 laser beam at different power outputs and scanning speeds*. Brasov, PRO LIGNO Foundation, pp. 218-226.
- Gurău, L. & **Petru, A.**, 2018. The Influence of CO2 Laser Beam Power Output and Scanning Speed on Surface Quality of Norway Maple (Acer platanoides). *BioResources*, 13(4), pp. 8168-8183.
- Gurău, L., **Petru, A.**, Varodi, A. & Timar, M. C., 2017. The Influence of CO2 Laser Beam Power Output



and Scanning Speed on Surface Roughness and Colour Changes of Beech (*Fagus sylvatica*). *Bioresources*, Volumul 12(4), pp. 7395-7412.

Hernández-Castañeda, J. C., Sezer, H. K. & Li, L., 2011. The effect of moisture content in fibre laser cutting of pine wood. *Optics and Lasers in Engineering*, 49(9), pp. 1139-1152.

Hitz, C. B., Ewing, J. & Hecht, J., 2012. *Introduction to laser technology*. 4th ed. New(York): John Wiley & Sons, Inc..

Howard, Z., Young, K. & Dunn, P., 2014. *Laser treatment transforms MDF producing startling image of rare wood grains*, Coventry, CV4 7AL, United Kingdom: International Manufacturing Centre University of Warwick.

Huber, H. A. & Ward, D., 1980. Laser cut furniture parts. *Wood-working and Furnit. Dig.*, Issue 79(2), pp. 26-29.

Irish, L. S., 2012. *The art & craft of pyrography: drawing with fire on leather, gourds, cloth, paper, and wood*. East Petersburg: Fox Chapel Publishing.

Irish, L. S., 2014. *Pyrography basics : techniques and exercises for beginners*. East Petersburg: Fox Chapel Publishing.

Kačík, F. & Kubovský, I., 2011. Chemical changes of beech wood due to CO₂ laser irradiation. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 222(1), pp. 105-110.

Kleskenova, M. & Orech, T., 1981. Untersuchungen uber die Holzbearbeitung mit Laserstrahlen. *Holzindustrie*, Issue No. 2.

Kubovský, I. & Kačík, F., 2009. FT-IR study of maple wood changes due to CO₂ laser irradiation. *Cellulose Chemistry and Technology*, 08, Volumul 43, pp. 235-240.

Laslău, R. C., 2012. *Investigarea proceselor de tăiere laser Nd:YAG a materialelor compozite cu matrice polimerică*, Timișoara: Universitatea „Politehnica”.

Laurenzi, W., 2001. *Proiectarea asistată de calculator în AutoLISP cu aplicații în industria lemnului*. Brașov: Editura Universității Transilvania.

Laurenzi, W., 2012. *Introducere în programarea vizuală în Delphi*. Brașov: Editura Universității Transilvania.

Lazarus, 2014. [Interactiv] Available at: <http://www.lazarus-ide.org/> [Accesat 28 04 2014].

Leone, C., Lopresto, V. & Iorio, I. D., 2009. Wood engraving by Q-switched diode-pumped frequency-doubled Nd:YAG green laser. *Optics and Lasers in Engineering*, 47(1), pp. 161-168.

Lin, C.-J. și alții, 2008. Effects of feed speed ratio and laser power on engraved depth and color difference of Moso bamboo lamina. *Journal of Materials Processing Technology*, 198(1), pp. 419-425.

Majumdar, J. D. & Manna, I., 2003. Laser processing of materials. *Sadhana*, Volumul 28, p. 495-562.

Mihăilescu, T., 2003. *Programare și proiectare asistată de calculator: interfețe grafice utilizator sub AutoCAD*. Brașov: Editura Universității Transilvania.

Millis, S.-M., 2013. Understanding pyrography, the photochemistry of 'scorched' decoration. *Pro Ligno*,



9(4), pp. 684-692.

Muscu, I., 2012. *Designul mobilei corp: formă, culoare, ergonomie - un proces creativ*. Brașov: Editura Universității Transilvania.

Neill, B., 2013. *Step-by-step pyrography*. East Sussex, BN7 1XU United Kingdom: Guild of Master Craftsman Publications Ltd.

Nichici, A., 2004. *Energii concentrate – suport al prelucrării termice a materialelor*. Timișoara: Editura Politehnica.

Nichici, A., 2004. *Evoluții semnificative în sistemele tehnologice laser de procesare a materialelor*. Timișoara: Universitatea Politehnica.

Pearsică, M., Nedelcu, Ș. & Luculescu, D., 2006. *Metode de modelare a procesului de prelucrare cu laser*. Cluj-Napoca, România: Editura Albastră.

Peters, C. & Banas, C., 1977. Cutting wood and wood base products with a multikilowatt CO2 laser. *Forest Products Journal*, Issue 27(11), p. 41-50.

Petru, A., 2015. Image Conversion for Laser Pyrography. *Pro Ligno*, 11(4), pp. 646-653.

Petru, A. & Boboescu, R., 2019. Number of laser beam passes influence on surface color to wood marking. *Nonconventional Technologies Review*, March, pp. 36-39.

Petru, A. & Lunguleasa, A., 2013. *Study of working temperature at wood burning tools*. Brașov, PRO LIGNO Foundation, pp. 950-956.

Petru, A. & Lunguleasa, A., 2013. *The pyrography, from solar radiation to laser radiation*. Brașov, Proceedings of the 6th International Conference on Manufacturing Engineering, Quality and Production Systems (MEQAPS 13), pp. 206-209.

Petru, A. & Lunguleasa, A., 2014. *Colour measurement using digital image analysis*. Brașov, Publishing House of "Henri Coanda" Air Force Academy, pp. 215-220.

