



**UNIVERSITATEA TEHNICĂ
„GHEORGHE ASACHI” DIN IAȘI
FACULTATEA DE INGINERIE CHIMICĂ ȘI
PROTECȚIA MEDIULUI**



Instrumente pentru luarea deciziilor în utilizarea durabilă a deșeurilor ca resurse materiale și energetice

REZUMATUL TEZEI DE DOCTORAT

Conducător de doctorat:

Prof.univ.dr.ing. MARIA GAVRILESCU

Doctorand:

Ing. ELENA-DIANA COMĂNIȚĂ

IAȘI 2016

Către

Vă facem cunoscut că, în ziua de **30 septembrie 2016** la ora **10:00**, în **Sala de Consiliu a Facultății de Inginerie Chimică și Protecția**, va avea loc susținerea publică a tezei de doctorat intitulată:

**"INSTRUMENTE PENTRU LUAREA DECIZIILOR ÎN UTILIZAREA DURABILĂ A DEȘEURILOR
CA RESURSE MATERIALE ȘI ENERGETICE"**

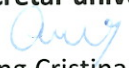
elaborată de inginer **Elena – Diana COMĂNIȚĂ** în vederea conferirii titlului științific de doctor.

Comisia de doctorat este alcătuită din:

- | | |
|--|------------------------|
| 1. Prof. univ. dr. ing. Silvia Curteanu
Universitatea Tehnică „Gheorghe Asachi” din Iași | președinte |
| 2. Prof. univ. dr. ing. Maria Gavrilesco
Universitatea Tehnică „Gheorghe Asachi” din Iași | conducător de doctorat |
| 3. Prof. univ. dr. ing. Anca Duță Capră
Universitatea Transilvania din Brașov | referent oficial |
| 4. Cercetător științific gradul I. Dr. Maria Cazacu
Institutul de Chimie Macromoleculară "Petru Poni" din Iași | referent oficial |
| 5. Conf. dr. ing. Brîndușa Mihaela Slușer
Universitatea Tehnică „Gheorghe Asachi” din Iași | referent oficial |

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


RECTOR,
Prof.univ.dr.ing. **DAN CAȘCAVAL**

Secretar universitate,

Ing.Cristina Nagi

MULȚUMIRI

Doamnei Prof.univ.dr.ing. Maria Gavrilescu, în calitate de conducător de doctorat, doresc să-i adresez cele mai calde mulțumiri și recunoștință pentru încrederea acordată și pentru susținerea, îndrumarea, suportul și încurajarea oferite pe tot parcursul celor 3 ani de studii doctorale.

Adresez mulțumiri pentru sprijinul și sugestiile acordate tuturor colegilor din grupul de cercetare Procese Chimice și Biologice în Ingineria și Managementul Mediului

Alese mulțumiri adresez doamnei Prof.univ.dr.ing. Alessandra Bonoli pentru oportunitatea oferită de a lucra ca doctorand sub coordonarea domniei sale în cadrul Universității Alma Mater Studiorum din Bologna. De asemenea doresc să mulțumesc gupului LCA pentru discuțiile constructive pe care le-am avut pe perioada stagiului în Bologna.

Aș dori să mulțumesc proiectului POSDRU/159/1.5/S/133652, „Sistem integrat de îmbunătățire a calității cercetării doctorale și postdoctorale din România și de promovare a rolului științei în societate”, finanțat prin Fondul Social European, Programul Operațional Sectorial Dezvoltarea Resurselor Umane 2007-2013 pentru sprijinul financiar în perioada decembrie 2014 – decembrie 2015 și doamnei Conf. dr. Irina Gostin, care mi-a fost tutore în cadrul Universității Alexandru Ioan Cuza din Iași.

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

Doresc să-mi exprim gratitudinea față de membrii comisiei de îndrumare a tezei de doctorat pentru sfaturile și sugestiile oferite: doamna Prof. univ. dr. ing. Silvia Curteanu, doamna Conf. dr. ing. Brîndușa Mihaela Slușer, doamna Șef lucrări dr.biol. Camelia Smaranda.

