

**UNIVERSITATEA TEHNICĂ
"GHEORGHE ASACHI" DIN IAȘI**

ȘCOALA DOCTORALĂ

**FACULTATEA DE INGINERIE CHIMICĂ
ȘI PROTECȚIA MEDIULUI
"Cristofor Simionescu"**



**MANAGEMENTUL SUSTENABIL
AL DEȘEURILOR ALIMENTARE:
EVALUAREA INTEGRATĂ
A IMPACTULUI, RISCURILOR
ȘI OPȚIUNILOR DE VALORIFICARE
ÎN CONTEXTUL ECONOMIEI CIRCULARE**

REZUMATUL TEZEI DE DOCTORAT

Conducător de doctorat:

Prof.univ.emerit dr.ing. MARIA GAVRILESCU

Doctorand:

ERSILIA-DANIELA LAZĂR (COȘBUC)

IAȘI 2026

UNIVERSITATEA TEHNICĂ „GHEORGHE ASACHI” DIN IAȘI
R E C T O R A T U L

Către

Vă facem cunoscut că, în ziua de 30.10.2026 la ora 10.00 în Sala CH IV a Facultății de Inginerie Chimică și Protecția Mediului "Cristofor Simionescu", va avea loc susținerea publică a tezei de doctorat intitulată:

“ Managementul sustenabil al deșeurilor alimentare: evaluare integrată a impactului, riscurilor și opțiunilor de valorificare în contextul economiei circulare”

elaborată de doamna Ersilia-Daniela Lazăr (Coșbuc), în vederea conferirii titlului științific de doctor.

Comisia de doctorat este alcătuită din:

1. Prof.univ.dr. habil.ing. Irina VOLF Universitatea Tehnică "Gheorghe Asachi" din Iași	Președinte
2. Prof.univ. emerit dr.ing. Maria GAVRILESCU Universitatea Tehnică "Gheorghe Asachi" din Iași	Conducător de doctorat
3. Prof.univ.dr.habil.ing. Lăcrămioara RUSU Universitatea "Vasile Alecsandri" din Bacău	Referent oficial
4. Conf.univ.dr.ing. Raluca-Maria HLIHOR Universitatea pentru Științele Vieții "Ion Ionescu de la Brad, Iași	Referent oficial
5. Prof.univ.dr. habil. chim. Laura BULGARIU Universitatea Tehnică "Gheorghe Asachi" din Iași	Referent oficial

Cu această ocazie vă invităm să participați la susținerea publică a tezei de doctorat.

TEZA DE DOCTORAT

**MANAGEMENTUL SUSTENABIL
AL DEȘEURILOR ALIMENTARE:
EVALUAREA INTEGRATĂ
A IMPACTULUI, RISCURILOR
ȘI OPȚIUNILOR DE VALORIFICARE
ÎN CONTEXTUL ECONOMIEI CIRCULARE**

Domeniul de doctorat: INGINERIA MEDIULUI

ERSILIA-DANIELA LAZĂR (COȘBUC)

Comisia de doctorat:

Prof.univ.dr. habil.ing. Irina VOLF	
Universitatea Tehnică "Gheorghe Asachi" din Iași	Președinte
Prof.univ. emerit dr.ing. Maria GAVRILESCU	
Universitatea Tehnică "Gheorghe Asachi" din Iași	Conducător de doctorat
Prof.univ.dr.habil.ing. Lăcrămioara RUSU	
Universitatea "Vasile Alecsandri" din Bacău	Referent oficial
Conf.univ.dr.ing. Raluca-Maria HLIHOR	
Universitatea pentru Științele Vieții "Ion Ionescu de la Brad, Iași	Referent oficial
Prof.univ.dr. habil. chim. Laura BULGARIU	
Universitatea Tehnică "Gheorghe Asachi" din Iași	Referent oficial

Comisia de îndrumare și integritate academică

1. Prof.univ.dr.ing. **Teodor MALUȚAN,**

Universitatea Tehnică "Gheorghe Asachi" din Iași

2. Prof.univ.dr.habil.ing. **Brîndușa Mihaela SLUȘER**

Universitatea Tehnică "Gheorghe Asachi" din Iași

3. Șef lucrări.dr.ing. **Petronela COZMA**

Universitatea Tehnică "Gheorghe Asachi" din Iași

4. Șef lucrări dr.ing. **Cristina GHINEA**

Universitatea Stefan cel Mare din Suceava

Mulțumiri

Finalizarea acestei teze de doctorat reprezintă un moment definitoriu în parcursul meu personal și profesional, reflectând un proces complex de aprofundare, efort susținut și dezvoltare continuă. Această lucrare nu exprimă doar rezultatele unei activități academice riguroase, ci și implicarea mea profundă în problematica managementului durabil al deșeurilor alimentare. Ea oglindește preocuparea constantă pentru protecția mediului și dorința de a contribui, printr-o abordare științifică, la înțelegerea mecanismelor, impactului și soluțiilor asociate acestui domeniu esențial pentru dezvoltarea durabilă.

Prezenta teză de doctorat a fost realizată cu sprijinul, îndrumarea și susținerea constantă oferite de cadrul academic și instituțional în care mi-am desfășurat activitatea, precum și de colectivele de cercetare și colaborare implicate, cărora le adresez profunda mea recunoștință. Contribuțiile acestora, sub diverse forme, au avut un rol esențial în desfășurarea și finalizarea demersului științific.

În primul rând, îmi exprim deosebită recunoștință doamnei Prof.univ. emerit dr.ing. Maria Gavrilescu, în calitate de conducător de doctorat, pentru încrederea acordată, pentru rigoarea științifică insuflată, precum și pentru sprijinul constant oferit pe parcursul studiilor doctorale. Profesionalismul, distincția și calitățile umane remarcabile au contribuit semnificativ la conturarea acestui demers științific, iar îndrumarea și viziunea sa au avut un rol esențial în definirea parcursului academic.

Mulțumiri speciale aduc membrilor Comisiei de îndrumare și integritate academică: domnul Prof.univ.dr.ing. Teodor Măluțan (Universitatea Tehnică Gheorghe Asachi din Iași), doamna Prof.univ.dr.habil.ing. Brîndușa Mihaela Slușer (Universitatea Tehnică Gheorghe Asachi din Iași) doamna Șef lucr.dr.ing. Petronela Cozma (Universitatea Tehnică Gheorghe Asachi din Iași) și doamna Șef lucr.dr.ing. Cristina Ghinea (Universitatea Ștefan cel Mare din Suceava), pentru sprijinul acordat pe parcursul activității doctorale. Apreciază în mod deosebit rigoarea științifică, exigența constructivă și implicarea constantă în procesul de elaborare a tezei. Observațiile, sugestiile și orientările formulate au contribuit semnificativ la structurarea coerentă a demersului de cercetare și la menținerea unei direcții științifice clare.

Îmi exprim recunoștința față de membrii Comisiei de evaluare și susținere a tezei de doctorat pentru disponibilitatea de a analiza cu atenție această lucrare, precum și pentru rigoarea științifică și spiritul critic manifestate în procesul de evaluare. Adresez mulțumiri doamnei Prof.univ.dr.habil.ing. Irina Volf, în calitate de președinte al comisiei, precum și distinșilor referenți oficiali: doamnei Prof.univ.dr.habil.ing. Ileana Denisa Nistor, doamnei Conf.univ.dr.ing. Raluca-Maria Hlihor, și doamnei Prof.univ.dr.habil.chim. Laura Bulgariu, pentru observațiile pertinente și contribuțiile valoroase la consolidarea conținutului științific al tezei de doctorat.

Recunoștința mea se îndreaptă spre cadrele didactice din cadrul Departamentului Ingineria și Managementul Mediului care au contribuit la formarea mea profesională.

Apreciez la superlativ întreg sprijinul colectivului Ingineria Proceselor Chimice și Biologice din Departamentul Ingineria și Managementul Mediului pentru mediul de lucru stimulat și pentru susținerea constantă de-a lungul acestor ani, perioadă în care mi-am desfășurat activitatea în cadrul acestui colectiv și am beneficiat de un cadru favorabil dezvoltării profesionale și științifice. Interacțiunile din cadrul grupului, colaborările și schimbul de idei au avut un rol important în parcursul meu academic. În mod special, le mulțumesc colegelor mele, Dr. ing. Diana Comăniță și Drd. ing. Raluca-Maria Țăbuleac, pentru colaborarea directă în activitățile de cercetare, pentru discuțiile constructive și pentru sprijinul oferit în desfășurarea lucrărilor și în depășirea dificultăților întâlnite pe parcurs.

Îmi exprim profunda recunoștință față de cele mai importante persoane din viața mea, a căror susținere constantă, înțelegere și încurajare necondiționată au constituit un veritabil reper de echilibru și stabilitate pe parcursul tuturor etapelor acestui demers doctoral. Prezența lor discretă, dar esențială, a oferit sprijinul emoțional necesar depășirii momentelor dificile și a contribuit semnificativ la menținerea motivației și a încrederii în finalizarea acestei lucrări.

Tuturor celor care mi-au fost alături, direct sau indirect, le adresez cele mai sincere gânduri de mulțumire și întreaga mea gratitudine pentru sprijinul, răbdarea și încrederea acordate de-a lungul acestui parcurs.

CUPRINS

INTRODUCERE	1
CAPITOLUL 1	
STADIUL CUNOAȘTERII ÎN DOMENIUL MANAGEMENTULUI SUSTENABIL AL DEȘEURILOR ALIMENTARE.....	13
1.1. Contextul actual al generării și managementului deșeurilor alimentare	13
1.2. Deșeurile alimentare și impactul asupra mediului	17
1.2.1. Contribuția deșeurilor alimentare la schimbările climatice	17
1.2.2. Utilizarea ineficientă a resurselor natural	19
1.2.3. Poluarea solului și a resurselor de apă	21
1.2.4. Impactul deșeurilor alimentare asupra biodiversității	21
1.2.5. Implicații pentru politicile de mediu și dezvoltare durabilă	22
1.3. Cadrul legislativ și strategic privind reducerea deșeurilor alimentare ...	23
1.4. Sinteza critică, poziționarea cercetării și obiectivele studiului	28
1.4.1. Limitări conceptuale și metodologice	28
1.4.2. Limitări ale cadrului politic și instituțional	29
1.4.3. Lipsa abordărilor integrate și limitările transferabilității	29
1.4.4. Poziționarea cercetării doctorale	30
1.5. Politici și reglementări pentru managementul integrat al deșeurilor alimentare	32
1.5.1. Politici și reglementări la nivelul Uniunii Europene	32
1.5.2. Politici și reglementări naționale privind managementul deșeurilor alimentare în România	33
1.5.3. Deșeurile alimentare și Obiectivele de Dezvoltare Durabilă (SDGs)	35
1.6. Opțiuni de management al deșeurilor alimentare la nivel european și național	36
1.6.1. Cadrul european privind prevenirea risipei alimentare	36
1.6.2. Modele și bune practici europene și naționale în managementul deșeurilor alimentare	38
1.6.3. Cercetări privind strategii și metode de valorificare a deșeurilor alimentare	39
1.7. Analiză bibliometrică a cercetărilor în managementul deșeurilor alimentare: evoluție și tendințe la nivel global și național	41
Concluzii	46
CAPITOLUL 2.	
METODOLOGIA CERCETĂRII	47
2.1. Fundamentarea metodologică a cercetării	47
2.2. Cadrul metodologic al instrumentelor de suport decizional pentru managementul deșeurilor alimentare	48
2.3. Integrarea principiilor de eco-eficiență și economie circulară în metodologia de cercetare	50

2.4. Metodologia integrată cantitativ–calitativă	51
2.4.1. Abordarea cantitativă	51
2.4.2. Abordarea calitativă	52
2.5. Metodologia Evaluării Ciclului de Viață (ECV)	53
2.5.1. Evaluarea ciclului de viață (ECV) aplicată în analiza impactului de mediu al managementului deșeurilor alimentare	53
2.5.2. Aplicarea metodologiei ECV	54
2.6. Metodologia de identificare a hazardelor și evaluare a riscurilor	56
2.6.1. Identificarea hazardelor	57
2.6.2. Estimarea riscurilor	58
2.6.3. Instrumente calitative complementare	60
2.6.4. Sinergia dintre metodele cantitative și calitative	63
2.6.5. Metodologia de estimare a riscului indus de deșeurile alimentare în mediu	65
2.7. Metodologia Analizei Cost–Beneficiu (ACB)	66
2.8. Metodologia analizei multicriteriale (MCDA)	72
Concluzii	78

CAPITOLUL 3.

PLANIFICAREA ȘI EVALUAREA ALTERNATIVELOR

DE MANAGEMENT ȘI VALORIFICARE A DEȘEURILOR ALIMENTARE ÎN MUNICIPIUL IAȘI

79

3.1. Scopul și relevanța cercetării.....	79
3.2. Deșeurile alimentare ca flux prioritar în managementul biodeșeurilor	80
3.3. Probleme și oportunități în managementul deșeurilor alimentare în municipiul Iași	82
3.4. Impactul deșeurilor alimentare asupra mediului și sănătății	84
3.4.1. Vulnerabilitatea fracției alimentare în contextul deficiențelor colectării separate	84
3.4.2. Depozitare și emisii de metan	86
3.4.3. Amprenta de carbon și pierderea resurselor	88
3.4.4. Levigatul și contaminarea pânzei freatice	88
3.4.5. Eutrofizarea ecosistemelor acvatice	89
3.4.6. Vectori și riscuri epidemiologice	90
3.4.7. Expunerea lucrătorilor din salubritate	90
3.4.8. Calitatea vieții în comunitățile adiacente	91
3.4.9. Riscuri specifice instituțiilor publice	92
3.5. Fundamentarea selectării alternativelor de valorificare	93
3.5.1. Dimensiunea tehnică și fezabilitatea operațională	94
3.5.2. Dimensiunea de mediu	95
3.5.3. Dimensiunea economică	95
3.5.4. Dimensiunea socială	96
3.5.5. Alinierea cu ierarhia deșeurilor și economia circular	97
3.5.6. Scenariul de referință (BAU)	97
3.5.7. Alternativele de valorificare	98
3.6. Descrierea alternativelor de valorificare a deșeurilor alimentare	99
3.6.1. Scenariul A – Compostarea	99
3.6.1.1. Procesul de compostare a deșeurilor alimentare: etape tehnologice și parametri operaționali	99
3.6.1.2. Beneficii și limitări ale compostării în contextul municipiului Iași	103
3.6.2. Scenariul B – Producerea de biogaz și recuperarea nutrienților	104
3.6.2.1. Analiza pierderilor de resurse și a potențialului energetic	104

al deșeurilor alimentare în Iași	
3.6.2.2. Principii tehnologice și fluxul operational	106
3.6.2.3. Fluxul tehnologic integrat pentru producerea de biogaz și recuperarea nutrienților din deșeuri alimentare	107
3.6.2.4. Beneficii și limitări ale digestiei anaerobe a deșeurilor alimentare în contextul municipiului Iași	111
3.6.3. Scenariul C – Extracția compușilor bioactivi pentru obținerea de flavonoide concentrate	113
3.6.3.1. Fluxul tehnologic de extracție a flavonoidelor din deșeuri alimentare	113
3.6.3.2. Tipuri de produse obținute prin extracția flavonoidelor din deșeuri alimentare	119
3.6.2.3. Beneficii și limitări ale procesului de extracție a flavonoidelor din deșeuri alimentare în contextul Municipiului Iași	119
3.6.3. Scenariul D – Obținerea de enzime din deșeuri alimentare	121
3.6.3.1. Etapele tehnologice și selecția materiilor prime pentru obținerea enzimelor din deșeuri alimentare	121
3.6.3.2. Tipuri de produse obținute în procesul de obținerea enzimelor din deșeuri alimentare	128
3.6.3.3. Beneficii și limitări ale procesului de obținerea enzimelor din deșeuri alimentare în contextul municipiului Iași	129
3.7. Planificarea și evaluarea comparativă a performanței alternativelor	129
3.7.1. Indicatori de performanță de mediu	129
3.7.2. Indicatori economici și sociali	131
3.7.3. Metodologia de analiză comparativă a scenariilor	132
3.8. Premise pentru integrarea alternativelor în strategia locală de management al deșeurilor	134
3.8.1. Corelarea cu politicile publice	134
3.8.2. Direcții de implementare la nivel municipiului	134
3.8.3. Rolul actorilor locali	135
Concluzii	135

CAPITOLUL 4.

ANALIZA IMPACTURILOR GENERATE ÎN MEDIU DE SCENARIILE DE VALORIFICARE A DEȘEURILOR ALIMENTARE ÎN MUNICIPIUL IAȘI APLICÂND METODOLOGIA EVALUĂRII CICLULUI DE VIAȚĂ (ECV)	139
---	-----

4.1. Scopul și importanța cercetării în contextul managementului sustenabil local	139
4.2. Scopul analizei ECV pentru scenariile de management al deșeurilor alimentare din municipiul Iași	140
4.2.1. Evaluarea ciclului de viață în fundamentarea deciziilor privind valorificarea deșeurilor alimentare	140
4.2.2. Evaluarea ciclului de viață a alternativelor de management al deșeurilor alimentare în municipiul Iași	142
4.2.3. Inventarul ciclului de viață	143
4.2.4. Selectarea metodelor și parametrilor de impact	146
4.3. Evaluarea impactului	153
4.3.1. Metoda ReCiPe08 (Scenariile A–D)	153
4.3.2. Metoda CML2001 (Scenariile A–D)	153
4.3.3. Metoda Eco-Indicator 99 (Scenariile A–D)	155
4.3.4. Metoda EDIP 2003 (Scenariile A–D)	155
4.4. Analiza comparativă detaliată a scenariilor A–D, din perspectiva	156

energiei și impactului asupra mediului	
4.4.1. Analiza comparativă din perspectiva energiei și impactului asupra mediului (GWP și ADP)	156
4.4.2. Analiza comparativă pe baza beneficiilor indirecte (substituție)	161
4.4.3. Analiza comparativă a scenariilor din perspectiva gradului de circularitate	162
Concluzii	164
 CAPITOLUL 5.	
ESTIMAREA ȘI MINIMIZAREA RISCULUI ASOCIAT ALTERNATIVELOR DE MANAGEMENT AL DEȘEURILOR ALIMENTARE	167
5.1. Scopul și importanța cercetării	167
5.2. Cadrul conceptual și metodologic al estimării riscului ecologic și pentru sănătatea umană	168
5.3. Estimarea riscului ecologic și pentru sănătatea umană asociat scenariilor A-D de management al deșeurilor alimentare	169
5.3.1. Cadrul metodologic pentru evaluarea riscului ecologic și estimarea expunerii în scenariile de management al deșeurilor alimentare	169
5.3.2. Estimarea expunerii	169
5.3.3. Evaluarea toxicității	177
5.3.4. Caracterizarea riscului	178
5.4. Minimizarea riscului ecologic și pentru sănătatea umană	182
5.4.1. Fundamentarea procesului de minimizare a riscului	182
5.4.2. Ierarhia măsurilor de reducere a riscului	183
5.4.3. Măsuri specifice de minimizare a riscului pe tipuri de poluare	183
5.4.4. Analiza comparativă a eficienței măsurilor de minimizare a riscului	184
5.4.5. Implicații pentru selecția scenariului optim	185
5.4.6. Integrarea minimizării riscului în ciclul de management	185
5.4.7. Minimizarea riscului prin integrarea scenariilor de valorificare a deșeurilor alimentare	185
5.5. Monitorizare și revizuire continuă a riscului ecologic și pentru sănătatea umană	186
5.5.1. Rolul monitorizării în managementul riscului	186
5.5.2. Monitorizarea parametrilor de mediu și a emisiilor	187
5.5.3. Compararea rezultatelor cu valorile de referință	187
5.5.4. Evaluarea eficienței măsurilor de reducere a riscului	188
5.5.5. Revizuirea și îmbunătățirea continuă a sistemului	188
5.5.6. Integrarea monitorizării în ciclul de management al riscului	189
Concluzii	189
 CAPITOLUL 6.	
ANALIZA COST-BENEFICIU (ACB) PENTRU SCENARIILE DE MANAGEMENT AL DEȘEURILOR ALIMENTARE	193
6.1. Scopul și importanța cercetării	193
6.2. Descrierea metodologiei aplicate	194
6.3. Evaluarea impactului economic al scenariilor de management al deșeurilor alimentare	195
6.3.1. Determinarea costurilor	195
6.3.2. Evaluarea costurilor și beneficiilor - aplicarea ratei de actualizare	197
6.3.3. Determinarea și analiza rapoartelor cost-beneficiu și beneficiu-cost	199
6.3.4. Analiza de sensibilitate pentru alternativele de management	205

