

ACADEMIA DE STUDII ECONOMICE DIN BUCUREȘTI

Școala doctorală de Informatică Economică



Rezumatul tezei de doctorat:

**Inteligența artificială în sprijinul economiei circulare:
cercetări și aplicații pentru reducerea risipei alimentare**

Doctorand:

Dragomir G.M. Denis-Alexandru

Conducător de doctorat:

Prof. univ. dr. Răzvan Daniel ZOTA

București, septembrie 2025

CUPRINS

Introducere	1
Structura tezei.....	2
Contribuții originale	3
Metodologia de cercetare	4
1. Contextul economic actual. Necesitatea tranziției către economia circulară	7
1.1 O tranziție necesară.....	9
1.1.1 Limitele modelului liniar	9
1.1.2 Oportunități circulare în rândul diferitelor domenii de activitate	11
1.1.3 Principalele probleme din alimentație și agricultură	12
1.1.4 Beneficiile implementării unui model circular	14
1.2 Politici pentru susținerea tranziției	15
1.2.1 O cale către inovație.....	15
1.2.2 European Green Deal	18
1.2.3 U.S. Environmental Protection Agency	25
2. Digitalizarea și economia circulară	29
2.1 Tehnologii digitale curente.....	30
2.2 Avantajele digitalizării economiei circulare.....	35
2.2.1 Informația imperfectă	35
2.2.2 Reducerea costurilor tranzacționale	37
2.2.3 Reducerea costurilor externe generate de consum	39
2.2.4 Atenuarea efectelor produse de factori externi tehnologiei	40
2.3 Transformarea circulară asistată de inteligența artificială.....	42
3. Computer Vision și risipa alimentară	46
3.1 Computer Vision.....	46
3.1.1 Recunoașterea	46
3.1.2 Analiza mișcării	47
3.2 Reducerea risipei alimentare	48
3.3 Analiza aplicațiilor existente ce utilizează Computer Vision	49
3.3.1 AgShift	49
3.3.2 ImpactVision	50
3.3.3 Winnow	50
3.3.4 Clarifresh	51
3.3.5 Tomra Food	52
3.3.6 FruitSpec	53
3.3.7 FarmWise	54
3.3.8 Prospera Technologies	55
3.3.9 Analiză comparativă.....	55
4. Platformă web pentru analiza vizuală inteligentă a alimentelor perisabile	57

4.1 Tehnologii utilizate	58
4.1.1 React și Material UI	58
4.1.2 Python	58
4.1.3 YOLO.....	59
4.2 Fluxul de operare	63
4.3 Algoritmi utilizați în preprocesarea cadrelor video	68
4.3.1 Gray World Normalization (GWN)	68
4.3.2 Îmbunătățirea adaptivă a luminozității	69
4.3.3 Ajustarea contrastului.....	70
4.4 Algoritmi utilizați în procesarea cadrelor video	71
4.4.1 Filtrarea dublurilor	71
4.4.2 Agentul de urmărire temporală	72
4.5 Algoritmi utilizați în calculul distribuției gradului de coacere	79
4.5.1 Eșantionarea probelor eligibile	79
4.5.2 Determinarea parametrilor de calcul	81
4.5.3 Calculul distribuției	83
4.5.4 Generarea recomandărilor	86
4.5.5 Motivația alegerii algoritmului HSV/RGB normalizat - Sobel.....	87
4.6 Strategii de optimizare	88
4.6.1 Interacțiunea cu motorul grafic	89
4.6.2 Captarea cadrelor intermediare	90
4.6.3 Interpolarea cadrelor statice.....	91
4.7 Validarea soluției	92
4.7.1 Mediul de test	92
4.7.2 Rezultate și analiză.....	94
4.8 Aplicații practice și relevanță	99
5. Concluzii	102
5.1 Considerații finale și concluzii	102
5.2 Contribuții originale, limite și direcții viitoare de cercetare.....	103
5.2.1 Contribuții originale	103
5.2.2 Limitări.....	104
5.2.3 Direcții viitoare de cercetare.....	105
Lista publicațiilor	105
1. Articole publicate în reviste internaționale	105
- Articole publicate în reviste indexate în baze de date internaționale.....	105
- Articole publicate în reviste indexate ISI – Web of Science.....	106
2. Articole prezentate la conferințe și publicate în Proceedings.....	107
3. Prezentări făcute în cadrul Sesiunilor Științifice ale Școlii doctorale de Informatică Economică – ASE București	107
Referințe bibliografice.....	108

