

ȘCOALA DOCTORALĂ INTERDISCIPLINARĂ

Facultatea de Silvicultură și Inginerie Forestieră

Mirella ELIAS

Evaluarea și dezvoltarea unor soluții inteligente pentru trasabilitatea și proveniența lemnului

REZUMAT

Conducător științific

Prof. dr. Stelian Alexandru BORZ

BRAȘOV, 2026



CUPRINS

LISTA FIGURILOR.....	3
LISTA TABELELOR.....	5
LISTA ABREVIERILOR ŞI ACRONIMELOR	6
INTRODUCERE.....	7
Relevanţa soluţiilor inteligente pentru trasabilitatea şi aprovizionarea cu lemn	7
Scopul şi obiectivele	9
Structura tezei.....	9
CAPITOLUL 1. TRASABILITATEA LEMNULUI ŞI GESTIONAREA TRANSPORTULUI DURABIL: O ANALIZĂ A TEHNOLOGIILOR ŞI PROCEDURILOR	11
1.1. MATERIALE ŞI METODE	11
1.2. REZULTATE ŞI DISCUŢII.....	11
1.2.1. Prezentare generală a studiilor.....	11
1.2.2. Rezultatele strategice	14
1.2.3. Provocările.....	14
1.3. CONCLUZIE.....	15
CAPITOLUL 2. PRECIZIA UNEI NOI APLICAŢII DE MĂSURARE A JURNALULUI PE SMARTPHONE ÎN FAZA DE PROTOTIPARE	16
2.1. MATERIALE ŞI METODE	16
2.1.1. Descrierea aplicaţiei şi datele utilizate în acest studiu.....	16
2.1.2. Locaţia studiului	16
2.1.3. Proiectarea experimentală şi colectarea datelor	17
2.2. REZULTATE.....	18
2.2.1. Tendinţe, concordanţă şi diferenţe în estimările algoritmului	18
2.2.2. Tendinţe, concordanţă şi diferenţe în replici.....	19
2.2.3. Tendinţe, concordanţă şi diferenţe între evaluatori	21
2.2.4. Concordanţa între datele digitale şi cele manuale	22
2.2.5. Eficienţa temporală.....	23
2.3. DISCUŢIE.....	24
2.4. CONCLUZIE.....	24
CAPITOLUL 3. MĂSURAREA LEMNULUI LA POARTA FABRICII: UN STUDIU COMPARATIV PENTRU EVALUAREA PRECIZIEI UNUI SISTEM DIGITAL DE ULTIMĂ GENERAŢIE DE MĂSURARE A ÎNCĂRCĂTURII CAMIOANELOR	25
3.1. MATERIALE ŞI METODE	25
3.1.1. Sursele datelor.....	25
3.2. REZULTATE.....	25
3.2.1. Concordanţa măsurătorilor.....	25
3.3. DISCUŢIE.....	28
3.4. CONCLUZIE.....	28

CAPITOLUL 4. TRASABILITATEA ÎNCĂRCĂTURILOR DE CAMION: PERFORMANȚA DIFERITELOR ALGORITMI DE CORELARE A IMAGINILOR ȘI PERSPECTIVELE APLICAȚIILOR ONLINE	29
4.1. MATERIALE ȘI METODE	29
4.1.1. Obținerea și preprocesarea datelor	29
4.1.2. Proiectarea experimentală și analiza datelor	30
4.2. REZULTATE.....	31
4.2.1. Efectul calității imaginii sursă asupra performanței de amprentare și potrivire	31
4.2.2. Performanța identificării și comparării amprentelor digitale pe imagini care au caracteristici similare de achiziție a datelor	33
4.2.3. Performanța identificării și comparării amprentelor digitale pe imagini care au caracteristici diferite de achiziție a datelor și un număr diferit de jurnale în imaginile de referință și cele comparate	34
4.2.4. Performanța identificării și comparării amprentelor digitale pe imagini care au caracteristici similare de achiziție a datelor și un număr diferit de jurnale în imaginile de referință și cele comparate	36
4.2.5. Timpul de amprentare și potrivire	38
4.3. DISCUȚIE.....	39
4.4. CONCLUZIE.....	39
CAPITOLUL 5. CONCLUZII. CONTRIBUȚII ORIGINALE. DISEMINAREA REZULTATELOR	40
5.1. CONCLUZII	40
5.2. CONTRIBUȚII ORIGINALE	41
5.3. DISEMINAREA REZULTATELOR.....	42
5.3.1. Publicații științifice bazate pe această teză de doctorat	42
5.3.2. Lucrări prezentate la conferințe științifice bazate pe această teză de doctorat	42
5.3.3. Publicații științifice bazate pe rezultatele obținute prin participarea la echipe de cercetare din afara domeniului de aplicare al tezei de doctorat	43
BIBLIOGRAFIE	44
MULȚUMIRI	48

LISTA FIGURILOR

Figura1.1 . Diagrama fluxului revizuirii sistematice a literaturii, conform ghidurilor PRISMA 2020.....	11
Figura1.2.	12
Figura1.3. Numărul articolelor selectate în fiecare țară.....	12
Figura1.4. Numărul de lucrări care menționează fiecare tehnologie.....	13
Figura2.1 . Localizarea zonei de studiu și caracteristicile eșantionului utilizat în acest studiu: (a) hartă la nivel național care arată locul de studiu (punct roșu), (b) bușteni din eșantion utilizați pentru măsurare (c) statistici sumare ale eșantionului, cu estimări de volum bazate pe metoda lui Huber.	17
Figura2.2. Descrierea fluxurilor de lucru de testare implementate pe teren.	17
Figura2.3. Diagrame Bland–Altman ale variabilelor comparate pentru estimările algoritmului: (a) comparație între VAPP1_S1R1 și VAPP2_S1R1; (b) comparație între VAPP1_S1R2 și VAPP2_S1R2; (c) comparație între VAPP1_S2R1 și VAPP2_S2R1; (d) comparație între VAPP1_S2R2 și VAPP2_S2R2.	19
Figura2.4. Diagrame Bland–Altman ale variabilelor comparate între replici: (a) comparație între VAPP1_S1R1 și VAPP1_S1R2; (b) comparație între VAPP2_S1R1 și VAPP2_S1R2; (c) comparație între VAPP1_S2R1 și VAPP1_S2R2; (d) comparație între VAPP2_S2R1 și VAPP2_S2R2.....	20
Figura2.5. Diagrame Bland–Altman ale variabilelor comparate între evaluatori: (a) comparație între VAPP1_S1R1 și VAPP1_S1R2; (b) comparație între VAPP2_S1R1 și VAPP2_S1R2; (c) comparație între VAPP1_S2R1 și VAPP1_S2R2; (d) comparație între VAPP2_S2R1 și VAPP2_S2R2.....	22
Figura3.1. Diferențele semnate între VMA și VTS ($\Delta VMA-VTS, m^3$), reprezentate grafic în funcție de VMA (m^3), indică o tendință moderată în ceea ce privește magnitudinea ($r = 0,22$) în raport cu magnitudinea VMA. Notă: Legenda numerică indică categoriile de magnitudine în VMS (m^3), iar punctele de date sunt scalate în funcție de magnitudinea diferențelor semnate.....	26
Figura3.2. Diferențele semnate între VMA și VMI ($\Delta VMA-VMI, m^3$), reprezentate grafic în funcție de VMA (m^3), indică o tendință scăzută a magnitudinii ($r = 0,14$) în raport cu magnitudinea VMA. Notă: Legenda numerică indică categoriile de magnitudine în VMI (m^3), iar punctele de date sunt scalate în funcție de magnitudinea diferențelor semnate.....	26
Figura3.3. Diferențele semnate între VTS și VMI ($\Delta VTS-VMI, m^3$), reprezentate grafic în funcție de VTS (m^3), indică o tendință ridicată a magnitudinii ($r = 0,40$) în raport cu magnitudinea VTS. Notă: Legenda numerică indică categoriile de magnitudine în VMI (m^3), iar punctele de date sunt scalate în funcție de magnitudinea diferențelor semnate.....	27
Figura4.1. Organizarea datelor de imagine. Legenda: TRi - folderul părinte care conține imagini pentru încărcătura de camion i, FO și FA – subfoldere care conțin imaginile originale (OR), cu fundalul eliminat (BR) și cu jurnalul eliminat (LR) realizate la punctele de origine și destinație, respectiv. Notă: FA conținea două instanțe de imagine ale aceleiași încărcături de camion organizate în subfolderele OR, BR și LR.	30
Figura4.2. Proiect experimental care prezintă întrebarea la care se dorește un răspuns, tipul de experimente, seturile de date și regulile utilizate, exemple de imagini și numărul de observații, împreună cu indicatorii de performanță utilizați. Notă: 15 × 15 și 72 × 72 reprezintă numărul de imagini din seturile de date Ref și Com.	31

Figura4.3. Performanța identificării și potrivirii amprentelor digitale în rândul algoritmilor utilizați pentru imagini sursă de calitate scăzută: a, c, e, g – experimente cu rezultate pozitive adevărate, b, d, f, h – experimente cu rezultate fals pozitive, RVP – raportul dintre punctele valide din imaginea de referință și cea comparată, MKR – raportul dintre punctele cheie potrivite și punctele valide din imaginea de referință, MKC – raportul dintre punctele cheie potrivite și punctele valide din imaginea comparată, NMK – numărul de puncte cheie potrivite.	32
Figura4.4. Performanța de amprentare și potrivire a algoritmilor utilizați pentru imagini cu o calitate similară: a, c, e, g – experiment cu rezultate pozitive adevărate, b, d, f, h – experimente cu rezultate fals pozitive, RVP – raportul dintre punctele valide din imaginea de referință și cea comparată, MKR – raportul dintre punctele cheie potrivite și punctele valide din imaginea de referință, MKC – raportul dintre punctele cheie potrivite și punctele valide din imaginea comparată, NMK – numărul de puncte cheie potrivite.....	33
Figura4.5. Performanța de amprentare și potrivire a algoritmilor utilizați pentru imagini sursă de calitate scăzută: a, c, e, g – experiment cu rezultate pozitive reale, cu jurnalele lipsă din imaginile de referință, b, d, f, h – experiment cu rezultate pozitive reale, cu bușteni lipsă în imaginile comparate, RVP – raportul dintre punctele valide din imaginea de referință și cea comparată, MKR – raportul dintre punctele cheie potrivite și punctele valide din imaginea de referință, MKC – raportul dintre punctele cheie potrivite și punctele valide din imaginea comparată, NMK – numărul de puncte cheie potrivite.	35
Figura4.6. Performanța de amprentare și potrivire a algoritmilor utilizați pentru imagini cu o calitate similară: a, c, e, g – experiment cu rezultate pozitive reale, cu bușteni lipsă în imaginile de referință, b, d, f, h – experiment cu rezultate pozitive reale, cu jurnale lipsă în imaginile comparate, RVP – raportul dintre punctele valide din imaginea de referință și cea comparată, MKR – raportul dintre punctele cheie potrivite și punctele valide din imaginea de referință, MKC – raportul dintre punctele cheie potrivite și punctele valide din imaginea comparată, NMK – numărul de puncte cheie potrivite.....	37
Figura4.7. Timpul de amprentare și potrivire: a – experiment cu rezultate pozitive reale cu imagini sursă de calitate scăzută, b – experiment cu rezultate pozitive false cu imagini sursă de calitate scăzută, c – experiment cu rezultate pozitive reale cu imagini sursă de calitate scăzută cu jurnalele lipsă, d – experiment cu rezultate pozitive reale cu imagini sursă de calitate scăzută cu jurnalele în surplus, e – experiment cu rezultate pozitive reale cu imagini de aceeași calitate, f – experiment fals pozitiv cu imagini de aceeași calitate, g – experiment adevărat pozitiv cu imagini de aceeași calitate și cu bușteni lipsă în imaginile sursă, h – experiment adevărat pozitiv cu imagini de aceeași calitate și cu bușteni în plus în imaginile sursă.....	38

LISTA TABELELOR

Tabelul1.1 . Utilizarea celor mai populare tehnologii, eficiența acestora și caracteristicile lor.	14
Tabelul d2.1	18
Tabelul2.2 . Statistici sumare ale tendințelor din datele dintre replici	20
Tabelul2.3 . Statistici sumare ale tendințelor datelor între evaluatori.....	21
Tabelul2.4 . Statistici sumare ale tendințelor din datele digitale comparativ cu estimările bazate pe evaluări manuale.	23
Tabelul2.5 . Indicatori de eroare ai datelor digitale în comparație cu estimările manuale.	23
Tabelul2.6 . Statistici descriptive ale datelor privind consumul de timp.	24
Tabelul3.1 . Rezultate principale privind indicatorii de eroare luați în considerare în studiu.....	27
Tabelul3.2 . Distribuția diferenței semnate pe categorii de mărime.	28

LISTA ABREVIERILOR ȘI ACRONIMELOR

AKAZE: Accelerated-KAZE

Android: Sistem de operare mobil

Aplicație: Aplicație

Bias: Diferența semnată între măsurătorile pereche

Bluetooth: Tehnologie de comunicații fără fir pe distanțe scurte

BRISK: Puncte cheie binare robuste, invariante și scalabile

CNN: Rețea neuronală convoluțională

DBH: Diametru la înălțimea pieptului

DBSCAN: Gruparea spațială bazată pe densitate a aplicațiilor cu zgomot

ADN: Acid dezoxiribonucleic

EUTR: Regulamentul Uniunii Europene privind lemnul

FREAK: Punct cheie rapid al retinei

FSC: Consiliul pentru Administrarea Pădurilor

GIS: Sistem de informații geografice

GPS: Sistem de poziționare globală

HITMAN: Instrument acustic pentru detectarea rigidității lemnului

Formula lui Huber (VH): Estimarea volumului folosind metoda lui Huber

KAZE: Detector de puncte cheie bazat pe difuzie neliniară

LiDAR: Detectarea și măsurarea distanței cu ajutorul luminii

MAE: Eroare absolută medie

ML: Învățare automată

ORB: FAST orientat și BRIEF rotit

PEFC: Programul pentru recunoașterea certificării forestiere

PRISMA: Elemente de raportare preferate pentru revizuri sistematice și meta-analize

QR: Răspuns rapid

RFID: Identificare prin radiofrecvență

RMSE: Eroarea medie pătratică

SIFT: Transformare a caracteristicilor invariante la scară

SINTETIC: Identificare cu un singur element pentru producția, protecția și gestionarea pădurilor

SURF: Caracteristici robuste accelerate

INTRODUCERE

Relevanța soluțiilor inteligente pentru trasabilitatea și aprovizionarea cu lemn

Operațiunile forestiere implică numeroase activități legate de gestionarea, recoltarea, transportul și prelucrarea resurselor de lemn în cadrul lanțurilor de aprovizionare (Baskent et al., 2008; Abbas et al., 2014; Braghiroli & Passarini, 2020). Numărul de etape implicate, precum și al actorilor și părților interesate care participă la aceste procese sporește riscul pierderii datelor și al practicilor ilegale (Sundström, 2016). Originea lemnului devine din ce în ce mai importantă, întrucât autoritățile de reglementare solicită garanții că lemnul provine din gestionarea durabilă a pădurilor (Sikkema et al., 2014). De exemplu, Regulamentul european privind lemnul (EUTR), precum și cerințele consumatorilor privind lemnul recoltat în mod durabil (Holopainen et al., 2015) încurajează sistemele de urmărire a fluxurilor de lemn (Laporte & Vandenhaute, 2016). Trasabilitatea a devenit un nou standard pentru desfășurarea activităților comerciale și tranzacționarea lemnului pe piețele globale (Tzoulis & Andreopoulou, 2013). În plus, sistemele actuale de trasabilitate și tehnicile de prelucrare a datelor pot oferi un compromis între durabilitate și creșterea producției prin gestionarea pădurilor și o logistică eficientă a lemnului în aval. Acest lucru asigură că produsele din lemn sunt extrase într-un mod prietenos cu clima (Mensah et al., 2022; Creutzburg & Lieberherr, 2021). Urmărirea lemnului, prin crearea unui sistem de informații care detectează și localizează lemnul și produsele din lemn provenite din surse legale, adaugă valoare produselor din lemn (Kaulen et al., 2023).

Trasabilitatea înseamnă „capacitatea de a urmări orice produs pe parcursul tuturor etapelor de producție, prelucrare și distribuție” (Laporte & Vandenhaute, 2016; Godbout et al., 2018; Kaulen et al., 2023). Până în prezent, sistemele de trasabilitate utilizează metode și tehnici tradiționale, precum ștampilarea, perforarea, marcarea cu culori, etichetele din plastic și codurile de bare. Aceste metode sunt însă afectate de factori de mediu și, de asemenea, nu sunt sigure (Tzoulis & Andreopoulou, 2013). Pe de altă parte, certificările de origine emise de Forest Stewardship Council (FSC) și de Programme for the Endorsement of Forest Certification Schemes (PEFC) domină în continuare piața, dar sunt predispuse la inexactități și lacune de securitate care trebuie remediate prin utilizarea noilor tehnologii (Kaulen et al., 2023). În plus, sistemele manuale și pe suport de hârtie, verificarea vizuală și instrumentele de măsurare manuală sunt încă utilizate în silvicultură în multe regiuni din întreaga lume. De exemplu, instrumentele standard de teren, precum șublerile și benzile forestiere (Kadzuwa & Missanjo, 2022), sunt încă utilizate pentru inventarele forestiere și industriale pentru a estima volumul de lemn (Gülci et al., 2023), iar comparațiile vizuale actualizate, împreună cu documentele de transport, sunt utilizate pentru a verifica încărcăturile camioanelor la punctele de încărcare și descărcare (Kravets et al., 2017). Acestea sunt adesea vulnerabile la erori umane, în special într-un mediu de lucru intens, fie în pădure, fie în industrie, care consumă în mare parte eforturi de muncă și timp (Borz et al., 2022; Borz & Proto, 2022). Aceste limitări evidențiază importanța digitalizării lanțurilor de aprovizionare (Palander et al., 2024); astfel, sunt necesare soluții inteligente automatizate și avansate pentru a sprijini trasabilitatea și aprovizionarea precisă a lemnului în condiții reale de lucru (Pichler et al., 2022). Recent, inovațiile bazate pe tehnologie au deschis noi oportunități pentru îmbunătățirea trasabilității lemnului prin utilizarea colectării de date de mare volum (big data) (Taylor et al., 2020), prelucrarea și transmiterea acestora în timp real și într-un format mai accesibil, care simplifică monitorizarea lanțului de aprovizionare cu lemn (Pichler et al., 2022; Figorilli et al., 2018). De exemplu, dezvoltarea aplicațiilor pentru smartphone-uri a oferit o gamă largă de servicii legate de gestionarea lanțului de aprovizionare