<i>al deșeurilor alimentare</i>	205
6.3.4.1. <i>Descrierea metodologiei aplicate</i>	205
6.3.4.2. <i>Determinarea efectului variabilelor asupra indicatorilor economici</i>	207
Concluzii	211
 CAPITOLUL 7.	
ANALIZA MULTICRITERIALĂ A SCENARIILOR DE MANAGEMENT	
AL DEȘEURILOR ALIMENTARE	213
7.1. Scopul și importanța cercetării	213
7.2. Evaluarea scenariilor A-D prin aplicarea metodei multicriteriale	
Elimination Et Choix Traduisant la Realité (ELECTRE)	214
7.2.1. <i>Fundamentarea scenariilor în contextul analizei multicriteriale</i>	214
7.2.2. <i>Determinarea matricei consecințelor pentru scenariile A–D</i>	215
7.2.3. <i>Determinarea coeficienților de importanță K_{ij} pentru scenariile A–D</i> ...	216
7.2.4. <i>Evaluarea performanței scenariilor și construcția matricei de utilitate normalizate</i>	218
7.2.4.1. <i>Transformarea datelor și stabilirea direcției de optimizare pentru fiecare criteriu</i>	218
7.2.4.2. <i>Calculul utilităților normalizate (a_{ij}^*)</i>	218
7.2.4.3. <i>Calculul indicatorilor de concordanță</i>	220
7.2.4.4. <i>Calculul indicatorilor de discordanță</i>	221
7.2.4.5. <i>Stabilirea relației de surclasare și ierarhizarea scenariilor</i>	223
Concluzii	224
 CAPITOLUL 8	
MODEL INTEGRAT ȘI PERSPECTIVE STRATEGICE PENTRU	
MANAGEMENTUL SUSTENABIL AL DEȘEURILOR ALIMENTARE	
ÎN MUNICIPIUL IAȘI	227
8.1. Sinteza rezultatelor cercetării	227
8.1.1. <i>Deficiențe ale sistemului actual de management al deșeurilor alimentare în municipiul Iași</i>	227
8.1.2. <i>Impactul asupra mediului</i>	228
8.1.3. <i>Riscurile identificate</i>	228
8.1.4. <i>Performanța scenariilor analizate</i>	229
8.1.5. <i>Scenariul optim</i>	229
8.2. Model integrat de management al deșeurilor alimentare	231
8.3. Structura sistemului de management propus	231
8.3.1. <i>Generarea deșeurilor alimentare</i>	232
8.3.2. <i>Colectarea separată</i>	232
8.3.3. <i>Transportul deșeurilor alimentare</i>	233
8.3.4. <i>Tratarea deșeurilor alimentare</i>	233
8.3.5. <i>Valorificarea resurselor</i>	233
8.3.6. <i>Monitorizarea sistemului</i>	234
8.4. Scenariu realist de implementare	234
8.4.1. <i>Etapa pe termen scurt (1–3 ani)</i>	234
8.4.1.1. <i>Implementarea colectării separate</i>	235
8.4.1.2. <i>Dezvoltarea bazelor de date</i>	235
8.4.1.3. <i>Pilot pentru digestia anaerobă</i>	236
8.4.2. <i>Etapa pe termen mediu (3–7 ani)</i>	236
8.4.2.1. <i>Construirea instalației de digestie anaerobă</i>	236

8.4.2.2. Valorificarea digestatului	237
8.4.2.3. Optimizarea logisticii	237
8.4.3. Etapa pe termen lung (7–15 ani)	237
8.4.3.1. Dezvoltarea unei biorafinării	237
8.4.3.2. Obținerea de compuși bioactive	238
8.4.3.3. Producerea de enzime industrial	238
8.5. Aplicabilitatea metodologiei dezvoltate	239
8.5.1. Aplicabilitatea în alte municipii din România	241
8.5.2. Aplicabilitatea în orașe similare	242
8.5.3. Aplicabilitatea în regiuni caracterizate de lipsa datelor	242
8.6. Contribuția tezei de doctorat la dezvoltarea managementului deșeurilor alimentare	244
8.6.1. Contribuția metodologică	245
8.6.2. Contribuția aplicativă.....	245
8.6.3. Contribuția decizională	246
CONCLUZII GENERALE	247
BIBLIOGRAFIE	261
ANEXA 1. ACTIVITATEA ȘTIINȚIFICĂ	I

INTRODUCERE

Deșeurile alimentare generează impacturi semnificative asupra mediului, prin emisii de gaze cu efect de seră, utilizarea inefficientă a resurselor, poluarea solului și apei și efecte asupra biodiversității, fiind asociate și cu costuri economice ridicate și disfuncționalități ale lanțului alimentar (Kohli și colab., 2024). La nivelul Uniunii Europene se generează anual aproximativ 88 de milioane de tone de deșeuri alimentare, cu pierderi de peste 140 miliarde euro, în timp ce în România cantitatea este estimată la circa 1,5 milioane de tone anual (EEB, 2022). Evoluția cadrului legislativ și strategic european și internațional subliniază necesitatea reducerii și valorificării acestora în contextul economiei circulare, însă implementarea este limitată de lipsa unor instrumente analitice integrate, deficitul de date și dificultățile de adaptare la condițiile locale.

În acest cadru, teza de doctorat intitulată „**Managementul sustenabil al deșeurilor alimentare: evaluarea integrată a impactului, riscurilor și opțiunilor de valorificare în contextul economiei circulare**” își propune să contribuie la dezvoltarea unui model integrat de evaluare și decizie, capabil să coreleze dimensiunile de mediu, economice și de risc și să ofere suport pentru fundamentarea unor strategii sustenabile de management. Relevanța cercetării este accentuată de contextul local al municipiului Iași. În pofida investițiilor realizate prin Centrul de Management Integrat al Deșeurilor (CMID) Țuțora, sistemul local de management al deșeurilor alimentare prezintă disfuncționalități structurale: colectarea separată este incompletă, fluxurile organice sunt adesea amestecate în transport, nu există infrastructură pentru digestie anaerobă, iar fracția organică colectată nu poate fi valorificată corespunzător din cauza contaminării și a lipsei instalațiilor dedicate. De asemenea, municipiul Iași nu dispune de date operaționale distincte privind deșeurile alimentare, acestea fiind incluse generic în categoria biodeșeurilor amestecate, ceea ce împiedică evaluarea precisă a potențialului de valorificare și fundamentarea deciziilor strategice.

Aceste limitări au fundamentat necesitatea dezvoltării unei abordări integrate și multidimensionale, orientate spre evaluarea simultană a impactului, riscurilor și opțiunilor de valorificare. Drept urmare, **obiectivul principal al tezei de doctorat care vizează dezvoltarea și aplicarea unui model integrat de evaluare a managementului deșeurilor alimentare, bazat pe corelarea impactului de mediu, a riscurilor ecologice și pentru sănătatea umană și a eficienței economice, în vederea identificării și fundamentării unor scenarii optime de valorificare și strategii sustenabile în contextul tranziției către economia circulară.**

Pentru atingerea acestui obiectiv, au fost formulate o serie de obiective specifice care vizează analiza critică a stadiului actual al cunoașterii, evaluarea impactului asupra mediului, analiza riscurilor asociate, investigarea opțiunilor de valorificare și dezvoltarea unor instrumente decizionale aplicabile:

- *analiza critică a stadiului actual al cunoașterii* privind generarea, distribuția și managementul deșeurilor alimentare, cu evidențierea lacunelor conceptuale, metodologice și operaționale existente în literatura de specialitate;
- *evaluarea impactului de mediu al deșeurilor alimentare*, prin analiza integrată a efectelor asupra schimbărilor climatice, utilizării resurselor naturale, poluării și biodiversității, în vederea evidențierii dimensiunii sistemice a fenomenului;
- *analiza cadrului legislativ și strategic* la nivel european și național, cu identificarea limitărilor și disfuncționalităților în implementarea măsurilor de prevenire și valorificare a deșeurilor alimentare;
- *caracterizarea sistemului actual de management al deșeurilor alimentare la nivel local (municipiul Iași)*, prin identificarea fluxurilor, a practicilor existente și a principalelor deficiențe structurale și informaționale ;
- *dezvoltarea unui cadru metodologic integrat de evaluare*, bazat pe combinarea unor metode complementare, respectiv evaluarea ciclului de viață (ECV), analiza cost-beneficiu (ACB), evaluarea riscului ecologic și pentru sănătatea umană și analiza decizională multicriterială;
- *estimarea și modelarea fluxurilor de deșeuri alimentare* în condiții de incertitudine informațională, prin utilizarea unor metode indirecte și scenarii prospective adaptate contextului local ;
- *identificarea și definirea unor scenarii relevante de management și valorificare a deșeurilor alimentare*, incluzând atât opțiuni convenționale (compostare, digestie anaerobă), cât și soluții avansate de tip biorafinărie (extracția compușilor bioactivi, producerea de enzime);

- *evaluarea comparativă a scenariilor de valorificare*, din perspectiva performanței de mediu, viabilității economice și riscurilor asociate, prin aplicarea integrată a instrumentelor analitice selectate;
- *aplicarea analizei multicriteriale pentru ierarhizarea alternativelor* și identificarea soluțiilor optime în contextul obiectivelor de sustenabilitate și economie circulară;
- *elaborarea unui model integrat de management al deșeurilor alimentare*, adaptat condițiilor locale, care să permită corelarea rezultatelor analitice cu deciziile strategice;
- *formularea unor direcții strategice și operaționale* pentru îmbunătățirea sistemului de management al deșeurilor alimentare, orientate către prevenire, valorificare superioară și reducerea impactului asupra mediului;
- *fundamentarea contribuției deșeurilor alimentare la tranziția către economia circulară și bioeconomie*, prin evidențierea potențialului de transformare a acestora în resurse cu valoare adăugată.

Teza de doctorat se înscrie în cadrul strategic european (Pactul Ecologic European, Strategia „De la fermă la consumator”, Pachetul „Fit for 55”, Planul de Acțiune pentru Economia Circulară), traducând obiectivele acestora în indicatori măsurabili la nivel local. Pentru prima dată în România, cercetarea cuantifică contribuția scenariilor de valorificare a deșeurilor alimentare la atingerea Țintelor privind reducerea emisiilor de GES, creșterea ratei de reciclare și tranziția către economia circulară, conferind astfel o relevanță aplicativă ridicată și utilitate pentru factorii de decizie. Originalitatea tezei este multidimensională, incluzând dimensiuni tematice, metodologice, analitice și aplicative, prin dezvoltarea unui cadru integrat de evaluare, introducerea analizei riscului ecologic și generarea de date în absența unor informații existente. Impactul asupra municipiului Iași este semnificativ, cercetarea oferind o diagnoză completă a sistemului local, evaluând comparativ scenariile de valorificare și fundamentând o viziune strategică pentru dezvoltarea bioeconomiei circulare.

Structura tezei de doctorat, prezentată în fig. 1 este organizată într-o manieră logică și progresivă, urmărind dezvoltarea etapizată a cercetării de la fundamentarea teoretică până la integrarea rezultatelor și formularea concluziilor.

Activitatea de cercetare pentru elaborarea tezei de doctorat a început la data de **1 octombrie 2019** în cadrul **Universității Tehnice "Gheorghe Asachi" din Iași, Facultatea de Inginerie Chimică și Protecția Mediului „Cristofor Simionescu”, Departamentul Ingineria și Managementul Mediului.**

Cercetările prevăzute în cadrul programului experimental s-au realizat în cadrul Departamentului Ingineria și Managementul Mediului - Facultatea de Inginerie Chimică și Protecția Mediului „Cristofor Simionescu”.

CAPITOLUL 1. STADIUL CUNOAȘTERII ÎN DOMENIUL MANAGEMENTULUI SUSTENABIL AL DEȘEURILOR ALIMENTARE

1.1. Contextul actual al generării și managementului deșeurilor alimentare

Conform Organizației Națiunilor Unite pentru Alimentație și Agricultură (FAO, 2019), aproximativ o treime din alimentele destinate consumului uman sunt pierdute sau irosite anual la nivel global, ceea ce corespunde unei cantități estimate la aproximativ 1,3 miliarde de tone (FAO, 2019, FFIPD, 2024). Acest fenomen se manifestă pe întreg lanțul alimentară, de la producția primară până la consumul final, cu variații semnificative între regiunile dezvoltate și cele în curs de dezvoltare (tabelul 1.1).

La nivelul Uniunii Europene, În 2023, au fost irosite în Uniunea Europeană aproximativ 130 kg·an⁻¹·loc⁻¹. În total, UE a generat 58,2 milioane de tone de deșeuri alimentare, care includ atât părți comestibile, cât și necomestibile, indicând o ușoară creștere de 0,7% comparativ cu anul 2022 (57,8 milioane de tone) (Eurostat, 2023a,b; Van Dooren și colab., 2019).

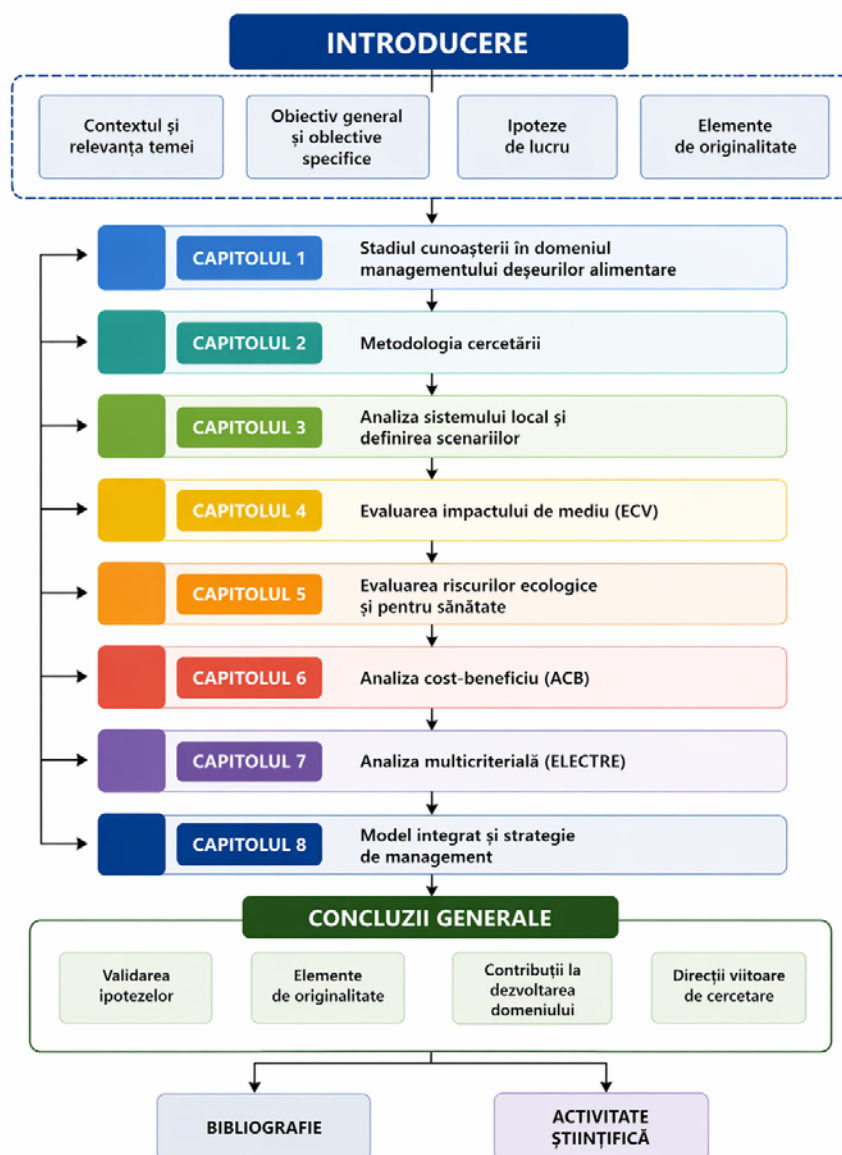


Fig. 1. Structura tezei de doctorat și organizarea etapizată a cercetării privind managementul sustenabil al deșeurilor alimentare în contextul economiei circulare

Deșeurile generate la nivelul gospodăriilor au reprezentat peste jumătate din totalul deșeurilor alimentare (53%), echivalentul a 69 kg per locuitor. Restul de 47% a provenit din etapele anterioare ale lanțului de aprovizionare alimentară: 19% din fabricarea produselor alimentare și a băuturilor (24 kg per locuitor), 11% din restaurante și servicii de alimentație (14 kg per locuitor), 10% din producția primară (12 kg per locuitor) și 8% din comerțul cu amănuntul și alte activități de distribuție a alimentelor (10 kg per locuitor) (Eurostat, 2023a,b).

1.2. Deșeurile alimentare și impactul asupra mediului

Deșeurile alimentare reprezintă un factor de presiune antropică cu implicații profunde asupra integrității sistemelor naturale, generând costuri ecologice ascunse, dar cu efecte cumulative la scară globală. Dincolo de dimensiunea economică și socială, risipa de alimente constituie un indicator al ineficienței metabolice a societăților contemporane, reflectând un dezechilibru între extracția resurselor naturale și satisfacerea efectivă a nevoilor umane (tabelul 1.4.) (Blanes-Vidal, 2017; Foley și colab., 2011; Rai et al., 2025;). În prezent, managementul inadecvat al deșeurilor alimentare, caracterizat prin depozitare necontrolată, colectare în amestec și valorificare limitată, conduce la pierderi semnificative de resurse

Tabelul 1.8. Principalele acte normative naționale privind deșeurile alimentare

Act normativ	An adoptare	Obiectiv principal	Stadiu implementare
Legea 217 (2016)	2016	Reducerea risipei alimentare prin donare	Parțial aplicat
OUG 74 (2018)	2018	Managementul biodeșeurilor; ținte de depozitare	Transpunere formală
PNGD (2017)	2017	Planul național de management al deșeurilor	În curs de actualizare
Legea nr. 181 (2020)	2020	Managementul deșeurilor nepericuloase	Aplicare etapizată

Planul Național de Gestionare a Deșeurilor (PNGD, 2017), aprobat prin Hotărârea Guvernului nr. 942/2017 și aflat în proces de revizuire pentru perioada 2023–2030, include măsuri dedicate prevenirii generării deșeurilor alimentare, precum campanii de informare și conștientizare, reducerea risipei la nivelul gospodăriilor și al sectorului HoReCa, precum și îmbunătățirea colectării separate a biodeșeurilor prin extinderea infrastructurii și a serviciilor de salubritate.

Cu toate acestea, documentul nu stabilește sub-ținte cantitative distincte pentru deșeurile alimentare și nu asigură o corelare operațională cu politicile din domenii conexe, precum agricultura, sănătatea publică sau educația, ceea ce limitează eficacitatea și coerența intervențiilor.

Un obstacol major în implementarea acestor măsuri îl reprezintă capacitatea redusă de monitorizare și raportare. În prezent, România nu dispune de un sistem național integrat de colectare și management al datelor privind deșeurile alimentare, iar estimările existente se bazează în principal pe extrapolarea unor studii punctuale sau pe modele statistice dezvoltate la nivel european. Această lacună metodologică afectează atât acuratețea și comparabilitatea datelor raportate, cât și capacitatea autorităților de a evalua impactul măsurilor adoptate și de a fundamenta politici publice eficiente, inclusiv în ceea ce privește îndeplinirea obligațiilor de raportare către Comisia Europeană (Eurostat, 2022).

1.4. Sinteza critică, poziționarea cercetării și obiectivele studiului

Analiza critică a literaturii de specialitate și a cadrului normativ evidențiază faptul că, în pofida progreselor semnificative în înțelegerea și managementului deșeurilor alimentare, domeniul rămâne marcat de o serie de limitări conceptuale, metodologice și operaționale. Aceste limitări reflectă nu doar complexitatea intrinsecă a sistemelor agroalimentare, ci și dificultatea integrării coerente a dimensiunilor tehnice, economice și instituționale într-un cadru analitic unitar. În acest context, devine evidentă necesitatea unor abordări aprofundate, capabile să depășească caracterul fragmentat al cercetărilor existente și să ofere soluții adaptate realităților specifice. În acest context, cercetarea se concentrează pe analiza comparativă a patru scenarii relevante pentru municipiul Iași:

- compostarea;
- digestia anaerobă;
- extracția compușilor bioactivi;
- producerea de enzime.

Selectarea acestor scenarii reflectă atât soluții convenționale, cât și opțiuni avansate de tip biorafinărie, permițând evaluarea tranziției de la modele tradiționale de management către modele circulare cu valoare adăugată ridicată.

Aplicarea cadrului metodologic propus în studiul de caz al municipiului Iași evidențiază relevanța acestuia pentru identificarea disfuncționalităților și a potențialului de valorificare, fără a anticipa în detaliu rezultatele analizelor ulterioare.

1.6. Opțiuni de management al deșeurilor alimentare la nivel european și național

Pe baza limitărilor identificate în literatura de specialitate și a cadrului instituțional analizat, evaluarea opțiunilor de management devine esențială pentru identificarea unor soluții sustenabile adaptate contextului local. Majoritatea studiilor analizează aceste opțiuni în mod izolat, fără a integra simultan criterii de mediu, economice și de risc, ceea ce limitează capacitatea de a identifica soluțiile optime în condiții reale de implementare.

etapele precum generare, colectare, transport, tratare biologică sau termică și eliminarea finală. În funcție de obiectivele studiului, poate fi utilizată și abordarea „de la leagăn la poartă” (*cradle-to-gate*) (Curran, 2017; Sánchez-Burgos et al., 2025).

Unitatea funcțională reprezintă referința cantitativă a analizei și permite compararea rezultatelor. De regulă, aceasta este exprimată ca o tonă de deșeuri alimentare generate și gestionate într-un anumit interval de timp sau context specific (Arzoumanidis și colab., 2020).

Rezultatele evaluării ciclului de viață sunt integrate în instrumente decizionale precum analiza multicriterială (MCA), analiza costului ciclului de viață (LCC) și evaluarea cost-beneficiu. Modelele bazate pe ECV permit simularea diferitelor scenarii de management al deșeurilor și evaluarea impacturilor cumulative, sprijinind implementarea principiilor economiei circulare (Jorge-Ortiz și colab., 2025).