Mulțumesc distinșilor referenți din Comisia de doctorat prezidată de doamna profesor Silvia Curteanu de la Universitatea Tehnică “Gheorghe Asachi” din Iași; doamna Prof.univ.dr.ing. Anca Duță de la Universitatea Transilvania din Brașov, doamna Cercetător științific gradul I. Dr. Maria Cazacu de la Institutul de Chimie Macromoleculară "Petru Poni" din Iași și doamnei Conf.univ.dr. ing. Brîndușa Mihaela Slușer de la Universitatea Tehnică „Gheorghe Asachi” din Iași, pentru răbdarea cu care au analizat lucrarea de față precum și pentru sugestiile formulate.

Îmi manifest cu drag recunoștința față de cele mai importante persoane din viața mea, pentru permanenta susținere și încurajările de care am avut parte în toate momentele, bune și rele.

Tuturor celor care m-au sprijinit le transmit cele mai bune gânduri și recunoștință.

Iași, Septembrie 2016

CUPRINS

INTRODUCERE	1
 Capitolul 1.	
STADIUL CERCETĂRIILOR PRIVIND GENERAREA ȘI MANAGEMENTUL DURABIL AL DEȘEURILOR CA RESURSE MATERIALE ȘI ENERGETICE ...	11
1.1. Aspecte generale privind dinamica generării deșeurilor și managementul acestora	11
1.1.1. Contextul actual al generării și managementului deșeurilor	11
1.1.2. Generarea deșeurilor și efecte asupra mediului	13
1.1.3. Opțiuni de management al deșeurilor	17
1.1.4. Managementul deșeurilor biodegradabile	21
1.2. Politici și reglementări pentru managementul integrat al deșeurilor la nivel european și național	26
1.3. Valorificarea deșeurilor cu potențial reciclabil, reutilizabil și recuperabil și selectarea instrumentelor suport în luarea deciziilor pentru alegerea alternativelor și scenariilor de management	29
1.3.1. Valorificarea potențialului material energetic al deșeurilor biodegradabile	29
1.3.2. Instrumente suport pentru luarea deciziilor în vederea valorificării deșeurilor cu potențial recuperabil	35
1.4. Concluzii	36
 Capitolul 2.	
INSTRUMENTE DE EVALUARE PENTRU LUAREA DECIZIILOR ÎN UTILIZAREA DURABILĂ A DEȘEURILOR CA RESURSE MATERIALE ȘI ENERGETICE	37
2.1. Contextul dezvoltării și aplicării instrumentelor pentru luarea deciziilor în domeniul mediului	37
2.2. Instrumente suport pentru luarea deciziilor în utilizarea durabilă a deșeurilor ca resurse materiale și energetice	40
2.3. Evaluarea ciclului de viață – instrument de măsurare și luare a deciziilor privind performanța de mediu	41
2.3.1. Descrierea metodei de aplicare a ECV	42
2.3.1.1. <i>Definirea scopului, domeniului, a limitelor sistemului și a unității functionale</i>	<i>43</i>
2.3.1.2. <i>Analiza de inventariere</i>	<i>43</i>
2.3.1.3. <i>Evaluarea impactului și interpretarea rezultatelor</i>	<i>45</i>
2.3.2. Metode aplicate pentru evaluarea ciclului de viață	45
2.3.3. Categorii de impact relevante în evaluarea ciclului de viață	49
2.3.4. Instrumente software aplicate în evaluarea ciclului de viață	52
2.3.5. Modele bazate pe analiza ciclului de viață	55
2.3.6. Avantaje și dezavantaje evaluării ciclului de viață în analiza performanței de mediu a proceselor și produselor	56
2.4. Aplicarea analizei cost – beneficiu ca instrument în luarea deciziilor	57
2.4.1. Descrierea metodologiei de aplicare	58
2.4.2. Avantaje și dezavantaje ale analizei cost-beneficiu	

în utilizarea durabilă a deșeurilor	60
2.5. Analiza de decizie multicriterială (MCDA) – instrument	
pentru luarea deciziilor în utilizarea durabilă a deșeurilor	61
2.5.1. Descrierea metodologiei de aplicare a MCDA	61
2.5.2. Metoda Elimination Et Choix Traduisant la Realité (ELECTRE).....	62
2.5.3. Metoda Procesul Analitic Ierarhic (AHP).....	64
2.5.4. Avantajele și dezavantajele utilizării metodei de decizie multicriterială.....	65
2.6. Concluzii	66

Capitolul 3.