cu lemn (Kärhä et al., 2019; Odstrčil et al., 2024). Smartphone-urile echipate cu scanere LiDAR, senzori și camere RGB de înaltă calitate sunt utile pentru fotogrammetria de proximitate și teledetecție (Magnuson et al., 2024), care sunt utilizate în mod eficient pentru a măsura variabile precum volumul de , diametrul la înălțimea pieptului (DBH), înălțimea arborelui, aria bazală (BA) volumul și datele biometrice ale buștenilor, oferind astfel posibilitatea de a îmbunătăți acuratețea și eficiența inventarelor forestiere (Borz et al., 2022; Niță & Borz, 2023; Tatsumi et al., 2023). Cu toate acestea, pentru a realiza o digitalizare la standarde înalte în silvicultură, aplicațiile mobile trebuie să îndeplinească mai multe cerințe. Acestea includ funcționarea precisă în timp util și capacitatea de a stoca, prelucra și transfera date instantaneu, cea mai importantă fiind integrarea cu alte tehnologii de trasabilitate a lemnului (Figorilli et al., 2018; Häkli et al., 2013; He & Turner, 2021), care iau în considerare deficiențele din multe aplicații (Borz et al., 2022; Niță & Borz, 2023; Tatsumi et al., 2023). Urmărirea lemnului de-a lungul lanțului de aprovizionare folosind tehnologii avansate nu este un concept nou. În paralel cu metodele tradiționale, au fost utilizate de-a lungul timpului mai multe abordări, fiecare având avantajele și limitările sale, cum ar fi codurile de răspuns rapid (QR) care sunt imprimate pe capetele buștenilor, camioanelor și produselor din lemn, pentru a stoca informații legate de specie, zona de recoltare etc. Chiar dacă această metodă este considerată una cu costuri reduse, citirea codurilor poate fi dificilă (Dykstra et al., 2002; Häkli et al., 2013; Tzoulis și Andreopoulou, 2013). Tehnologia RFID a câștigat o atenție semnificativă ca metodă practică și scalabilă pentru urmărirea lemnului (Kaakkurivaara, 2019; Picchi, 2020), oferind un sistem automat de identificare a buștenilor care este mai puțin susceptibil la factorii de mediu și asigură o lizibilitate ridicată, deoarece undele radio nu necesită o linie de vedere și pot penetra majoritatea materialelor (Häkli et al., 2013). Etichetele RFID pot fi plasate pe fiecare buștean, precum și pe șasiul vehiculului, motor și alte părți. Acest lucru face posibilă urmărirea buștenilor în timp real pe măsură ce sunt transportați (Tsioras et al., 2022). Însă etichetele și cititoarele RFID sunt încă destul de scumpe (Häkli et al., 2013; Pichler et al., 2017). Amprentarea ADN poate identifica sursa lemnului prin analiza genotipurilor probelor de lemn (Tzoulis și Andreopoulou, 2013). Deși această metodă experimentală s-a dovedit fiabilă ca instrument de verificare, implementarea ei este adesea prea costisitoare și dificilă (Boner et al., 2019). Integrarea tehnologiei sistemelor de informații geografice (GIS) cu dispozitivele de poziționare globală (GPS) instalate în majoritatea camioanelor a permis urmărirea cu succes a mișcării lemnului în timp real (Devlin et al., 2008). Cu toate acestea, un obstacol în calea urmăririi prin GPS este faptul că semnalele pot fi obstructionate în zonele cu păduri dense (Abdi et al., 2014), iar GPS-ul în sine nu este complet precis pentru certificarea conformității încărcăturii camioanelor. În plus, progresele înregistrate în tehnicile de învățare automată (ML), învățare profundă (DL) și viziune computerizată (CV) s-au dovedit a fi instrumente puternice pentru identificarea lemnului. Rețelele neuronale convoluționale (CNN) și algoritmi de detectare a caracteristicilor (Ji et al., 2024; Martinetto et al., 2025) au fost utilizați pentru a identifica și a compara imagini ale scândurilor tăiate, produselor din lemn și buștenilor secționați transversal (Pahlberg et al., 2015; Hu et al., 2015; Sun et al., 2022; Hwang et al., 2022; Ji et al., 2024; Martinetto et al., 2025) relevante pentru diverse industrii bazate pe lemn. Aceste instrumente utilizează date vizuale, eliminând necesitatea dispozitivelor portabile în unele aplicații, dar performanța lor depinde de calitatea datelor (Sun et al., 2021). Această teză își propune să dezvolte și să evalueze noi soluții inteligente pentru trasabilitatea și aprovizionarea cu lemn, având în vedere necesitatea unor lanțuri de aprovizionare cu lemn legale, responsabile, transparente și durabile. Dezvoltarea acestor

soluții inteligente necesită seturi de date de mari dimensiuni, incluzând măsurători de referință și digitale, înregistrări de imagini, scanare mobilă, date privind calitatea și documentație de-a lungul etapelor lanțului de aprovizionare pentru o validare robustă și o analiză comparativă. Mai mult, integrarea acestor tehnologii în sistemele de trasabilitate din fluxurile de lucru forestiere și industriale trebuie să abordeze unele constrângeri practice în condiții reale de lucru.

Scop și obiective

Scopul acestei teze este de a îmbunătăți sistemele de trasabilitate și aprovizionare cu lemn de-a lungul lanțului de aprovizionare prin testarea și evaluarea unor instrumente și abordări noi, cum ar fi smartphone-urile cu aplicații și instrumentele digitale. În plus, teza dezvoltă și introduce noi metode bazate pe viziune computerizată și învățare automată. Recunoscând limitele practicilor convenționale, această cercetare abordează provocările asociate sistemului actual de trasabilitate prin dezvoltarea de noi metode care pot îmbunătăți transparența, eficiența, productivitatea și calitatea colectării datelor în lanțul de aprovizionare cu lemn. Obiectivele specifice ale tezei au fost următoarele:

O1. Realizarea unei analize cuprinzătoare a stării actuale a procedurilor și tehnologiilor existente utilizate pentru trasabilitatea lemnului și gestionarea durabilă a transportului, precum și a rezultatelor adoptării acestor dezvoltări, precum și identificarea limitărilor și lacunelor actuale pentru inovații viitoare.

O2. Evaluarea performanței aplicației TreeScanner (TS), un smartphone bazat pe tehnologia LiDAR pentru estimarea volumului buștenilor;

O3. Evaluarea preciziei tehnologiei Timspec® a CIND utilizate în fabricile de cherestea pentru estimarea volumului solid de lemn rotund din încărcăturile camioanelor;

O4. Introducerea utilizării mai multor algoritmi de detectare a caracteristicilor și evaluarea performanței acestora pentru identificarea încărcăturilor de camioane și corelarea acestora pe baza imaginilor realizate la destinație;

O5. Diseminarea rezultatelor.

Organizarea tezei

Teza de doctorat este organizată în capitole de tip manuscris, fiecare concentrându-se pe următoarele subiecte:

Capitolul 1: Trasabilitatea lemnului și gestionarea durabilă a transportului: o trecere în revistă a tehnologiilor și procedurilor

Acest studiu a prezentat o trecere în revistă sistematică a literaturii de specialitate, care a explorat procedurile și tehnologiile actuale utilizate pentru trasabilitatea lemnului și gestionarea durabilă a transportului. Analiza a examinat 125 de lucrări științifice publicate între 1993 și 2023, care au răspuns la întrebări de cercetare esențiale, precum: care sunt avantajele acestor proceduri și tehnologii? Care sunt rezultatele de mediu, economice și sociale ale adoptării lor și, în final, care sunt provocările implementării tehnologiei bazate pe trasabilitate în sectorul forestier?, punând bazele pentru cercetări viitoare.

Capitolul 2: Precizia unei noi aplicații de măsurare a buștenilor bazată pe smartphone, aflată în faza de prototipare

Acest studiu a evaluat performanța aplicației Tree Scanner (TS), o aplicație pentru smartphone bazată pe LiDAR aflată în faza de prototipare, pentru estimarea directă a volumului buștenilor. Un set de date de 155 de bușteni de conifere a fost măsurat atât manual, cât și digital de către doi operatori. Fiecare operator a efectuat măsurători repetate pentru a verifica fiabilitatea intra- și inter-utilizator. Aplicația TS a estimat volumele utilizând două densități de eșantionare, 0,5 m și 0,1 m.

Capitolul 3: Măsurarea lemnului la poarta fabricii: un studiu comparativ pentru evaluarea preciziei unui sistem digital de ultimă generație de măsurare a încărcăturii camioanelor

Studiul investighează precizia sistemului digital CIND Timspec® în estimarea volumului de lemn rotund din încărcăturile camioanelor la poarta fabricii de cherestea. A fost efectuată o evaluare cuprinzătoare utilizând un set de date de 1.292 de încărcături de camioane, comparând măsurătorile CIND cu datele obținute prin măsurători manuale efectuate în pădure și măsurătorile Microtec® efectuate în curtea fabricii de cherestea.

Capitolul 4: Trasabilitatea încărcăturilor de camioane: Performanța diferitelor algoritmi de potrivire a imaginilor și perspective pentru aplicații online

Acest studiu prezintă utilizarea mai multor algoritmi de detectare a caracteristicilor — SURF, SIFT, ORB, AKAZE, BRISK și FREAK — pentru identificarea încărcăturilor de camioane și potrivirea acestora pe baza imaginilor realizate la destinație. Au fost concepute și realizate opt experimente constând într-un total de 2.084 de comparații de imagini pentru a evalua performanța algoritmilor.

CHAPTER 1. TRASABILITATEA LEMNULUI ȘI GESTIONAREA TRANSPORTULUI DURABIL: O ANALIZĂ A TEHNOLOGIILOR ȘI PROCEDURILOR

1.1. MATERIALE ȘI METODE

În cadrul acestei cercetări, s-a adoptat o analiză metodică a tehnicilor și proceselor utilizate în urmărirea lemnului și transportul durabil al acestuia. Pentru a spori calitatea analizei, s-a utilizat tehnica PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses) pentru analize sistematice. Conform metodologiei PRISMA, 125 de lucrări au fost incluse în studiu, așa cum se arată în **Figura 1.1**.

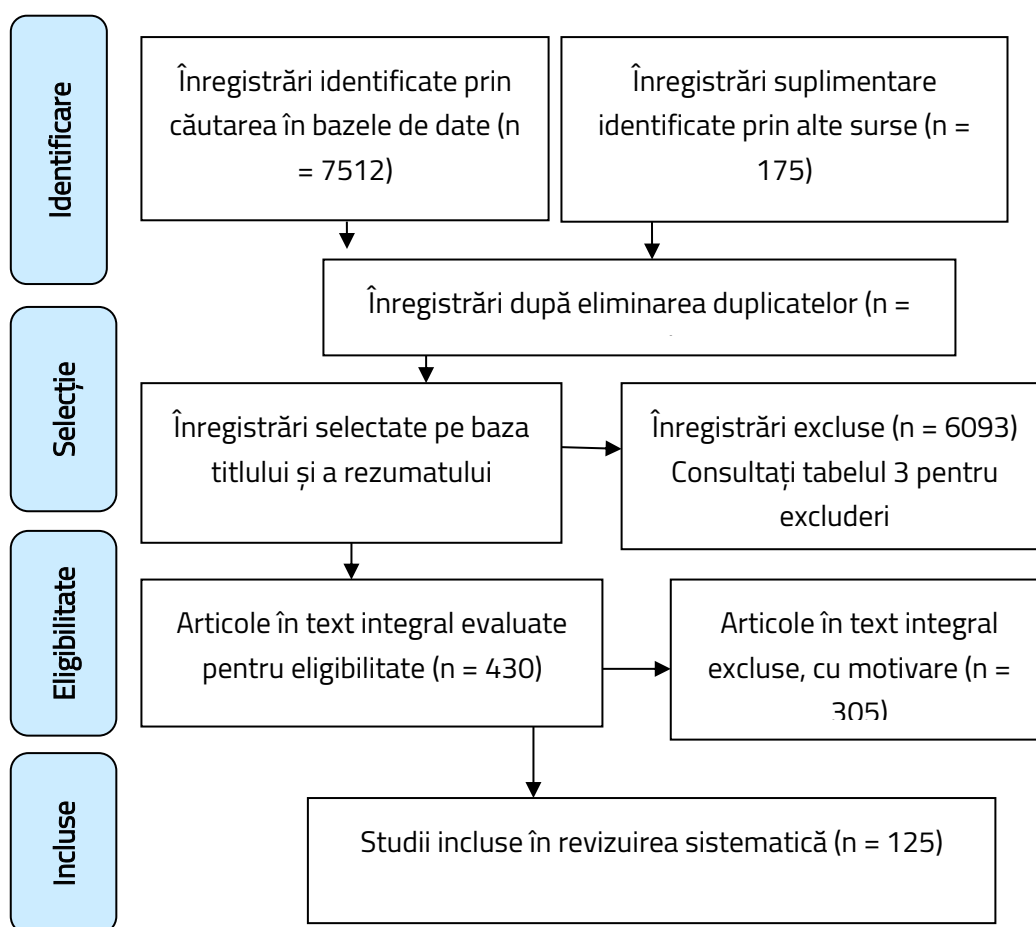


Figura 1.1 . Diagrama fluxului revizuirii sistematice a literaturii, în conformitate cu ghidurile PRISMA 2020.

1.2. REZULTATE ȘI DISCUȚII

1.2.1. Prezentare generală a studiilor

Pe baza rezultatelor acestei revizuirii sistematice a literaturii, concluziile sunt prezentate în această secțiune. Revizuirea a inclus 125 de articole publicate în 87 de reviste academice, trei teze publicate, 32 de lucrări de conferință, o carte și două rapoarte. În conformitate cu obiectivul acestei revizuirii,

articolele selectate au fost clasificate pe baza diferitelor atribute, cum ar fi anul publicării, țările din care provin articolele, tehnologia utilizată, rezultatele și concluziile care păreau relevante.

Figura 1.2 prezintă distribuția pe ani a celor 125 de lucrări selectate, din 1993 până în 2023.

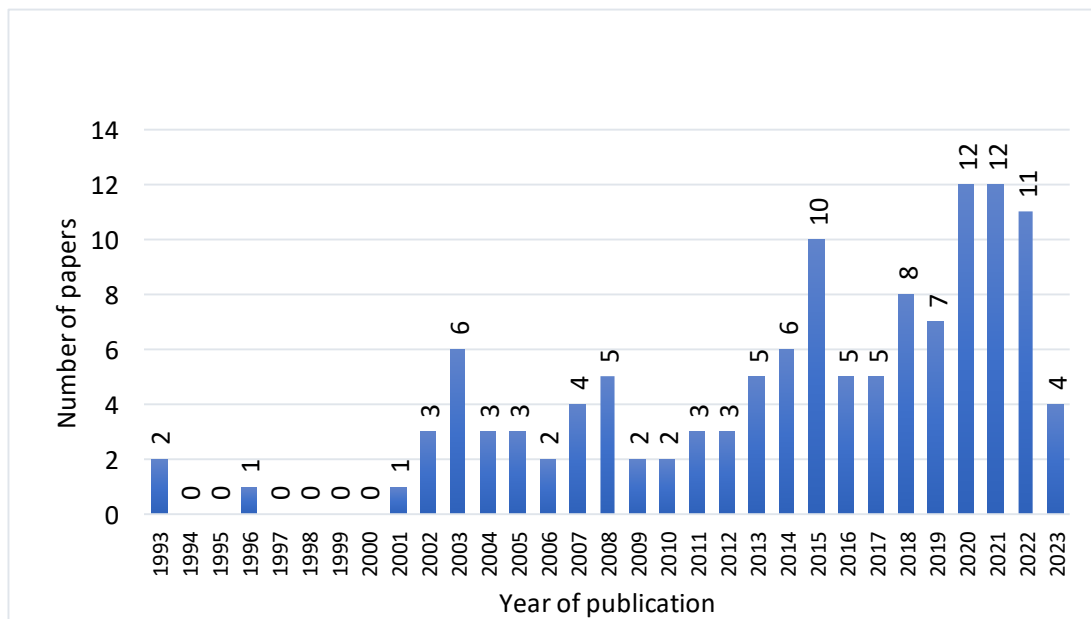


Figura1 .2 . Distribuția articolelor clasificate în funcție de anul publicării.

Figura 1.3 prezintă țările din care provin articolele selectate. Sursele au fost cuprinzătoare la nivel mondial și au inclus Europa, Asia, Africa, America de Sud și America de Nord. **Figura 1.4** ilustrează distribuția articolelor menționând tehnologiile utilizate pentru trasabilitate. Pe baza datelor extrase din studii, tehnologiile predominante identificate în studii au fost RFID, codurile de bare, codurile QR, amprentele ADN și tehnologia blockchain.

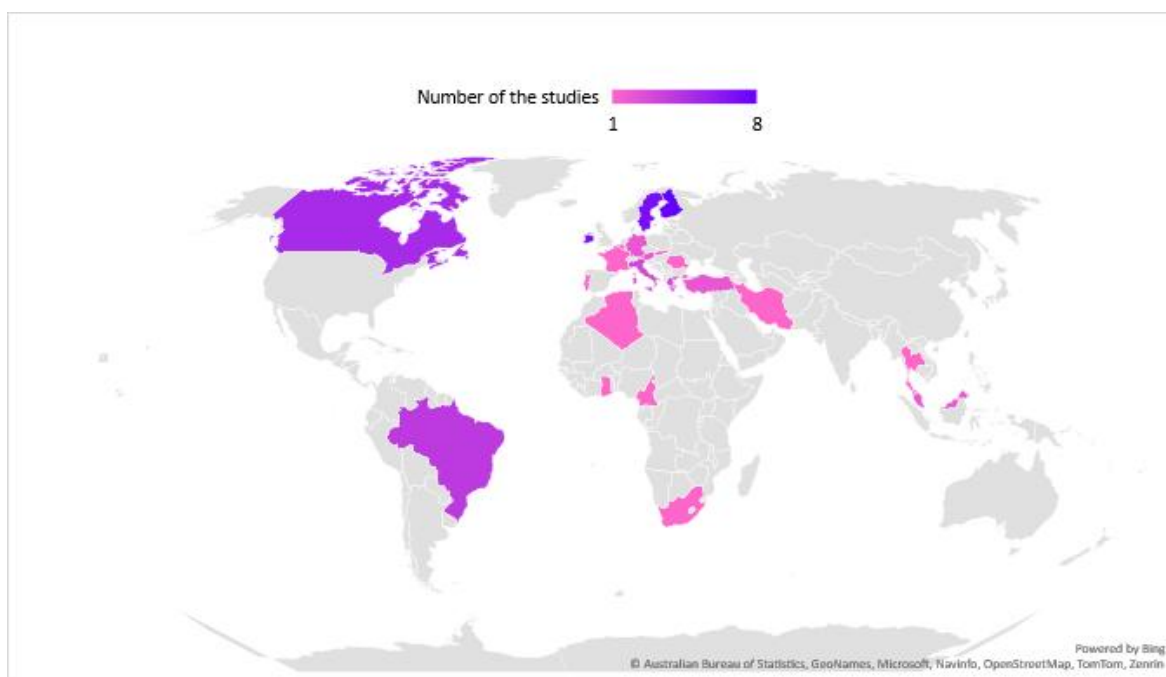


Figura1 .3 . Numărul de lucrări selectate în fiecare țară.