ECV oferă o abordare completă și integrată, identifică etapele critice și sprijină luarea deciziilor sustenabile. Limitele metodei includ complexitatea, necesitatea unui volum mare de date și incertitudinile asociate ipotezelor și modelelor. În ciuda acestor constrângeri, ECV se dovedește a fi un instrument esențial pentru analiza performanței de mediu a sistemelor de management al deșeurilor.

2.6. Metodologia de identificare a hazardelor și evaluare a riscurilor

Evaluarea riscurilor asociate managementului deșeurilor alimentare este realizată printr-o analiză sistematică a întregului lanț alimentar, de la producție și procesare, până la colectare, transport și tratament final. Aceasta presupune două etape principale: identificarea hazardelor și evaluarea riscurilor.

2.6.1. Identificarea hazardelor

Identificarea hazardelor include evaluarea potențialului de apariție a hazardelor emergente, generate de schimbările tehnologice și de implementarea principiilor economiei circulare. Procesele de valorificare și recirculare a deșeurilor alimentare pot introduce noi căi de expunere și pot amplifica riscurile existente, ceea ce impune o abordare dinamică și prospectivă. În ansamblu, această etapă furnizează baza analitică pentru evaluarea ulterioară a riscurilor, prin corelarea tipurilor de hazard cu sursele de generare și cu posibilele căi de expunere. Rezultatele obținute sunt esențiale pentru prioritizarea măsurilor de prevenire și pentru integrarea acestora în cadrul evaluării scenariilor de management al deșeurilor alimentare.

2.6.2. Estimarea riscurilor

Estimarea riscurilor reprezintă etapa prin care informațiile obținute în urma identificării hazardelor sunt integrate și analizate în vederea estimării efectelor potențiale asupra mediului, sănătății umane și sistemelor socio-economice. Această etapă are rolul de a transforma datele descriptive privind hazardele în indicatori cuantificabili și comparabili, care permit fundamentarea deciziilor de management și prioritizarea intervențiilor (Coyle și colab., 2025; Hassan și colab., 2025). În acest context, riscul este definit ca o funcție a probabilității și a impactului, fiind exprimat atât prin indicatori cantitativi, cât și prin evaluări calitative. Procesul de evaluare a riscurilor presupune următoarele etape principale:

- Determinarea probabilității de apariție a fiecărui hazard
- Estimarea severității consecințelor asupra mediului, sănătății și economiei.
- Clasificarea riscurilor pe baza nivelului de acceptabilitate și prioritizarea acestora pentru managementul preventiv.

Pentru caracterizarea riscului ecologic asociat scenariilor de management analizate, indicatorii specifici utilizați în evaluare sunt sintetizați în tabelul 2.3. Acești indicatori permit cuantificarea nivelului de expunere, a efectelor potențiale și a intensității riscului ecologic, constituind baza pentru integrarea acestei dimensiuni în analiza comparativă a scenariilor. Evaluarea riscului ecologic presupune integrarea informațiilor privind hazardul, expunerea și efectele potențiale; această relație conceptuală este ilustrată sintetic în fig. 2.3. Figura evidențiază caracterul integrativ al evaluării riscului, în care nivelul final al riscului rezultă din interacțiunea dintre probabilitatea de apariție și severitatea efectelor, în condițiile unui anumit nivel de expunere la hazard.

Tabelul 2.3. Indicatori de risc ecologic și semnificația acestora

<i>Indicator</i>	<i>Descriere</i>	<i>Unitate / formă</i>	<i>Interpretare</i>
Concentrația estimată în mediu (PEC)	Nivelul estimat al contaminanților în mediu (apă, sol, aer)	mg/L, mg/kg	Reflectă expunerea
Concentrația fără efect (PNEC)	Concentrația sub care nu sunt anticipate efecte adverse	mg/L, mg/kg	Prag de siguranță

Raport de risc (RQ = PEC/PNEC)	Raport între expunere și pragul de efect	-	RQ ≥ 1 indică risc potențial
Toxicitate acută (EC50)	Concentrația care produce efecte asupra a 50% dintre organisme	mg/L	Efecte pe termen scurt
Toxicitate cronică (NOEC)	Concentrația fără efect observabil pe termen lung	mg/L	Efecte pe termen lung
Scor ecotoxicologic cumulativ (ESQcum)	Integrarea efectelor mai multor substanțe	-	Impact cumulativ
Indice global de risc ecologic	Agregare a indicatorilor de risc	-	Clasificare finală a riscului



Fig. 2.3. Cadrul conceptual al evaluării riscului ecologic: integrarea hazardului, expunerii și efectelor în determinarea nivelului de risc

2.7. Metodologia Analizei Cost-Beneficiu (ACB)

În cadrul prezentei cercetări, ACB este utilizată ca instrument complementar evaluării ciclului de viață (ECV) și analizei multicriteriale (MCDA), având rolul de a transforma în termeni monetari fluxurile de costuri și beneficii aferente fiecărui scenariu analizat pe întreaga durată de funcționare. Procesul analitic începe prin definirea clară a obiectivelor ACB și a frontierelor sistemului analizat, în concordanță cu delimitările utilizate în evaluarea ciclului de viață. Limitele includ întregul traseu al deșeurilor alimentare, de la momentul generării până la eliminarea finală a reziduurilor sau reintegrarea produselor secundare în circuitul economic. Sunt luate în considerare etapele de colectare, transport, pretratament, procesare și distribuție a produselor rezultate, astfel încât să fie captate atât costurile și beneficiile directe, cât și cele indirecte, evitând transferul impacturilor în afara ariei de analiză (He și colab., 2025; Lopez și colab., 2016).

Inventarierea costurilor urmărește includerea tuturor categoriilor relevante, structurate după relația cu sistemul analizat și după gradul de cuantificare monetară (Djukica și colab., 2016; Ferreira și Almeida, 2015; He și colab., 2025; Holland, 2012; Tesfaye și colab., 2016). Procesul metodologic implică identificarea elementelor economice relevante, actualizarea valorilor în timp și calculul unor indicatori sintetici, precum valoarea actualizată netă, rata internă de rentabilitate și raportul cost-beneficiu. Structura acestor etape este ilustrată în fig. 2.4. Figura evidențiază caracterul sistematic al analizei, în care evaluarea economică rezultă din corelarea fluxurilor financiare cu dimensiunea temporală și din utilizarea unor indicatori sintetici pentru compararea scenariilor.

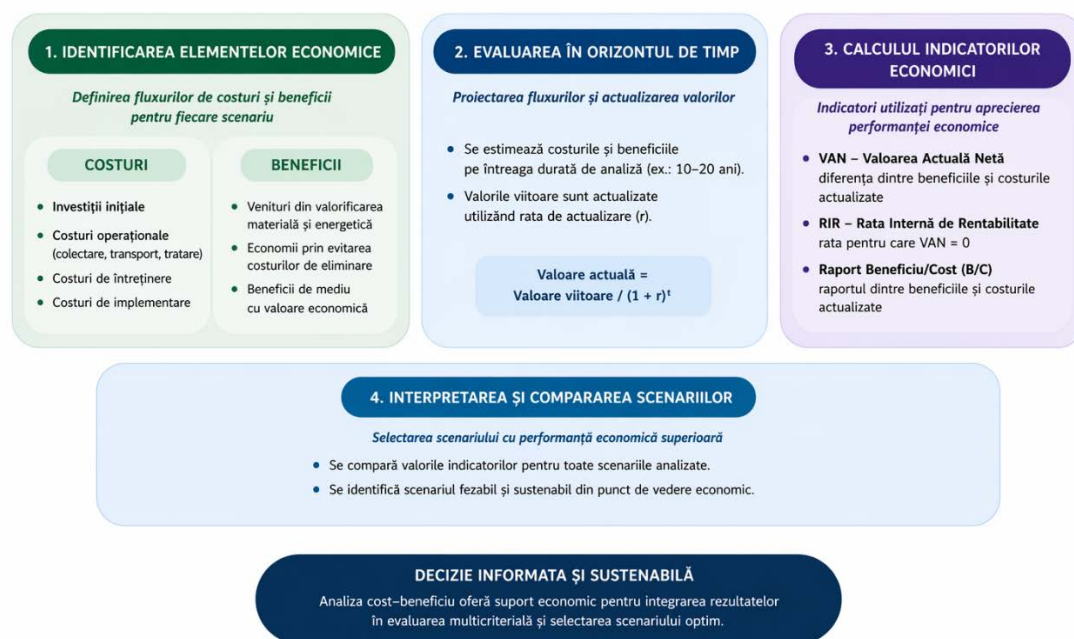


Fig. 2.4. Cadrul metodologic al analizei cost–beneficiu aplicate evaluării scenariilor de management al deșeurilor alimentare

Această integrare facilitează transferul și utilizarea coerentă a rezultatelor între diferitele instrumente analitice contribuind la creșterea consistenței și relevanței procesului decizional. ACB este corelată funcțional cu ECV și MCDA. De asemenea, integrarea permite evaluarea simultană și echilibrată a dimensiunilor economice, de mediu și sociale ale sustenabilității, evitând abordările fragmentate și reducând riscul de selectare a unor soluții suboptimale. În plus, corelarea acestor metode contribuie la creșterea transparenței procesului decizional și la fundamentarea unor strategii de management al deșeurilor alimentare adaptate principiilor economiei circulare și dezvoltării durabile.

2.8. Metodologia analizei multicriteriale (MCDA)

Analiza multicriterială (MCA) este o metodă robustă utilizată pentru evaluarea alternativelor complexe, luând în considerare simultan criterii multiple de mediu, economice și sociale. Prima etapă a demersului multicriterial constă în definirea operațională și exhaustivă a criteriilor relevante pentru evaluarea scenariilor de management al deșeurilor alimentare (Distratis și colab., 2025; Ziemba, 2022). Procesul de selecție a criteriilor se bazează pe trei surse principale: analiza sistematică a literaturii de specialitate, consultarea ghidurilor europene privind evaluarea sustenabilității sistemelor de management al deșeurilor și interacțiunea exploratorie cu experți și factori de decizie locali (Karagiannidis and Perkoulidis, 2009). Pentru fiecare criteriu este elaborată o fișă metodologică ce precizează unitatea de măsură, direcția de optimizare, sursa datelor și procedura de cuantificare, asigurând coerența și reproductibilitatea evaluării multicriteriale (Distratis și colab., 2025; Martin and Smith, 2025). Criteriile utilizate în analiza decizională multicriterială, derivate din evaluarea impactului de mediu, analiza cost–beneficiu și evaluarea riscurilor, sunt sintetizate în tabelul 2.5.

Tabelul 2.5. Criterii utilizate în analiza decizională multicriterială (MCDA)

<i>Criteriu</i>	<i>Descriere</i>	<i>Tip indicator</i>	<i>Direcția de optimizare</i>
Potențial de încălzire globală	Emisii de gaze cu efect de seră asociate scenariului	Cantitativ (ECV)	Minimizare
Potențial de eutrofizare	Aport de nutrienți cu impact asupra ecosistemelor acvatice	Cantitativ (ECV)	Minimizare
Ecotoxicitate	Impact asupra organismelor și ecosistemelor	Cantitativ (ECV)	Minimizare
Valoarea actualizată netă (VAN)	Diferența dintre beneficii și costuri actualizate	Cantitativ (ACB)	Maximizare

CAPITOLUL 3. PLANIFICAREA ȘI EVALUAREA ALTERNATIVELOR DE MANAGEMENT ȘI VALORIFICARE A DEȘEURILOR ALIMENTARE ÎN MUNICIPIUL IAȘI

3.2. Deșeurile alimentare ca flux prioritar în managementul biodeșeurilor

Managementul deșeurilor alimentare trebuie să respecte principiile ierarhiei deșeurilor, care prioritizează prevenirea generării, urmată de reutilizare, reciclare materială, valorificare energetică și, în ultimă instanță, eliminare prin depozitare. Această ordine reflectă obiectivul reducerii pierderilor de resurse și al minimizării impactului asupra mediului (Papargyropoulou și colab, 2014; Scherhaufner și colab., 2018). Aplicarea pe scară largă a opțiunilor de valorificare este limitată de factori multipli, precum contaminarea chimică a fluxurilor de deșeuri, variabilitatea compozițională, costurile investiționale ridicate ale tehnologiilor avansate și obstacolele instituționale sau comportamentale legate de colectarea separată și acceptarea socială a produselor rezultate (Shahid și Hittinger, 2021; Sarangi și colab., 2024).

Contextul municipiului Iași conferă o importanță particulară analizei de față. Pe de o parte, atingerea țintelor europene de reciclare depinde în mod semnificativ de management eficient al biodeșeurilor. Pe de altă parte, infrastructura existentă nu include încă instalații dedicate tratării biologice a fracției organice colectate separat, ceea ce indică simultan o vulnerabilitate de conformare și o oportunitate strategică pentru dezvoltarea unor soluții adaptate specificului regional.

3.3. Probleme și oportunități în managementul deșeurilor alimentare în municipiul Iași

Fluxul de deșeuri alimentare generat la nivelul municipiului Iași provine dintr-o varietate de categorii de generatori, fiecare caracterizată prin particularități cantitative, compoziționale și operaționale distincte, cu implicații directe asupra modului de management (PJGD, 2021). Deși implementarea Sistemului de Management Integrat al Deșeurilor (SMID) a condus la îmbunătățiri semnificative în ultimul deceniu, configurația actuală a infrastructurii și a mecanismelor de operare indică persistența unor disfuncționalități structurale care limitează tranziția efectivă către un model circular funcțional (PA, 2023; PJGD, 2021; Raport Salubris, 2024).

Un aspect critic al diagnosticului instituțional îl constituie disponibilitatea redusă a datelor specifice privind fracția alimentară (PJGD, 2021). Conform practicilor operaționale ale operatorului regional de salubritate Salubris S.A., raportările cantitative vizează, în principal, fracția organică totală colectată în amestec cu deșeurile menajere reziduale, fără o delimitare statistică distinctă a componentei alimentare (PJGD, 2021; Raport Salubris, 2024). Această limitare metodologică afectează acuratețea evaluărilor privind potențialul real de valorificare biologică și energetică și reduce capacitatea de fundamentare a unor decizii strategice bazate pe evidențe cantitative detaliate.

La nivel municipal funcționează, din anul 2017, Centrul de Management Integrat al Deșeurilor (CMID) Țuțora, realizat prin finanțare europeană și dotat cu depozit ecologic conform, stație de tratare mecano-biologică, linii de sortare și instalație de compostare destinată deșeurilor verzi. Din perspectivă tehnologică, această infrastructură reprezintă un progres major față de configurațiile anterioare de eliminare necontrolată (PJGD, 2021; Raport Salubris, 2024).

Cu toate acestea, analiza funcțională evidențiază trei limitări structurale majore:

- a) Absența tratării dedicate pentru deșeurile alimentare
- b) Lipsa capacităților de digestie anaerobă
- c) Colectarea separată insuficient dezvoltată

Deși cadrul legislativ impune colectarea separată a biodeșeurilor, implementarea practică rămâne fragmentară. Infrastructura de containere dedicate este incompletă, contaminarea fluxurilor este ridicată, iar datele operaționale disponibile la nivelul Salubris S.A. nu permit cuantificarea distinctă a fracției alimentare, aceasta fiind inclusă în categoria generală a deșeurilor organice amestecate.

Tranziția către un model circular presupune astfel trecerea de la paradigma eliminării la cea a valorificării integrate, susținută de planificare strategică, infrastructură adecvată, participare socială și cooperare instituțională. În acest cadru, deșeurile alimentare pot deveni un vector de dezvoltare regională, contribuind simultan la securitatea energetică, la economia locală și la protecția mediului.

3.4. Impactul deșeurilor alimentare asupra mediului și sănătății

Managementul inadecvat al deșeurilor alimentare în municipiul Iași generează efecte cumulative asupra mediului, cu implicații semnificative asupra schimbărilor climatice, ecosistemelor locale și sănătății publice. Deși legislația europeană și națională impune colectarea separată și tratarea prioritară a biodeșeurilor, implementarea practică la nivel local rămâne fragmentată, iar consecințele negative asupra mediului și societății sunt semnificative (Raport Salubris, 2024).

Amestecarea deșeurilor alimentare cu alte fluxuri, inclusiv cu deșeuri medicale nepericuloase, reduce posibilitatea valorificării acestora și poate genera probleme suplimentare legate de contaminare. În același timp, lipsa unor sisteme eficiente de separare și redistribuire a alimentelor excedentare conduce la pierderea unor resurse care ar putea fi utilizate în scopuri sociale. De asemenea, absența unor proceduri clare și a programelor educaționale coerente în cadrul instituțiilor publice contribuie la generarea constantă de deșeuri alimentare și la perpetuarea unui model liniar de tip „consum–eliminare”. Acest aspect transmite un mesaj contrar principiilor de sustenabilitate și reduce rolul educativ pe care aceste instituții îl pot avea în promovarea unui comportament responsabil.

Disfuncționalitățile principale identificate includ (PA, 2023; PJGD, 2021; Raport Salubris, 2024):

- **Colectarea:** Separarea la sursă este inefficientă, deoarece deșeurile sunt amestecate ulterior în timpul colectării.
- **Infrastructura:** Lipsa instalațiilor de digestie anaerobă și a compostării dedicate limitează valorificarea fracției organice.
- **Impact climatic:** Depozitarea conduce la emisii de metan și la pierderea potențialului de producere a energiei regenerabile.
- **Sănătatea publică:** Expunerea lucrătorilor și proliferarea vectorilor biologici nu sunt monitorizate corespunzător.
- **Echitatea ecologică:** Impacturile negative sunt resimțite în mod disproporționat de comunitățile din proximitatea infrastructurilor de deșeuri și de personalul implicat în managementul deșeurilor.

În acest context, tranziția către un model circular de management al deșeurilor alimentare devine esențială, având ca obiectiv reducerea impacturilor negative și valorificarea resurselor energetice și fertilizante conținute în aceste fluxuri.

3.5. Fundamentarea selectării alternativelor de valorificare

Identificarea celor mai potrivite opțiuni pentru valorificarea deșeurilor alimentare în municipiul Iași reprezintă un proces decizional complex, care depășește simpla selecție tehnologică, configurându-se ca un exercițiu strategic în planificarea dezvoltării regionale sustenabile. Având în vedere diagnosticul detaliat prezentat anterior – marcat de deficiențe în colectarea separată, lipsa infrastructurii de digestie anaerobă, efecte negative asupra mediului și sănătății publice, precum și necesitatea conformării la acquis-ul european – fundamentarea deciziilor de investiție pe criterii riguroase devine esențială pentru eficiența și succesul viitoarelor intervenții. În concordanță cu principiile consacrate în documentele referitoare la cele mai bune tehnici disponibile Best Available Techniques (BAT), selecția soluțiilor de valorificare trebuie să echilibreze performanța de mediu, viabilitatea economică și maturitatea tehnologică.

Acest subcapitol urmărește:

- **Definirea și operationalizarea cadrului conceptual și a setului de criterii pentru evaluarea comparativă a alternativelor;**
- **Analizarea fiecărei opțiuni din perspectiva tehnică, de mediu, economică și socială, ținând cont de specificul local;**
- **Fundamentarea selecției scenariilor care vor fi supuse evaluării detaliate prin metode precum ECV, ACB, MCDA și estimarea riscului ecologic.**

Procesul decizional integrează patru dimensiuni principale, interdependente, fiecare operationalizată prin criterii cuantificabile și relevante pentru contextul municipiului Iași.

3.5.6. Scenariul de referință (BAU)

Scenariul BAU reflectă practica curentă în Iași: colectarea predominantă în amestec, valorificare limitată la CMID Țuțora, lipsa infrastructurii de digestie anaerobă și incapacitatea de extracție a compușilor bioactivi. Consecințele includ pierderi energetice și fertilizatoare, emisii de metan și costuri de oportunitate ridicate.

În contextul municipiului Iași, scenariul de referință (Business as Usual – BAU, depozitare) reflectă modul actual de management al deșeurilor alimentare, caracterizat prin colectare predominantă în amestec

și valorificare limitată în cadrul infrastructurii existente, în principal la nivelul CMID Țuțora. Lipsa colectării separate eficiente a fracției alimentare, absența instalațiilor de digestie anaerobă și imposibilitatea aplicării unor tehnologii avansate de valorificare, precum extracția compușilor bioactivi, conduc la o utilizare inefficientă a resurselor.

3.5.7. Alternativele de valorificare

Au fost considerate patru alternative de valorificare, relevante pentru specificul local, care acoperă diferite niveluri de maturitate tehnologică, complexitate operațională și valoare adăugată.

Aceste alternative au fost selectate astfel încât să includă atât soluții imediat aplicabile, compatibile cu infrastructura existentă, cât și opțiuni avansate, care pot fi dezvoltate progresiv, pe măsura îmbunătățirii colectării separate și a consolidării capacității instituționale și economice.

Alternativele analizate sunt următoarele:

- **A – Compostare centralizată:** robustă, costuri moderate, TRL 9, consum net de energie și ocupare mare de teren.
- **B – Digestie anaerobă cu producere de biometan și energie:** biometan purificat, energie electrică și termică, fertilizant, TRL 9, costuri de capital ridicate.
- **C – Extracția compușilor bioactivi:** produse de înaltă valoare, TRL 5-7, aplicabilitate limitată la fluxuri curate, consum energetic ridicat.
- **D – Producerea de enzime prin fermentație microbiană:** TRL 4-6, piață globală în creștere, necesită expertiză și investiții semnificative.