Petru, A. & Lunguleasa, A., 2014. *The choice of the pyrometers used for pyrogravure devices*. Brașov, Proceedings of the 6th International Conference on Manufacturing Engineering, Quality and Production Systems (MEQAPS 14), pp. 84-89.

Petru, A. & Lunguleasa, A., 2014. *Wood processing by laser tools*. Brașov, Publishing House of "Henri Coanda" Air Force Academy, pp. 213-219.

Petru, A. & Lunguleasa, A., 2015. *Effects of the laser power on wood coloration*. Brașov, Publishing House of "Henri Coanda" Air Force Academy, pp. 581-584.

Petru, A. & Lunguleasa, A., 2017. Colour influence of the laser raster speed on wood pyrography. *Pro Ligno*, 13(4), pp. 508-515.

Petutschnigg, A. și alții, 2013. Laser Treatment of Wood Surfaces for Ski Cores: An Experimental Parameter Study. *Advances in Materials Science and Engineering*, 09, Volumul 2013, pp. 1-7.

Popa, E. & Popa, V., 2004. *Lemnul de anin, plop, salcâm. Proprietăți, colorare*. Brașov: Editura Universității Transilvania.



Radovanović, M. & Madić, M., 2011. Experimental investigations of CO2 laser cut quality: A review. *Nonconventional Technologies Review*, 01, 15(4), pp. 35-42.

SLG-4030, 2012. *Laser engraving cutting machine - User manual*. China.

STAS6880/1-88, 1988. *Colorimetrie. Colorimetrie de reflexie. Noțiuni generale*. București: Institutul Român de Standardizare.

STAS6880/3-88, 1988. *Colorimetrie. Colorimetrie de reflexie. Calculul diferențelor de culoare*. București: Institutul Român de Standardizare.

Wairimu, G., 2011. *Study on effects of CO2 laser machining conditions on cut parameters and microstructures*, Juja: Jomo Kenyatta University of Agriculture and Technology.

Walters, S., 2005. *Pyrography workbook*. East Petersburg, PA: Fox Chapel Publishing, Inc..

Walters, S., 2014. *What To Burn: Materials for Pyrography*. East Petersburg: Pyrography Online.

Yakimovich, B., Chernykh, M., Stepanova, A. I. & Siklienka, M., 2016. Influence of selected laser parameters on quality of images engraved on the wood. *Acta Facultatis Xylogologiae Zvolen res Publica Slovaca*, 58(2), pp. 45-50.



Scurt rezumat

Teza de doctorat intitulată CONTRIBUȚII LA DECORAREA SUPRAFEȚELOR LEMNOASE PRIN PIROGRAVARE CU LASER și-a propus diversificarea tehnologiilor de decorare a suprafețelor lemnoase folosind o metodă de actualitate, ecologică și de perspectivă în vederea creșterii valorii estetice a acestora.

Lucrarea analizează **două** aspecte importante ale tehnologiei de pirogravare cu laser: parametrii tehnologici și informația digitală. Primul aspect a fost studiat ca o cercetare fundamentală și s-a materializat printr-o aplicație software care optimizează regimurile de lucru după criteriul obținerii unei anumite nuanțe în timpul cel mai scurt. Rezultatele obținute s-au verificat prin aplicațiile practice prezentate la sfârșitul cercetărilor experimentale. Prin aceste exemple s-a demonstrat că tema abordată are aplicabilitate, este de perspectivă, iar lucrarea și-a atins obiectivele propuse.

Pe lângă studiul principal, lucrarea cuprinde și metode inedite de măsurare și analiză a principalilor factori de influență ai prelucrării cu laser. Complementar temei, lucrarea este interdisciplinară, aceasta cuprinzând domeniile: artă prin folosirea imaginilor, meșteșug prin tehnologia de prelucrare studiată, inginerie prin programele de cercetare dezvoltate, fizică prin explicarea fenomenelor care au loc în urma interacțiunii dintre radiația laser și lemn, matematică prin ecuațiile care definesc procesele fizice, dar și prin aplicațiile software dezvoltate. Prin complexitatea sa, lucrarea pornește de la o prelucrare slab dezvoltată la ora actuală – prelucrarea lemnului folosind tehnologia laser, oferind o soluție practică de decorare a lemnului cu o tehnologie optimizată pe baza datelor obținute în urma cercetării experimentale.

Short abstract

The PhD-Thesis named CONTRIBUTIONS TO WOOD SURFACES DECORATION BY LASER BEAM PYROGRAPHY aimed to diversify the technologies for decorating wooden surfaces using an up to date, ecological and promising method in order to increase their aesthetic value.

The paper analyzes **two** important aspects of laser pyrography technology: the technological parameters and digital information. The first aspect was studied as a fundamental research and materialized through a software application that optimizes work regimes according to the criterion of obtaining a certain shade in the shortest time. The results obtained were verified through the practical applications presented at the end of the experimental research. Through these examples it was demonstrated that the approached topic has applicability, it is of perspective, and the paper has reached its proposed objectives.

In addition to the main study, the paper also includes original methods of measuring and analyzing the main influencing factors of laser processing. Complementary to the topic, the paper is interdisciplinary. It covers the fields: art through the use of images, craftsmanship through studied processing technology, engineering through developed research programs, and physics by explaining the phenomena that occur during the interaction between laser radiation and wood, mathematics through equations that define the physical processes, but also through the developed software applications. Due to its complexity, the work starts from a poorly developed processing at present - wood processing using the laser technology, offering a practical solution for wood decoration with an optimized technology based on data obtained from experimental research.