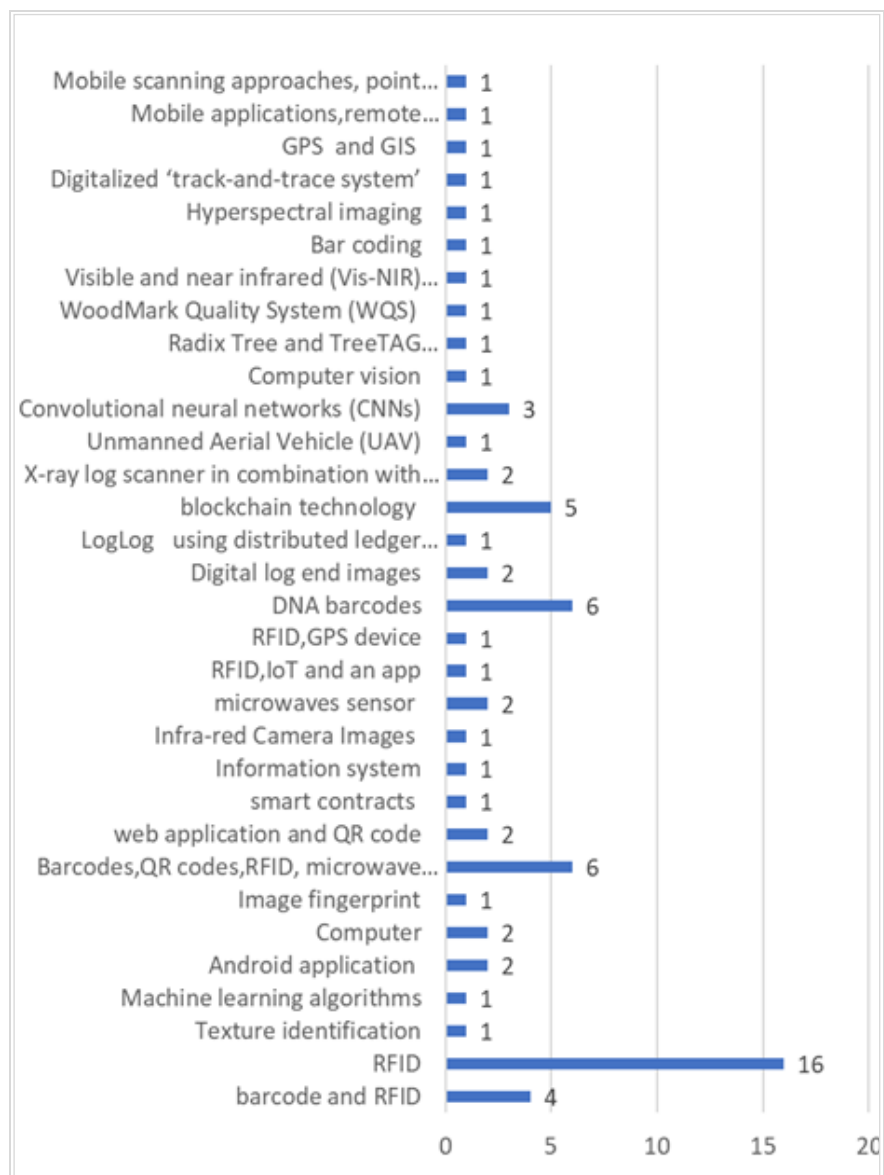


Figura 1 .4 . Numărul de articole care menționează fiecare tehnologie.

Tabelul 1.1 din documentul sursă detaliază utilizarea, eficiența, caracteristicile și provocările acestor tehnologii.

Tabelul 1.1 . Utilizarea celor mai populare tehnologii, eficiența și caracteristicile acestora.

Tehnologie	Utilizare	Eficiență	Caracteristici	Provocări
Ștanțare	Marcarea buștenilor	Mai puțin eficient	Ușor de utilizat	Factori de mediu, nesigur
Vopsea	Marcarea buștenilor	Mai puțin eficient	Ușor de utilizat	Factori de mediu, nesiguri
Marcare inteligentă (sistem de codificare)	Marcarea buștenilor	Mai puțin eficient	Ușor de utilizat	Factori de mediu, nesigur
Cod de bare	Jurnale de urmărire și produse din lemn	Mai puțin eficient	Simplu și ieftin	Nu este sigur
Cod QR	Urmărirea buștenilor și a produselor din lemn	Mai puțin eficient	Ușor de utilizat	Nu este sigur
Amprentarea ADN	Verificarea originii lemnului	Fiabil și eficient	Baza de date cu probe	Costisitor
Senzor cu microunde	Identificarea automată a produselor din lemn	Experimental	Identificarea caracteristicilor lemnului	Experimental
RFID	Identificarea buștenilor și a produselor din lemn	Fiabil și eficient	Greu de falsificat	Scump, dar se preconizează că prețul pe etichetă va scădea
Metoda biometrică	Identificarea buștenilor	Fiabil și eficient	Sigur și de înaltă precizie	Set de date mare
Informare orientată (ORB)	Urmărirea jurnalelor	Fiabil și eficient	Rapid și eficient, comparabil cu o imagine	Set de date mare
Blockchain	Urmărirea jurnalelor și a produselor din lemn	Fiabil și eficient	Date complete și imuabile	Set de date de mari dimensiuni
Aplicația Smart Tree	Colectarea datelor de la marcarea copacilor până la fazele de tăiere	Fiabil și eficient	Identificarea locației copacului prin GPS	Este necesară conexiune la internet

1.2.2. Rezultatele strategice

Importanța gestionării durabile a transporturilor în contextul sustenabilității ecologice și economice pe termen lung subliniază optimizarea logisticii, a tehnologiilor, a sistemelor, a procedurilor și a instrumentelor pentru a realiza economii, a reduce impactul asupra mediului și a spori sustenabilitatea socială (Wilkerson et al., 2008).

1.2.3. Provocările

Rezultatele cercetării demonstrează existența multor obstacole care trebuie depășite pentru a stabili sisteme de trasabilitate fiabile și eficiente cu ajutorul tehnologiei în sectorul lemnului. Astfel de dificultăți apar din cauza unor factori precum costurile, absența infrastructurii necesare, constrângerile de interoperabilitate, problemele legate de gestionarea datelor și confidențialitate, adoptarea și respectarea standardelor sau a legilor, precum și capacitățile necesare din partea persoanelor implicate

în diferite etape ale prelucrării lemnului până la clienții finali d . Depășirea acestor provocări este importantă pentru a asigura adoptarea și utilizarea eficientă a tehnologiei de trasabilitate în sectorul lemnului.

1.3. CONCLUZIE

Constatările demonstrează că trasabilitatea lemnului poate fi îmbunătățită semnificativ în ceea ce privește viteza, acuratețea și fiabilitatea prin utilizarea diverselor tehnologii de-a lungul lanțului de aprovizionare. Aceste progrese tehnologice ajută la gestionarea, monitorizarea și consolidarea trasabilității de la origine până la produsul final, permițând consumatorilor să facă alegeri informate cu privire la produsele din lemn. Acest lucru poate duce la un control mai bun asupra defrișărilor, exploatării forestiere legale și a altor activități ascunse. Deși analiza recunoaște că tehnologiile discutate nu sunt încă operaționale, ea subliniază potențialul acestora de a promova utilizarea responsabilă și durabilă a lemnului.

Beneficiile includ îmbunătățirea calității și diferențierii produselor, respectarea reglementărilor, siguranța lucrătorilor, participarea părților interesate și alegerile etice ale consumatorilor, contribuind la o industrie forestieră durabilă. Documentul discută, de asemenea, limitările și provocările legate de implementarea tehnologiei de trasabilitate, cum ar fi costurile, obstacolele legate de infrastructură (gestionarea datelor, adoptarea și conformitatea, precum și implicarea părților interesate) și alte dezavantaje. Abordarea acestor probleme este crucială pentru viitorul industriei forestiere, deoarece sistemele de trasabilitate vor deschide calea către practici mai durabile și produse din lemn de calitate superioară.

CHAPTER 2. PRECIZIA UNEI NOI APLICAȚII DE MĂSURARE A BUȘTENILOR PE SMARTPHONE ÎN FAZA DE PROTOTIPARE

2.1. MATERIALE ȘI METODE

2.1.1. Descrierea aplicației și datele utilizate în acest studiu

Tree Scanner (denumită în continuare TS) este o aplicație pentru smartphone aflată în prezent în curs de dezvoltare ca parte a proiectului Sintetic (Single Item Identification for Forest Production, Protection, and Management) (<https://sinteticproject.eu/>). Obiectivul acestui proiect este de a valorifica potențialul tehnologiilor digitale în lanțurile de aprovizionare care încă se bazează în mare măsură pe metode manuale.

Aplicația permite utilizatorilor să măsoare datele biometrice ale copacilor și buștenilor, să proceseze și să salveze rezultatele pe dispozitive locale, precum și să transfere și să stocheze date georeferențiate în baze de date dedicate, utilizând tehnologii de ultimă generație de conectare la servere la distanță. Pentru măsurarea buștenilor, aplicația permite utilizatorilor să creeze instanțe de măsurare, să înregistreze diametrele de referință la capetele buștenilor folosind modele de învățare profundă pentru a le recunoaște profilurile și să scaneze buștenii folosind senzori specializați. Pe lângă estimarea volumului de lemn, aplicația este dotată cu alte funcționalități esențiale. Acestea includ conectivitate Bluetooth cu instrumentul acustic HITMAN pentru detectarea rigidității lemnului și un cititor de etichete RFID (identificare prin radiofrecvență) pentru identificarea unică a fiecărui copac sau bucată de lemn.

2.1.2. Locația studiului

Amplasarea locului de măsurare și dispunerea buștenilor au fost alese astfel încât să se limiteze cât mai mult zgomotul de fond, deoarece prezența vegetației de subarbust sau a ierbii ar fi putut genera artefacte în norii de puncte colectați sau obstacole la sol în timpul măsurărilor, ceea ce, la rândul său, ar fi putut afecta fluxul de lucru al aplicației și durata măsurărilor. Grupul de specii a fost, de asemenea, controlat prin includerea în acest studiu doar a buștenilor de conifere, pentru a limita numărul de variabile. Acest studiu a fost realizat în depozitul de bușteni al unei importante companii de prelucrare a lemnului cu sediul în România, care este indicată prin punctul roșu din **Figura 2.1 a**. Compania prelucrează material provenit atât din păduri autohtone, cât și din păduri străine și lucrează, de obicei, cu bușteni scurți, cu lungimi cuprinse între 3 și 4 m. Un lot de bușteni reprezentând o parte din eșantionul utilizat pentru efectuarea măsurărilor este ilustrat în **Figura 2.1 b**, în timp ce statisticile descriptive ale eșantionului, inclusiv estimările de volum bazate pe formula lui Huber, sunt prezentate în **Figura 2.1 c**.

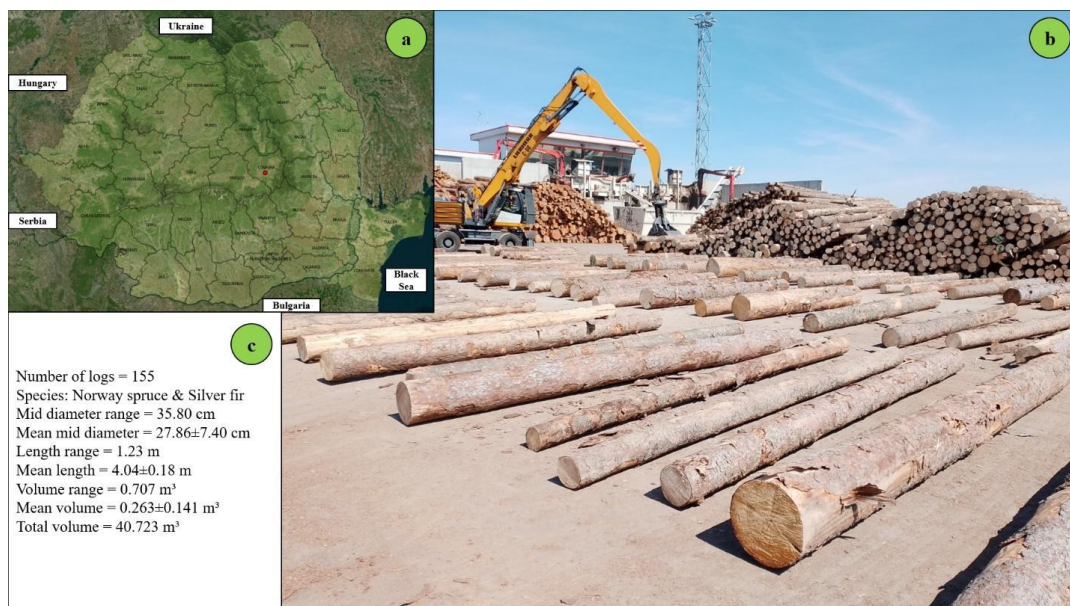


Figura2 .1 . Localizarea zonei de studiu și caracteristicile eșantionului utilizat în acest studiu: (a) hartă la nivel național care arată locul de studiu (punct roșu), (b) bușteni din eșantion utilizați pentru măsurare (c) statistici sumare ale eșantionului, cu estimări de volum bazate pe formula lui Huber.

2.1.3. Proiectarea experimentală și colectarea datelor

Proiectarea acestui studiu a fost în primul rând comparativă, iar datele au fost colectate folosind atât măsurători manuale, cât și digitale. Doi cercetători, denumiți în continuare Subiectul 1 (S1) și Subiectul 2 (S2), au măsurat buștenii așa cum este descris în **Figura 2.2**. Ambii subiecți au efectuat sarcinile de măsurare în două repetări.

Workflow	Persons	Tools used	Measurement accuracy	Measurement steps, work object: single log	Data storage	Data transfer	Office storage	Sample size and variables	Abbreviation of the dataset
Manual measurement	RM	RM	Nearest millimeter Nearest centimeter	1 2 3 4	Paper	Manual	X	155 obs. Ds Dm DI L VH VS	REF
Digital measurement by S1, R1	R1	R1	App default	1 2 3	Smartphone	Bluetooth	X	155 obs. VAPP1_S1R1 VAPP2_S1R1	VAPP1_S1R1 VAPP2_S1R1
Digital measurement by S1, R2	R2	R2	App default	1 2 3	Smartphone	Bluetooth	X	155 obs. VAPP1_S1R2 VAPP2_S1R2	VAPP1_S1R2 VAPP2_S1R2
Digital measurement by S2, R1	R1	R1	App default	1 2 3	Smartphone	Bluetooth	X	155 obs. VAPP1_S2R1 VAPP2_S2R1	VAPP1_S2R1 VAPP2_S2R1
Digital measurement by S2, R2	R2	R2	App default	1 2 3	Smartphone	Bluetooth	X	89 obs. VAPP1_S2R2 VAPP2_S2R2	VAPP1_S2R2 VAPP2_S2R2
Time consumption for manual and digital measurement	All	All	Nearest second	Log 1 Log ... Log n	Paper	Manual	X	155 obs. TM TS1R1 TS1R2 TS2R1 TS2R2	TM TS1R1 TS1R2 TS2R1 TS2R2

Figura 2 .2 . Descrierea fluxurilor de lucru de testare implementate pe teren.

2.2. REZULTATE

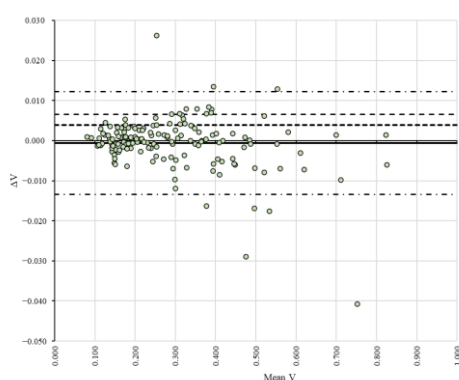
2.2.1. Tendințe, concordanță și diferențe în estimările algoritmului

Tabelul 2.1 rezumă valorile pantelor (C) și coeficienților de determinare (R^2) derivați din modelele de tendință dezvoltate folosind regresia prin origine atât pentru valorile reale, cât și pentru diferențele dintre valorile reale.

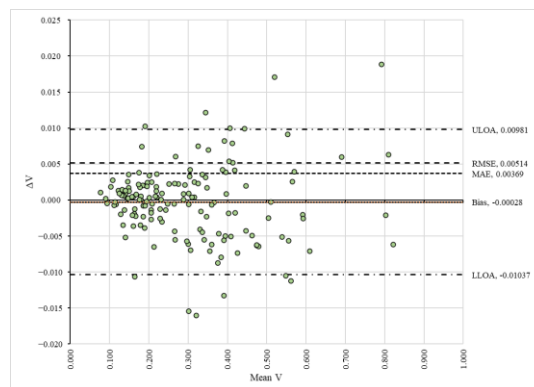
Tabelul 2.1 . Statistici sumare ale tendințelor din datele dintre estimările algoritmului.

Variabilă Variabilă	Variabilă Variabilă	Număr de observații	Parametrii modelului pentru valorile reale	Parametrii modelului pentru diferențe
VAPP2_S1R1	VAPP1_S1R1	155	C = 1,0041 $R^2 = 0,9996$	C = -0,0041 $R^2 = 0,0430$
VAPP2_S1R2	VAPP1_S1R2	155	C = 1,0006 $R^2 = 0,9998$	C = -0,0006 $R^2 = 0,0014$
VAPP2_S2R1	VAPP1_S2R1	155	C = 1,0035 $R^2 = 0,9999$	C = -0,0035 $R^2 = 0,0844$
VAPP2_S2R2	VAPP1_S2R2	89	C = 0,9994 $R^2 = 0,9996$	C = -0,0006 $R^2 = 0,0009$

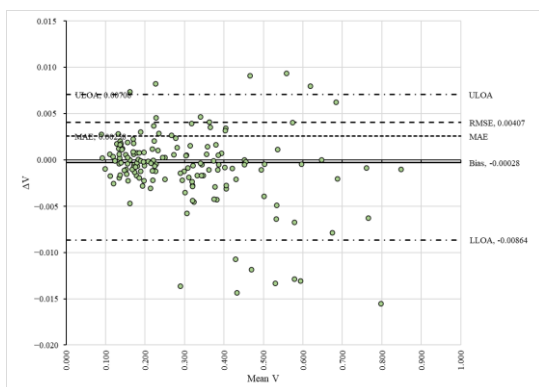
Modelele de regresie dezvoltate pentru diferențele din date relevă două puncte cheie: panta a fost în mod constant aproape de zero, indicând o linie de tendință constantă, iar coeficienții de determinare au sugerat o explicație slabă a variabilității (**Tabelul 2.1**). Concluzii similare sunt prezentate în **Figura 2.3**, unde graficele Bland–Altman indică un grad ridicat de concordanță în estimări, deoarece punctele de date se încadrează în limitele de concordanță și prezintă un interval îngust de valori pentru aceste limite.



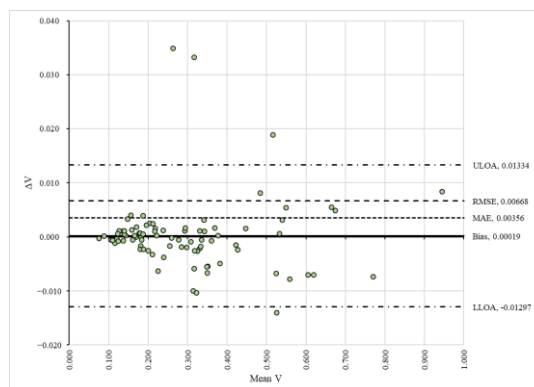
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 2.3 . Diagrame Bland–Altman ale variabilelor comparate pentru estimările algoritmului: (a) comparație între VAPP1_S1R1 și VAPP2_S1R1; (b) comparație între VAPP1_S1R2 și VAPP2_S1R2; (c) comparație între VAPP1_S2R1 și VAPP2_S2R1; (d) comparație între VAPP1_S2R2 și VAPP2_S2R2.