Anexe	123
1. Lista figurilor.....	123
2. Lista tabelelor	124
3. Lista acronimelor	125
4. Cod sursă.....	127
4.1 Filtrul Kalman.....	127
4.2 GPU shader pentru preprocesare	129
4.3 GPU shader pentru calculul distribuției de coacere	130
4.4 Funcția ce calculează potrivirea detectări – cadre.....	135
4.5 Funcții ce calculează distribuția de coacere.....	137
4.6 Filtrarea duplicatelor	141
4.7 Logica CPU pentru preprocesare	144
4.8 Procesarea cadrului + interpolare.....	146
4.9 Motorul de recomandări	148
4.10 Motorul de colectare a datelor	152
4.11 Inferența pe server.....	157

CUVINTE CHEIE: economie circulară, inteligență artificială, risipă alimentară, identificare vizuală, distribuție de coacere

REZUMAT

Progresul tehnologic a generat apariția unor soluții tot mai sofisticate și eficiente pentru provocările contemporane. Una dintre acestea vizează gestionarea limitării resurselor naturale, aspect care a determinat adoptarea unor modele economice noi, bazate pe principii de reutilizare și reciclare. În acest context, sectorul agroalimentar, fiind printre cei mai mari consumatori de resurse, se confruntă direct cu problema risipei alimentare, care devine o prioritate majoră în cadrul inițiativelor de schimbare a modelului economic.

Teza de doctorat definește și descrie procesele de dezvoltare și testare a unei platforme web inteligentă, destinată evaluării vizuale automate a alimentelor perisabile, cu scopul de a contribui la reducerea pierderilor alimentare și la creșterea eficienței economice. Platforma se distinge prin mai multe elemente originale, între care se remarcă implementarea manuală (atât pe procesor, cât și pe unitatea grafică) a logicii de preprocesare a imaginilor, pentru diminuarea timpilor de răspuns, integrarea unui mecanism avansat de urmărire temporală, care include un filtru Kalman construit pe zece dimensiuni, completat de metode complexe de filtrare, precum și calculul distribuției de coacere prin algoritmi ce utilizează spectrul de culoare, combinați cu filtrul Sobel pentru identificarea zonelor cu textură neregulată.

Limitările identificate, precum absența unui model de segmentare pentru creșterea preciziei sau lipsa unor mecanisme de învățare continuă asistată, constituie puncte de plecare pentru cercetări viitoare. Aceste direcții ar putea contribui la extinderea capabilităților platformei și la integrarea acesteia într-un ecosistem digital mai amplu, dedicat sustenabilității agroalimentare și reducerii risipei de resurse.

Teza de doctorat este organizată în cinci capitole. Primele două capitole sunt dedicate cadrului conceptual și stadiului actual al cercetării, incluzând definirea contextului economic, identificarea principalelor probleme și prezentarea soluțiilor existente la nivel internațional (în special în Europa și Statele Unite ale Americii). Tot aici este analizată influența inteligenței artificiale asupra economiei circulare și este subliniată contribuția acesteia la dezvoltarea unor soluții digitale menite să sporească eficiența proceselor și să diminueze efectele negative ale modelului economic liniar.

Următoarele trei capitole sunt orientate spre dimensiunea aplicativă a cercetării, prin care sunt evidențiate utilitatea practică a studiului, dezvoltarea unor soluții originale și formularea unor

concluzii care validează consistența și relevanța demersului științific.

Primul capitol, intitulat *Contextul economic actual. Necesitatea tranziției către economia circulară*, conturează caracteristicile contextului economic liniar actual, precum și importanța tranziției către modele circulare.