Alternativele C și D sunt incluse pentru perspectiva strategică și dezvoltarea pe termen mediu-lung, susținute de ecosistemul academic local.

3.7. Planificarea și evaluarea comparativă a performanței alternativelor

Fundamentarea unei decizii privind modalitățile optime de valorificare a deșeurilor alimentare la nivelul municipiului Iași impune dezvoltarea unui cadru analitic riguros pentru evaluarea performanței scenariilor posibile. Acest cadru trebuie să integreze dimensiuni multiple ale sustenabilității și să fie adaptat particularităților teritoriale, astfel încât să permită cuantificarea impactului fiecărei opțiuni din perspectivele ecologică, economică și socială (fig. 2.6).

3.7.1. Indicatori de performanță de mediu

Pentru scenariile analizate (A – compostare, B – digestie anaerobă, C – extracția compușilor bioactivi, D – producerea de enzime), impactul este raportat la un scenariu de referință reprezentat de eliminarea deșeurilor prin depozitare.

Principalii parametri de impact considerați includ (fig. 2.6):

- Schimbările climatice, exprimate prin potențialul de încălzire globală (GWP), cuantificat în tone echivalent CO₂
- Eutrofizarea, determinată de transferul nutrienților către sol și apă
- Acidifierea, asociată emisiilor de compuși cu caracter acidifiant
- Utilizarea terenurilor
- Consumul de resurse și energie.

În completarea acestor indicatori, este analizat gradul de circularitate al fiecărui scenariu, prin raportarea cantității de resurse recuperate la volumul de deșeuri procesate.

3.7.2. Indicatori economici și sociali

a) Indicatori economici

- Costul total pe durata ciclului de viață (Life Cycle Costing – LCC), care cuprinde investițiile inițiale, costurile operaționale și cheltuielile asociate dezafectării instalațiilor.
- Veniturile potențiale, generate prin valorificarea produselor rezultate, precum compostul, energia, biometanul, extractele bioactive sau enzimele.
- Indicatori de rentabilitate, precum perioada de recuperare a investiției și rata internă de rentabilitate, relevanți pentru analiza atractivității investiționale.
- Costul evitării emisiilor de CO₂, care corelează efortul economic cu beneficiul climatic.

3.8.2. Direcții de implementare la nivel municipiului

Integrarea soluțiilor de valorificare a deșeurilor alimentare la nivelul municipiului Iași presupune adoptarea unei abordări etapizate, adaptate nivelului actual de dezvoltare a sistemului de management al deșeurilor și capacității instituționale existente.

- Pe termen scurt, accentul este pus pe consolidarea colectării separate a biodeșeurilor și pe implementarea tehnologiilor mature, cu grad ridicat de fiabilitate și aplicabilitate imediată, precum compostarea sau digestia anaerobă.

- Pe termen mediu și lung, odată cu stabilizarea fluxurilor de deșeuri și îmbunătățirea calității colectării separate, pot fi dezvoltate soluții mai avansate de valorificare, precum extracția compușilor bioactivi sau obținerea de enzime.

Modelul de finanțare asociat acestor investiții poate combina resurse publice, fonduri europene și investiții private, în funcție de complexitatea proiectelor și de nivelul de maturitate tehnologică. O astfel de abordare permite distribuirea riscurilor și creșterea fezabilității implementării.

3.8.3. Rolul actorilor locali

Implementarea eficientă a scenariilor analizate depinde de cooperarea dintre actorii implicați în managementul deșeurilor și dezvoltarea locală. Autoritățile publice asigură cadrul normativ și planificarea strategică, operatorii de salubritate gestionează colectarea și transportul, mediul academic contribuie la dezvoltarea soluțiilor tehnologice, iar sectorul privat susține investițiile și integrarea produselor în lanțuri valorice. Comunitatea locală are un rol esențial prin participarea la colectarea separată și adoptarea unor comportamente responsabile. În acest context, valorificarea deșeurilor alimentare necesită o abordare integrată, bazată pe colaborare instituțională și corelarea dimensiunilor tehnice, economice și sociale, interacțiunile dintre actori și fluxurile asociate fiind ilustrate în fig. 3.5.

CAPITOLUL 4. ANALIZA IMPACTURILOR GENERATE ÎN MEDIU DE SCENARIILE DE VALORIFICARE A DEȘEURILOR ALIMENTARE ÎN MUNICIPIUL IAȘI APLICÂND METODOLOGIA EVALUĂRII CICLULUI DE VIAȚĂ (ECV)

4.2. Scopul analizei ECV pentru scenariile de management al deșeurilor alimentare din municipiul Iași

Scopul central al evaluării ciclului de viață (ECV) constă în realizarea unei analize exhaustive, cantitative și comparative a impacturilor asupra mediului asociate celor patru scenarii de valorificare a deșeurilor alimentare, raportate sistematic la scenariul de referință, reprezentat de alternative de depozitare.

4.2.2. Evaluarea ciclului de viață a alternativelor de management al deșeurilor alimentare în municipiul Iași

Evaluarea impactului asupra mediului a fost realizată utilizând metodologia de evaluare a ciclului de viață, în conformitate cu standardele internaționale ISO 14040 și ISO 14044, parcurgând etapele prezentate în fig. 2.1.

Aplicarea metodologiei ECV a avut în vedere cele patru scenarii distincte de management și valorificare a deșeurilor alimentare din municipiul Iași, descrise în capitolul 3:

- Scenariul A – compostarea centralizată – reprezintă o soluție tehnologică matură (TRL 9). Cu toate acestea, scenariul implică un consum net de energie și necesită suprafețe extinse de teren pentru operare.

- Scenariul B – digestia anaerobă cu producere de biometan și energie – oferă o valorificare combinată, energetică și materială, prin obținerea de biometan purificat, energie electrică și termică, precum și digestat utilizabil ca fertilizant. Tehnologia este matură (TRL 9) și permite integrarea în sistemele energetice locale, însă necesită investiții inițiale semnificative și un control riguros al calității fluxului de intrare.

Tabelul 4.1. Analiza inventarului ciclului de viață pentru Scenariul A

<i>Etape</i>	<i>Intrări</i>	<i>Unitate</i>	<i>Ieșiri</i>	<i>Unitate</i>
Colectare și transport	Deșeuri alimentare, motorină	kg, kg	Emisii din transport (CO ₂ , CO, NO _x , PM)	kg
Încărcare și manipulare	Deșeuri alimentare, motorină	kg, kg	Emisii din utilaje	kg
Sortare	Deșeuri alimentare, electricitate	kg, kWh	Fracție organică sortată	kg
Măcinare	Deșeuri alimentare, motorină	kg, kg	Material pregătit pentru compostare	kg
Compostare aerobă	Deșeuri alimentare, aer, energie	kg, kg, kWh	Compost matur	kg
			Emisii compostare (CH ₄ , N ₂ O, NH ₃)	kg
Aerare compost	Compost, motorină	kg, kg	Emisii aerare	kg
Îndepărtare contaminanți	Compost, electricitate	kg, kWh	Deșeuri neconforme	kg

Tabelul 4.2. Analiza inventarului ciclului de viață pentru Scenariul B

<i>Etape</i>	<i>Intrări</i>	<i>Unitate</i>	<i>Ieșiri</i>	<i>Unitate</i>
Colectare și transport	Deșeuri alimentare, motorină	kg, kg	Emisii din transport	kg
Pretratare substrat	Deșeuri alimentare, energie, apă	kg, kWh, kg	Substrat pentru digestie	kg
Digestie anaerobă	Substrat, energie electrică și termică	kg, kWh	Biogaz	m ³
			Digestat	kg
Utilizare biogaz	Biogaz	m ³	Electricitate	kWh
			Căldură	kWh
			Emisii ardere biogaz	kg
Compostare digestat	Digestat, aer, energie	kg, kg, kWh	Compost	kg
			Emisii compostare (CH ₄ , N ₂ O, NH ₃)	kg
Management efluenți	Digestat lichid, apă	kg, kg	Efluenți tratați	kg

Tabelul 4.3. Analiza inventarului ciclului de viață pentru Scenariul C

<i>Etape</i>	<i>Intrări</i>	<i>Unitate</i>	<i>Ieșiri</i>	<i>Unitate</i>
Colectare și transport	Deșeuri alimentare, motorină	kg, kg	Emisii din transport (CO ₂ , NO _x , PM)	kg
Pretratare (sortare, măcinare)	Deșeuri alimentare, electricitate	kg, kWh	Deșeuri pregătite pentru extracție	kg
Extracție compuși bioactivi	Solvent de extracție, energie electrică și termică	kg, kWh	Extract bioactiv (concentrat de flavonoide)	kg
Separare și purificare	Electricitate, apă	kWh, kg	Extract purificat	kg
Managementul reziduurilor	Reziduuri solide, ape uzate	kg	Emisii și deșeuri secundare	kg

Tabelul 4.4. Analiza inventarului ciclului de viață pentru Scenariul D

<i>Etape</i>	<i>Intrări</i>	<i>Unitate</i>	<i>Ieșiri</i>	<i>Unitate</i>
Colectare și transport	Deșeuri alimentare, motorină	kg, kg	Emisii din transport	kg
Pretratare substrat	Deșeuri alimentare, apă, energie	kg, kg, kWh	Substrat fermentabil	kg
Fermentație	Substrat, microorganisme, energie	kg, kWh	Enzime brute	kg
Separare și stabilizare	Electricitate, agenți de stabilizare	kWh, kg	Enzime purificate	kg
Managementul reziduurilor	Reziduuri organice, efluenți	kg	Emisii, deșeuri secundare	kg

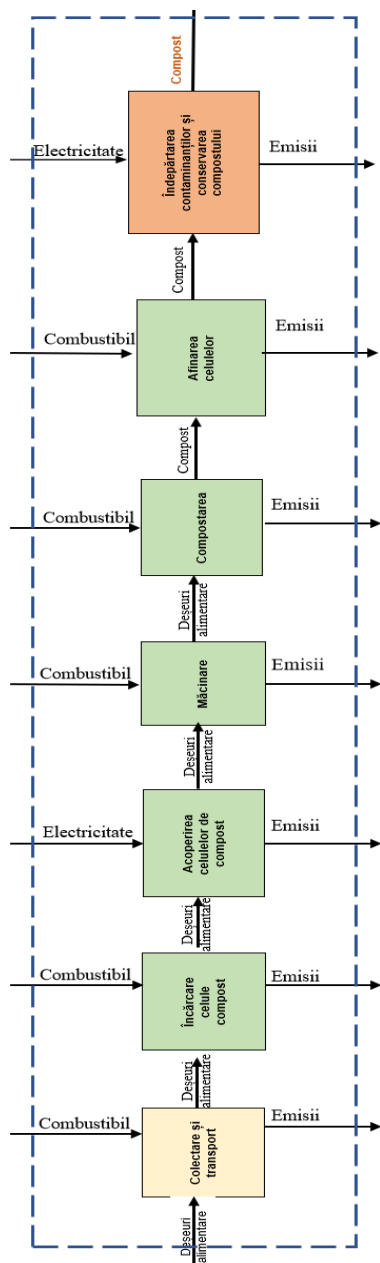


Fig. 4.2. Limitele sistemului pentru scenariul A

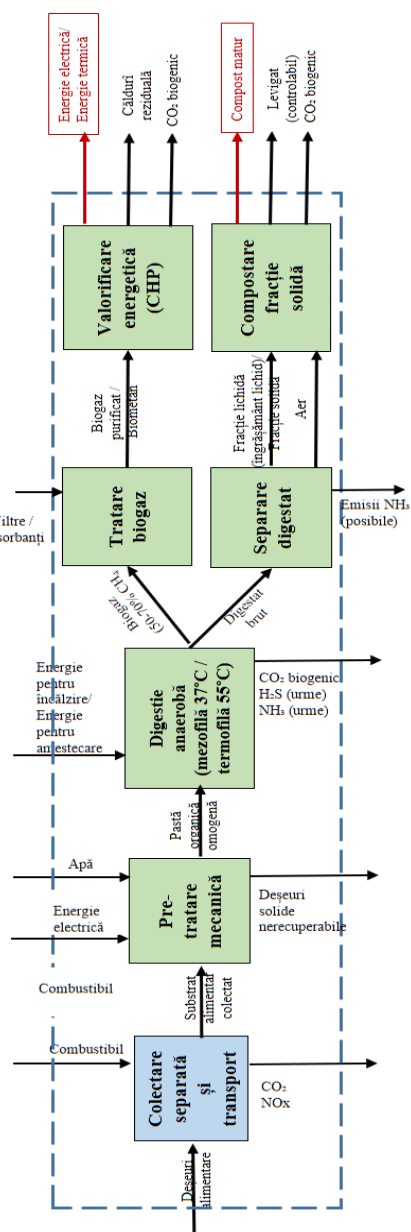


Fig. 4.3. Limitele sistemului pentru scenariul B

4.3. Evaluarea impactului

4.3.1. Metoda ReCiPe08 (Scenariile A–D)

Aplicarea metodei ReCiPe08 pentru scenariile A–D evidențiază că impactul schimbărilor climatice asupra sănătății umane (CcHh) și ecosistemelor (CcE) este dominat de emisiile atmosferice, în special compușii organici volatili, oxizii de azot și gazele cu efect de seră provenite din procese biologice și utilizarea combustibililor fosili. Scenariul A înregistrează cele mai ridicate valori, datorate fermentării aerobe și emisiilor de CH_4 , N_2O și NH_3 , precum și consumului de motorină, ceea ce explică valorile maxime din fig. 4.6 pentru CcHh. Scenariul B prezintă un impact redus comparativ, datorită digestiei anaerobe controlate și valorificării emisiilor sub formă de biogaz (fig. 4.6). În Scenariul C, impactul este dominat de consumul de energie pentru extracție și purificare, dar absența degradării biologice conduce la emisii directe mai scăzute (fig. 4.6). Scenariul D are un impact intermediar, asociat consumului energetic al fermentației controlate și etapelor de separare, dar cu emisii directe limitate (fig. 4.6). Categoria ocupării terenurilor agricole are un impact redus pentru toate scenariile, valorificarea deșeurilor diminuând necesarul de depozitare și favorizând obținerea de produse utile.

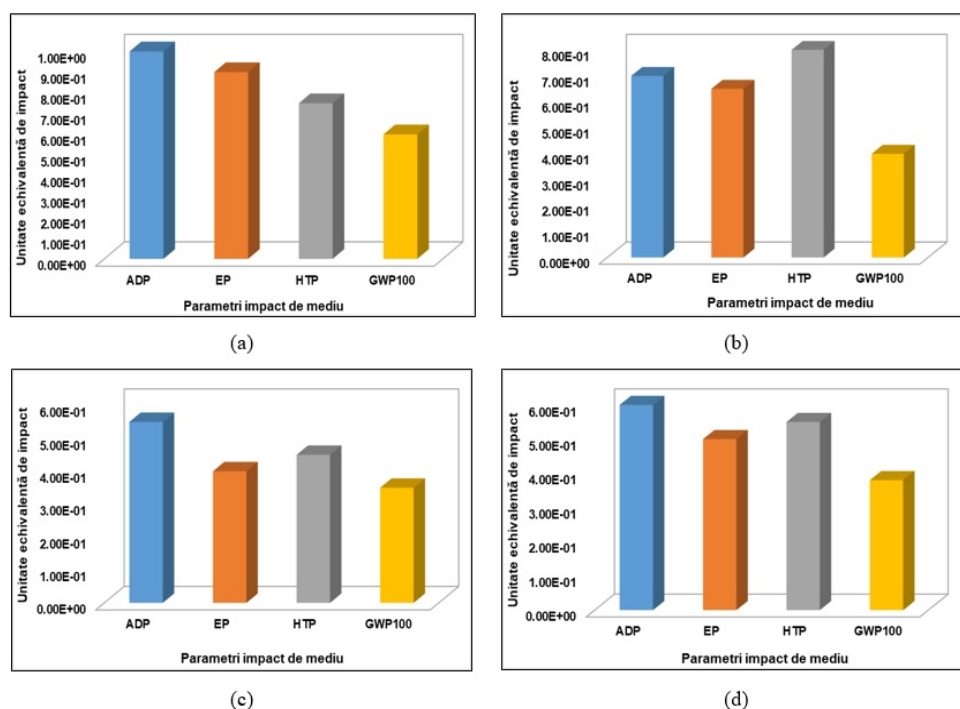
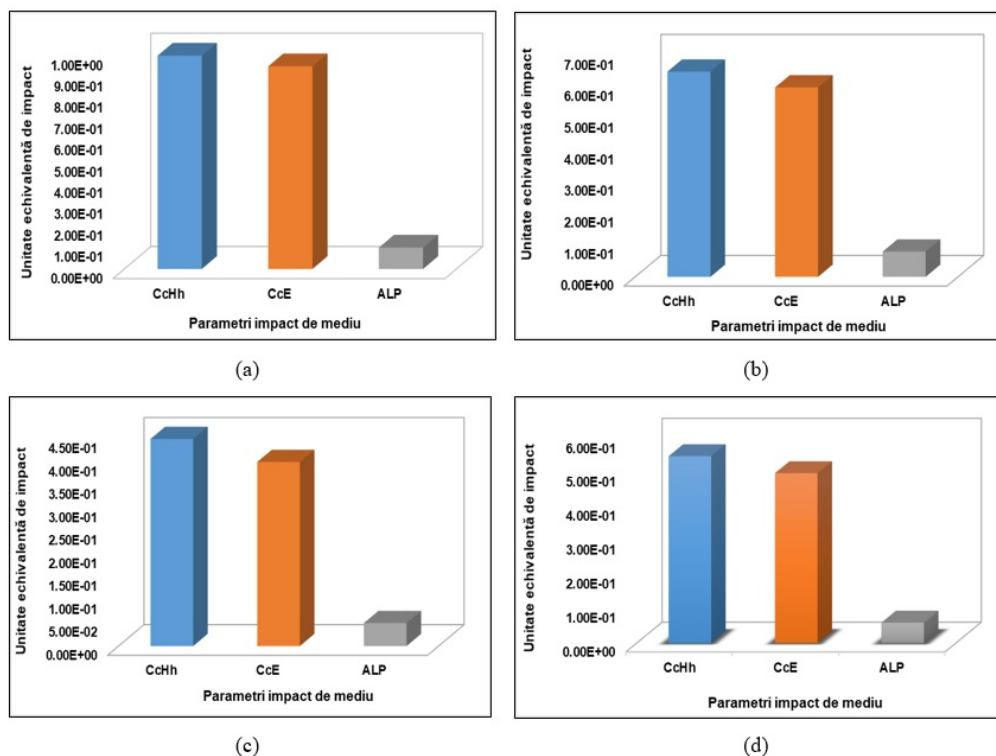


Fig. 4.7. Impactul asupra mediului rezultat din scenariile A-D, metoda CML2001 (a – Scenariul A, b – Scenariul B, c – Scenariul C, d – Scenariul D)

4.3.3. Metoda Eco-Indicator 99 (Scenariile A–D)

Aplicarea metodei Eco-Indicator 99 evidențiază diferențe semnificative între scenarii în ceea ce privește efectele asupra sănătății umane, în special în categoria HhCe (efecte cancerigene). Scenariul A înregistrează cele mai ridicate valori, datorate emisiilor necontrolate din compostare, incluzând particule

5.1, care include principalii poluanți identificați pentru fiecare scenariu, în funcție de mediul afectat (aer, apă, sol și zgomot).