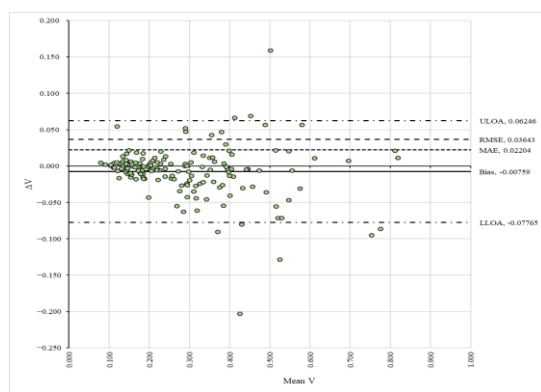
În aceste grafice (Figura 2.3), diferențele semnate (ΔV) între referință (VAPP1_S1R1—panoul (a), VAPP1_S1R2—panoul (b), VAPP1_S2R1—panoul (c), VAPP1_S2R2—panoul (d)) și comparate (VAPP2_S1R1—panoul (a), VAPP2_S1R2—panoul (b), VAPP2_S2R1—panoul (c), VAPP2_S2R2—panoul (d)) sunt reprezentate grafic în raport cu valorile lor medii (Mean V) într-un spațiu delimitat de limitele superioare (ULO) și inferioare (LLO) de concordanță, împreună cu cifre precum abaterea fixă (Bias), eroarea absolută medie (MAE) și eroarea medie pătratică (RMSE).

2.2.2. Tendințe, concordanță și diferențe în replici

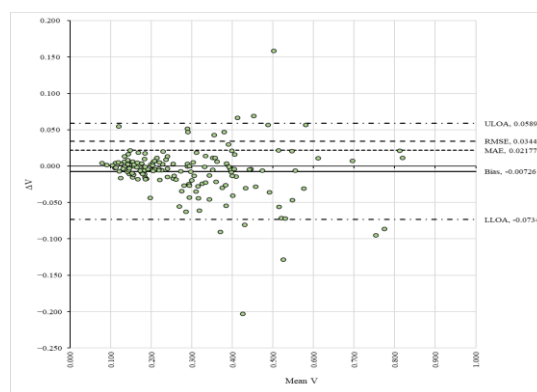
Rezultatele privind tendințele, concordanța și diferențele dintre replici sunt rezumate în mod similar cu cele raportate în secțiunea 3.2. Tabelul 2.2 prezintă valorile pantelor (C) și coeficienților de determinare (R^2), în timp ce figura 2.4 afișează graficele Bland–Altman împreună cu indicatorii de eroare. Panourile (a) până la (d) arată diferențele semnate (ΔV) între referință (VAPP1_S1R1—panoul (a), VAPP2_S1R1—panoul (b), VAPP1_S2R1—panoul (c), VAPP2_S2R1—panoul (d)) și comparate (VAPP1_S1R2—panoul (a), VAPP2_S1R2—panoul (b), VAPP1_S2R2—panoul (c), VAPP2_S2R2—panoul (d)) reprezentate grafic în raport cu valorile lor medii (Mean V) într-un spațiu delimitat de limitele superioare (ULO) și inferioare (LLO) de concordanță, împreună cu cifre precum abaterea fixă (Bias), eroarea absolută medie (MAE) și eroarea medie pătratică (RMSE).

Tabelul 2 . Statistici sumare ale tendințelor datelor între replici.

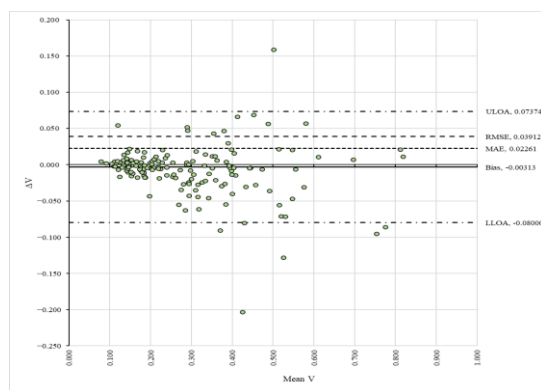
Variabilă Variabilă	Variabilă Variabilă	Număr de observații	Parametrii modelului pentru valorile reale	Parametrii modelului pentru diferențe
VAPP1_S1R2	VAPP1_S1R1	155	$C = 1,0231$ $R^2 = 0,9888$	$C = -0,0231$ $R^2 = 0,0431$
VAPP2_S1R2	VAPP2_S1R1	155	$C = 1,0199$ $R^2 = 0,9900$	$C = -0,0199$ $R^2 = 0,0364$
VAPP1_S2R2	VAPP1_S2R1	89	$C = 1,0117$ $R^2 = 0,9867$	$C = -0,0017$ $R^2 = 0,0098$
VAPP2_S2R2	VAPP2_S2R1	89	$C = 1,0082$ $R^2 = 0,9886$	$C = -0,0082$ $R^2 = 0,0057$



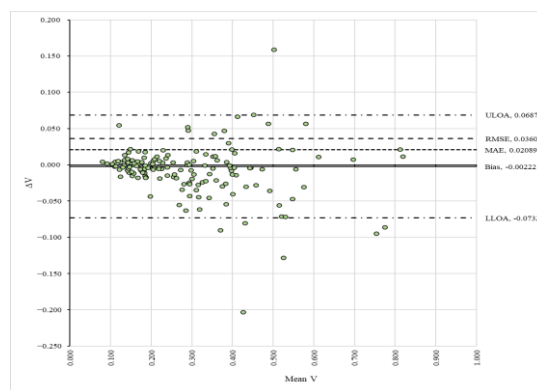
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 2 .4 . Diagrame Bland–Altman ale variabilelor comparate între replici: (a) comparație între VAPP1_S1R1 și VAPP1_S1R2; (b) comparație între VAPP2_S1R1 și VAPP2_S1R2; (c) comparație între VAPP1_S2R1 și VAPP1_S2R2; (d) comparație între VAPP2_S2R1 și VAPP2_S2R2.

2.2.3. Tendințe, concordanță și diferențe între evaluatori

În ceea ce privește consistența între evaluatori, **Tabelul 2.3** rezumă valorile pantelor (C) și coeficienților de determinare (R^2), în timp ce Figura 5 prezintă graficele Bland–Altman alături de metricile de eroare. Panourile (a) până la (d) arată diferențele semnate (ΔV) între referință (VAPP1_S1R1—panoul (a), VAPP2_S1R1—panoul (b), VAPP1_S2R1—panoul (c), VAPP2_S2R1—panoul (d)) și comparate (VAPP1_S1R2—panoul (a), VAPP2_S1R2—panoul (b), VAPP1_S2R2—panoul (c), VAPP2_S2R2—panoul (d)) reprezentate grafic în raport cu valorile lor medii (Mean V) într-un spațiu delimitat de limitele superioare (ULO) și inferioare (LLO) de concordanță, împreună cu cifre precum abaterea fixă (Bias), eroarea absolută medie (MAE) și eroarea pătratică medie (RMSE). Abaterea sistematică a prezentat, în general, valori care indicau diferențe mai mari (**Figura 2.5**), iar eroarea absolută medie (MAE) a fost ușor mai mare în comparație cu consistența intra-evaluator. În plus, eroarea pătratică medie (RMSE) a sugerat prezența unor diferențe de magnitudine mai mare, în special pentru ultimele două seturi de date comparate (**Figura 2.5**).

Tabelul 2.3 . Statistici sumare ale tendințelor în date între evaluatori.

Variabilă Variabilă	Variabilă Variabilă	Număr de observații	Parametrii modelului pentru valorile reale	Parametrii modelului pentru diferențe
VAPP1_S2R1	VAPP1_S1R1	155	$C = 1,0432$ $R^2 = 0,9884$	$C = -0,0432$ $R^2 = 0,1270$
VAPP2_S2R1	VAPP2_S1R1	155	$C = 1,0431$ $R^2 = 0,9898$	$C = -0,0431$ $R^2 = 0,1417$
VAPP1_S2R2	VAPP1_S1R2	89	$C = 1,0321$ $R^2 = 0,9732$	$C = -0,0458$ $R^2 = 0,0737$
VAPP2_S2R2	VAPP2_S1R2	89	$C = 1,0338$ $R^2 = 0,9773$	$C = -0,0102$ $R^2 = 0,0083$

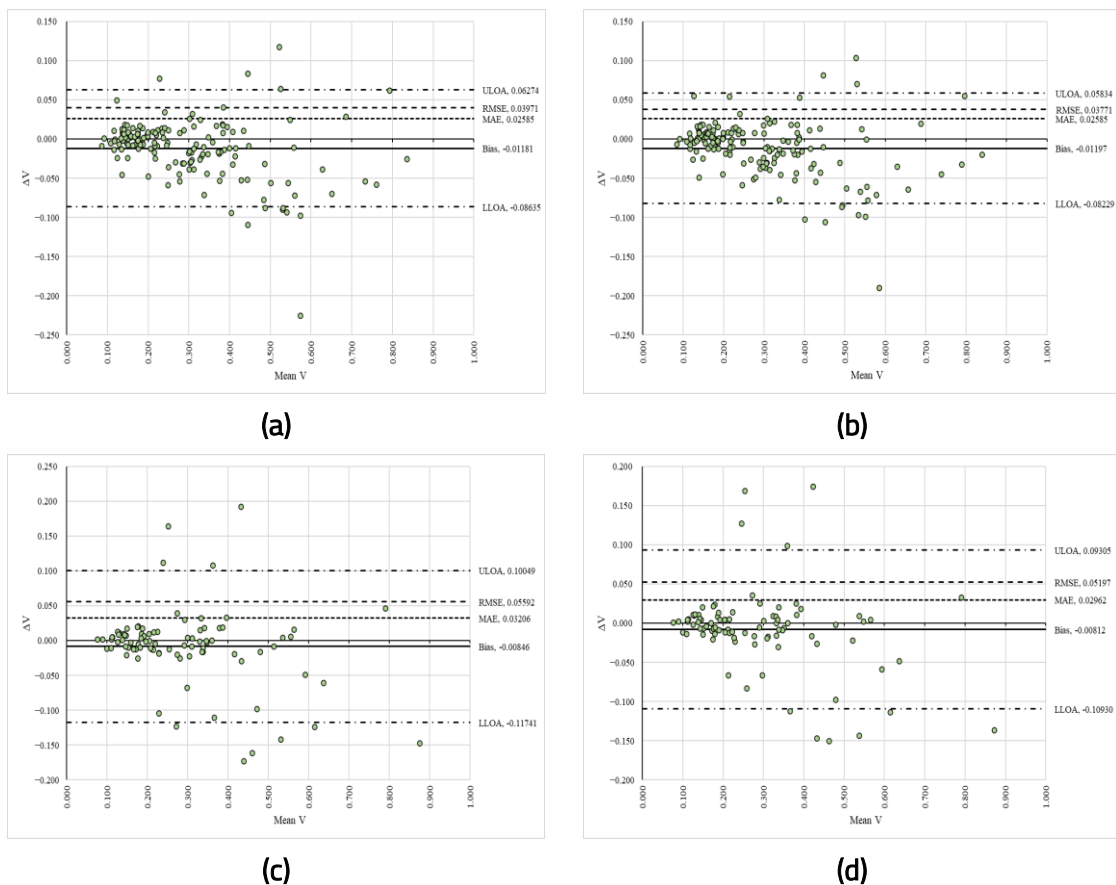


Figura2 .5 . Diagrame Bland–Altman ale variabilelor comparate între evaluatori: (a) comparație între VAPP1_S1R1 și VAPP1_S1R2; (b) comparație între VAPP2_S1R1 și VAPP2_S1R2; (c) comparație între VAPP1_S2R1 și VAPP1_S2R2; (d) comparație între VAPP2_S2R1 și VAPP2_S2R2.

2.2.4. Concordanța dintre datele digitale și cele manuale

La compararea estimărilor digitale cu datele de referință obținute manual, modelele dezvoltate au prezentat pante și coeficienți de determinare variabili, așa cum se prezintă în **Tabelul 2.4**. S-a observat o similitudine a pantelor (C) pentru același subiect și replicare la diferite densități de eșantionare, iar valorile pentru abaterea fixă (Bias), eroarea absolută medie (MAE) și eroarea medie pătratică (RMSE) au demonstrat un comportament similar (**Tabelul 2.5**).

Tabelul 2.4 . Statistici sumare ale tendințelor datelor digitale în comparație cu estimările manuale.

Variabila dependentă	Variabilă independentă	Număr de observații	Parametrii modelului pentru valorile reale
VAPP1_S1R1	VH	155	$C = 1,0924$ $R^2 = 0,9848$
VAPP2_S1R1	VH	155	$C = 1,0978$ $R^2 = 0,9860$
VAPP1_S1R2	VH	155	$C = 1,1236$ $R^2 = 0,9843$
VAPP2_S1R2	VH	155	$C = 1,1248$ $R^2 = 0,9849$
VAPP1_S2R1	VH	155	$C = 1,1509$ $R^2 = 0,9928$
VAPP2_S2R1	VH	155	$C = 1,1551$ $R^2 = 0,9929$
VAPP1_S2R2	VH	89	$C = 1,1659$ $R^2 = 0,9806$
VAPP2_S2R2	VH	89	$C = 1,1664$ $R^2 = 0,9824$

Tabelul 2.5 . Indicatori de eroare ai datelor digitale în comparație cu estimările manuale.

Variabila dependentă	Variabilă independentă	Număr de observații	Abatere	MAE	RMSE
VAPP1_S1R1	VH	155	-0,0286	0,0353	0,0489
VAPP2_S1R1	VH	155	-0,0292	0,0357	0,0487
VAPP1_S1R2	VH	155	-0,0362	0,0406	0,0559
VAPP2_S1R2	VH	155	-0,0364	0,0405	0,0557
VAPP1_S2R1	VH	155	-0,0404	0,0430	0,0536
VAPP2_S2R1	VH	155	-0,0412	0,0437	0,0546
VAPP1_S2R2	VH	89	-0,0417	0,0495	0,0668
VAPP2_S2R2	VH	89	-0,0416	0,0492	0,0654

2.2.5. Eficiența timpului

Principalele statistici descriptive pentru datele privind consumul de timp sunt prezentate în **Tabelul 2.6**. Pe baza valorii mediane, consumul de timp pentru măsurătorile manuale a fost mai mare cu 7 s per jurnal. În plus, coeficientul de variație (**Tabelul 2.6**) a indicat o dispersie mai mare în setul de date privind consumul de timp manual, comparativ cu măsurătorile digitale.

Tabelul 2.6 . Statistici descriptive ale datelor privind consumul de timp.

Variabilă	Valoare minimă	Valoare maximă	Valoarea medie	Valoarea mediană	Coeficient de variație
TM (s)	21	89	31,11	29,00	25,19
Bancomat(e)	17	29	20,94	21,00	10,22

2.3. DISCUȚIE

Acest studiu a evaluat performanța aplicației Tree Scanner (TS), un instrument pentru smartphone bazat pe LiDAR, în faza de prototipare pentru estimarea volumului buștenilor. Rezultatele sunt promițătoare, indicând potențialul aplicației ca alternativă precisă, fiabilă și eficientă la metodele manuale tradiționale, deși există câteva considerente și limitări. Aplicația TS a demonstrat un grad ridicat de precizie în estimarea volumelor buștenilor în comparație cu datele de referință manuale evaluate folosind formula lui Huber. Concordanța puternică, evidențiată de valorile R^2 care depășesc în mod constant 0,98 și de un RMSE global scăzut (sub $0,067 \text{ m}^3$), cu o subestimare sistematică minoră (Bias aprox. $-0,0417 \text{ m}^3$), poziționează aplicația TS în mod favorabil față de alte soluții mobile.

2.4. CONCLUZIE

Acest studiu a avut ca scop evaluarea performanței prototipului aplicației Tree Scanner (TS), o aplicație pentru smartphone echipată cu LiDAR, pentru estimarea directă a volumului buștenilor. Rezultatele demonstrează că aplicația TS este un instrument de măsurare digital promițător, prezentând o concordanță puternică cu metodele manuale convenționale, oferind în același timp o îmbunătățire semnificativă a eficienței în timp. Aplicația a menținut o precizie constantă și o fiabilitate ridicată la două densități de eșantionare diferite (0,1 m și 0,5 m) și între diferiți utilizatori. Aplicația TS reprezintă un progres notabil, oferind estimări instantanee ale volumului direct pe un dispozitiv mobil, simplificând colectarea datelor pe teren. Ușurința sa de utilizare de către un singur operator și designul său care integrează funcții pentru conectivitatea dispozitivelor Bluetooth, accesul la serverul la distanță și potențialul de identificare a speciilor o poziționează ca o componentă valoroasă pentru îmbunătățirea operațiunilor forestiere și integrarea în sisteme cuprinzătoare de trasabilitate a lemnului. Cu toate acestea, fiind un prototip evaluat în condiții controlate, sunt esențiale cercetări suplimentare. Lucrările viitoare trebuie să se concentreze pe evaluarea performanței și robusteții aplicației TS în medii forestiere diverse și dificile din lumea reală și pe o varietate mai largă de specii de arbori și nereguli ale buștenilor.

CHAPTER 3. MĂSURAREA LEMNULUI LA POARTA FABRICII: UN STUDIU COMPARATIV PENTRU EVALUAREA PRECIZIEI UNUI SISTEM DIGITAL DE ULTIMĂ GENERAȚIE DE MĂSURARE A ÎNCĂRCĂTURII CAMIOANELOR

3.1. MATERIALE ȘI METODE

3.1.1. Sursele de date

Un set mare de date a fost compilat la sediul companiei de la începutul lunii martie până la sfârșitul lunii iunie 2022. Acest set de date a inclus trei măsurători efectuate pe un total de 1.300 de camioane. Prima măsurătoare a fost efectuată manual (denumită în continuare VMA, m³) la locul de încărcare a camioanelor din pădure, de către persoanele responsabile de astfel de sarcini, inclusiv contractanții de recoltare și transportatorii. Acest personal are obligația, conform legislației române relevante, de a măsura și de a raporta rezultatele măsurării și clasificării lemnului în sistemul național de trasabilitate înainte de transport (Ministerul Mediului, Apelor și Pădurilor, 2021). Datele raportate în sistemul de trasabilitate includ sortimentul, specia, diametrul mediu (cm) și lungimea (m), ceea ce duce la eliberarea unui document care descrie încărcătura camionului, inclusiv cantitatea transportată, care a constituit una dintre datele de intrare ale acestui studiu (VMA, m³). Astfel de măsurători manuale sunt practicate în mod obișnuit în România și la nivel global.

A doua măsurătoare a încărcăturii camionului a fost efectuată utilizând sistemul CIND Timspec® (denumit în continuare VTS, m³), un portal de detectare 3D automatizat, proprietate exclusivă, instalat la poarta fabricii. Acest sistem bazat pe modele oferă măsurători automatizate, aproape în timp real, fără asistență umană specifică. Vehiculul este scanat în câteva secunde pe măsură ce trece prin poartă, iar programul sistemului utilizează o serie de algoritmi pentru a identifica dinamic încărcătura camionului. Se generează un model 3D, în timp ce se capturează simultan imagini 2D pentru procesare ulterioară. Software-ul utilizează datele colectate pentru a calcula volumul încărcăturii camionului și alte caracteristici. A treia măsurătoare a fost efectuată utilizând sistemul Microtec® (denumit în continuare VMI, m³) în curtea fabricii de cherestea.