SELECTAREA ȘI PLANIFICAREA ALTERNATIVELOR DE VALORIFICARE MATERIALĂ ȘI ENERGETICĂ A DEȘEURILOR ORGANICE BIODEGRADABILE ȘI A REFERINȚEI PENTRU COMPARAREA PERFORMANȚELOR

3.1. Scopului și importanța cercetării	67
3.2. Probleme și oportunități în managementul deșeurilor organice biodegradabile: analiză comparativă cu deșeurile cu potențial redus de biodegradare	68
3.2.1. Analiza dinamicii generării și valorificării deșeurilor din plastic	68
3.2.2. Analiza calitativă a impactului generat de prezența deșeurilor organice alimentare asupra mediului înconjurător și sănătății umane	71
3.3. Polimerii sintetici și deșeurile din plastic	72
3.3.1. Caracteristici ale producției de polimeri sintetici și materiale plastice	73
3.3.2. Analiza calitativă a impacturilor generate în mediului înconjurător și pentru sănătatea umană de prezența deșeurilor din materialele plastice convenționale	75
3.4. Polihidroxicloroacetat vs. policlorura de vinil	78
3.4.1. Policlorura de vinil (PVC)	79
3.4.2. Polihidroxicloroacetat (PHAs)	80
3.4.3. Justificarea alegerii PVC și PHAs pentru analiza comparativă a performanței proceselor tehnologice de obținere a polimerilor	83
3.5. Concluzii	84

Capitolul 4.

ANALIZA IMPACTURILOR GENERATE ÎN MEDIU DE PROCESUL DE VALORIFICARE PRIN BIOCONVERSIE A DEȘEURILOR ORGANICE BIODEGRADABILE APLICÂND METODOLOGIA EVALUĂRII CICLULUI DE VIAȚĂ

4.1. Scopul și importanța cercetării	87
4.2. Identificarea domeniului de cercetare, definirea scopului, unității funcționale și limitelor sistemelor	88
4.2.1. Descrierea succintă a procesului de producție a policlorurii de vinil.....	90
4.2.2. Descrierea succintă a procesului de producție a polihidroxicloroacetatilor.....	93
4.3. Analiza de inventariere pentru procesele de producție a PHAs și PVC	95
4.3.1. Analiza de inventariere pentru procesul de producție a PVC	95
4.3.2. Analiza de inventariere pentru procesul de producție a PHAs.....	96
4.4. Evaluarea impacturilor generate în mediu de procesele de producție a PHAs și PVC în mediul software GaBi	98
4.4.1. Evaluarea impacturilor generate în mediu de procesul de producție a PVC.....	99
4.4.1.1. Evaluarea impacturilor de mediu cu metoda CML	99
4.4.1.2. Evaluarea impactului de mediu cu metoda ReCiPe	104