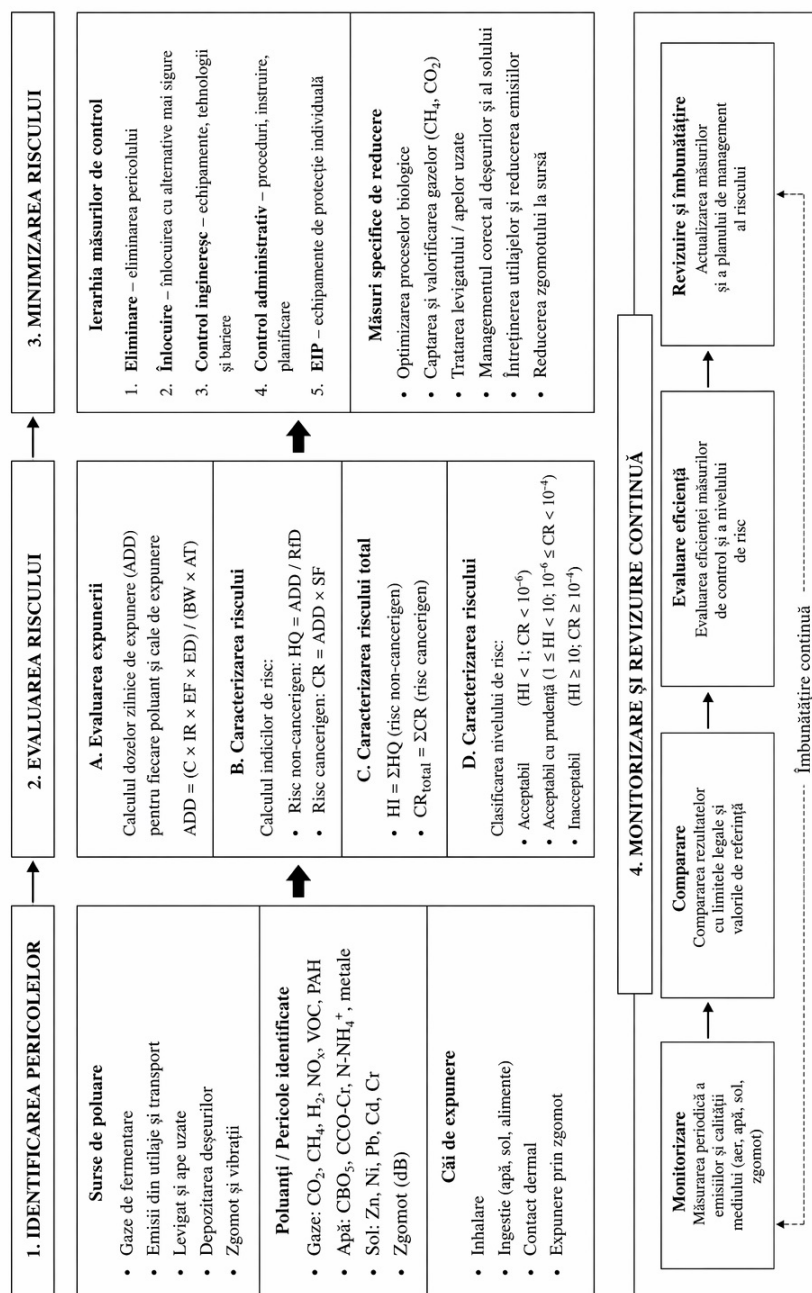


Fig. 5.1. Cadrul conceptual și metodologic al estimării și minimizării riscului ecologic și pentru sănătatea umană

Tabelul 5.1. Inventarul emisiilor rezultate din Scenariile A-D de management al deșeurilor alimentare

Tip de poluare	Sursă de poluare	Emisie/Poluant	Cantități per kg deșeu / Concentrații	CMA	Bibliografie
Scenariul A					
Poluarea aerului	Gaze de fermentare	CO ₂	40,3 mg/35 mg	-	IPCC, 2019; Quirós și colab., 2016; Amlinger et
		CH ₄	12,4 mg/14 mg	-	
		H ₂	8,1 mg/0,36 mg	-	

Tip de poluare	Sursă de poluare	Emisie/Poluant	Cantități per kg deșeu / Concentrații	CMA	Bibliografie
		CCO-Cr	8 mg/L*	500 mg/L	Moreno-Garcia și colab., 2020; Wang et al., 2002
		Ioni metale grele	0,15 mg/L*	0,5 mg/L	
Poluarea solului	Depozitarea deșeurilor	Zn	210 mg/kg*	700 mg/kg	Moreno-Garcia și colab., 2020
		Ni	90 mg/kg*	200 mg/kg	
		Pb	15 mg/kg*	250 mg/kg	
		Cd	2 mg/kg*	5 mg/kg	
		Cr	18 mg/kg*	300 mg/kg	
Poluare fonică	Utilaje și echipamente	Zgomot	38 dB/zi	65 dB/zi	-
Scenariul D					
Poluarea aerului	Producerea enzimelor	CO ₂	26 mg/35 mg	-	Hallenbeck și Benemann, 2002; Mueller și colab., 2021
		CH ₄	2,8 mg/14 mg	-	
		H ₂	1,2 mg/0,36 mg	-	
	Pulberi, gaze motoare diesel	NO _x	0,32 mg/0,623 mg	-	IPPC, 2019; Mueller și colab., 2021
		VOC	0,19 mg/0,452 mg	-	
		CO ₂	0,018 mg/0,017 mg	-	
		PAH	0,0018 mg/0,006 mg	-	
Poluarea apei	Levigat	Materii în suspensie	9,5 mg/L*	350 mg/L	Mueller și colab., 2021
		CBO ₅	4,8 mg/L*	300 mg/L	
		CCO-Cr	7,5 mg/L*	500 mg/L	
		Ioni metale grele	0,12 mg/L*	0,5 mg/L	
Poluarea solului	Depozitarea deșeurilor	Zn	200 mg/kg*	700 mg/kg	Mueller și colab., 2021
		Ni	85 mg/kg*	200 mg/kg	
		Pb	12 mg/kg*	250 mg/kg	
		Cd	1,8 mg/kg*	5 mg/kg	
		Cr	15 mg/kg*	300 mg/kg	
Poluare fonică	Utilaje și echipamente	Zgomot	36 dB/zi	65 dB/zi	-

* Valorile exprimate în mg/kg și mg/L reprezintă concentrațiile poluanților în mediile receptor (sol, respectiv apă/levigat), rezultate în urma proceselor de tratare a deșeurilor alimentare. Acestea nu sunt direct raportate la masa de deșeu tratat, ci reflectă nivelul de contaminare al mediilor afectate.

Valorile exprimate sub forma X/Y reprezintă valoarea estimată în cadrul scenariului analizat (X) și valoarea de referință din literatura de specialitate (Y), utilizată pentru validarea rezultatelor.

Unitatea de referință pentru emisiile atmosferice este mg/kg de deșeu tratat.

Această abordare permite evidențierea diferențelor semnificative între alternativele de management al deșeurilor alimentare, în funcție de gradul de control al proceselor tehnologice și de capacitatea acestora de a limita emisiile poluante. Rezultatele obținute oferă o bază obiectivă pentru compararea scenariilor și pentru identificarea opțiunilor care asigură reducerea riscurilor ecologice, contribuind astfel la fundamentarea unor strategii de management al deșeurilor alimentare aliniate principiilor economiei circulare și cerințelor de protecție a mediului.

5.3.2. Estimarea expunerii

În etapa de estimare a expunerii se analizează modul în care receptorii ecologici și populația umană pot intra în contact cu poluanții generați de procesele de valorificare a deșeurilor alimentare.

Expunerea la poluanți poate avea loc prin trei căi principale:

- Ingerare – prin consumul de alimente cultivate pe soluri contaminate sau prin consumul apei potabile afectate de poluanți;
- Inhalare – prin respirația aerului contaminat sau prin inhalarea prafului care conține substanțe toxice;

- Absorbție cutanată – prin contact direct al pielii cu apa, aerul sau solul contaminat, inclusiv prin imersie accidentală în apă poluată.

Una dintre metodele standard de cuantificare a riscului prin ingerare o reprezintă calculul dozei medii zilnice (ADD). Formula generală utilizată pentru poluanții din sol, aer sau apă este exprimată prin ecuația (1):

$$ADD = \left(\frac{C \cdot IR \cdot EF \cdot ED}{BW \cdot AT} \right) / 1000 \quad (1)$$

unde: ADD – doza medie zilnică (mg/kg/zi); C – concentrația poluantului din sol (mg/kg); IR -rata de ingestie (este adoptată din literatură de specialitate din USEPA (201) în funcție de poluantul pentru care se determina doza zilnică - în acest caz 100 mg/zi pentru adulți și 200 mg/zi pentru copii); EF – frecvența expunerii (zile/an) - se adoptă 210 zile/an; ED – durata expunerii (ani) - se presupune o durată de 5 ani; BW – greutatea corporală a receptorului (kg) - se presupune BW ca fiind: 60 kg – adulți; 25 kg – copii; AT – timpul mediu de expunere pentru care se determină expunerea medie la poluanți (zile). În cazul substanțelor cancerigene AT se determină cu ecuația (2), unde: T – numărul de zile corespunzătoare unui an (365 zile); ED – 5 ani.

$$AT = ED \cdot T \quad (2)$$

Din ecuația (2) rezultă AT = 1825.

Metodologia utilizată, bazată pe indicatorii ADD și HQ, este larg aplicată în studiile de evaluare a riscului asociat contaminării cu metale grele, fiind recomandată de ghidurile USEPA și validată în numeroase studii privind solurile contaminate (Kamunda et al., 2016; USEPA, 2026). Rezultate similare au fost raportate în studii recente, care evidențiază depășiri ale valorilor HQ în cazul scenariilor de management necontrolat al deșeurilor organice.

Pentru cele patru scenarii s-a calculat ADD, luând în considerare următoarele metale grele din sol: Cd, Cr, Pb. Astfel, s-au obținut următoarele valori ale ADD:

Scenariul A: ADD _{Cd} = 0,0201 mg/kg/zi ADD _{Cr} = 0,0179 mg/kg/zi ADD _{Pb} = 0,0230 mg/kg/zi	Scenariul B: ADD _{Cd} = 0,0036 mg/kg/zi ADD _{Cr} = 0,0100 mg/kg/zi ADD _{Pb} = 0,0136 mg/kg/zi	Scenariul C: ADD _{Cd} = 0,0015 mg/kg/zi ADD _{Cr} = 0,009 mg/kg/zi ADD _{Pb} = 0,007 mg/kg/zi	Scenariul D: ADD _{Cd} = 0,0012 mg/kg/zi ADD _{Cr} = 0,0075 mg/kg/zi ADD _{Pb} = 0,005 mg/kg/zi
---	---	---	--

Analiza comparativă a rezultatelor ADD pentru cele 4 scenarii evidențiază următoarele aspecte, ilustrate în fig. 5.2:

1. o scădere progresivă a ADD în ordinea: A → B → C → D, ceea ce indică faptul că tehnologiile mai avansate și controlate reduc semnificativ expunerea receptorilor la metale grele.
2. Scenariul A prezintă valori foarte mari, confirmând faptul că procesele necontrolate generează un risc cronic ridicat pentru sănătatea umană.
3. Scenariul B reduce considerabil riscul, dar expunerea la Cr și Cd rămâne moderată, sugerând necesitatea monitorizării continue.
4. Scenariile C și D sunt cele mai sigure, valorile ADD fiind mai mici decât dozele de referință pentru majoritatea poluanților, ceea ce indică un nivel de expunere acceptabil și controlat.

Tendința de reducere progresivă a expunerii în funcție de gradul de control tehnologic este în acord cu rezultatele altor studii, care arată că procesele avansate de tratare reduc semnificativ transferul metalelor grele către sol și lanțul alimentar. În mod similar, compostarea necontrolată a fost asociată cu niveluri ridicate de contaminare, comparativ cu digestia anaerobă și procesele de tip biorafinărie. Această analiză subliniază importanța alegerii unor tehnologii de valorificare a deșeurilor alimentare cu control riguros al emisiilor, pentru a minimiza riscul de expunere la metale grele și a proteja sănătatea umană și mediul înconjurător.

5.3.3. Evaluarea toxicității

Evaluarea toxicității urmărește determinarea gradului de pericolozitate al fiecărui poluant. Pentru receptorii umani, se utilizează doza de referință (RfD), definită de baza de date IRIS (USEPA, 2022). Aceasta reprezintă cantitatea zilnică de substanță care poate fi ingerată pe parcursul vieții fără a produce efecte adverse.

$$RfD_{Cd} = 0,0005 \text{ mg/kg/zi}$$

măsurilor de reducere a riscului este în concordanță cu principiile internaționale de management al riscului, care prioritizează prevenirea și controlul la sursă față de măsurile corective (ISO 14001, 2026; WHO, 2021). Studiile recente confirmă că prevenirea generării poluanților este cea mai eficientă strategie pentru reducerea riscurilor pe termen lung (Gupta et al., 2022). Tabelul 5.4 evidențiază faptul că scenariile avansate (C și D) reduc riscul încă din faza de generare a poluanților, în timp ce scenariul A necesită intervenții complexe la toate nivelurile.

Tabelul 5.4. Ierarhia măsurilor de minimizare a riscului

<i>Nivel</i>	<i>Tip măsură</i>	<i>Descriere</i>	<i>Scenarii relevante</i>
1	Eliminare	Eliminarea sursei de poluare	C, D
2	Înlocuire	Tehnologii alternative mai sigure	B, C, D
3	Control ingineresc	Captare și tratare emisii	A, B
4	Control administrativ	Proceduri și instruire	Toate
5	Protecție individuală	EIP pentru operatori	A, B

5.4.3. Măsuri specifice de minimizare a riscului pe tipuri de poluare

Având în vedere rezultatele obținute în tabelul 5.3 și fig. 5.4, măsurile de reducere a riscului pot fi diferențiate în funcție de tipul de poluare.

5.4.4. Analiza comparativă a eficienței măsurilor de minimizare a riscului

Datele din tabelul 5.5 confirmă faptul că eficiența măsurilor de minimizare a riscului este direct corelată cu nivelul de control al procesului tehnologic. Scenariile C și D se remarcă printr-o reducere semnificativă a riscului, datorită controlului strict al fluxurilor de materie și energie.

Tabelul 5.5. Eficiența globală a minimizării riscului pentru scenariile A–D

<i>Scenariu</i>	<i>Nivel inițial risc</i>	<i>Control tehnologic</i>	<i>Eficiență reducere</i>	<i>Nivel final risc</i>
A	Ridicat	Scăzut	Redus	Ridicat
B	Mediu-ridicat	Mediu	Bun	Mediu
C	Scăzut	Ridicat	Foarte bun	Scăzut
D	Foarte scăzut	Foarte ridicat	Excelent	Minim

5.4.7. Minimizarea riscului prin integrarea scenariilor de valorificare a deșeurilor alimentare

Integrarea scenariilor A–D într-un sistem unitar de management al deșeurilor alimentare permite minimizarea riscului ecologic și pentru sănătatea umană prin valorificarea complementară a fiecărei tehnologii și direcționarea diferențiată a fluxurilor în funcție de compoziție. Astfel, fracțiile mai puțin contaminate pot fi orientate către scenariile C și D, caracterizate prin control tehnologic ridicat și emisii reduse, în timp ce fracțiile organice variabile sunt tratate prin digestie anaerobă (Scenariul B), unde biogazul este captat și valorificat. Compostarea (Scenariul A) este utilizată controlat, ca etapă secundară pentru stabilizarea reziduurilor.

Astfel se reduce riscul global prin limitarea și controlul fluxurilor de poluanți, evitarea dispersiei metalelor grele și captarea emisiilor atmosferice, contribuind totodată la optimizarea resurselor și reducerea dependenței de combustibili fosili. Din perspectiva sănătății umane, expunerea la poluanți este diminuată prin controlul proceselor și reducerea contactului direct cu deșeurile.

5.5. Monitorizare și revizuire continuă a riscului ecologic și pentru sănătatea umană

5.5.1. Rolul monitorizării în managementul riscului

Monitorizarea reprezintă componenta operațională esențială a sistemului de management al riscului, asigurând legătura dintre evaluarea teoretică a riscului și condițiile reale de funcționare ale sistemului de valorificare a deșeurilor alimentare. Așa cum este evidențiat în fig. 5.1, această etapă nu este una finală, ci face parte dintr-un ciclu continuu de control și optimizare, având rolul de a valida ipotezele utilizate în evaluarea riscului și de a detecta eventualele deviații față de valorile estimate.

2. Costuri de operare și întreținere: utilități, salarii, mentenanță, costuri de operare zilnică;
3. Costuri de monitorizare și închidere: verificarea post-operare și management al reziduurilor.

Instalațiile moderne de digestie anaerobă și producție de biometan implică investiții de ordinul zecilor de milioane de euro; de exemplu, un proiect de **15 MW biometan în România este estimat la aproximativ 30 milioane €**, confirmând nivelul ridicat al capitalului necesar pentru scenariile energetice avansate (Shahid and Hittinger, 2021).

Tabelul 6.1. Structurarea costurilor directe pentru scenariile A–D de management al deșeurilor alimentare (RON)

Tipul de cost	Scenariul A (RON)	Scenariul B (RON)	Scenariul C (RON)	Scenariul D (RON)
Cheltuieli inițiale de implementare				
Studii de fezabilitate, cercetare, proiectare	450,000	600,000	900,000	1,200,000
Infrastructură și echipamente tehnologice	3,500,000	6,800,000	45,000,000	58,000,000
Permise, autorizații, conformare	300,000	450,000	1,200,000	1,500,000
Achiziție teren și amenajare	800,000	1,200,000	3,500,000	4,200,000
Instalare și punere în funcțiune	700,000	1,100,000	6,500,000	7,800,000
Materii prime inițiale și inocul biologic	120,000	180,000	350,000	500,000
Subtotal inițial	5,870,000	10,330,000	57,450,000	73,200,000
Cheltuieli de operare și întreținere (anuale)				
Aprovizionare deșeuri organice	600,000	900,000	2,500,000	3,200,000
Energie și utilități	450,000	700,000	3,200,000	4,000,000
Întreținere echipamente	120,000	220,000	1,000,000	1,400,000
Costuri personal	900,000	1,200,000	3,500,000	4,200,000
Tratarea reziduurilor	150,000	250,000	900,000	1,200,000
Transport și logistică	500,000	750,000	2,200,000	2,800,000
Subtotal operare	2,720,000	4,020,000	13,300,000	16,800,000
Cheltuieli post-implementare				
Optimizare procese și monitorizare	80,000	120,000	400,000	600,000
Certificări, audituri, conformare	60,000	90,000	250,000	320,000
Marketing și distribuție produse	40,000	70,000	200,000	300,000
Cercetare și inovare	50,000	90,000	300,000	500,000
Extindere capacitate	120,000	200,000	1,200,000	1,800,000
Subtotal post-implementare	350,000	570,000	2,350,000	3,520,000
Cost total estimat	8,940,000	14,920,000	73,100,000	93,520,000

6.3.2. Evaluarea costurilor și beneficiilor - aplicarea ratei de actualizare

Durata analizelor a fost stabilită la 10 ani, cu o rată de actualizare de 5%, utilizând factorul de actualizare (ecuația 6.1):

$$fa = \frac{1}{(1+r)^t} \quad (6.1)$$

unde: f_a reprezintă factorul de actualizare; r reprezintă rata de actualizare; t constituie anul de recuperare al investiției.

S-au obținut următoarele valori pentru factorul de actualizare:

$$\begin{aligned} f_a^1 &= 1/(1+0.05)^1 = 0.952; & f_a^6 &= 1/(1+0.05)^6 = 0.746; \\ f_a^2 &= 1/(1+0.05)^2 = 0.907; & f_a^7 &= 1/(1+0.05)^7 = 0.710; \\ f_a^3 &= 1/(1+0.05)^3 = 0.863; & f_a^8 &= 1/(1+0.05)^8 = 0.676; \\ f_a^4 &= 1/(1+0.05)^4 = 0.822; & f_a^9 &= 1/(1+0.05)^9 = 0.644; \\ f_a^5 &= 1/(1+0.05)^5 = 0.783; & f_a^{10} &= 1/(1+0.05)^{10} = 0.613. \end{aligned}$$

Actualizarea costurilor pentru implementarea celor patru scenarii se realizează prin înmulțirea factorului de actualizare cu valoarea costurilor necesare fiecărei etape de implementare a procesului (Comăniță, 2016). Valorile C_{it} , C_{expt} și costul de închidere sunt corelate cu structura investițională estimată anterior pentru cele 4 scenarii.

Analiza beneficiilor generate de scenariile de valorificare a deșeurilor alimentare a fost realizată integrat, pe trei dimensiuni fundamentale ale sustenabilității: economică, socială și de mediu. Această

Nr. crt.	Tip beneficiu	Beneficii identificate	Scenariul A (RON)	Scenariul B (RON)	Scenariul C (RON)	Scenariul D (RON)
		• Reutilizarea apei din digestat				
Total beneficii			9,981,662	13,721,250	24,833,475	33,516,000

• **Raportul Beneficiu/Cost (B/C)** se definește ca raportul dintre beneficiile totale actualizate și costurile totale actualizate ale proiectului, fiind un indicator sintetic utilizat pentru evaluarea eficienței economice a investițiilor. Se disting următoarele cazuri:

- $B/C > 1$ indică o proiectare economică favorabilă, în care beneficiile generate de proiect depășesc costurile totale, justificând implementarea acestuia din perspectiva rentabilității economice și a utilizării eficiente a resurselor.

- $B/C = 1$ arată o situație de echilibru economic, în care beneficiile compensează exact costurile, proiectul fiind sustenabil din punct de vedere financiar, dar fără a genera un avantaj economic net.

- $B/C < 1$ reflectă o proiectare cu profitabilitate limitată sau insuficientă din perspectiva economică strictă, indicând faptul că investiția nu este recuperată integral prin beneficiile generate, ceea ce impune reconsiderarea parametrilor tehnico-economici sau analiza beneficiilor indirecte și a externalităților.

În contextul managementului deșeurilor alimentare, interpretarea acestui indicator trebuie realizată în corelație cu beneficiile de mediu și sociale, care pot justifica implementarea unor scenarii chiar și în situațiile în care raportul B/C este subunitar.

• **Raportul Cost-Beneficiu (C/B)** reprezintă raportul dintre costurile totale actualizate și beneficiile totale actualizate ale proiectului, fiind un indicator complementar raportului B/C , care evidențiază costul necesar pentru obținerea unei unități de beneficiu (Atkinson și Mourato, 2008; Comaniță, 2016). Se disting următoarele situații:

- $C/B < 1$ semnalează proiecte eficiente din punct de vedere economic, în care costurile sunt inferioare beneficiilor generate, indicând o utilizare optimă a resurselor și o bună performanță investițională.

- $C/B = 1$ indică o situație de echilibru între costuri și beneficii, în care proiectul își acoperă integral cheltuielile, fără a genera însă un avantaj economic net.

- $C/B > 1$ sugerează investiții cu rentabilitate redusă, în care costurile depășesc beneficiile obținute, ceea ce implică necesitatea reevaluării parametrilor tehnico-economici, a optimizării costurilor sau a reconsiderării beneficiilor indirecte și a externalităților asociate proiectului.

Aceste rapoarte permit o **comparare sistematică a scenariilor A–D** și identificarea alternativei cu **cea mai mare eficiență economică și potențial de valorificare a resurselor**. Pe baza costurilor și beneficiilor actualizate determinate în secțiunea precedentă, valorile estimate pentru fiecare scenariu sunt prezentate în tabelul 6.11.