3.2. REZULTATE

3.2.1. Concordanța măsurărilor

Figura 3.1, Figura 3.2 și Figura 3.3 ilustrează seturile de date comparate, luând în considerare localizarea și amploarea diferențelor semnate, în timp ce Tabelul 3.1 prezintă datele sintetice privind indicatorii de eroare luați în considerare. Așa cum se arată în Figura 3.1, Figura 3.2 și Figura 3.3, s-au observat tendințe de diferite grade în ceea ce privește diferențele semnate, în funcție de amploarea măsurărilor de referință luate în considerare. În medie (Tabelul 3.1), VTS a supraestimat măsurătorile manuale cu aproximativ 0,5 m³ ($\text{BIAS}_{\text{VMA-VTS}} = -0,47 \text{ m}^3$). Pentru aceleași seturi de date comparate, eroarea absolută medie a fost de aproximativ 2,5 ($\text{MAE}_{\text{VMA-VTS}} = 2,33$), iar eroarea pătratică medie a fost de aproximativ 3 ($\text{RMSE}_{\text{VMA-VTS}} = 3,06$). În mod similar, VMI a subestimat volumele obținute prin măsurarea manuală cu aproximativ 0,8 m³, în timp ce BIAS-ul mediu al VTS-VMI a fost de aproximativ 1,3 m³ (Tabelul 3.1). Toate aceste rezultate privind indicatorii de eroare indică, în medie, un grad ridicat de concordanță. Cu toate acestea, rezultatele testelor de heteroscedasticitate indică prezența unei erori

de proporționalitate atunci când se iau în considerare seturile de date VMA – VTS și VTS – VMI (a se vedea rezultatele testelor Breusch-Pagan și White, **Tabelul 3.1**).

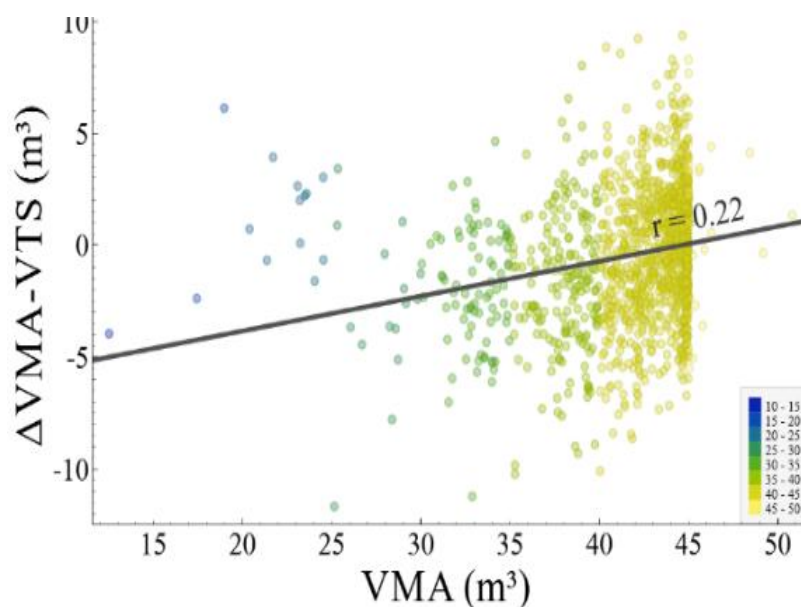


Figura3 .1 . Diferențele semnate între VMA și VTS ($\Delta VMA-VTS$, m^3), reprezentate grafic în funcție de VMA (m^3), indică o tendință moderată în ceea ce privește magnitudinea ($r = 0,22$) în raport cu magnitudinea VMA. Notă: Legenda numerică indică categoriile de magnitudine în VMS (m^3), iar punctele de date sunt scalate în funcție de magnitudinea diferențelor semnate.

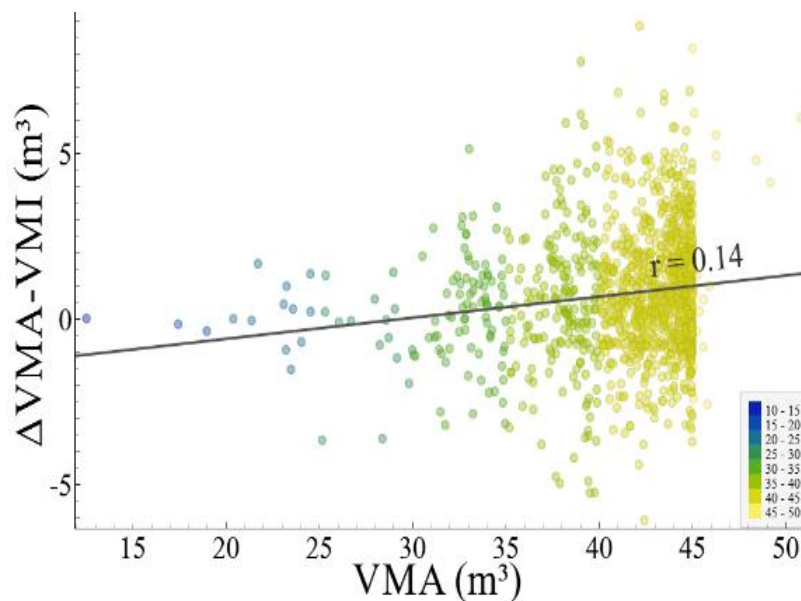


Figura3 .2 . Diferențele semnate între VMA și VMI ($\Delta VMA-VMI$, m^3), reprezentate grafic în funcție de VMA (m^3), indică o tendință scăzută a magnitudinii ($r = 0,14$) în raport cu magnitudinea VMA. Notă: Legenda numerică indică categoriile de magnitudine în VMI (m^3), iar punctele de date sunt scalate în funcție de magnitudinea diferențelor semnate.

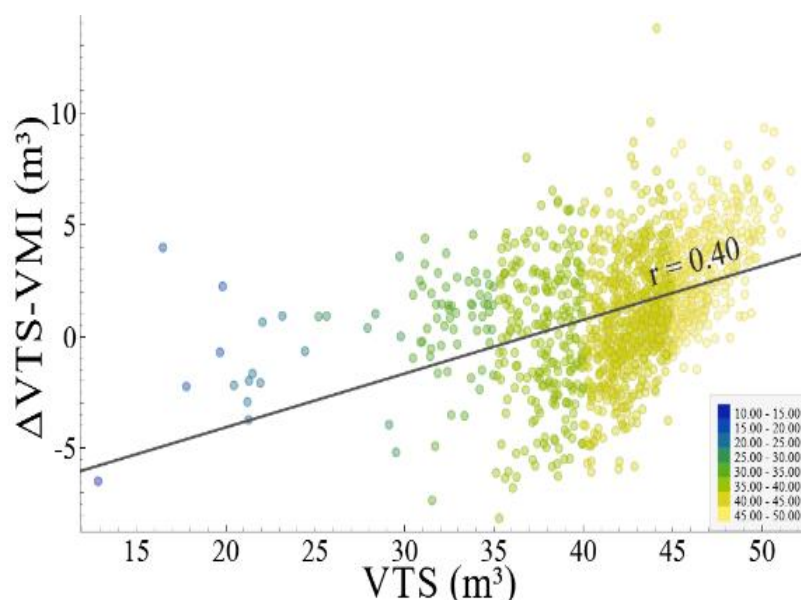


Figura 3.3 . Diferențele semnate dintre VTS și VMI ($\Delta VTS-VMI$, m^3), reprezentate grafic în funcție de VTS (m^3), indică o tendință puternică de corelație ($r = 0,40$) în raport cu valoarea VTS. Notă: Legenda numerică indică categoriile de valoare ale VMI (m^3), iar punctele de date sunt scalate în funcție de valoarea diferențelor semnate.

Tabelul 3.1 . Rezultate principale privind metricile de eroare luate în considerare în studiu.

Seturi de date comparate	BIAS	MAE	RMSE	Test de heteroscedasticitate
VMA – VTS (m^3)	-0,46	2,42	3,06	$p_{BP} < 0,001$ $p_W < 0,001$
VMA – VMI (m^3)	0,79	1,54	2,03	$p_{BP} = 0,802$ $p_W = 0,056$
VTS – VMI (m^3)	1,26	2,47	3,08	$p_{BP} < 0,001$ $p_W < 0,001$

În cele din urmă, **tabelele d -3.2** oferă o imagine de ansamblu asupra distribuției diferențelor semnate, luând în considerare categoriile de mărime. La compararea VTS cu VMA, aproape jumătate din diferențele identificate se încadrează în intervalul de $\pm 2m^3$. La compararea VMI cu VMA, peste 70% se încadrează în acest interval, iar la compararea VMI cu VTS, aproape 47% din diferențe se încadrează în intervalul de $\pm 2m^3$. Diferențele foarte mari, reprezentând peste $\pm 5 m^3$ (a se vedea, de asemenea, **Figura 3.1**, **Figura 3.2** și **Figura 3.3**), au reprezentat aproximativ 10% pentru VMA–VTS și, respectiv, VTS–VMI, iar ponderea acestora a fost redusă la compararea VMI cu VMA (**Tabelul 3.2**).

Tabelul3 .2 . Distribuția diferenței semnate pe categorii de magnitudine.

Date comparate	Ponderea diferențelor semnate pe categorii de mărime (%)						
	$\pm 1 \text{ m}^3$	$\pm 1-2 \text{ m}^3$	$\pm 2-3 \text{ m}^3$	$\pm 3-4 \text{ m}^3$	$\pm 4-5 \text{ m}^3$	peste $\pm 5 \text{ m}^3$	Total
VMA–VTS	25,54	24,15	19,81	12,77	7,51	10,22	100
VMA–VMI	44,43	28,40	13,70	7,05	4,11	2,31	100
VTS–VMI	25,46	21,67	19,89	12,46	10,76	9,76	100

3.3. DISCUȚIE

Rezultatele acestui studiu sunt, în general, promițătoare, indicând, în ansamblu, un grad ridicat de concordanță între sistemele de măsurare testate. În mod deosebit, abaterea sistematică a fost cea mai mică atunci când s-au comparat datele Timspec cu cele obținute din măsurători manuale, iar această constatare a fost în concordanță cu rezultatele legate de indicatorii MAE și RMSE pentru aceste două seturi de date. Pe de o parte, se așteaptă ca VTS să supraestimeze măsurătorile manuale datorită modului său de funcționare, care poate include în estimările de volum o parte din spațiile goale dintre încărcăturile de pe un camion dat, care ar fi putut fi omise de sistem ca spații goale. În medie, VMI a subestimat VMA cu aproximativ $0,8 \text{ m}^3$, dar măsurătorile s-au încadrat într-un interval mediu mai restrâns ($\text{MAE} = 1,54$) și au prezentat o eroare relativă mai mică (aproximativ 3,5%). În cele din urmă, VMI a subestimat VTS ($\text{BIAS} = 1,26 \text{ m}^3$) din motive similare. În primul rând, estimările VTS pot include goluri în cadrul unei anumite încărcături de camion. În plus, buștenii pot pierde scoarță și se pot micșora înainte de a fi introduși în linia de producție, ceea ce duce la diferențe de volum observabile.

3.4. CONCLUZIE

Având în vedere rezultatele acestui studiu, precum și reglementările actuale din țară, concluzionăm că sistemul studiat poate oferi beneficii semnificative lanțului de aprovizionare cu lemn prin verificarea conformității generale în ceea ce privește cantitatea de lemn livrată industriei de prelucrare. Acest lucru ar documenta și ar informa procesul decizional la nivel strategic și tactic, presupunând că costurile de implementare ar fi acceptabile. La momentul raportării acestor rezultate, este probabil ca sistemul să fi suferit deja îmbunătățiri importante în ceea ce privește algoritmi utilizați pentru estimare, iar studiile ulterioare de monitorizare sunt încurajate pentru a verifica acuratețea acestuia. Împreună cu viteza și sincronizarea măsurătorilor, sistemul oferă un instrument eficient pentru lanțul de aprovizionare cu lemn, permițând estimări rapide și precise ale lemnului livrat, precum și automatizarea proceselor de măsurare la poarta fabricii. Pentru un design experimental de comparație mai bun, sunt necesare măsurători de referință mai precise.

CHAPTER 4. TRASABILITATEA ÎNCĂRCĂTURII CAMIONULUI: PERFORMANȚA DIFERITELOR ALGORITMI DE CORELARE A IMAGINILOR ȘI PERSPECTIVELE APLICAȚIILOR ONLINE

4.1. MATERIALE ȘI METODE

4.1.1. Sursele de date și preprocesarea

Datele de imagine au fost obținute prin fotografierea capetelor încărcăturilor de camioane la o mare companie de prelucrare a lemnului situată în România. În total, 72 de încărcături de camioane diferite au fost fotografiate de două ori folosind un dispozitiv mobil Realme C53, care rulează Android versiunea 13, respectând două reguli. Pentru fiecare încărcătură de camion, s-a realizat o fotografie de la aproximativ 20 de metri, cu câmpul vizual orientat perpendicular pe capătul încărcăturii, evitând în același timp rotirea camerei. Apoi, a doua fotografie a fost realizată de la aproximativ aceeași distanță, dar după re poziționarea câmpului vizual, cu scopul de a produce o imagine diferită a aceleiași încărcături. Ulterior, aceste seturi de date de imagini și derivatele lor, după preprocesare, au fost etichetate cu 1 și, respectiv, 2. Imaginile realizate la punctul de proveniență (pădure) au fost, de asemenea, obținute din sistemul de trasabilitate a lemnului al companiei. Cu toate acestea, aceste imagini au fost capturate folosind diferite dispozitive mobile, ceea ce a dus la o scară diferită, iar majoritatea dintre ele au suferit alte distorsiuni, cum ar fi neclaritatea.

Figura 4.1 ilustrează logica organizării datelor în foldere, împreună cu exemple de imagini corespunzătoare fiecărui folder creat. A fost creat un folder părinte pentru a stoca datele de imagine specifice fiecărui camion (notat cu TR_i , unde TR reprezintă încărcătura camionului, iar i variază de la 40 la 111). În cadrul fiecărui folder la nivel de camion, au fost create două subfoldere: FO și FA. Subfolderul FO a fost utilizat pentru a conține imaginile și derivatele lor de preprocesare colectate de diverse dispozitive în pădure (la punctul de aprovizionare), în timp ce subfolderul FA a stocat imaginile corespunzătoare colectate la fabrică. În cadrul subfolderelor FO și FA, au fost create trei subfoldere suplimentare: OR, BR și LR.

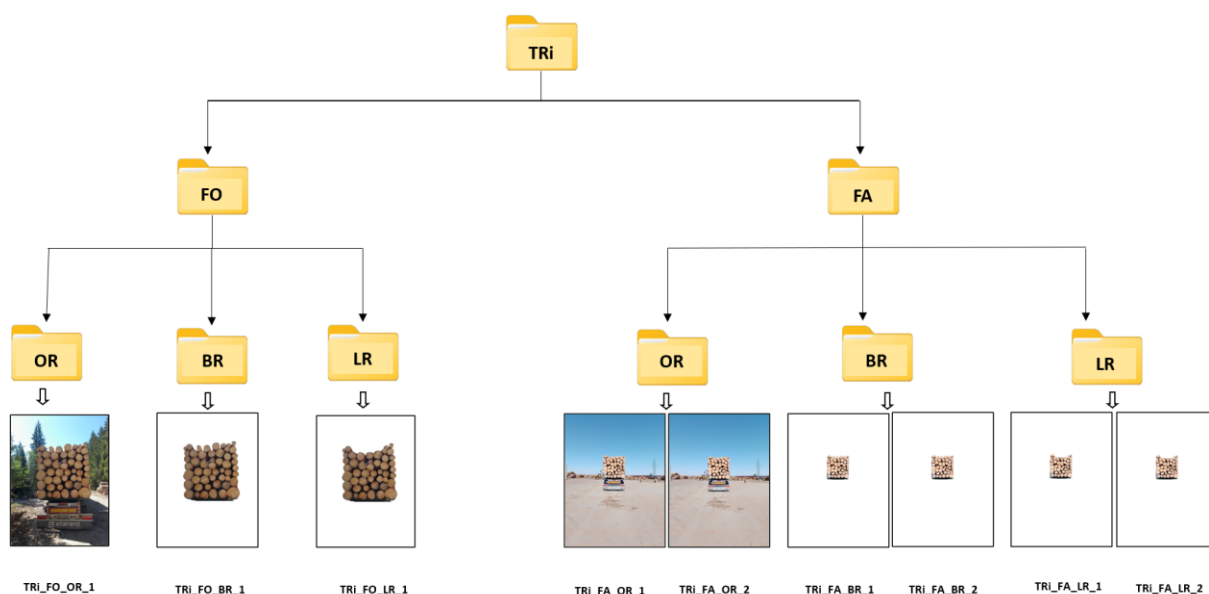


Figura 4.1. Organizarea datelor de imagine. Legenda: TRi - folderul părinte care conține imagini pentru încărcătura camionului i, FO și FA – subfoldere care conțin imaginile originale (OR), cu fundalul eliminat (BR) și cu buștenii eliminați (LR), realizate la punctele de proveniență și de destinație, respectiv. Notă: FA conținea două instanțe de imagine ale aceleiași încărcături de camion organizate în subfolderele OR, BR și LR.

4.1.2. Proiectarea experimentală și analiza datelor

În total, au fost efectuate opt experimente pentru a evalua performanța algoritmilor în identificarea și potrivirea imaginilor încărcăturilor de camioane. Proiectarea experimentelor a fost ghidată de principalele întrebări de cercetare, așa cum este ilustrat în **Figura 4.2**. Pentru primele două întrebări, au fost stabilite atât experimente cu rezultate pozitive adevărate, cât și cu rezultate pozitive false. Un experiment cu rezultate pozitive adevărate a implicat utilizarea imaginilor aceleiași încărcături de camion atât pentru referință (Ref), cât și pentru comparație (Com). În schimb, experimentele cu rezultate pozitive false au fost concepute pentru a compara imaginile de referință ale unei încărcături specifice de camion cu imagini selectate aleatoriu ale unor încărcături diferite de camion. Această abordare a presupus că, din întâmplare, unele încărcături de camion din seturile de date Com ar putea fi potrivite incorect cu cele din seturile de date Ref. Experimentele au fost realizate comparând mai întâi imaginile realizate în pădure cu cele de la fabrică, urmate de o comparație a imaginilor din cele două seturi de date (1 și 2) realizate la fabrică.

Question	Type of experiment	Image datasets	Rule	Image data examples and number of comparisons				Performance metrics				
1	True positive	Ref TRI_FO_BR_1 Com TRI_FA_BR_1	Same truckload in Ref and Com		against		15 × 15	RVP	MKR	MKC	NMK	MT
	False positive	Ref TRI_FO_BR_1 Com TRI_FA_BR_1	Randomly selected truckload in Com		against		15 × 15	RVP	MKR	MKC	NMK	MT
2	True positive	Ref TRI_FA_BR_1 Com TRI_FA_BR_2	Same truckload in Ref and Com		against		72 × 72	RVP	MKR	MKC	NMK	MT
	False positive	Ref TRI_FA_BR_1 Com TRI_FA_BR_2	Randomly selected truckload in Com		against		72 × 72	RVP	MKR	MKC	NMK	MT
3	True positive	Ref TRI_FO_LR_1 Com TRI_FA_BR_1	Same truckload in Ref and Com & logs missing in Ref		against		15 × 15	RVP	MKR	MKC	NMK	MT
	True positive	Ref TRI_FO_BR_1 Com TRI_FA_LR_1	Same truckload in Ref and Com & logs missing in Com		against		15 × 15	RVP	MKR	MKC	NMK	MT
	True positive	Ref TRI_FA_LR_1 Com TRI_FA_BR_1	Same truckload in Ref and Com & logs missing in Ref		against		72 × 72	RVP	MKR	MKC	NMK	MT
	True positive	Ref TRI_FO_BR_1 Com TRI_FA_LR_1	Same truckload in Ref and Com & logs missing in Com		against		72 × 72	RVP	MKR	MKC	NMK	MT
								RVP	MKR	MKC	NMK	MT
								RVP	MKR	MKC	NMK	MT
4	Best image fingerprinting algorithm with the lowest image matching time							RVP	MKR	MKC	NMK	MT

Figura4 .2 . Schema experimentală care prezintă problema de rezolvat, tipul experimentelor, seturile de date și regulile utilizate, exemple de imagini și numărul de observații, precum și indicatorii de performanță folosiți. Notă: 15 × 15 și 72 × 72 reprezintă numărul de imagini din seturile de date Ref și Com.