În prima parte este realizat contrastul dintre modelul liniar și cel circular. Sunt definite limitele modelului liniar (dependența de resurse finite, vulnerabilitatea la șocuri ale lanțurilor de aprovizionare și volatilitatea prețurilor) și modalitatea prin care schimbarea de paradigmă economică oferă oportunități în rândul diferitelor domenii de activitate. De asemenea, pentru a face legătura cu problema pe care dorește să o rezolve platforma dezvoltată în cadrul lucrării, secțiunea dedicată risipei alimentare argumentează de ce domeniul agroalimentar este prioritar pentru implementarea politicilor circulare. Datele sintetizate indică pierderi considerabile de-a lungul lanțului valoric și distribuții diferite pe verigi (gospodării, retail, HoReCa, producție). În cele din urmă, sunt prezentate beneficiile majore ale modelului circular: diminuarea presiunii asupra resurselor, reducerea emisiilor și a poluării, creșterea eficienței energetice prin produse mai fiabile, apariția de locuri de muncă verzi și stimularea inovării, precum și reducerea dependenței de materii prime importate.

Partea a doua sintetizează cadrul strategic european (European Green Deal și Planul de acțiune pentru economia circulară), tranziția energetică (inclusiv prin REPowerEU), mobilitate durabilă și agricultură (de la fermă la consumator). Sunt menționate și alianțe industriale (ce vizează bateriile, materiile prime, hidrogenul, materialele plastice). Totodată, sunt incluse și inițiativele din SUA care acționează prin autoritatea denumită Agenția pentru Protecția Mediului EPA: reglementări și programe pentru apă, aer, energie, stimulente fiscale pentru eficiență energetică, precum și parteneriate de reducere a emisiilor.

Capitolul al doilea, intitulat *Digitalizarea și economia circulară* analizează principalele modalități prin care soluțiile digitale pot sprijini implementarea modelelor economice circulare. Aici este realizată o descriere a principalelor tehnologii care pot accelera schimbarea modelului economic: Internet of Things (rețele de senzori și dispozitive conectate care colectează date despre stare, utilizare și mediu), Cloud computing (IaaS, PaaS, SaaS pentru stocare, procesare și livrare de aplicații), Big Data analytics (valorificarea volumului, vitezei, varietății și veridicității datelor pentru a extrage valoare), Inteligența Artificială (modele care automatizează detecția de tipare, predicția și optimizarea), Blockchain (registre distribuite care oferă imuabilitate și trasabilitate) și platformele online (coordonare, piețe, colaborare). Sunt evidențiate și tehnologii de transformare fizică (precum imprimarea 3D), care sprijină modularitatea, reparabilitatea și producția la cerere.

Pentru a demonstra impactul pozitiv al acestor tehnologii, sunt prezentate și principalele avantaje ale digitalizării economiei circulare, precum implementarea trasabilității, monitorizarea componentelor cu scopul întreținerii și reparării ulterioare, precum și reducerea costurilor (tranzacționale, generate de consum).

În final, tehnologia utilizată în teză (IA) este descrisă în amănunt, fiind evidențiat rolul acesteia în transformarea circulară: accelerarea sortării deșeurilor, optimizarea mentenanței, asistarea în proiectarea materialelor, îmbunătățirea lanțului de aprovizionare și personalizarea interacțiunilor cu utilizatorul final (prin aplicații de tip chatbot).

Capitolul conchide că transformarea digitală este un catalizator al economiei circulare: reduce incertitudinea, micșorează frecvențele de frecare din tranzacții și aliniază stimulentele între actori. Rezultatul este un sistem mai transparent, mai rezistent și mai eficient, capabil să decupleze creșterea economică de la consumul de resurse. Acest fundament pregătește terenul pentru capitolele următoare ale tezei, în care IA și Computer Vision sunt aplicate practic pentru reducerea risipei alimentare.

În capitolul 3, intitulat *Computer vision și risipa alimentară*, este realizată tranziția către cadrul conceptual din spatele demersului științific: introduce conceptele de Computer Vision (CV), arată de ce CV este potrivit pentru obiectivul reducerii risipei și compară soluțiile existente din piață, pentru a contura inovația adusă de platforma propusă în teză.