Tabelul 6.11. Valorile rapoartelor C/B și B/C pentru scenariile A–D

Scenariu	Costuri actualizate (RON)	Beneficii actualizate (RON)	B/C	C/B
A	153.564.040	2.859.021	0,019	53,76
B	234.500.000	5.147.194	0,022	45,55
C	184.344.000	31.679.500	0,172	5,82
D	219.120.000	33.516.000	0,153	6,54

Raportul B/C reflectă relația dintre beneficiile totale actualizate și costurile totale actualizate, iar indicatorul C/B exprimă relația inversă (fig. 6.1). Rezultatele obținute indică valori foarte reduse ale raportului B/C ($< 0,03$) și, corespunzător, valori foarte ridicate ale raportului C/B (> 45) pentru scenariile A și B, ceea ce evidențiază faptul că beneficiile economice directe nu sunt suficiente pentru a acoperi costurile totale, sugerând o rentabilitate limitată dintr-o perspectivă strict economică.

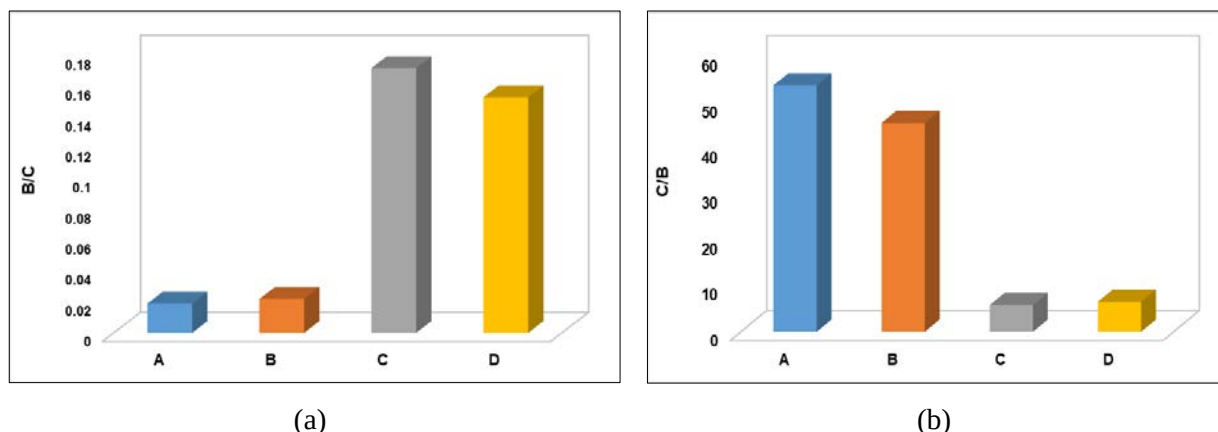


Fig. 6.1. Analiza rapoartelor (A) beneficiu-cost (B/C) și (b) cost-beneficiu (C/B)

În cazul scenariilor C și D, raportul B/C înregistrează o creștere semnificativă (0,15–0,17) față de scenariile A, B, iar raportul C/B se reduce (5–6) față de scenariile A, B, ceea ce indică o performanță economică net superioară comparativ cu scenariile tradiționale. Acest rezultat este determinat de valorificarea unor fluxuri cu valoare adăugată ridicată, generate prin procese tehnologice avansate, precum: valorificarea compușilor bioactivi sau a enzimelor cu potențial comercial; producția de energie regenerabilă din deșeuri; obținerea de produse secundare reutilizabile (compost de calitate, biogaz).

Scenariile C și D sunt în concordanță cu politicile Uniunii Europene privind economia circulară și inovația verde, prin promovarea reducerii deșeurilor și creșterea valorii resurselor secundare. Din perspectiva eficienței economice, acestea se evidențiază ca fiind cele mai avantajoase, fiind singurele care se apropie de pragul de rentabilitate economică în condițiile analizate. În schimb, scenariile A și B rămân dependente de integrarea beneficiilor externe și de mecanismele de sprijin financiar (subvenții sau fonduri europene) pentru a deveni sustenabile din punct de vedere economic. Cu toate acestea, includerea beneficiilor sociale și de mediu poate modifica semnificativ evaluarea acestora, prin: crearea de locuri de muncă; reducerea emisiilor de gaze cu efect de seră; îmbunătățirea calității solului.

6.3.4. Analiza de sensibilitate pentru alternativele de management al deșeurilor alimentare

Analiza de sensibilitate permite evaluarea impactului variației parametrilor economici cheie asupra rezultatelor obținute, deoarece oferă o perspectivă asupra stabilității și robusteții scenariilor de management al deșeurilor alimentare în condiții de incertitudine.

6.3.4.1. Definirea metodologiei aplicate

Analiza de sensibilitate reprezintă un instrument de evaluare aplicat în cadrul Analizei Cost-Beneficiu (ACB) pentru a determina gradul de vulnerabilitate al rezultatelor economice față de variațiile parametrilor de intrare (Ackerman și colab., 2008; Comanita, 2016; Ghinea, 2012). Aceasta permite identificarea factorilor critici care influențează rentabilitatea proiectelor de valorificare a deșeurilor alimentare, precum cantitatea de deșeuri, costurile de implementare, prețurile produselor obținute sau eficiența tehnologiilor aplicate.

Prin această analiză, se creează scenarii diferite de evoluție (Barry, 2008; Bănac, 2004):

- Scenariul optimist: presupune valori favorabile pentru toți parametrii cheie (costuri mai mici, producții mai mari, prețuri ridicate ale bioproduselor).
- Scenariul pesimist: presupune valori nefavorabile (costuri mai mari, producții mai mici, prețuri mai scăzute).

Indicatorii calculați în cadrul analizei de sensibilitate sunt (Barry, 2008; Bănac, 2004):

1. Valoarea Netă Actualizată (VAN) reprezintă unul dintre principalii indicatori utilizați în evaluarea eficienței economice a investițiilor, exprimând diferența dintre beneficiile totale actualizate și costurile totale actualizate pe întreaga durată de viață a proiectului. (ecuația 6.2) (Barry, 2008; Bănac, 2004; HG 443, 2022).

7.2.2. Determinarea matricei consecințelor pentru scenariile A–D

În aceasta analiză, scenariile A–D, denumite în continuare Variantele 1-4, sunt evaluate pe baza unui set de opt criterii (C1-C8): beneficii economice, respectarea legislației UE, emisiile de gaze cu efect de seră, costul implementării, reducerea suprafeței de depozitare, energia recuperată, crearea de locuri de muncă și valoarea adăugată obținută prin produsele bioactive sau enzimele extrase.

C1 – Beneficii economice (mii RON)

C2 – Conformitate UE (calificativ)

C3 – Emisii GES (%)

C4 – Cost implementare (mii RON)

C5 – Reducere depozitare (%)

C6 – Energie recuperate (%)

C7 – Acceptare socială

C8 – Potențial inovativ

Criteriile suplimentare C7 și C8 au fost introduse pentru a integra dimensiunea socială și principiile economiei circulare în analiza multicriterială. Consecințele fiecărui scenariu în raport cu criteriile definite sunt prezentate în tabelul 7.1. Valorile reflectă estimările economice, ecologice și sociale pentru municipiul Iași.

Tabelul 7.1. Matricea consecințelor variantelor în funcție de criterii

Variante	C1 (mii RON)	C2 (calificativ)	C3 (%)	C4 (mii RON)	C5 (%)	C6 (%)	C7 (calificativ)	C8 (calificativ)
V1	12,000	B	15	30,000	25	5	B	S
V2	35,000	B	12	75,000	45	35	B	B
V3	50,000	F.B.	10	120,000	55	10	F.B.	B
V4	80,000	F.B.	8	180,000	70	15	F.B.	F.B.

Transformare calificative în valori numerice pentru calcul: C2 (UE): S = 0.4, B = 0.6, F.B. = 1, C7 (acceptare socială): S = 0.4, B = 0.6, F.B. = 1, C8 (potențial inovativ): S = 0.4, B = 0.6, F.B. = 1

7.2.3. Determinarea coeficienților de importanță K_{ij} pentru scenariile A–D

Coeficienții de importanță K_{ij} sunt definiți pe un interval cuprins între 0 și 1, reflectând gradul de influență al participanților implicați în evaluarea variantelor analizate, în raport cu criteriile stabilite (Jokar și colab., 2023). Procesul de evaluare a fost realizat de un grup de experți cu formări profesionale diferite, după cum urmează:

- E1 – Inginer biotehnolog
- E2 – Economist în bioindustria alimentară
- E3 – Expert în protecția mediului și emisii GES
- E4 – Specialist în energie regenerabilă

Fiecare expert a evaluat importanța criteriilor pe o scară de la 1 la 10, rezultând coeficienții ponderali care reflectă relevanța relativă a fiecărui criteriu în luarea deciziei. Acești coeficienți vor fi utilizați pentru calcularea indicatorilor de concordanță și discordanță între scenariile tabelul 7.2.

Tabelul 7.2. Evaluarea importanței criteriilor de către grupul de experți

<i>Criteriu Expert</i>	<i>E1</i>	<i>E2</i>	<i>E3</i>	<i>E4</i>	$\sum n_{ij}$
C1	8	10	6	7	31
C2	7	8	9	6	30
C3	9	7	10	8	34
C4	6	9	7	7	29
C5	8	8	9	8	33
C6	7	6	8	9	30
C7	8	7	8	7	30
C8	9	8	7	8	32
$\sum \sum n_{ij}$					239

Coeficientul de importanță (K_{ij}) pentru fiecare criteriu se calculează ca raport între suma punctajelor acordate criteriului respectiv și suma totală a punctajelor acordate de toți experții pentru toate criteriile. Formula de calcul pentru determinarea coeficienților de importanță K_{ij} este (7.1):

$$K_{ij} = \frac{\sum n_{ij}}{\sum \sum n_{ij}}, \quad (7.1)$$

unde: $\sum n_{ij}$ reprezintă suma valorilor corespunzătoare criteriilor ce exprimă concordanța dintre variantele analizate, pentru care $n_{ij} \geq n_{ji}$ sunt coeficienții de importanță asociați criteriilor.

Valorile obținute pentru coeficienții de importanță, situate între 0 și 1, indică măsura în care o variantă V_i este preferată în raport cu o altă variantă V_j .

Valorile coeficienților de importanță:

K1: 31/239=0.13031/239=0.130	K5: 33/239=0.13833/239=0.138
K2: 30/239=0.12630/239=0.126	K6: 30/239=0.12630/239=0.126
K3: 34/239=0.14234/239=0.142	K7: 30/239=0.12630/239=0.126
K4: 29/239=0.12129/239=0.121	K8: 32/239=0.13432/239=0.134

7.2.4. Evaluarea performanței scenariilor și construcția matricei de utilitate normalizate

În această etapă, scenariile A-D sunt evaluate pe baza datelor din matricea consecințelor și a coeficienților de importanță stabiliți. Pentru a permite compararea și agregarea valorilor eterogene (RON, %, calificative) este necesară normalizarea performanțelor pe o scară unică de utilitate, de la 0 la 1.

7.2.4.1. Transformarea datelor și stabilirea direcției de optimizare pentru fiecare criteriu

În primul rând, calificativele sunt transformate în valori numerice, iar pentru fiecare criteriu se stabilește dacă scopul este maximizarea sau minimizarea valorii (tabelul 7.3).

7.2.4.2. Calculul utilităților normalizate (a_{ij})

Utilitatea normalizată a_{ij} a scenariului i pentru criteriul j se determină astfel încât valorile obținute să fie cuprinse în intervalul $[0, 1]$, unde 0 corespunde celei mai slabe performanțe, iar 1 celei mai bune performanțe.

Tabelul 7.3. Matricea consecințelor transformate și direcția criteriilor

Criteriu V	V1	V2	V3	V4	Tip	Optimizare
C1	12,000	35,000	50,000	80,000	Cantitativ	Maximizare
C2	0.6	0.6	1.0	1.0	Calitativ	Maximizare
C3	15%	12%	10%	8%	Cantitativ	Maximizare
C4	30,000	75,000	120,000	180,000	Cantitativ	Minimizare
C5	25%	45%	55%	70%	Cantitativ	Maximizare
C6	5%	35%	10%	15%	Cantitativ	Maximizare
C7	0.6	0.6	1.0	1.0	Calitativ	Maximizare
C8	0.4	0.6	0.6	1.0	Calitativ	Maximizare

Pentru criteriile de **maximizare** (C1, C2, C3, C5, C6, C7, C8), unde valori mai mari indică performanțe superioare, utilitatea se calculează conform relațiilor (7.2–7.4). În schimb, pentru criteriul de **minimizare** (C4 – costul de implementare), unde valori mai mici sunt preferabile, se utilizează relația specifică (7.3), care asigură inversarea scalei de evaluare.

Formula pentru criteriile de MAXIMIZARE (C1, C2, C3, C5, C6, C7, C8) (Ec. 7.2-7.4) (Jokar și colab., 2023):

$$a_{ij} = \frac{X_{ij} - X_j^{\min}}{X_j^{\max} - X_j^{\min}} \quad (7.2)$$

Formula pentru criterii de MINIMIZARE (C4) (Jokar și colab., 2023):

$$D_{vgvh} = \begin{cases} a_{gj}^* > a_{hj}^* \\ \frac{1}{d} \max |a_{gj}^* - a_{hj}^*|; a_{gj}^* \leq a_{hj}^* \end{cases} \quad (7.6)$$

unde: d este ecartul maxim (diferența maximă posibilă între utilități), considerat egal cu 1.

Pe baza utilităților normalizate, a fost construită matricea indicatorilor de discordanță, prezentată în tabelul 7.6.

Tabelul 7.6. Matricea indicatorilor de discordanță

D_{vgvh}	V1	V2	V3	V4
V1		1.000	1.000	1.000
V2	0.300	-	0.600	1.000
V3	0.441	0.400	-	0.667
V4	0.879	0.300	0.600	-

Analiza valorilor obținute evidențiază diferențe semnificative între scenarii. Astfel, scenariul V1 este puternic dezavantajat în raport cu toate celelalte alternative, înregistrând valori maxime ale discordanței, ceea ce indică existența unor diferențe critice pe mai multe criterii. Scenariul V2 prezintă dezavantaje moderate, în special în raport cu scenariile V3 și V4, ceea ce reflectă o poziționare intermediară din punct de vedere al performanței globale. Scenariul V3 se caracterizează printr-un profil relativ echilibrat, fără diferențe majore care să conducă la penalizări semnificative. În cazul scenariului V4, valorile ridicate ale discordanței apar punctual, în special în raport cu criteriul costului de implementare, evidențiind faptul că performanțele superioare din punct de vedere tehnologic și inovativ sunt asociate cu un efort investițional semnificativ.

În ansamblu, analiza indicatorilor de discordanță confirmă faptul că scenariile cu valoare adăugată ridicată pot fi limitate de costurile inițiale, însă aceste dezavantaje sunt compensate de performanțele superioare în alte dimensiuni, evidențiind necesitatea unei evaluări integrate în procesul decizional.

7.2.4.5. Stabilirea relației de surclasare și ierarhizarea scenariilor

Pentru identificarea alternativei dominante, indicatorii de concordanță și discordanță calculați anterior au fost comparați cu praguri decizionale specifice metodei ELECTRE, care permit stabilirea relațiilor de preferință între scenarii (Jokar și colab., 2023). În cadrul acestei analize au fost utilizate următoarele valori:

- prag de concordanță: $p=0,65$
- prag de discordanță: $q=0,40$

Un scenariu Vi este considerat preferabil (surclasează) scenariul Vk dacă îndeplinește simultan două condiții:

- nivelul concordanței este suficient de ridicat ($\geq p$),
- discordanța nu depășește pragul acceptabil ($\leq q$).

Această abordare permite identificarea alternativelor care prezintă avantaje globale, fără a fi afectate de dezavantaje critice pe criterii individuale. Pe baza acestor criterii, relațiile de surclasare identificate sunt următoarele:

- V2 surclasează V1, datorită performanțelor superioare în ceea ce privește recuperarea energetică și reducerea cantității de deșeuri depozitate;
- V3 surclasează V1, evidențiind avantajele semnificative în termeni de beneficii economice și impact ecologic;
- V4 surclasează V2, confirmând superioritatea soluțiilor bioindustriale avansate din punct de vedere al valorii adăugate și al potențialului inovativ;
- V3 și V4 nu se surclasează reciproc, ceea ce indică existența unui echilibru între cele două scenarii, fiecare fiind avantajos pe anumite criterii:
 - valorificarea compușilor bioactivi (V3);
 - producerea de enzime cu potențial inovativ ridicat (V4).

Analiza nucleului de surclasare conduce la următoarea ierarhie a scenariilor:

solurile afectate de depozitare sau compostare necontrolată. Rezultatele obținute au evidențiat existența unor riscuri cronice semnificative pentru sănătatea umană, în special în scenariile caracterizate prin control insuficient al fluxurilor de intrare. Pentru unele elemente, precum cadmiul și cromul, coeficientul de hazard a depășit de zeci de ori pragurile de siguranță, indicând un nivel ridicat de expunere potențială pentru populație.

8.1.4. Performanța scenariilor analizate

Analiza cost-beneficiu a indicat faptul că scenariile bazate pe valorificarea energetică și pe obținerea de produse cu valoare adăugată ridicată prezintă rezultate economice favorabile pe termen mediu și lung. Digestia anaerobă s-a evidențiat printr-un raport favorabil între investiții și beneficii, datorită producției de energie regenerabilă și reducerii costurilor de depozitare. Scenariile avansate de valorificare au prezentat cele mai ridicate valori ale beneficiilor economice totale, datorită valorii ridicate a produselor obținute, în pofida costurilor investiționale mai ridicate.

8.1.5. Scenariul optim

Integrarea rezultatelor obținute prin evaluarea ciclului de viață, analiza cost-beneficiu, evaluarea riscului ecologic și analiza multicriterială a permis identificarea unei ierarhii coerente a alternativelor de valorificare. Rezultatele analizei multicriteriale ELECTRE au indicat următoarea ordine de preferință a scenariilor:

Producerea de enzime > Extracția compușilor bioactivi > Digestia anaerobă > Compostarea

Această ierarhie reflectă tranziția de la o abordare orientată spre eliminarea deșeurilor către una orientată spre valorificarea resurselor și dezvoltarea bioeconomiei circulare.

Pentru a evidenția în mod sintetic relațiile dintre principalele rezultate obținute în cadrul cercetării, în fig. 8.1 este prezentată o schemă integrată a elementelor definitorii ale managementului deșeurilor alimentare în municipiul Iași.



Fig. 8.1. Sinteza integrată a rezultatelor cercetării privind managementul deșeurilor alimentare în municipiul Iași

8.2. Model integrat de management al deșeurilor alimentare

Rezultatele obținute în cadrul prezentei cercetări au permis elaborarea unui model integrat de management al deșeurilor alimentare, adaptat condițiilor specifice municipiului Iași. Modelul propus se bazează pe principiile economiei circulare și pe integrarea etapelor de generare, colectare, transport, tratare, valorificare și monitorizare într-un sistem coerent și funcțional. Structura generală a modelului integrat este ilustrată în fig. 8.2.

8.3. Structura sistemului de management propus

Modelul integrat de management al deșeurilor alimentare propus pentru municipiul Iași include șase componente principale: generarea deșeurilor alimentare, colectarea separată, transportul, tratarea, valorificarea și monitorizarea fluxurilor (fig. 8.2). Integrarea acestor componente permite trecerea de la un sistem liniar de eliminare a deșeurilor la un sistem circular bazat pe recuperarea resurselor.

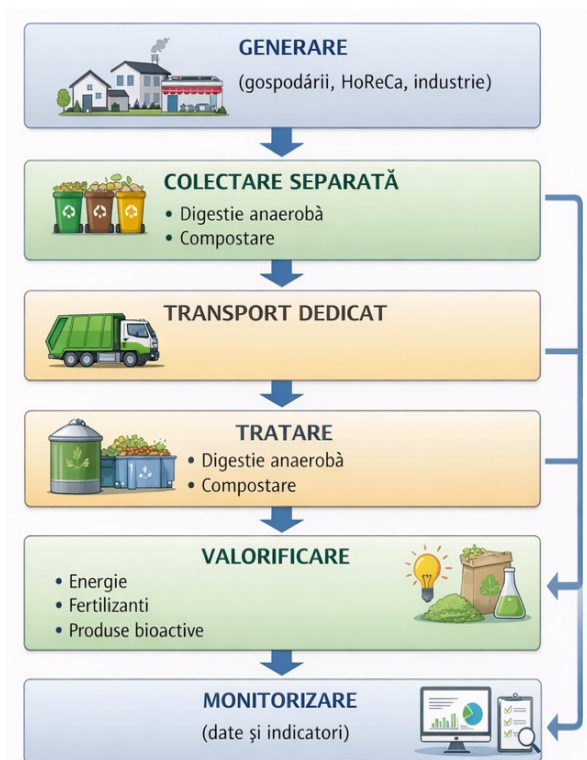


Fig. 8.2. Model integrat de management al deșeurilor alimentare

8.3.1. Generarea deșeurilor alimentare

În cadrul modelului integrat, etapa de generare este corelată cu introducerea unor mecanisme de prevenire și reducere a risipei alimentare, inclusiv prin informarea populației și optimizarea managementului stocurilor în sectorul comercial. De asemenea, separarea la sursă a fracției alimentare constituie o condiție esențială pentru funcționarea eficientă a întregului sistem.