Pentru a treia întrebare a studiului, au fost configurate doar experimente de tip „adevărat pozitiv” pentru a compara în mod consecvent imaginile din setul Ref cu cele din setul Com ale aceleiași încărcături de camion. Aceste experimente au implicat compararea imaginilor realizate în pădure cu cele realizate la fabrică, precum și compararea imaginilor din cele două seturi de date capturate la fabrică.

4.2. REZULTATE

4.2.1. Efectul calității imaginii sursă asupra performanței de amprentare și potrivire d

Așa cum se arată în Figura 4.3, atunci când s-au utilizat imagini de calitate scăzută ca date de referință, rezultatele nu au fost încurajatoare. De exemplu, raportul punctelor valide (RVP) a fost deosebit de scăzut, cu o medie de aproximativ 0,15, indiferent de tipul de experiment (Figura 4.3 a, b). Mai mult, nu a existat o consecvență în rezultate, deoarece ambele tipuri de experimente au dat rezultate similare care depindeau de algoritm (adică, BRISK și FREAK au avut RVP-uri mai mari în comparație cu celelalte algoritme).

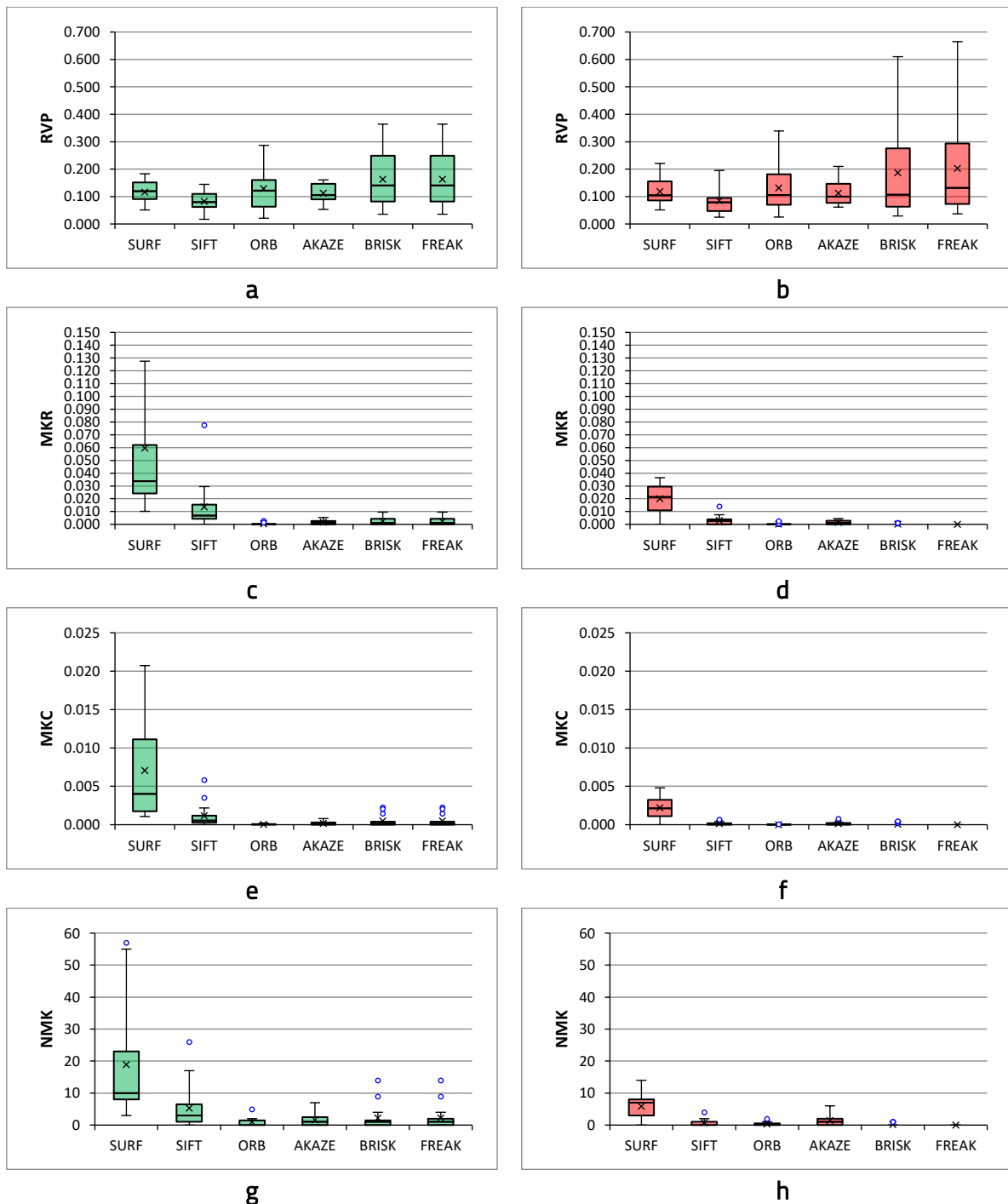


Figura4 .3 . Performanța de amprentare și potrivire a algoritmilor utilizați pentru imagini sursă de calitate scăzută: a, c, e, g – experimente cu rezultate pozitive adevărate, b, d, f, h – experimente cu rezultate fals pozitive, RVP – raportul dintre punctele valide din imaginea de referință și cea comparată, MKR – raportul dintre punctele cheie potrivite și punctele valide din imaginea de referință, MKC – raportul dintre punctele cheie potrivite și punctele valide din imaginea comparată, NMK – numărul de puncte cheie potrivite.

4.2.2. Performanța amprentării și potrivirii pe imagini care împărtășesc caracteristici similare de achiziție a datelor

Algoritmii au generat rapoarte medii (RVP) apropiate de 1 atunci când s-au comparat aceleași încărcături de camioane pe baza unor imagini de înaltă calitate (Figura 4.4 a). Mai mult, raportul (MKR) s-a aliniat îndeaproape cu raportul (MKC) pentru toți algoritmi utilizați (Figura 4.4 c, e), iar aceste rapoarte au fost peste 0,1.

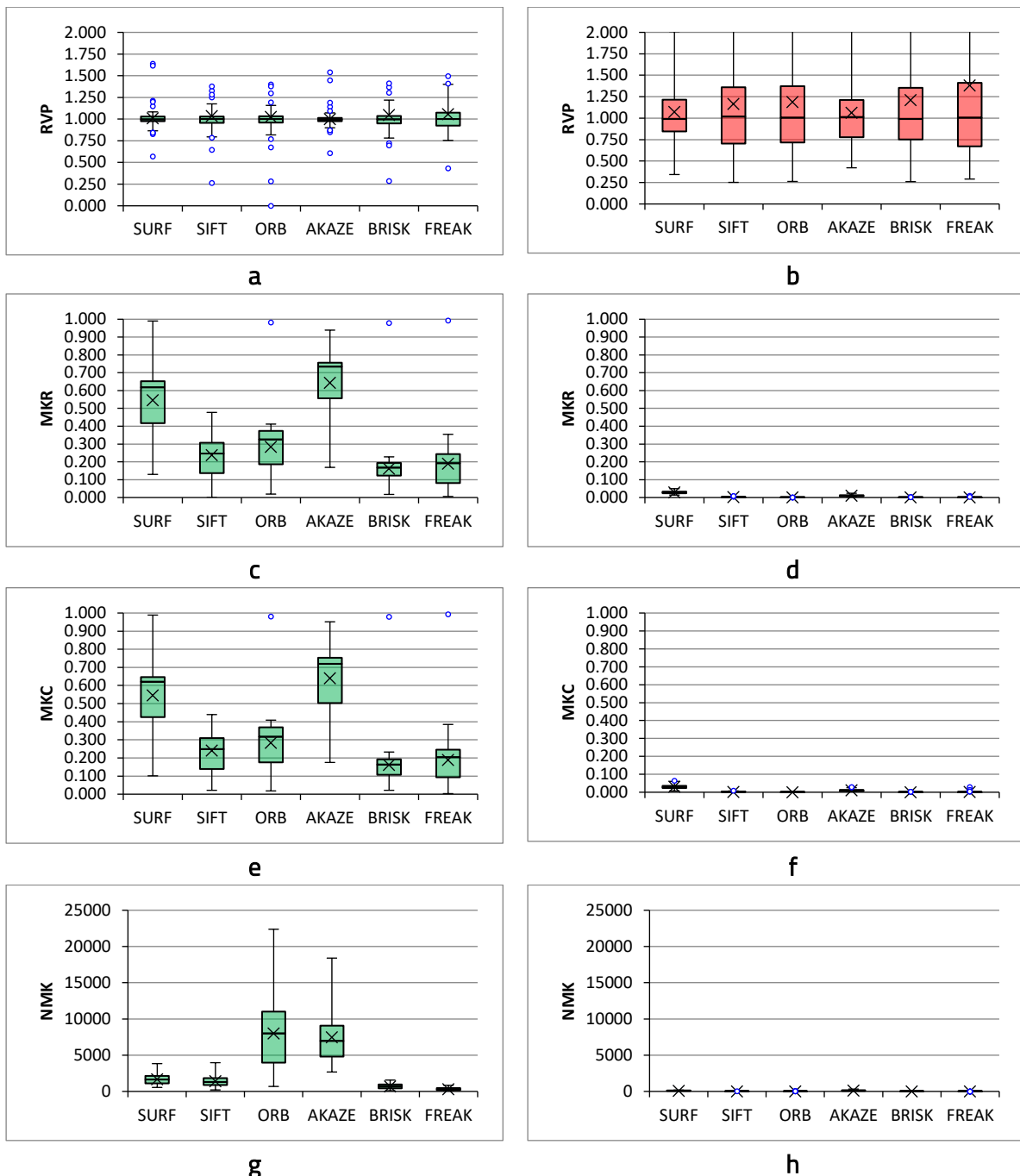


Figura4 .4 . Performanța de amprentare și potrivire între algoritmi utilizați pentru imagini cu o calitate similară: a, c, e, g – experiment cu rezultate pozitive adevărate, b, d, f, h – experimente cu rezultate fals pozitive, RVP – raportul dintre punctele valide din imaginea de referință și cea comparată, MKR – raportul dintre punctele cheie potrivite și punctele valide din imaginea de referință, MKC – raportul

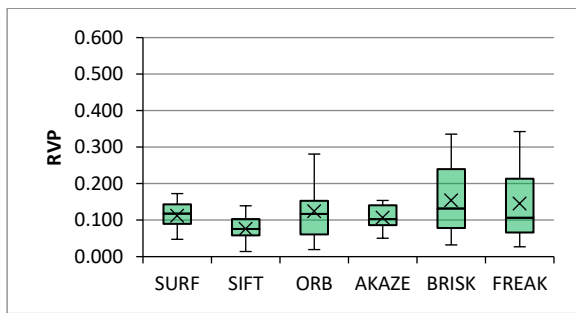
dintre punctele cheie potrivite și punctele valide din imaginea comparată, NMK – numărul de puncte cheie potrivite.

În mod deosebit, algoritmi SURF și AKAZE au înregistrat valori MKR și MKC constant ridicate. Pe de altă parte, numărul total de puncte-cheie potrivite pentru ORB și AKAZE a fost semnificativ mai mare decât în cazul celorlalte algoritme (**Figura 4.4 g**). Imaginile utilizate în experimentul cu fals pozitive erau de aceeași calitate, dar difereau în ceea ce privește conținutul (încărcături diferite ale camioanelor). În acest caz, rezultatele au fost diferite, deoarece intervalul raporturilor punctelor valide era mai larg și nu la fel de consistent ca în experimentul cu adevărat pozitive (**Figura 4.4 b**). Mai mult, valorile MKR și MKC erau aproape de zero, așa cum se arată în **Figura 4.4 d, f**, iar numărul de puncte cheie potrivite era semnificativ mai mic în comparație cu experimentul cu rezultate pozitive reale (**Figura 4.4 h**). Acești parametri au arătat contraste puternice între cele două experimente care au utilizat imagini de calitate similară pentru comparații.

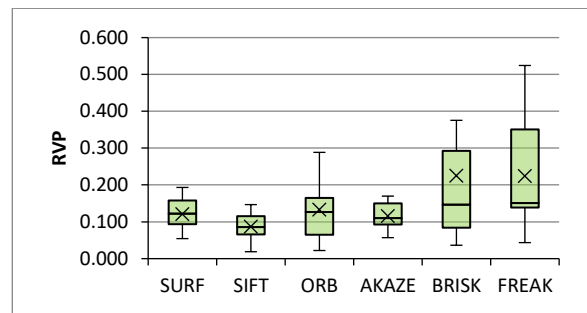
4.2.3. Performanța amprentării și potrivirii pe imagini care prezintă caracteristici diferite de achiziție a datelor și un număr diferit de bușteni în imaginile de referință și cele comparate

Rezultate similare au fost observate în timpul comparării imaginilor cu încărcături similare de camioane care variaua în ceea ce privește numărul de bușteni (bușteni lipsă în imaginile de referință sau în cele comparate) și care utilizau imagini de referință de calitate scăzută în cele două experimente cu rezultate pozitive reale. Așa cum se arată în **Figura 4.5 a, b**, raportul punctelor valide pentru toate algoritmele a fost foarte scăzut, cu o medie de aproximativ 0,13.

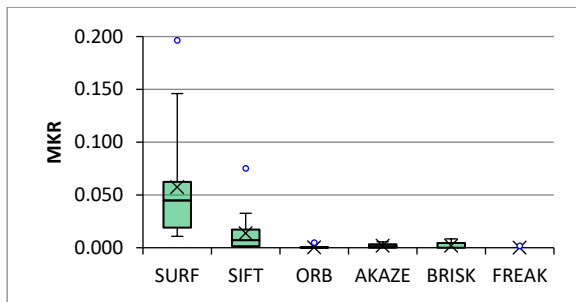
În plus, raportul dintre punctele cheie potrivite în imaginile de referință și în cele comparate a fost, de asemenea, semnificativ scăzut. Mai mult, MKR și MKC au fost ușor mai scăzute în aceste experimente comparativ cu experimentul anterior care a utilizat imagini de calitate scăzută, dar cu același număr de bușteni. Comparativ cu alte algoritme care tratează imagini de calitate scăzută, algoritmul SURF a demonstrat o performanță mai bună. Acesta a putut identifica și potrivi mai bine pe baza punctelor cheie detectate (**Figura 4.5 c-h**).



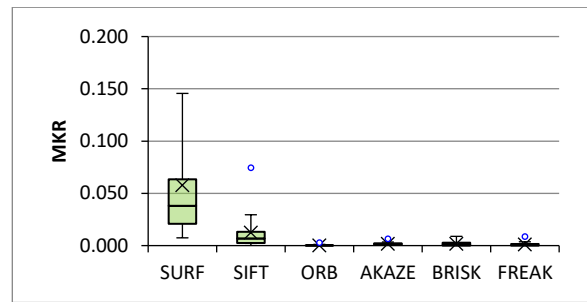
a



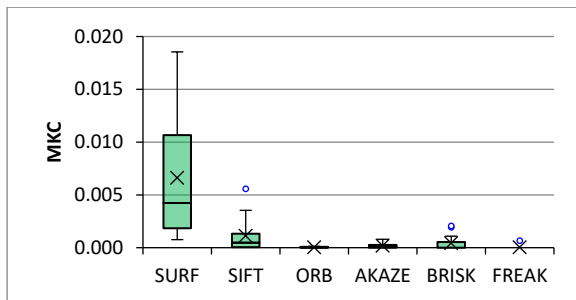
b



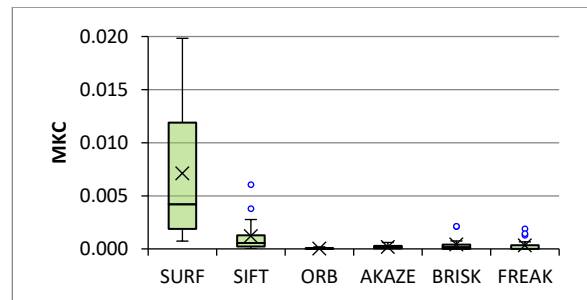
c



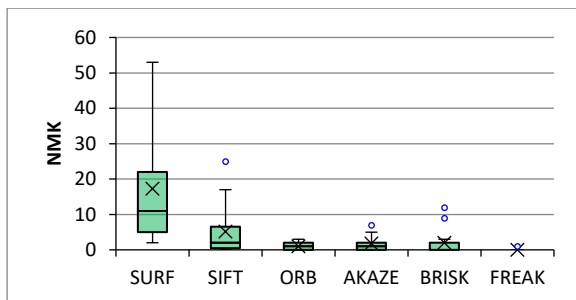
d



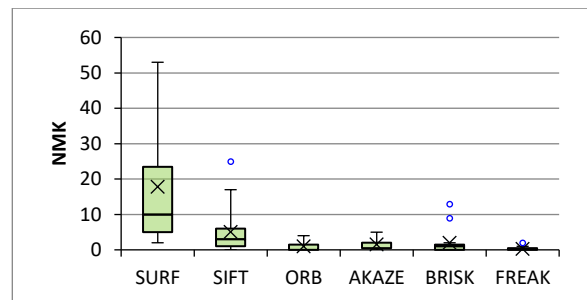
e



f



g



h

Figura 4 .5 . Performanța de amprentare și potrivire a algoritmilor utilizați pentru imagini sursă de calitate scăzută: a, c, e, g – experiment cu rezultate pozitive reale, cu jurnale lipsă în imaginile de referință, b, d, f, h – experiment cu rezultate pozitive reale cu jurnalele lipsă în imaginile comparate, RVP – raportul dintre punctele valide din imaginea de referință și cea comparată, MKR – raportul dintre punctele cheie potrivite și punctele valide din imaginea de referință, MKC – raportul dintre punctele cheie potrivite și punctele valide din imaginea comparată, NMK – numărul de puncte cheie potrivite.

4.2.4. Performanța amprentării și potrivirii imaginilor care au caracteristici similare de achiziție a datelor și un număr diferit de bușteni în imaginile de referință și comparate

Analiza performanței algoritmilor utilizați în detectarea și potrivirea imaginilor de aceeași calitate, dar cu un număr variabil de log-uri, a arătat că algoritmi au avut o stabilitate în ceea ce privește raportul punctelor valide, cu excepția FREAK (**Figura 4.6 a, b**). AKAZE, urmat de SURF, a obținut cele mai mari valori medii ale MKR și MKC în ambele scenarii (log-uri lipsă în imaginile de referință sau comparate), așa cum se arată în **Figura 4.6 c-f**. În ceea ce privește numărul de puncte cheie potrivite, ORB a fost superior, cu aproximativ 7200 de puncte cheie, urmat de AKAZE cu 6800 de puncte cheie. SURF și SIFT au demonstrat o performanță moderată, cu 1500 și, respectiv, 1200 de puncte cheie, în timp ce BRISK și FREAK au detectat și potrivit 600 și, respectiv, 200 de puncte cheie, așa cum se arată în **Figura 4.6 g, h**.