În prima parte este prezentat CV ca tehnologie prin intermediul căreia sunt extrase informațiile din imagini/video și automatizarea sarcinilor de la recunoaștere (OCR, detecție obiecte, identificare fețe, estimare poziție) la analiza mișcării (egomotion, tracking, optical flow). Acest cadru justifică alegerile ulterioare: detecția, urmărirea temporală și analiza vizuală a stării produselor sunt exact funcțiile necesare pentru a reduce pierderile mari din lanțul alimentar. De asemenea, analiza literaturii de specialitate în acest sens confirmă fezabilitatea tehnică (rețele pre-antrenate, YOLO/varianțe pentru detecție, clasificatoare pentru prospețime), dar semnalează și limite: dependența de seturi de date precise și de condiții de iluminare controlate și costuri de hardware mari pentru imagistică avansată.

A doua parte compară principalele soluții de pe piață ce integrează CV și semnalează principalele probleme: costurile foarte ridicate, necesitatea echipamentelor specializate, precum și lipsa scalabilității și imposibilitatea integrării la nivel de instituții medii și mijlocii sau în gospodării.

Prin urmare, capitolul fundamentează deciziile tehnice ale capitolului 4 și demonstrează nevoia și noutatea soluției: un sistem accesibil, dezvoltat în web, ce funcționează în timp real, cu urmărire temporală și estimare de coacere la nivel de aliment.

Al patrulea capitol, Platformă web pentru analiza vizuală inteligentă a alimentelor perisabile, descrie soluția propusă în cadrul cercetării, o platformă web dedicată analizei vizuale a alimentelor perisabile. Platforma urmărește să răspundă direct limitărilor identificate anterior în literatura de specialitate: lipsa procesării în timp real, dificultatea urmăririi dinamice a obiectelor și necesitatea implementării unei soluții fără a depinde de infrastructuri costisitoare sau complexe.

Obiectivul general al aplicației este analiza vizuală inteligentă a alimentelor, prin integrarea unui flux de preprocesare a imaginii, detecție, clasificare, urmărire temporală și acordare de scoruri. Aceste etape permit atât identificarea obiectelor, cât și estimarea gradului lor de coacere, oferind ulterior recomandări pentru consum, în funcție de context.

Arhitectura este construită modular, separând componentele de captare și procesare a imaginilor de logica de interacțiune cu utilizatorul. Interfața grafică este concepută pentru a fi modernă, intuitivă și accesibilă, ocupând întreg spațiul disponibil al browser-ului și adaptată pentru a funcționa inclusiv pe dispozitive cu resurse limitate. Pentru aceasta, aplicația oferă două moduri operaționale: pe CPU (procesor central) sau pe GPU (unitate grafică), utilizatorul putând comuta între ele în funcție de context și resursele disponibile.

Fluxul general al aplicației presupune captarea fluxului video prin camera web, aplicarea unor proceduri de preprocesare menite să normalizeze datele de intrare, și transmiterea acestora către un server unde rulează un model avansat de detecție vizuală (YOLOV8). Rezultatele sunt filtrate și stabilizate temporal, fiecare obiect fiind urmărit de-a lungul timpului cu ajutorul unui agent specializat care utilizează un filtru Kalman cu 10 dimensiuni. Pe baza obiectelor detectate și urmărite, sunt selectate probe ce permit analiza distribuției gradului de coacere. Distribuția este estimată în funcție de nuanțele dominante, variația cromatică și prezența neregularităților vizuale, rezultatele fiind transformate în recomandări.

Un element central al platformei este agentul de urmărire temporală, menit să asigure coerență și stabilitate în detecții. Acesta gestionează fiecare obiect ca o entitate monitorizată în timp, îi atribuie un identificator unic și ia decizii privind păstrarea sau eliminarea detectărilor în funcție de consistența temporală. De asemenea, implementează un mecanism de alocare a claselor bazat pe stabilitate, prevenind schimbările bruște de categorie cauzate de erori temporare ale modelului de detecție.