8.3.2. Colectarea separată

Colectarea separată reprezintă una dintre componentele esențiale ale modelului integrat, deoarece calitatea fluxului de deșeur alimentare influențează direct posibilitățile de valorificare ulterioară. Modelul propus presupune implementarea unui sistem extins de colectare separată a biodeșeurilor, bazat pe containere dedicate și pe stabilirea unor frecvențe adecvate de colectare. Separarea eficientă a fracției alimentare permite reducerea contaminării și crește semnificativ eficiența proceselor de tratare. În plus, colectarea separată facilitează obținerea unor date cantitative și calitative privind fluxurile de deșeur alimentare, contribuind la dezvoltarea unui sistem de monitorizare funcțional.

8.3.3. Transportul deșeurilor alimentare

Transportul reprezintă etapa de legătură între colectarea separată și procesele de tratare și valorificare. În cadrul modelului propus, transportul trebuie organizat astfel încât să se evite amestecarea fracției alimentare cu alte tipuri de deșeuri municipale.

8.3.4. Tratarea deșeurilor alimentare

Tratarea deșeurilor alimentare reprezintă etapa centrală a modelului integrat, vizând stabilizarea fracției organice și pregătirea acesteia pentru valorificare. În cadrul modelului sunt utilizate digestia anaerobă și compostarea controlată, digestia anaerobă fiind soluția optimă pentru valorificarea energetică, prin producerea de biogaz și reducerea emisiilor de gaze cu efect de seră. Compostarea este aplicată complementar, în special pentru tratarea digestatului rezultat.

8.3.5. Valorificarea resurselor

Valorificarea reprezintă obiectivul principal al modelului integrat, implicând transformarea deșeurilor alimentare în energie regenerabilă, fertilizanți organici sau produse cu valoare adăugată ridicată. Digestia anaerobă permite recuperarea energiei sub formă de electricitate și căldură, iar utilizarea digestatului sau a compostului contribuie la reciclarea nutrienților și îmbunătățirea solurilor. Modelul permite, de asemenea, integrarea tehnologiilor avansate, precum obținerea de compuși bioactivi sau enzime industriale.

8.3.6. Monitorizarea sistemului

Monitorizarea reprezintă componenta transversală a modelului integrat, asigurând funcționarea eficientă a sistemului. Aceasta se bazează pe colectarea sistematică a datelor privind cantitățile și compoziția deșeurilor alimentare, precum și performanța proceselor de tratare și valorificare. Utilizarea unor indicatori specifici permite evaluarea periodică și ajustarea strategiilor, contribuind totodată la îmbunătățirea planificării și fundamentarea deciziilor privind dezvoltarea infrastructurii.

8.4. Scenariu realist de implementare

Scenariul de implementare este structurat pe trei intervale temporale: termen scurt (1–3 ani), termen mediu (3–7 ani) și termen lung (7–15 ani), fiecare etapă corespunzând unui nivel diferit de dezvoltare a sistemului (fig. 8.3). Strategiile etapizate de implementare sunt frecvent recomandate în literatura de specialitate pentru reducerea riscurilor investiționale și creșterea acceptabilității sociale a proiectelor de infrastructură de mediu (Kaza și colab., 2018; UNEP, 2021).

8.4.1. Etapa pe termen scurt (1–3 ani)

Etapa pe termen scurt reprezintă faza de fundamentare a sistemului integrat de management al deșeurilor alimentare și are ca obiectiv principal crearea infrastructurii organizaționale și informaționale necesare funcționării sistemului.

8.4.1.1. Implementarea colectării separate

Extinderea colectării separate a biodeșeurilor la nivelul municipiului Iași reprezintă o măsură esențială, separarea la sursă a fracției alimentare fiind condiția de bază pentru valorificare și reducerea contaminării. Implementarea presupune dotarea utilizatorilor cu recipiente dedicate, stabilirea unor programe regulate de colectare și derularea unor campanii de informare pentru creșterea participării. Procesul poate fi inițiat în zone pilot, urmat de extinderea progresivă la nivelul întregului municipiu.

8.4.1.2. Dezvoltarea bazelor de date

O componentă esențială a etapei inițiale o constituie dezvoltarea unui sistem funcțional de colectare și gestionare a datelor privind deșeurile alimentare. Crearea unei baze de date operaționale permite determinarea cantităților generate, a variațiilor sezoniere și a compoziției deșeurilor, informații necesare pentru dimensionarea instalațiilor și evaluarea performanței sistemului. Monitorizarea include evidența cantităților colectate, analiza compoziției, indicatori de performanță și costuri operaționale, contribuind la eliminarea deficitului informațional și la fundamentarea planificării strategice pe termen lung.

8.4.1.3. Pilot pentru digestia anaerobă

În etapa inițială este recomandată implementarea unui proiect pilot de digestie anaerobă, care permite testarea caracteristicilor reale ale deșeurilor alimentare din municipiul Iași și evaluarea performanței procesului în condiții locale. O instalație de capacitate redusă, amplasată în apropierea infrastructurii existente, facilitează determinarea randamentului de producere a biogazului, evaluarea stabilității procesului, caracterizarea digestatului și estimarea costurilor operaționale. Rezultatele obținute constituie baza pentru proiectarea unei instalații la scară industrială.

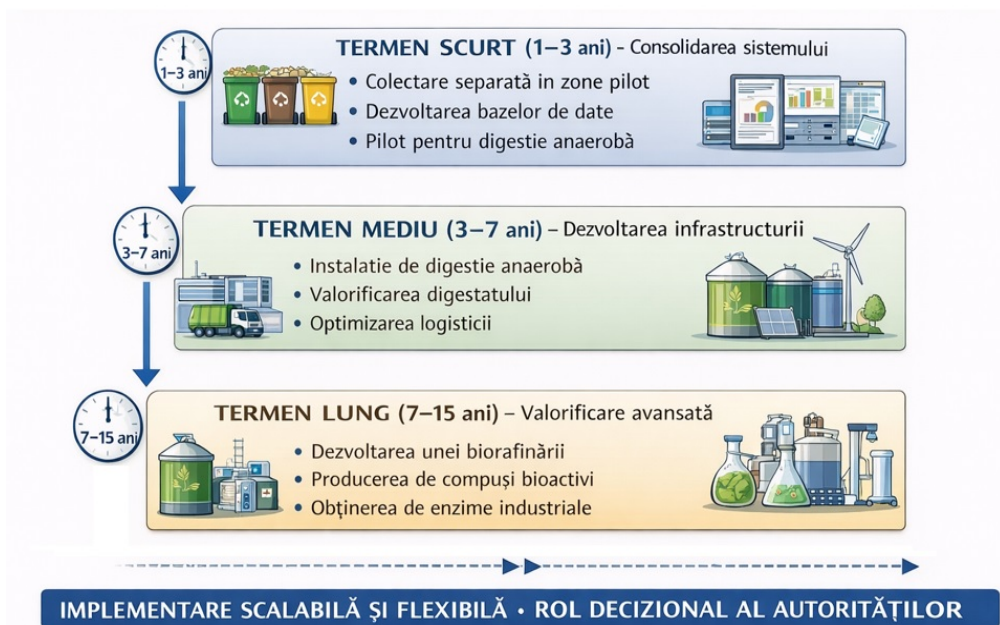


Fig. 8.3. Scenariu etapizat de implementare a unui sistem integrat de management al deșeurilor alimentare

8.4.2 Etapa pe termen mediu (3–7 ani)

Etapa pe termen mediu reprezintă faza de dezvoltare a infrastructurii principale de tratare și valorificare a deșeurilor alimentare.

8.4.2.1. Construirea instalației de digestie anaerobă

Pe baza datelor obținute în etapa inițială poate fi realizată o instalație de digestie anaerobă la scară industrială, aceasta constituind elementul central al sistemului integrat, prin valorificarea energetică a fracției organice și reducerea cantităților eliminate prin depozitare. Producerea biogazului permite obținerea de energie electrică și termică, contribuind la diminuarea consumului de combustibili fosili și a emisiilor de gaze cu efect de seră, iar integrarea acestei instalații în sistemul local favorizează creșterea gradului de circularitate și reducerea impactului asupra mediului.

8.4.2.2. Valorificarea digestatului

Digestatul rezultat din digestia anaerobă constituie o resursă importantă de nutrienți, valorificabilă în agricultură. În etapa pe termen mediu este necesară dezvoltarea unor soluții de utilizare, precum compostarea suplimentară sau aplicarea directă ca fertilizant organic, contribuind la reciclarea nutrienților și reducerea utilizării îngrășămintelor minerale. Controlul calității digestatului rămâne esențial pentru limitarea riscurilor ecologice asociate contaminanților.

8.4.2.3. Optimizarea logisticii

Extinderea colectării separate și introducerea instalațiilor de tratare necesită optimizarea sistemului logistic de transport al deșeurilor alimentare. Aceasta implică stabilirea unor rute eficiente, reducerea distanțelor de transport, utilizarea vehiculelor specializate și sincronizarea programelor de colectare și tratare, contribuind astfel la diminuarea costurilor operaționale și a emisiilor asociate transportului.

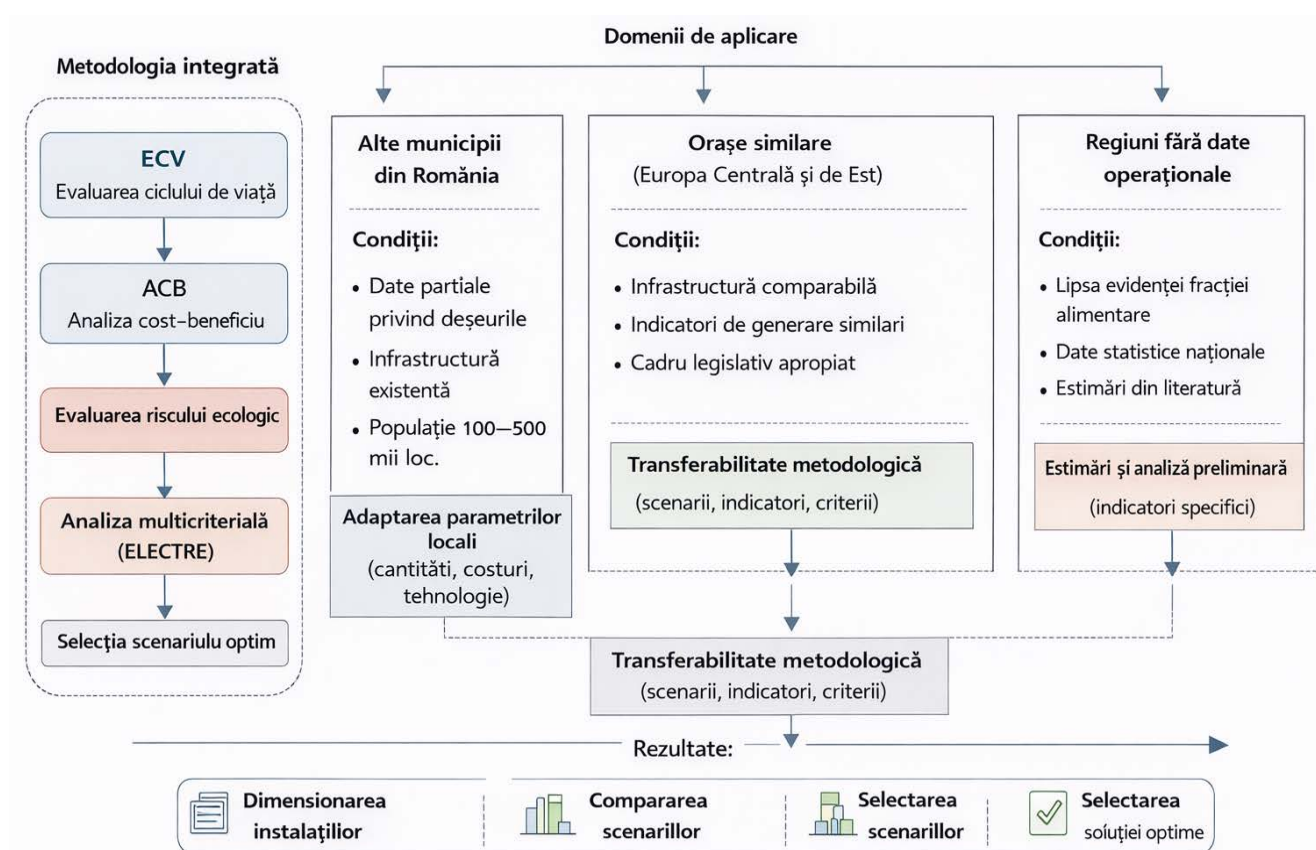


Fig. 8.5. Domenii de aplicare a metodologiei integrate de evaluare a managementului deșeurilor alimentare

8.6.1. Contribuția metodologică

Principala contribuție metodologică a tezei constă în dezvoltarea unui cadru integrat de evaluare a managementului deșeurilor alimentare, care combină evaluarea ciclului de viață, analiza cost-beneficiu, evaluarea riscului ecologic și analiza multicriterială de tip ELECTRE într-un sistem unitar. Integrarea acestor metode într-o succesiune logică permite corelarea performanței de mediu, a viabilității economice și a riscurilor asociate, oferind o evaluare mult mai completă decât abordările bazate pe un singur criteriu.

Metodologia este adaptată pentru condiții de disponibilitate limitată a datelor, permițând utilizarea unor estimări bazate pe indicatori statistici și date din literatura de specialitate, fără a compromite coerența analizei, ceea ce îi conferă un grad ridicat de aplicabilitate. De asemenea, aceasta permite integrarea unor scenarii tehnologice variate, de la soluții convenționale, precum compostarea și digestia anaerobă, până la opțiuni avansate bazate pe obținerea de compuși bioactivi și enzime, extinzând analiza către conceptul de bioeconomie circulară.

8.6.2. Contribuția aplicativă

Contribuția aplicativă a tezei constă în realizarea unei evaluări integrate a managementului deșeurilor alimentare în municipiul Iași, prin estimarea cantităților generate și caracterizarea fluxurilor, în absența unor baze de date operaționale distincte. Analiza a evidențiat deficiențele sistemului actual și a permis identificarea principalelor direcții de dezvoltare.

Aplicarea metodologiei integrate a permis evaluarea comparativă a scenariilor din perspectiva impactului de mediu, performanței economice și riscurilor ecologice, demonstrând avantajele valorificării avansate. De asemenea, a fost elaborat un model integrat de management și un scenariu etapizat de implementare, utilizabile ca bază pentru planificarea strategică a infrastructurii de management al biodeșeurilor la nivel local sau regional.

8.6.3. Contribuția decizională

Contribuția decizională a tezei constă în dezvoltarea unui instrument de suport pentru fundamentarea deciziilor privind managementul deșeurilor alimentare, bazat pe integrarea rezultatelor obținute prin metodele de evaluare. Analiza multicriterială permite identificarea și ierarhizarea alternativelor optime pe baza unor criterii obiective, reducând incertitudinile și facilitând selecția unor soluții adaptate condițiilor locale.

Rezultatele pot fi utilizate în elaborarea strategiilor locale și în fundamentarea investițiilor în infrastructura de tratare a biodeșeurilor, contribuind la creșterea transparenței procesului decizional. În ansamblu, contribuțiile tezei oferă un cadru integrat de analiză și un instrument operațional pentru dezvoltarea managementului sustenabil al deșeurilor alimentare.

CONCLUZII GENERALE

Teza de doctorat intitulată „**Managementul sustenabil al deșeurilor alimentare: evaluarea integrată a impactului, riscurilor și opțiunilor de valorificare în contextul economiei circulare**” abordează o problemă de maximă relevanță științifică și aplicativă, situată la intersecția dintre ingineria mediului, economia circulară și politicile de dezvoltare durabilă. Tema investigată reflectă una dintre provocările majore ale societății contemporane, generate de creșterea cantităților de deșeuri alimentare și de impactul semnificativ al acestora asupra mediului, resurselor naturale și sistemelor economice.

În acest context, cercetarea se înscrie în direcțiile actuale de interes la nivel internațional și european, care vizează reducerea risipei alimentare, optimizarea utilizării resurselor și tranziția către modele circulare de producție și consum. Abordarea propusă răspunde necesității dezvoltării unor soluții integrate și sustenabile, capabile să coreleze dimensiunile de mediu, economice și sociale ale fenomenului, în vederea fundamentării unor strategii eficiente de management.

În prima parte a tezei s-a realizat o analiză critică amplă a stadiului cercetărilor privind managementul deșeurilor alimentare, cu accent pe dinamica generării, distribuția pe lanțul alimentar, impactul asupra mediului și resurselor naturale, precum și pe opțiunile de prevenire și valorificare în contextul economiei circulare. Analiza a evidențiat complexitatea fenomenului, abordat în literatura de specialitate atât ca indicator al ineficienței sistemelor agroalimentare, cât și ca resursă potențial valorificabilă.

Au fost examinate principalele direcții de cercetare, incluzând impactul asupra schimbărilor climatice, utilizarea resurselor, biodiversitatea și limitările infrastructurale ale sistemelor de management, precum și cadrul legislativ și politicile publice relevante. În urma acestei analize au fost identificate lacune semnificative, precum caracterul fragmentat al abordărilor, lipsa unor metodologii integrate și corelarea insuficientă între dimensiunile de mediu, economice și decizionale. De asemenea, s-a evidențiat tendința studiilor de a analiza izolat fluxurile de deșeuri sau tehnologiile de valorificare, fără integrarea evaluării riscurilor și a eficienței economice. Totodată, au fost identificate limitări importante legate de lipsa metodologiilor unitare de evaluare, deficitul de date operaționale și dificultățile de comparabilitate, precum și analiza insuficientă a interacțiunilor dintre etapele lanțului alimentar.

Prin urmare, aceste limitări au fundamentat necesitatea dezvoltării unei abordări integrate și multidimensionale, orientate spre evaluarea simultană a impactului, riscurilor și opțiunilor de valorificare. Astfel, primul capitol configurează cadrul conceptual al cercetării și justifică orientarea tezei către elaborarea unui model integrat de evaluare și optimizare a managementului deșeurilor alimentare în contextul economiei circulare.

În acest context, a fost formulat un punct de vedere propriu care a permis stabilirea **obiectivului principal al tezei de doctorat care vizează dezvoltarea și aplicarea unui model integrat de evaluare a managementului deșeurilor alimentare, bazat pe corelarea impactului de mediu, a riscurilor ecologice și pentru sănătatea umană și a eficienței economice, în vederea identificării și fundamentării unor scenarii optime de valorificare și strategii sustenabile în contextul tranziției către economia circulară.**

Pentru atingerea obiectivului general au fost formulate și realizate următoarele obiective specifice:

- *analiza critică a stadiului actual al cunoașterii* privind generarea, distribuția și managementul deșeurilor alimentare, cu evidențierea lacunelor conceptuale, metodologice și operaționale existente în literatura de specialitate;
- *evaluarea impactului de mediu al deșeurilor alimentare*, prin analiza integrată a efectelor asupra schimbărilor climatice, utilizării resurselor naturale, poluării și biodiversității, în vederea evidențierii dimensiunii sistemice a fenomenului;
- *analiza cadrului legislativ și strategic* la nivel european și național, cu identificarea limitărilor și disfuncționalităților în implementarea măsurilor de prevenire și valorificare a deșeurilor alimentare;
- *caracterizarea sistemului actual de management al deșeurilor alimentare la nivel local (municipiul Iași)*, prin identificarea fluxurilor, a practicilor existente și a principalelor deficiențe structurale și informaționale ;
- *dezvoltarea unui cadru metodologic integrat de evaluare*, bazat pe combinarea unor metode complementare, respectiv evaluarea ciclului de viață (ECV), analiza cost-beneficiu (ACB), evaluarea riscului ecologic și pentru sănătatea umană și analiza decizională multicriterială;
- *estimarea și modelarea fluxurilor de deșeuri alimentare* în condiții de incertitudine informațională, prin utilizarea unor metode indirecte și scenarii prospective adaptate contextului local ;
- *identificarea și definirea unor scenarii relevante de management și valorificare a deșeurilor alimentare*, incluzând atât opțiuni convenționale (compostare, digestie anaerobă), cât și soluții avansate de tip biorafinărie (extracția compușilor bioactivi, producerea de enzime);
- *evaluarea comparativă a scenariilor de valorificare*, din perspectiva performanței de mediu, viabilității economice și riscurilor asociate, prin aplicarea integrată a instrumentelor analitice selectate;
- *aplicarea analizei multicriteriale pentru ierarhizarea alternativelor și identificarea soluțiilor optime* în contextul obiectivelor de sustenabilitate și economie circulară;
- *elaborarea unui model integrat de management al deșeurilor alimentare*, adaptat condițiilor locale, care să permită corelarea rezultatelor analitice cu deciziile strategice;
- *formularea unor direcții strategice și operaționale* pentru îmbunătățirea sistemului de management al deșeurilor alimentare, orientate către prevenire, valorificare superioară și reducerea impactului asupra mediului;
- *fundamentarea contribuției deșeurilor alimentare la tranziția către economia circulară și bioeconomie*, prin evidențierea potențialului de transformare a acestora în resurse cu valoare adăugată

Structura tezei este coerent organizată în opt capitole, fiecare contribuind în mod distinct la atingerea obiectivelor propuse și evidențiind elemente de originalitate.