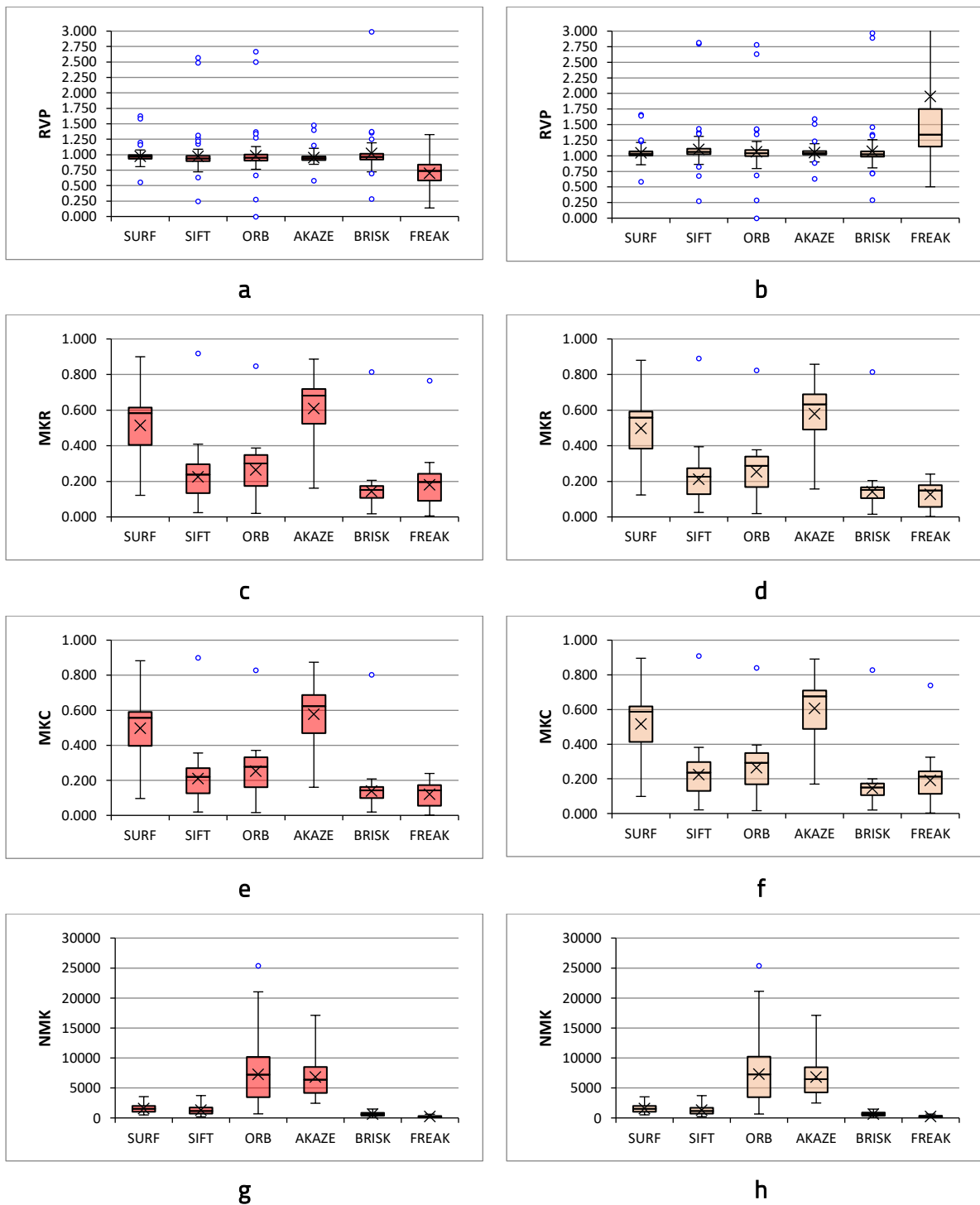


Figura 4.6 . Performanța de amprentare și potrivire între algoritmi utilizați pentru imagini cu o calitate similară: a, c, e, g – experiment cu rezultate pozitive reale cu jurnale lipsă în imaginile de referință, b, d, f, h – experiment cu rezultate pozitive reale cu jurnale lipsă în imaginile comparate, RVP – raportul dintre punctele valide din imaginea de referință și cea comparată, MKR – raportul dintre punctele cheie potrivite și punctele valide din imaginea de referință, MKC – raportul dintre punctele cheie potrivite și punctele valide din imaginea comparată, NMK – numărul de puncte cheie potrivite.

4.2.5. Timpul de amprentare și potrivire

Observațiile au indicat că ORB a înregistrat cel mai lung timp mediu de potrivire în toate experimentele, așa cum se arată în Figura 4.7.

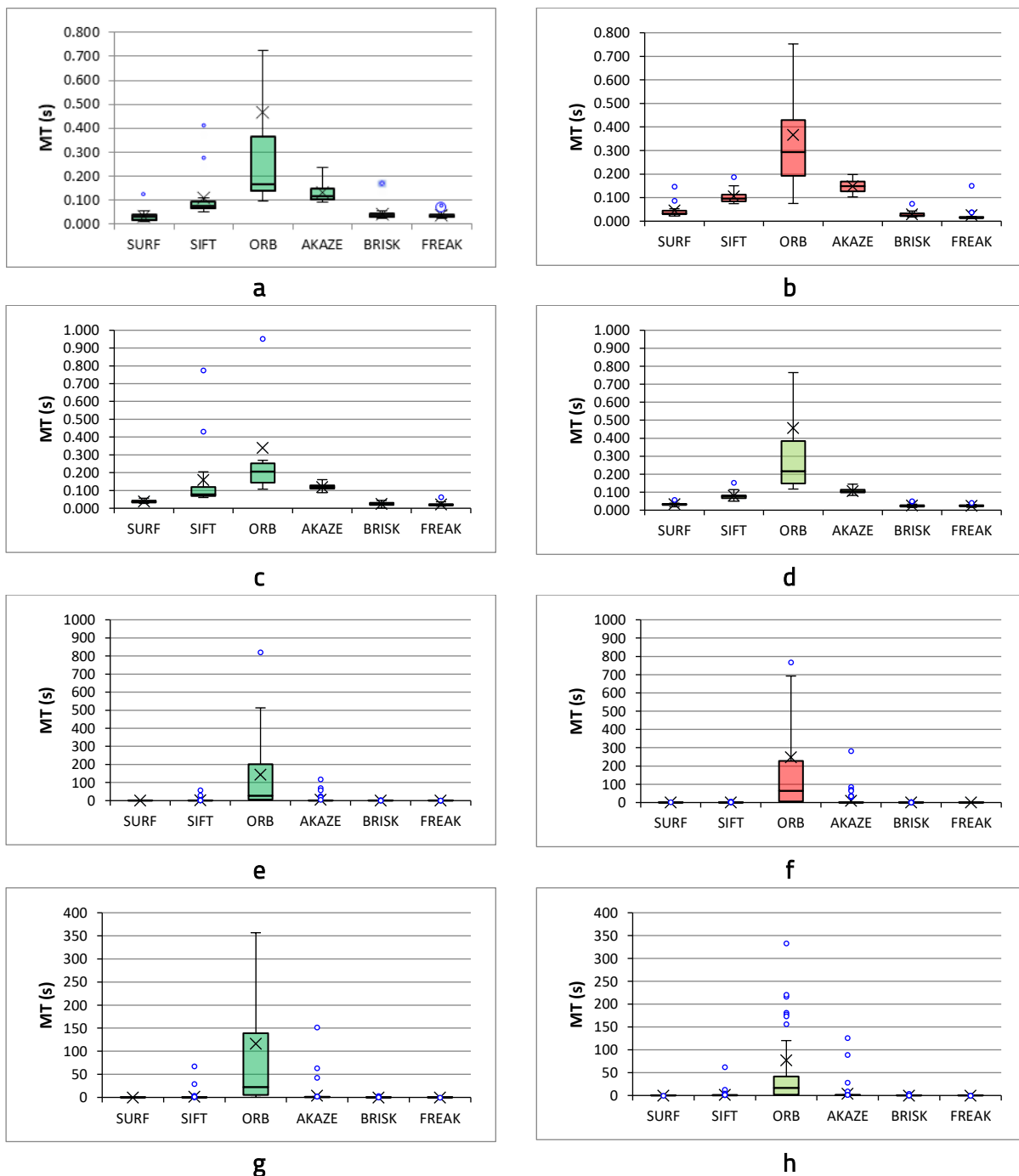


Figura 4.7 . Timpul de amprentare și potrivire: a – experiment cu rezultate pozitive reale și imagini sursă de calitate scăzută, b – experiment cu rezultate pozitive false și imagini sursă de calitate scăzută, c – experiment cu rezultate pozitive reale și imagini sursă de calitate scăzută fără jurnale, d – experiment cu rezultate pozitive reale și imagini sursă de calitate scăzută cu jurnale în plus, e – experiment cu rezultate pozitive reale și imagini de aceeași calitate, f – experiment cu rezultate fals pozitive cu imagini de aceeași calitate, g – experiment cu rezultate adevărat pozitive cu imagini de

aceeași calitate și jurnalele lipsă în imaginile sursă, h – experiment cu rezultate adevărat pozitive cu imagini de aceeași calitate și jurnalele în plus în imaginile sursă.

4.3. DISCUȚIE

Acest studiu experimental a fost realizat pentru a examina performanța algoritmilor SURF, SIFT, ORB, AKAZE, BRISK și FREAK în identificarea și potrivirea încărcăturilor de camioane pe baza imaginilor realizate la capetele acestora. De remarcat că niciun studiu anterior nu a abordat în mod specific această problemă, care este extrem de relevantă pentru transportul cu camioane. Rezultatele studiului au arătat că performanța acestor algoritmi depinde de calitatea imaginii. În mod deosebit, algoritmul SURF poate funcționa într-o oarecare măsură cu imagini de calitate scăzută, chiar dacă acestea sunt ușor diferite ca scară și conținut; acesta a demonstrat că este mai eficient în stabilirea potrivirilor, chiar și în scenarii cu imagini de calitate scăzută. Atunci când se compară două imagini care au aceeași calitate, performanța algoritmilor depinde de faptul dacă algoritmul utilizat este sensibil la variații ușoare de scară ale imaginilor comparate.

4.4. CONCLUZIE

Acest studiu a fost realizat pentru a examina performanța algoritmilor de detectare a caracteristicilor în identificarea și potrivirea încărcăturilor de camioane pe baza imaginilor realizate la capetele acestora. Rezultatele au arătat că performanța de potrivire depinde de calitatea imaginilor, în special de neclaritate, care are un efect negativ asupra capacităților acestor algoritmi. Dintre algoritmii testați, SURF a demonstrat într-o oarecare măsură capacitatea de a potrivi imagini de calitate scăzută. În plus, performanța acestor algoritmi depinde de modul în care au fost realizate imaginile. SURF și AKAZE funcționează excelent chiar dacă imaginile nu sunt realizate exact din același punct de vedere. În schimb, algoritmii SIFT, ORB, BRISK și FREAK sunt mai sensibili dacă câmpul vizual al imaginilor nu a fost exact același, în ciuda faptului că s-a urmat aceeași procedură. Un dezavantaj al AKAZE este că este consumator de timp, în timp ce SURF este mai rapid. Mai mult, acești algoritmi sunt capabili să identifice diferențele în încărcăturile camioanelor, cum ar fi buștenii lipsă sau în surplus. SURF ar putea fi cea mai eficientă soluție inteligentă pentru implementarea în unități mobile cu putere de calcul limitată pentru amprentarea imaginilor încărcăturilor camioanelor, presupunând că imagini de calitate similară și înaltă ar putea fi furnizate la punctele de origine și destinație.

CHAPTER 5. CONCLUZII. CONTRIBUȚII ORIGINALE. DISEMINAREA REZULTATELOR

5.1. CONCLUZII

Această teză de doctorat subliniază importanța integrării soluțiilor inteligente în sistemele de trasabilitate și aprovizionare cu lemn, răspunzând cererii tot mai mari la nivel mondial de transparență și confirmare a legalității, care pot promova gestionarea durabilă a pădurilor. Analiza tehnologiilor actuale evidențiază progresul rapid înregistrat în domeniul instrumentelor de marcare, al platformelor digitale, al tehnicilor de identificare și al instrumentelor de monitorizare, punând totodată în lumină obstacolele legate de costuri, infrastructură și acceptarea de către părțile interesate. Cercetarea demonstrează că cele mai recente instrumente digitale, de la metodele avansate identificate printr-o analiză cuprinzătoare a literaturii de specialitate până la metodele testate, precum aplicația pentru smartphone bazată pe LiDAR, sistemul industrial digital CIND și instrumentele algoritmice de potrivire, pot susține în mod semnificativ integritatea și eficiența lanțului de aprovizionare cu lemn. Aplicația TreeScanner evaluată a arătat că un smartphone bazat pe LiDAR poate oferi o estimare instantanee și foarte fiabilă a volumului buștenilor, care poate constitui o alternativă eficientă și practică la instrumentele tradiționale de măsurare pe teren. Mai mult, evaluarea sistemului digital CIND de măsurare a volumului solid al buștenilor a demonstrat o estimare rapidă și precisă a încărcăturii camioanelor la poarta fabricii, reducând erorile umane, îmbunătățind controlul operațional și monitorizarea fluxului de lemn, ceea ce poate rezolva multe provocări legate de transportul lemnului. Această tehnologie asigură conformitatea legală în industria forestieră. În plus, algoritmi de potrivire a caracteristicilor testați au furnizat industriei dovezi ale unei idei valoroase de integrare a acestei soluții inteligente pentru urmărirea încărcăturilor de lemn de la pădure la fabrică, cu avantajul de a expune buștenii furați sau ilegali din încărcături. Concluziile acestei teze demonstrează că digitalizarea poate modifica sistemele de trasabilitate și aprovizionare cu lemn prin reducerea efortului manual, îmbunătățirea preciziei datelor și susținerea practicilor de aprovizionare fiabile. Indiferent de seturile de date limitate și de necesitatea unei validări cuprinzătoare pe teren, această cercetare a stabilit o bază solidă de cunoștințe pentru îmbunătățiri viitoare. Lucrările viitoare se pot concentra pe combinarea altor tehnologii, cum ar fi datele de la senzori, testarea altor algoritmi cu seturi de date extinse, îmbunătățirea interoperabilității între sistemele de teren și cele industriale, precum și dezvoltarea de platforme combinate capabile să monitorizeze întregul lanț de custodie. Aceste eforturi pot spori eficiența și transparența sectorului forestier, îndeplinind obiectivele globale de durabilitate.

5.2. CONTRIBUȚII ORIGINALE

Această teză de doctorat a adus progrese semnificative în domeniul trasabilității și aprovizionării cu lemn prin dezvoltarea și evaluarea de soluții inteligente inovatoare care sporesc transparența și eficiența lanțului de aprovizionare. Un aspect esențial al acestei teze este dezvoltarea unei baze de înțelegere prin analiza sistematică a literaturii de specialitate, care cuprinde 125 de lucrări științifice, creând astfel una dintre cele mai actualizate și complete analize ale literaturii de specialitate privind procesele și tehnologiile utilizate în trasabilitatea lemnului și gestionarea durabilă a transportului, precum și rezultatele obținute în domeniile de mediu, economic și social. Această analiză nu numai că sintetizează înțelegerea actuală, dar relevă și lacunele și oportunitățile existente în ceea ce privește inovațiile, creând astfel o referință remarcabilă.

O altă contribuție importantă este evaluarea aplicației TreeScanner, care este considerată a fi unul dintre primele studii care aplică tehnologia LiDAR bazată pe telefon pentru a estima direct volumul buștenilor în curtea fabricii de cherestea. Studiul a generat un set de date de înaltă calitate care include atât măsurători manuale, cât și digitale. Rezultatele demonstrează că aplicația TreeScanner oferă măsurători precise și consistente la două densități de eșantionare diferite (0,1 m și 0,5 m) și între diferiți operatori, oferind o alternativă practică și eficientă la metodele convenționale prin îmbunătățirea productivității (38%), întrucât măsurătorile digitale au durat în medie 21 de secunde per buștean, comparativ cu 29 de secunde per buștean în cazul măsurătorilor manuale. Această cercetare promovează integrarea acestei aplicații bazate pe LiDAR în sistemele de trasabilitate a lemnului, deoarece oferă numeroase funcționalități, precum transferul prin Bluetooth, servicii de server la distanță, furnizarea de estimări instantanee ale volumului, compatibilitatea cu etichetele RFID și capacitatea de a documenta locația geografică a măsurătorilor.

Teza contribuie la dezvoltarea trasabilității industriale printr-o evaluare a tehnologiei CIND în contextul mediului de gater pentru a determina volumul de lemn transportat în camioane. Ea se concentrează pe potențialul oferit de această tehnologie de a furniza măsurători precise în momentul în care camionul ajunge la poartă. Acest studiu evidențiază beneficiile operaționale care pot fi obținute din integrarea soluțiilor inteligente, care pot fi benefice în ceea ce privește interoperabilitatea dintre sistemele de trasabilitate din teren și cele din industrie.

Această teză introduce utilizarea algoritmilor de detectare a caracteristicilor pentru a identifica încărcăturile camioanelor și a le potrivi pe baza imaginilor realizate la sosire, ca o contribuție notabilă, semnificativă și originală. Setul de date cuprinzător a conținut 2.084 de imagini utilizate pentru a evalua performanța a șase algoritmi în identificarea imaginilor, care au fost următorii: SURF (Speeded-Up Robust Features), SIFT (Scale-Invariant Feature Transform), ORB (Oriented FAST and Rotated BRIEF), AKAZE (Accelerated-KAZE), BRISK (Binary Robust Invariant Scalable Keypoints) și FREAK (Fast Retina Keypoint). Studiul demonstrează că aceste algoritme pot urmări lemnul transportat de la pădure la fabricile de cherestea și pot contribui la prevenirea intrării buștenilor ilegali în lanțul de aprovizionare prin transport, folosind avantajele acestor algoritmi în identificarea diferențelor din încărcăturile camioanelor, cum ar fi buștenii lipsă sau în surplus. Cercetarea evidențiază SURF ca fiind cea mai eficientă soluție inteligentă dintre algoritmi testați. Această cercetare oferă industriei o idee privind integrarea acestei soluții inteligente în sistemele de trasabilitate a lemnului.

În ansamblu, aceste contribuții creează un cadru pe mai multe niveluri pentru îmbunătățirea trasabilității lemnului prin combinarea cunoștințelor sistematice, validarea măsurătorilor digitale,

evaluarea tehnologiei industriale, precum și prezentarea și testarea de soluții inteligente inovatoare. Această teză oferă o bază importantă pentru inovațiile viitoare și implementarea practică a digitalizării în silvicultură.