Estimarea distribuției de coacere reprezintă o etapă esențială, fiind bazată pe analiza probelor cromatice selectate din interiorul fiecărui obiect detectat. Acestea sunt filtrate astfel încât să fie eliminate zonele prea întunecate, supraexpuse sau care fac parte din fundal. Distribuția finală ia în considerare proporția vizuală a nuanțelor dominante, variația acestora și indicatorii de textură

(precum coeficientul Sobel), permițând o clasificare în stadii precum Unripe, Early Ripe, Ripe, Overripe și Rotten. Pe baza acestor rezultate, motorul de recomandări oferă sugestii privind consumul, sortarea sau destinația ulterioară a alimentelor, ținând cont de contextul ales de utilizator (depozit, comerț, bucătărie sau fermă).

Optimizările integrate permit rularea aplicației în timp real. Printre acestea se numără preprocesarea accelerată pe GPU, gestionarea cadrelor intermediare pentru evitarea blocajelor, precum și interpolarea prin predicții atunci când procesarea completă nu poate fi realizată. Prin aceste mecanisme, platforma atinge pragul de performanță necesar pentru utilizarea practică, menținând peste 30 cadre pe secundă inclusiv pe sisteme cu resurse limitate.

Validarea soluției a fost realizată prin experimente desfășurate atât pe CPU, cât și pe GPU, în condiții diferite de rezoluție, număr de obiecte și dinamică a scenei. Rezultatele au demonstrat robustețea platformei: sistemul rămâne stabil, depășește pragul de 30 FPS și menține acuratețea detecțiilor chiar și atunci când aproape jumătate dintre cadre sunt interpolate prin filtrul Kalman. Această capacitate de a compensa lipsa detecțiilor directe confirmă utilitatea abordării propuse pentru scenarii reale.

Relevanța practică a platformei se reflectă în multiple domenii: comerț cu amănuntul, (pentru identificarea rapidă a produselor alterate și gestionarea stocurilor), depozite și centre de colectare, ferme și livezi (decizii de recoltare și distribuție), consum, industria HoReCa sau chiar piețe agroalimentare și aplicații educaționale.

În cele din urmă, **capitolul 5**, denumit *Concluzii*, prezintă contribuțiile originale ale cercetării, evidențiază limitele platformei și trasează direcțiile viitoare de dezvoltare. Sunt prezentate, totodată, articolele, conferințele și prezentările științifice realizate pe parcursul stagiului doctoral.

Lucrarea aduce contribuții originale prin identificarea tehnologiilor IA utilizate în sprijinul economiei circulare și analiza comparativă a platformelor existente, precum și dezvoltarea unei platforme hibride web-backend cu preprocesare în browser și inferență asincronă (YOLOv8m/n).

La nivel de algoritmi, teza propune utilizarea unui filtru Kalman 10D, filtrare și fuziune de detecții, stabilizare a claselor, filtrare bazată pe proximitate, mișcare și stabilitate, interacțiunea directă cu GPU prin intermediul *shaders* și metode de interpolare și calcul de distribuție bazat pe nuanțele de culoare și filtrul Sobel.

Limitele identificate se referă la aria restrânsă de acoperire (nu sunt luate în calcul toate alimentele perisabile), necesitatea unui mediu controlat (iluminare uniformă, fără umbre și reflexii), extinderea filtrului Kalman pentru a trata și cazurile ce prezintă accelerație, absența segmentării pentru creșterea preciziei calculului distribuției de coacere.

Pe baza rezultatelor obținute și a limitărilor identificate, direcțiile viitoare de cercetare vizează consolidarea și extinderea platformei printr-o serie de îmbunătățiri tehnice și metodologice. Un prim obiectiv îl constituie integrarea mecanismelor de tip Explainable AI, prin generarea de hărți de atenție (heatmaps) care să ofere utilizatorilor transparență și înțelegere asupra modului în care sistemul ia decizii. Totodată, estimarea tridimensională sau volumetrică a fructelor și legumelor pe baza secvențelor video ar permite o evaluare mai precisă a dimensiunilor și a gradului de maturitate. Pentru creșterea acurateței, se propune introducerea segmentării, care să permită selecția exactă a probelor, depășind limitările măștii eliptice utilizate în prezent. În paralel, optimizarea calculelor de coacere pe CPU ar contribui la o utilizare mai eficientă a resurselor, facilitând și mai mult implementarea pe dispozitive cu capabilități hardware limitate.