Capitolul 2 dezvoltă cadrul conceptual și metodologic al cercetării, definind ipotezele de lucru, obiectivele specifice și arhitectura analitică utilizată pentru evaluarea managementului deșeurilor alimentare. Acest capitol operationalizează direcțiile identificate în analiza critică și stabilește structura metodologică necesară pentru investigarea sistemului în mod integrat.

Cadrul metodologic este construit pe baza integrării unor instrumente analitice complementare, respectiv evaluarea ciclului de viață (ECV) pentru cuantificarea impactului de mediu, analiza cost-beneficiu (ACB) pentru evaluarea viabilității economice, evaluarea riscului ecologic și pentru sănătatea umană pentru identificarea implicațiilor asupra sistemelor naturale și sociale, precum și analiza decizională multicriterială (ELECTRE) pentru ierarhizarea alternativelor de management. Aceste metode sunt corelate într-un demers unitar, care permite evaluarea simultană a performanței scenariilor din perspective multiple. Totodată, capitolul definește parametrii de analiză, indicatorii specifici și criteriile de evaluare, precum și modul de integrare a acestora într-un cadru decizional coerent, adaptat condițiilor de incertitudine informațională caracteristice sistemelor reale de management al deșeurilor alimentare.

Caracterul original al capitolului constă în dezvoltarea unui cadru metodologic integrat, bazat pe o abordare sistemică, care corelează indicatorii de impact, risc și sustenabilitate într-un model analitic coerent. Această abordare permite depășirea limitărilor metodologice existente și fundamentează evaluarea comparativă a scenariilor de valorificare, constituind baza elaborării modelului integrat și a analizelor aplicative dezvoltate în capitolele ulterioare.

BIBLIOGRAFIE SELECTIVA

- Ackerman F., Heinzerling L., Massey R., (2005), Applying cost-benefit to past decisions: Was environmental protection ever a good idea?, *Administrative Law Review*, 57, 155-192.
- Atkinson G., Mourato S., (2008), Environmental cost-benefit analysis, *Annual Review of Environment and Resources*, 33, 317-344.
- Arzoumanidis I., D'Eusano M., Raggi A., Petti L., (2020), Functional unit definition criteria in life cycle assessment and social life cycle assessment: A discussion. In: *Perspectives on social LCA*, Traverso M., Petti L., Zamagni A. (eds.) Springer Briefs in Environmental Science, Springer, Cham, https://doi.org/10.1007/978-3-030-01508-4_1
- Barry W., (2008), Cost benefit analysis, *Economic and Labour Market Review*, 2, 67- 70.
- Bănaciu S.C., (2004), Analiza cost - beneficiu (ACB) instrument util pentru studiile de fezabilitate, On line la: <https://www.management.ase.ro/reveconomia/2004-1/15.pdf>.
- Bisinella V., Schmidt S., Varling A.S., Laner D., Christensen T.H., (2024), Waste LCA and the future, *Waste Management*, 174, 53-75.
- Blanes-Vidal V., (2017), Living in the clean, stress-free and quiet countryside: Does the reality match the dream? Residential exposure to environmental health stressors in the Danish Countryside, *Human Ecology*, 45, 545-552.
- Bolaji I., Nejad B., Billham M., Mehta N., Smyth B., Cunningham E., (2021), Multi-criteria decision analysis of agri-food waste as a feedstock for biopolymer production, *Resources, Conservation and Recycling*, 172, 105671, <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105671>.
- Comăniță E.-D., (2016), Instrumente pentru luarea deciziilor în utilizarea durabilă a deșeurilor ca resurse materiale și energetice, Teză de doctorat, Universitatea Tehnică "Gheorghe Asachi" din Iași, Romania.
- Corrente S., Greco S., Słowiński R., (2016), Multiple Criteria Hierarchy Process for ELECTRE Tri methods, *European Journal of Operational Research*, 252, 191-203.
- Curran M.A., (2017), Overview of goal and scope definition in life cycle assessment. in: curran, m. (eds) goal and scope definition in life cycle assessment. *LCA compendium – the complete world of life cycle assessment*, Springer, Dordrecht, https://doi.org/10.1007/978-94-024-0855-3_1
- Coyle J., Barnhart B., Harbison R., Shao K., Hayes A.W., Johnson G., (2025), Probabilistic risk assessment approaches better protect susceptible populations, *Integrated Environmental Assessment and Management*, 21, 1368-1380.
- Distratis R., De Iaco S., Posa D., Anzilli L., (2025), A multi-criteria approach to air pollution assessment based on the ELECTRE score method, *Proceedings of EcoSta 2025*, On line la: <https://iris.unisalento.it/handle/11587/563507?mode=full>.
- Djukica M., Jovanoski I., Ivanovic O.M., Lazic M., Bodroza D., (2016), Cost-benefit analysis of an infrastructure project and a cost-reflective tariff: A case study for investment in wastewater treatment plant in Serbia, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 59, 1419-1425.
- EEA, (2020), Bio-waste in Europe - turning challenges into opportunities, European Environment Agency, Report No 04/2020, Copenhagen, On line at: <https://www.eea.europa.eu/publications/bio-waste-in-europe>
- EEB, (2022), EU wastes more food than it imports, says new report, European Environmental Bureau, On line la: https://eeb.org/en/eu-wastes-more-food-than-it-imports-says-new-report/?trk=public_post_main-feed-card_feed-article-content
- European Commission, (2020), Farm to Fork Strategy. For a fair, healthy and environmentally-friendly food system, On line la: https://food.ec.europa.eu/system/files/2020-05/f2f_action-plan_2020_strategy-info_en.pdf
- Eurostat, (2022), Food waste and food waste prevention – estimates, European Commission, On line la: https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Food_waste_and_food_waste_prevention_-_estimates
- Eurostat, (2023a), Food waste and food waste prevention by NACE Rev. 2 activity - tonnes of fresh mass, On line la: https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/env_wasfw__custom_12951734/bookmark/table?lang=en&bookmarkId=0999862f-b7ab-4dae-92a4-7539981ce4eb&c=1758271741000
- Eurostat, (2023b), Food waste and food waste prevention - estimates, On line la: https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Food_waste_and_food_waste_prevention_-_estimates.
- FAO, (2019), The State of Food and Agriculture 2019. Moving forward on food loss and waste reduction, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, On line la: <https://www.fao.org/3/ca6030en/ca6030en.pdf>
- Ferreira M., Almeida M., (2015), Benefits from energy related building renovation beyond costs, energy and emissions, *Energy Procedia*, 78, 2397-2402.

- FFIPD, (2024), Food and Feed Information Portal Database Version 5.6.0, On line la: <https://ec.europa.eu/food/food-feed-portal/screen/home>.
- Foley, J.A., Ramankutty, N., Brauman, K.A., Cassidy E.S., Gerber J.S., Johnston M., Mueller N.D., O'Connell C., Ray D.K., West P.C., Balzer C., Bennett E.M., Carpenter S.R., Hill J., Monfreda C., Polasky S., Rockström J., Sheehan J., Siebert S., Tilman D., Zaks D.P.M., (2011), Solutions for a cultivated planet, *Nature*, 478, 337-342.
- Ghinea C., (2012), Modele de management al deșeurilor și aplicarea lor pentru managementul durabil al deșeurilor reciclabile, Teză de doctorat, Universitatea Tehnică "Gheorghe Asachi" din Iași, Romania.
- Gupta N., Yadav K.K., Kumar V., Prasad S., Cabral-Pinto M.M.S., Jeon B.-H., Kumar S., Abdellattif M.H., Alsukaibia A.K.D., (2022) Investigation of heavy metal accumulation in vegetables and health risk to humans from their consumption, *Frontiers in Environmental Science*, 10, 791052, <http://doi.org/10.3389/fenvs.2022.791052>
- Hassan M.M., Xu Y., Sayada J., Zareef M., Jiao T., Chen M., Chen X., Li H., Chen Q., (2025), Trends in smart surface-enhanced Raman scattering sensors for food hazards, *Trends in Food Science & Technology*, 163, 105199, <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2025.105199>.
- Hawken, P., (2017), *Drawdown: The most comprehensive plan ever proposed to reverse global warming*, Penguin Books, New York.
- He W., Guo X., Han J., (2025), Management of urban manufacturing byproducts: food circular economy and safety aspects, *CyTA - Journal of Food*, 23, <https://doi.org/10.1080/19476337.2025.2477659>.
- HG 443, (2022), Hotărârea de Guvern nr. 443/2022 pentru aprobarea conținutului instrumentului de prezentare și motivare, a structurii raportului privind implementarea actelor normative, a instrucțiunilor metodologice pentru realizarea evaluării impactului, precum și pentru înființarea Consiliului consultativ pentru evaluarea impactului actelor normative, *Monitorul Oficial, Partea I nr. 333 din 05 aprilie 2022*.
- Holland P., (2012), Simple Introduction to Cost-Benefit Analysis, On line la: http://www.nab.vu/sites/all/files/documents/pr841_0.pdf.
- ISO 14001, (2026), Environmental management systems - Requirements with guidance for use, On line la: <https://www.iso.org/standard/14001>
- ISO 14040, (2006), International Organization for Standardization, Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework, On line la: http://www.iso.org/iso/catalogue_detail.htm?csnumber=23151.
- ISO 14044, (2006), Environmental management - International Organization for Standardization, Life cycle assessment - Requirements and guidelines, On line la: http://www.iso.org/iso/catalogue_detail?csnumber=38498.
- Ivanovic N., Vucinic A., Marinkovic V., Krajnovic, D., Curcic M., (2025), Towards sustainable food waste management in Serbia: A review of challenges, gaps, and future perspectives, *Sustainability*, 17, 2961, <https://doi.org/10.3390/su17072961>
- Jokar F., Jalali Varnamkhasti M., Hadi-Vencheh A., (2023), A New ELECTRE method based on left and right score for Multicriteria Decision-Making, *Computational Intelligence and Neuroscience*, 2023, 6414686, <https://doi.org/10.1155/2023/6414686>
- Jorge-Ortiz A., Braulio-Gonzalo M., Bovea M.D., (2025), Environmental and economic performance of residential buildings: ECV/LCC tool and case study in Colombia, *Building and Environment*, 269, 112459, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2024.112459>.
- Karagiannidis A., Perkoulidis G., (2009), A multi-criteria ranking of different technologies for the anaerobic digestion for energy recovery of the organic fraction of municipal solid wastes, *Bioresource Technology*, 100, 2355-2360.
- Kaza S., Yao L.C., Bhada-Tata P., Van Woerden F., (2018), "What a Waste 2.0". A global snapshot of solid waste management, to 2050, World Bank Publications - Books, The World Bank Group, number 30317, <https://doi.org/10.1596/978-1-4648-1329-0>
- Kohli K., Prajapati R., Shah R., Das M., Sharma B.K., (2024), *Sustainable Food Technology*, 2, 70-80.
- Lee H., (2021), The concept of risk and corporate risk, In: *Risk management*, Springer Texts in Business and Economics, pp. 3-12, Springer Nature Singapore Pte Ltd.
- Lopez D., Froese Th. M., (2016), Analysis of costs and benefits of panelized and modular prefabricated homes, *International Conference on Sustainable Design, Engineering and Construction*, 145, 1291 – 1297.
- Martin D.M., Smith D.R., (2025), Comparing SMART and ELECTRE methods for multi-criteria decision analysis: A case study evaluating conservation strategies, *Environmental and Sustainability Indicators*, 27, 100764, <https://doi.org/10.1016/j.indic.2025.100764>.

- Noel L., McCormack R., (2014), A cost benefit analysis of a V2G-capable electric school bus compared to a traditional diesel school bus, *Applied Energy*, 126, 246-265.
- PA, (2023), Planul de Acțiune pentru oraș verde Iași, On line la: https://ebrdgreencities.com/assets/Uploads/PDF/20231221_Iasi-GCAP_RO.pdf.
- Papargyropoulou E., Lozano R., Steinberger J.C., Wright N., bin Ujang Z., (2014), The food waste hierarchy as a framework for the management of food surplus and food waste, *Journal of Cleaner Production*, 76, 106-115.
- PE International, (2012a), GaBi Handbook and GaBi Modelling Principles, On line la: [www.gabi-software](http://www.gabi-software.com)
- PE International (2012b), Gabi Professional Databases, On line la: <http://www.pe-international.com/nw-eu-english/index/>.
- PJGD, (2021), Planul județean de gestionare a deșeurilor în județul Iași, On line la: <https://www.icc.ro/sites/default/files/files/activitate/hotarari/2021/27-01/22.pdf>.
- Rai N., Pavankumar T.L., Ghotra B., Dhillion S., Juneja V., Amaly N., Pandey P., (2025), Essential recycling and repurposing of food waste for environment and sustainability, *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 9, 1575113, <http://doi.org/10.3389/fsufs.2025.1575113>
- Raport Salubris, (2024), Raportul de evaluare pentru anul 2024 a activității directorilor a SC SALUBRIS SA, On line la: [https://www.primaria-iasi.ro/dm_iasi/portal.nsf/atasament/9D50EC6846CAA5E5C2258C9F003F830F/\\$FILE/Anunt%20Raport%20activitate%20Salubris.pdf?Open](https://www.primaria-iasi.ro/dm_iasi/portal.nsf/atasament/9D50EC6846CAA5E5C2258C9F003F830F/$FILE/Anunt%20Raport%20activitate%20Salubris.pdf?Open).
- Sánchez-Burgos M.A., Conradi-Galnares E., Dragatogiannis D., (2025), Life Cycle Assessment (LCA) Methodology, In: *Life Cycle Analysis Based on Nanoparticles Applied to the Construction Industry*, Mercader-Moyano P., Porras-Pereira P. (eds) Springer, Cham, https://doi.org/10.1007/978-3-031-79115-4_3
- Sarangi P.K., Pal P., Singh A.K., Sahoo U.K., Prus P., (2024), Food waste to food security: transition from bioresources to sustainability, *Resources* 13, 164, <https://doi.org/10.3390/resources13120164>
- Scherhauser S., Moates G., Hartikainen H., Waldron K., Obersteiner G., (2018), Environmental impacts of food waste in Europe, *Waste Management*, 77, 98-113.
- Shahid K., Hittinger E., (2021), Techno-economic optimization of food waste diversion to treatment facilities to determine cost effectiveness of policy incentives, *Journal of Cleaner Production*, 279, 122634, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122634>.
- Siddiqua A., Hahladakis J.N., Al-Attiya W.A.K.A., (2022), An overview of the environmental pollution and health effects associated with waste landfilling and open dumping, *Environmental Science and Pollution Research*, 29, 58514–58536.
- Skaf L., Franzese P.P., Capone R., Buonocore E., (2021), Unfolding hidden environmental impacts of food waste: An assessment for fifteen countries of the world, *Journal of Cleaner Production*, 310, 127523, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127523>.
- Tesfaye A., Brouwer R., van der Zaag P., Negatu W., (2016), Assessing the costs and benefits of improved land management practices in three watershed areas in Ethiopia, *International Soil and Water Conservation Research*, 4, 20–29.
- UNEP, (2021), UNEP Food Waste Index Report 2021, On line la: <https://www.unep.org/resources/report/unep-food-waste-index-report-2021>
- UNEP, (2024), Food Waste Index Report 2024, On line la: <https://www.unep.org/resources/publication/food-waste-index-report-2024>
- USEPA, (2022), Integrated Risk Information System (IRIS)*. United States Environmental Protection Agency, On line la: <https://www.epa.gov/iris>
- Van Dooren C., Janmaat O., Snoek J., Schrijnen M., (2019), Measuring food waste in Dutch households: A synthesis of three studies, *Waste Management*, 94, 153-164.
- WHO, (2021), WHO Health and Climate Change Global Survey Report, On line la: <https://climate-adapt.eea.europa.eu/en/metadata/publications/2021-who-health-and-climate-change-global-survey-report>
- Ziemba P., (2022), Application framework of multi-criteria methods in sustainability assessment, *Energies*, 15, 9201, <https://doi.org/10.3390/en15239201>

ANEXA 1. ACTIVITATEA ȘTIINȚIFICĂ

A. Lucrări publicate în reviste incluse în Web of Science cu factor de impact

1. *Linking tourism intensity to food waste generation in Europe: insights from a cross-country assessment*
Țăbuleac R.M., **Coșbuc E.D.**, Simion T.V., Ungureanu-Comăniță E.D., Gavrilăscu M.,
Environmental Engineering and Management Journal, 25, 137-148, 2026,
<http://doi.org/10.30638/eemj.2026.012>
2. *Cost-benefit analysis of enzymatic hydrolysis alternatives for food waste management*,
Ghinea C., Ungureanu-Comăniță E.-D., Țăbuleac R.M., Oprea P.S., **Coșbuc E.D.**, Gavrilăscu M., *Foods*,
14, 488, 2025, <https://doi.org/10.3390/foods14030488>

B. Lucrări publicate în reviste CNCSIS (B+)

1. *Food waste: current trends, global perspectives and impacts*,
Coșbuc E.-D., Ungureanu-Comăniță E.-D., Gavrilăscu M.
Buletinul Institutului Politehnic din Iași, Secția Chimie și Inginerie Chimică, Vol. 67 (71), Nr. 4, 9-21.

C. Lucrări publicate în volumele conferințelor (ISI Proceedings)

1. *Human health risks concerning food waste management*
Ungureanu-Comanita E.-D., **Cosbuc E.D.**, Cozma P., Smaranda C., Gavrilăscu M.
2020 International Conference on e-Health and Bioengineering (EHB)
<http://doi.org/10.1109/EHB50910.2020.9280256>
2. *Identification of the risks generated in the environment by food waste*,
Coșbuc E.D., Ungureanu-Comăniță E.-D., Gavrilăscu M.
Proc. of the 9th IEEE International Conference on E-Health and Bioengineering - EHB 2021
<http://doi.org/10.1109/EHB52898.2021.9657709>
3. *Environmental pressures generated by bakery waste and their sustainable management*,
Ungureanu-Comăniță E.-D., Olteanu S., **Coșbuc E.D.**, Smaranda C., Gavrilăscu M.
Proc. of the 9th IEEE International Conference on E-Health and Bioengineering - EHB 2021
<http://doi.org/10.1109/EHB52898.2021.9657621>

D. Participări la conferințe

1. Food waste: current trends, global perspectives and impacts,
Coșbuc Ersilia Daniela, Ungureanu-Comăniță Elena-Diana, Gavrilăscu Maria
Conferința Școlii Doctorale – TUIASI 19-21 Mai, 2021, Iași, Romania
Comunicare orală
2. Environmental constraints generated by food waste and alternatives for sustainable management,
Coșbuc Ersilia Daniela, Ungureanu-Comăniță Elena-Diana, Gavrilăscu Maria
International Online Conference on “Applications of Chemistry in Nanosciences and Biomaterials
Engineering-NanoBioMat 2021”, Iași, Romania
Comunicare orală
3. Cost benefit evaluation of converting banana and apple pulp into nutrient-rich food ingredients, Elena-Diana
Ungureanu-Comăniță, Raluca Maria Țăbuleac, Ersilia Daniela, Coșbuc, Paula Sânziana Oprea, Dana Fertu,
Maria Gavrilăscu,
Applications of Chemistry in Nanosciences and Biomaterials Engineering NanoBioMat, Bucharest, Romania.

Comunicare orală

4. Cost-benefit based risk modeling for food waste management

Ersilia Daniela Coșbuc, Elena-Diana Ungureanu-Comăniță, Raluca Maria Țăbuleac, Paula Sânziana Oprea, Maria Gavrilescu; Applications of Chemistry in Nanosciences and Biomaterials Engineering, NanoBioMat 2025 – Winter Edition, 26-28 November 2025, Bucharest, Romania.

Comunicare orală

5. Multi-criteria decision analysis for waste-to-resource options: conventional PVC vs PHA

Elena-Diana Ungureanu-Comăniță, Raluca Maria Țăbuleac, Ersilia Daniela Coșbuc, Paula Sânziana Oprea, Maria Gavrilescu, , Applications of Chemistry in Nanosciences and Biomaterials Engineering, NanoBioMat 2025 – Winter Edition, 26-28 November 2025, Bucharest, Romania.

Comunicare orală

6. Comparative analysis of two scenarios for food waste management by life cycle assessment (ECV), Ungureanu-Comăniță Elena-Diana, Coșbuc Ersilia Daniela, Olteanu S., Smaranda C, Gavrilescu Maria 11th International Conference on Environmental Engineering and Management 8 - 10 September 2021, Muttentz, Switzerland (online)

Poster

7. Identification of the risks generated in the environment by food waste,

Coșbuc Ersilia Daniela, Ungureanu-Comăniță Elena-Diana, Gavrilescu Maria IEEE International Conference on e-Health and Bioengineering , EHB 2021 - 9-th Edition, 18-19 November 2021, Iasi - web conference - Romania

Poster

8. Environmental pressures generated by bakery waste and their sustainable management, Ungureanu-Comăniță Elena-Diana, Olteanu S., Coșbuc Ersilia Daniela, Smaranda C, Gavrilescu Maria IEEE International Conference on e-Health and Bioengineering , EHB 2021 - 9-th Edition, 18-19 November 2021, Iasi - web conference - Romania

Poster

9. Circular strategies and innovative technologies for food waste management: A review of sustainable solutions for nutrient recovery,

Elena-Diana Ungureanu-Comăniță, Raluca Maria Țăbuleac, Paula Sânziana Oprea, Ersilia Daniela Coșbuc, Maria Gavrilescu, The 20th International Conference of Constructive Design and Technological Optimization in Machine Building Field OPROTEH 2025, 21-23 may 2024, Bacau, Romania.