5.3. DIFUZAREA REZULTATELOR

5.3.1. Publicații științifice bazate pe această teză de doctorat

A. Articole publicate în revistele BDI

1. Elias, M. (2024). Trasabilitatea lemnului și gestionarea durabilă a transportului: o trecere în revistă a tehnologiilor și procedurilor. Buletinul Universității Transilvania din Brașov. Seria II: Silvicultură ■ Industria lemnului ■ Inginerie agroalimentară, 11-52. Disponibil online la: https://webbut.unitbv.ro/index.php/Series_II/article/view/7874/5925
DOI: 10.31926/but.fwiafe.2024.17.66.1.2

B. Articole publicate în reviste indexate de Clarivate Analytics (fosta ISI Web of Science)

1. Elias, M., Forkuo, G. O., Picchi, G., Nati, C., & Borz, S. A. (2025). Precizia unei noi aplicații de măsurare a buștenilor bazată pe smartphone în faza de prototipare. *Sensors*, 25(18), 5847. Disponibil online la: <https://www.mdpi.com/1424-8220/25/18/5847>, DOI:10.3390/s25185847
2. Elias, M., & Borz, S. A. (2025). Măsurarea lemnului la poarta fabricii: un studiu comparativ pentru evaluarea preciziei unui sistem digital de ultimă generație de măsurare a încărcăturii camioanelor. *Annals of Forest Research*, 68(2), 85-96. Disponibil online la: <http://afrjournal.org/index.php/afr/article/view/4151/1349>, DOI: 10.15287/afr.2025.4151

5.3.2. Lucrări prezentate la conferințe științifice pe baza acestei teze de doctorat

A. Lucrări prezentate la conferințe științifice naționale

1. Elias, M., Borz, S.A., 2023. Tehnologii de trasabilitate și aprovizionare a lemnului: o analiză sistematică. Celei de-a VIII-a Sesiuni Naționale de Comunicări Științifice Studentești pe Teme de Silvicultură și Protecția Mediului Vatra Dornei, 26-27 mai 2023. Disponibil online la: https://silvic.usv.ro/avizier/2023_mai_simoz_national.pdf
2. Elias, M., Borz, S.A., 2024. Urmărirea lemnului de la pădure la fabrică: o aplicație a algoritmului SURF pentru identificarea încărcăturilor de camioane pe baza fotografiilor realizate la destinație. Absolvenți în fața companiilor (AFCO) 2024. Disponibil online la: https://afco.unitbv.ro/2024/images/Documente/AFCO_2024_Lucrari_inscrise_.pdf
3. Elias, M., Borz, S.A., 2024. Urmărirea lemnului de la pădure la fabrică: o aplicație a algoritmului SURF pentru identificarea încărcăturilor de camioane pe baza fotografiilor realizate la destinație. DoCo2024. Disponibil online la: <https://www.unitbv.ro/en/research/doctoral->

[studies/2024-doctoral-conference.html](https://www.unitbv.ro/studies/2024-doctoral-conference.html). Detaliile programului conferinței sunt disponibile online la: https://www.unitbv.ro/Detailed_Programme.pdf

B. Lucrări prezentate la conferințe științifice internaționale

1. Elias, M., Borz, S.A., 2024. Urmărirea lemnului de la pădure la fabrică: o aplicație a algoritmului SURF pentru identificarea încărcăturilor camioanelor pe baza fotografiilor realizate la capetele acestora. În Cartea de rezumate a celui de-al 11-lea Simpozion Internațional privind Pădurile și Dezvoltarea Durabilă, FSD 2024. Disponibil online la: https://silvic.unitbv.ro/images/conferinte/fsd2024/Book_of_abstracts_FSD_2024c.pdf
2. Elias, M., Borz, S.A., 2024. Urmărirea lemnului de la pădure la fabrică: o aplicație a algoritmului SURF pentru identificarea încărcăturilor camioanelor pe baza fotografiilor realizate la capetele acestora. În Cartea de rezumate a celui de-al 56-lea Simpozion Internațional privind Mecanizarea Pădurilor (FORMEC), Gdańsk, Polonia 2024. Disponibil online la: https://www.formec.org/images/proceedings/2024/Proceedings_FORMEC_2024_Gdansk_02.pdf
3. Borz, S.A., Elias, M., Forkuo, G.O., Picchi, G., Nati, C., 2025. Performanța unui prototip de aplicație de măsurare bazată pe smartphone în estimarea volumului de bușteni. Carte de rezumate: Lucrările celui de-al 57-lea Simpozion Internațional de Mecanizare Forestieră (FORMEC), Finlanda. Disponibil online la: <https://erepo.uef.fi/server/api/core/bitstreams/2dd5580c-e499-4590-a04f-aebea21969d4/content>

5.3.3. Publicații științifice bazate pe rezultatele obținute prin participarea la echipe de cercetare din afara domeniului tezei de doctorat

A. Articole publicate în reviste indexate de Clarivate Analytics (fosta ISI Web of Science)

1. Stopfer, L., Buss, E., Kaulen, A., Berendt, F., De Miguel-Díez, F., Püls, Elias, M., Borz, S. A. & Purfürst, T. Evaluarea sustenabilității sistemelor blockchain în lanțurile de aprovizionare cu lemn: impactul asupra mediului și economic. *Frontiers in Blockchain*, 9, DOI:10.3389/fbloc.2026.1745200

REFERINȚE

1. Abbas, D., Handler, R., Hartsough, B., Dykstra, D., Lautala, P., & Hembroff, L. (2014). O analiză a sondajului privind operațiunile de recoltare și transport forestier în Michigan. *Croatian Journal of Forest Engineering: Journal for Theory and Application of Forestry Engineering*, 35(2), 179-192. Disponibil online la: <https://hrcak.srce.hr/127001> (Accesat la 26 februarie 2026)
2. Abdi, E., Mariv, H. S., Deljouei, A., & Sohrabi, H. (2014). Acuratețea și precizia poziționării GPS de consum într-un mediu urban cu spații verzi. *Știința și tehnologia pădurilor*, 10(3), 141-147. DOI:10.1080/21580103.2014.887041
3. Baskent, E. Z., Keles, S., & Yolasigmaz, H. A. (2008). Compararea gestionării forestiere multifuncționale cu gestionarea lemnului, incorporând valorile lemnului, carbonului și oxigenului: Un studiu de caz. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 23(2), 105-120. <https://doi.org/10.1080/02827580701803536>
4. Boner, M., Cervera, M., Chavesta, M., Cronn, R., Degen, B., Deklerck, V., Diaz-Sala, C., Dormontt, E., Ekué, M., Espinoza, E. (2019) Ghid general de eșantionare pentru urmărirea lemnului, Rețeaua Globală de Urmărire a Lemnului, Secretariatul GTTN, Institutul European pentru Păduri și Institutul Thuenen, 46 p. DOI:10.13140/RG.2.2.26883.96806
5. Borz, S. A., & Proto, A. R. (2022). Aplicarea și precizia tehnologiilor inteligente pentru măsurarea lemnului rotund: Evaluarea consumului de timp și a eficienței. *Computers and Electronics in Agriculture*, 197, 106990. DOI:10.1016/j.compag.2022.106990
6. Borz, S. A., Morocho Toaza, J. M., Forkuo, G. O., & Marcu, M. V. (2022). Potențialul aplicației Measure în estimarea datelor biometrice ale buștenilor: O comparație cu măsurarea convențională a buștenilor. *Forests*, 13(7), 1028. DOI:10.3390/f13071028
7. Braghiroli, F. L., & Passarini, L. (2020). Valorificarea reziduurilor de biomasă provenite din exploatarea forestieră și din industria lemnului oferă o gamă largă de posibilități durabile și inovatoare. *Current Forestry Reports*, 6(2), 172-183. DOI:10.1007/s40725-020-00112-9
8. Creutzburg, L., & Lieberherr, E. (2021). A tăia sau a nu tăia? Preferințele actorilor și rețelele în politica forestieră elvețiană. *Politica și economia forestieră*, 125, 102395. DOI:10.1016/j.forpol.2021.102395
9. Dykstra, D. P., Kuru, G., & Nussbaum, R. (2003). Tehnologii pentru urmărirea buștenilor. *International Forestry Review*, 5(3), 262-267. DOI: 10.1505/IFOR.5.3.262.19137
10. Figorilli, S., Antonucci, F., Costa, C., Pallottino, F., Raso, L., Castiglione, M., ... & Menesatti, P. (2018). Un prototip de implementare a tehnologiei blockchain pentru trasabilitatea electronică open source a lemnului de-a lungul întregului lanț de aprovizionare. *Sensors*, 18(9), 3133. DOI:10.3390/s18093133
11. Godbout, J., Bomal, C., Farr, K., Williamson, M., & Isabel, N. (2018). Instrumente genomice pentru trasabilitate: oportunități, provocări și perspective pentru sectorul forestier canadian. *The Forestry Chronicle*, 94(1), 75-87. Disponibil online la: <https://pubs.cif-ifc.org/doi/abs/10.5558/tfc2018-010> (Accesat la 26 februarie 2026)
12. Gülci, S., Yurtseven, H., Akay, A. O., & Akgul, M. (2023). Măsurarea diametrului copacilor folosind un smartphone echipat cu LiDAR: o comparație între DBH bazat pe smartphone și cel bazat pe șubler. *Environmental Monitoring and Assessment*, 195(6), 678. DOI:10.1007/s10661-023-11366-8

13. Häkli, J., Sirkka, A., Jaakkola, K., Puntanen, V., & Nummila, K. (2013). Provocări și posibilități ale RFID în industria forestieră. În *Identificarea prin radiofrecvență de la sistem la aplicații*. IntechOpen. DOI: 10.5772/54205
14. He, Z., & Turner, P. (2021). O analiză sistematică a tehnologiilor și Industriei 4.0 în lanțul de aprovizionare forestier: un cadru de identificare a provocărilor și oportunităților. *Logistics*, 5(4), 88. DOI:10.3390/logistics5040088
15. Holopainen, J., Toppinen, A., & Perttula, S. (2015). Impactul reglementării Uniunii Europene privind lemnul asupra strategiilor de certificare forestieră în lanțul valoric al industriei lemnului finlandez. *Forests*, 6(8), 2879–2896. <https://doi.org/10.3390/f6082879>
16. Hu, S., Li, K., & Bao, X. (octombrie 2015). Recunoașterea speciilor de lemn pe baza histogramei punctelor cheie SIFT. În 2015, al 8-lea congres internațional privind procesarea imaginilor și a semnalelor (CISP) (pp. 702–706). IEEE. DOI:10.1109/CISP.2015.7407968
17. Hwang, S. W., Lee, T., Kim, H., Chung, H., Choi, J. G. și Yeo, H. (2022). Clasificarea nodurilor de lemn folosind rețele neuronale artificiale cu descriptori de imagine bazați pe textură și caracteristici locale. *Holzforschung*, 76(1), 1–13. DOI:10.1515/hf-2021-0051
18. Ji, M., Zhang, W., Han, J. K., Miao, H., Diao, X. L., & Wang, G. F. (2024). Un algoritm bazat pe învățare profundă pentru detectarea online a defectelor mici țintă în cherestea tăiată de dimensiuni mari. *Industrial Crops and Products*, 222, 119671. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2024.119671>.
19. Kaakkurivaara, N. (2019). Posibilități de utilizare a tehnologiei codurilor de bare și RFID în industria lemnului din Thailanda. *Maejo International Journal of Science & Technology*, (1). În: *Maejo International Journal of Science and Technology*, vol. 13(1), pp. 29–41.
20. Kadzuwa, H., & Missanjo, E. (2022). Compararea diverselor metode de inventariere forestieră și a procedurilor operaționale pentru estimarea biomasei de suprafață în pădurile Miombo din Malawi. *Journal of Global Ecology and Environment*, 16(2), 7–27.
21. Kärhä, K., Nurmela, S., Karvonen, H., Kivinen, V. P., Melkas, T., & Nieminen, M. (2019). Estimarea preciziei și a timpului necesar pentru o aplicație mobilă de viziune artificială în măsurarea stivelor de lemne. *Computers and electronics in agriculture*, 158, 167–182. Doi:10.1016/j.compag.2019.01.040
22. Kaulen, A., Stopfer, L., Lippert, K., & Purfürst, T. (2023). Sistematică a tehnologiei forestiere pentru urmărirea lanțului de aprovizionare cu lemn. *Forests*, 14(9), 1718. DOI:10.3390/f14091718
23. Laporte, J., & Vandenhaute, M. (2016). Trasabilitatea: un instrument de management pentru întreprinderi și guverne. Programul FLEFGT al FAO. Document tehnic (FAO) nr. 1. Disponibil online la: <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/680effa0-6043-471e-b6d4-82f19194a176/content> (Accesat la 26 februarie 2026)
24. Magnuson, R., Erfanifard, Y., Kulicki, M., Gasica, T. A., Tangwa, E., Mielcarek, M. și Stereńczak, K. (2024). Dispozitive mobile în măsurarea pădurilor: O trecere în revistă a tehnologiilor și metodelor de măsurare a copacilor individuali. *Remote Sensing*, 16(19), 3570. DOI:10.3390/rs16193570
25. Martinetto, D., Wimmer, G., Ngo, P., Mothe, F., Piboule, A., Uhl, A., ... & Longuetaud, F. (2025). O nouă abordare a trasabilității biometrice a buștenilor de lemn, combinând metodele tradiționale și învățarea profundă. *Tehnologie agricolă inteligentă*, 10, 100686. <https://doi.org/10.1016/j.atech.2024.100686>.

26. Mensah, P., Pimenta, A. S., de Melo, R. R., Amponsah, J., Tuo, G., Chakurah, I., ... & Miranda, N. D. O. (2022). Lanțul global de aprovizionare cu produse din lemn: o analiză a literaturii de specialitate. *Forests*, 16 (7), 1036. DOI:10.3390/f16071036
27. Ministerul Mediului, Apelor și Pădurilor, SUMAL Woodtracking. Disponibil online la: <http://sumal.ro/>. (Accesat la 20 martie 2025)
28. Niță, M. D., & Borz, S. A. (2023). Precizia unei soluții freeware bazate pe smartphone și a două algoritmi de reconstrucție a formei în măsurătorile volumului buștenilor. *Computers and Electronics in Agriculture*, 205, 107653. DOI:10.1016/j.compag.2023.107653
29. Odstrčil, L., Valent, P., Kaputa, V., & Fabrika, M. (2024). Digitalizarea și virtualizarea produselor din lemn pentru utilizarea comercială a acestora. *Forests*, 15(12), 2263. Doi:10.3390/f15122263
30. Pahlberg, T., Hagman, O., & Thurley, M. (2015). Recunoașterea plăcilor folosind amprente lemnului pe baza unei fuziuni a metodelor de detectare a caracteristicilor. *Computers and Electronics in Agriculture*, 111, 164-173. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2014.12.014>.
31. Picchi, G. (2020). Marcarea copacilor în picioare cu etichete RFID. *Forests*, 11(2), 150. DOI: 10.3390/f11020150
32. Pichler, G., Sandak, J., Picchi, G., Kastner, M., Graifenberg, D., Stampfer, K., & Kühmaier, M. (2022). Urmărirea lemnului într-un lanț de aprovizionare forestier montan: un studiu de caz pentru analiza funcționalității, blocajelor, riscurilor și costurilor. *Forests*, 13(9), 1373. DOI: 10.3390/f13091373
33. Pichler, G., Lopez, J. A. P., Picchi, G., Nolan, E., Kastner, M., Stampfer, K., & Kühmaier, M. (2017). Comparatie între RFID bazat pe teledetectie și marcarea standard a copacilor pentru recoltarea lemnului. *Computers and Electronics in Agriculture*, 140, 214-226. DOI:10.1016/j.compag.2017.05.030
34. Sikkema, R., Junginger, M., Van Dam, J., Stegeman, G., Durrant, D., & Faaij, A. (2014). Recoltarea legală, aprovizionarea durabilă și utilizarea în cascadă a lemnului pentru bioenergie: Acoperirea acestora prin cadrele de certificare existente pentru gestionarea durabilă a pădurilor. *Forests*, 5(9), 2163-2211. DOI:10.3390/f5092163
35. SINTETIC: Valorificarea revoluției digitale în sectorul forestier. Disponibil online la: <https://sinteticproject.eu/>. (Accesat la 30 aprilie 2025).
36. Sun, Y., Du, G., Cao, Y., Lin, Q., Zhong, L., & Qiu, J. (2021). Urmărirea produselor din lemn folosind o metodă AKAZE îmbunătățită în sistemul de trasabilitate a lemnului. *IEEE Access*, 9, 88552-88563. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3088236>.
37. Sun, Y., Du, G., Lin, Q., Zhong, L., Zhao, Y., Qiu, J. și Cao, Y. (2022). Metoda de urmărire individuală a plăcilor de lemn folosind metoda orientată rapidă și rotită scurtă în sistemul de trasabilitate a lemnului. *Wood Science and Technology*, 56(3), 947-968. <https://doi.org/10.1007/s00226-022-01379-w>.
38. Sundström, A. (2016). Înțelegerea ilegalității și a corupției în guvernanta forestieră. *Journal of environmental management*, 181, 779-790. DOI:10.1016/j.jenvman.2016.07.020
39. Tatsumi, S., Yamaguchi, K., & Furuya, N. (2023). ForestScanner: O aplicație mobilă pentru măsurarea și cartografierea copacilor cu iPhone și iPad echipate cu LiDAR. *Metode în ecologie și evoluție*, 14(7), 1603-1609. DOI:10.1111/2041-210X.13900

40. Taylor, R., Davis, C., Brandt, J., Parker, M., Stäuble, T., & Said, Z. (2020). Ascensiunea big data și a tehnologiilor de sprijin în monitorizarea pădurilor lumii. *International Forestry Review*, 22(1), 129-141. DOI:10.1505/146554820829523880
41. Tzoulis, I., & Andreopoulou, Z. (2013). Tehnologiile emergente de trasabilitate ca instrument pentru comerțul cu lemn de calitate. *Procedia Technology*, 8, 606-611. DOI: 10.1016/j.protcy.2013.11.087
42. Wilkerson, E.G., Perlack, R.D., Blackwelder, B.D. et al. (2008). O evaluare preliminară a stării tehnologiei de recoltare și colectare a reziduurilor forestiere. Laboratorul Național Oak Ridge, Raport tehnic ORNL/TM-2007/195. DOI: 10.2172/938743

MULȚUMIRI

Îi aduc toată slava și mulțumirile Domnului și Mântuitorului meu Iisus Hristos pentru iubirea și harul Său și pentru împlinirea dorinței inimii mele de a obține titlul de doctor.

Cu mult respect și admirație, îi sunt profund recunoscător îndrumătorului meu, prof. dr. ing. Stelian Alexandru BORZ, a cărui expertiză și îndrumare, intuiții neprețuite, răbdare și sprijin m-au ghidat în fiecare etapă a acestei cercetări.

De asemenea, sunt îndatorat membrilor Comitetului meu de coordonare, prof. dr. Petrișan Ion Cătălin, prof. univ. asoc. dr. Marcu Marina Viorela, prof. univ. asoc. dr. Iordache Eugen și prof. univ. asoc. dr. Nicușor Boja, pentru feedback-ul lor constructiv, întrebările care m-au provocat la reflecție și încurajarea neclintită pe parcursul diferitelor etape ale acestei cercetări.

Aș dori să mulțumesc Catedrei de Inginerie Forestieră, Planificare a Gestionării Pădurilor și Măsurători Terestre, Facultatea de Silvicultură și Inginerie Forestieră, Universitatea Transilvania din Brașov, pentru punerea la dispoziție a echipamentului necesar pentru această cercetare.

Aș dori să mulțumesc Universității Transilvania din Brașov pentru bursa de studii extrem de valoroasă care a făcut posibilă realizarea acestui proiect de cercetare. Adresez mulțumiri rectorului Universității Transilvania din Brașov, prof. Ioan Vasile ABRUDAN, decanului Facultății de Silvicultură și Inginerie Forestieră, prof. Alexandru Lucian CURTU, precum și tuturor cadrelor didactice pentru îndrumarea utilă oferită pe parcursul programului de doctorat.

Mulțumiri speciale colegilor și prietenilor mei pentru amabilitatea și sprijinul acordat în diferite etape ale programului meu academic: Obaida Alhousrya, Tinashe Chamunorwa, Ronald Musona, Malsha Mayoshi, Vladimir Bulatnikov, Lukas Stopfer, Alexandra Reyes. Apreciez eforturile prietenilor și colegilor mei: Jenny Morocho, Gabriel Forkuo, Alfaro Dylan, Bolash Andras, Darius Naiman și Necolai Talagai, care m-au ajutat la colectarea datelor.