4.4.1.3. Evaluarea impacturilor de mediu cu metodele Eco-Indicator 95 și Eco-Indicator 99	105
4.4.1.4. Evaluarea impactului de mediu cu metoda EDIP.....	108
4.4.2. Evaluarea impacturilor generate în mediu de procesul de producție a PHAs.....	109
4.4.2.1. Evaluarea impactului de mediu cu metoda CML.....	109
4.4.2.2. Evaluarea impactului generat în mediu cu metoda ReCiPe.....	113
4.4.2.3. Evaluarea impactului de mediu cu metodologiile Eco-Indicator 95 și Eco-Indicator 99	114
4.4.2.4. Evaluarea impactului de mediu cu metoda EDIP	116
4.4.3. Analiza comparativă a impacturilor generate în mediu de procesele de producție a PHAs și PVC.....	116
4.4.3.1. Analiza comparativă a impacturilor generate în mediu de procesele de producție a PHAs și PVC evaluate cu metoda CML	117
4.4.3.2. Analiza comparativă a impacturilor generate în mediu de procesele de producție a PHAs și PV evaluate cu metoda ReCiPe	118
4.4.3.3. Analiza comparativă a impacturilor generate în mediu de procesele de producție a PHAs și PVC evaluate cu metoda Eco-Indicator 95.....	119
4.4.3.4. Analiza comparativă a impacturilor generate în mediu de procesele de producție a PHAs și PVC evaluate cu metoda EDIP 2003	120
4.5. Evaluarea impacturilor generate în mediu de procesele de producție a PHAs și PVC în mediul software SimaPro.....	121
4.5.1. Evaluarea impacturilor generate în mediu de procesul de producție a PVC.....	122
4.5.1.1. Evaluarea impacturilor de mediu cu metoda CML	122
4.5.1.2. Evaluarea impacturilor de mediu cu metoda ReCiPe.....	123
4.5.1.3. Evaluarea impacturilor de mediu cu metoda Eco-Indicator 99.....	124
4.5.1.4. Evaluarea impacturilor de mediu cu metoda EDIP 2003.....	124
4.5.1.5. Evaluarea impactului de mediu folosind amprenta ecologică (Ecological Footprint)	125
4.5.2. Evaluarea impacturilor generate în mediu de procesul de producție a PHAs.....	126
4.5.2.1. Evaluarea impacturilor de mediu cu metoda CML 2001.....	126
4.5.2.2. Evaluarea impactului de mediu cu metoda ReCiPe.....	126
4.5.2.3. Evaluarea impactului de mediu cu metoda Eco-Indicator 99.....	126
4.5.2.4. Evaluarea impactului de mediu cu metoda EDIP 2003.....	127
4.5.2.5. Evaluarea impactului de mediu cu metoda Ecological Footprint.....	128
4.5.3. Analiza comparativă a impactului asupra mediului indus de procesele de producție a PVC și PHAs	129
4.5.3.1. Evaluarea comparativă a impactului de mediu cu metoda CML 2001 (SimaPro)	129
4.5.3.2. Evaluarea comparativă a impactului de mediu cu metoda ReCiPe (SimaPro)	129
4.5.3.3. Evaluarea comparativă a impactului de mediu cu metoda Eco-Indicator 95 (SimaPro)	131
4.5.3.4. Evaluarea comparativă a impactului de mediu cu metoda EDIP 2003 (SimaPro)	131
4.5.3.5. Evaluarea comparativă a impactului de mediu cu metoda Ecological Footprint (SimaPro)	132
4.6. Evaluarea comparativă a impactului generat în mediu de procesele de producție a PVC și PHAs cu instrumentele software GaBi și SimaPro	134
4.7. Concluzii	136

Capitolul 5.

EVALUAREA IMPACTURILOR ECONOMICE, A COSTURILOR ȘI BENEFICIILOR DE MEDIU REZULTATE ÎN PROCESUL DE VALORIFICARE PRIN BIOCONVERSIE A DEȘEURILOR ORGANICE

BIODEGRADABILE APLICÂND ANALIZA COST-BENEFICIU	143
5.1. Scopul și importanța cercetării	143
5.2. Definirea scopului și a domeniului de aplicare al analizei	144
5.3. Analiza de inventariere	145
5.4. Evaluarea impactului economic al proceselor de obținere a PHAs și PVC.....	146
5.4.1. Evaluarea impactului economic al procesului de obținere a PVC	146
5.4.1.1. Evaluarea costurilor.....	146
5.4.1.2. Evaluarea beneficiilor	149
5.4.1.3. Determinarea și analiza rapoartelor cost - beneficiu și beneficiu-cost	150
5.4.2. Evaluarea impactului economic al procesului de producție a PHAs	151
5.4.2.1. Determinarea și analiza costurilor	152
5.4.2.2. Evaluarea beneficiilor	155
5.4.2.3. Determinarea și analiza rapoartelor cost - beneficiu și beneficiu-cost	156
5.5. Analiza de sensibilitate pentru procesul de obținere a policlorii de vinil și procesul de obținere a polihidroxialcanoatilor	157
5.5.1. Determinarea gradului de sensibilitate a ratei de actualizare intene (RIR) și a valorii nete actualizate (VNA)	158
5.5.2. Analiza variației indicelui de sensibilitate	
5.6. Concluzii	162

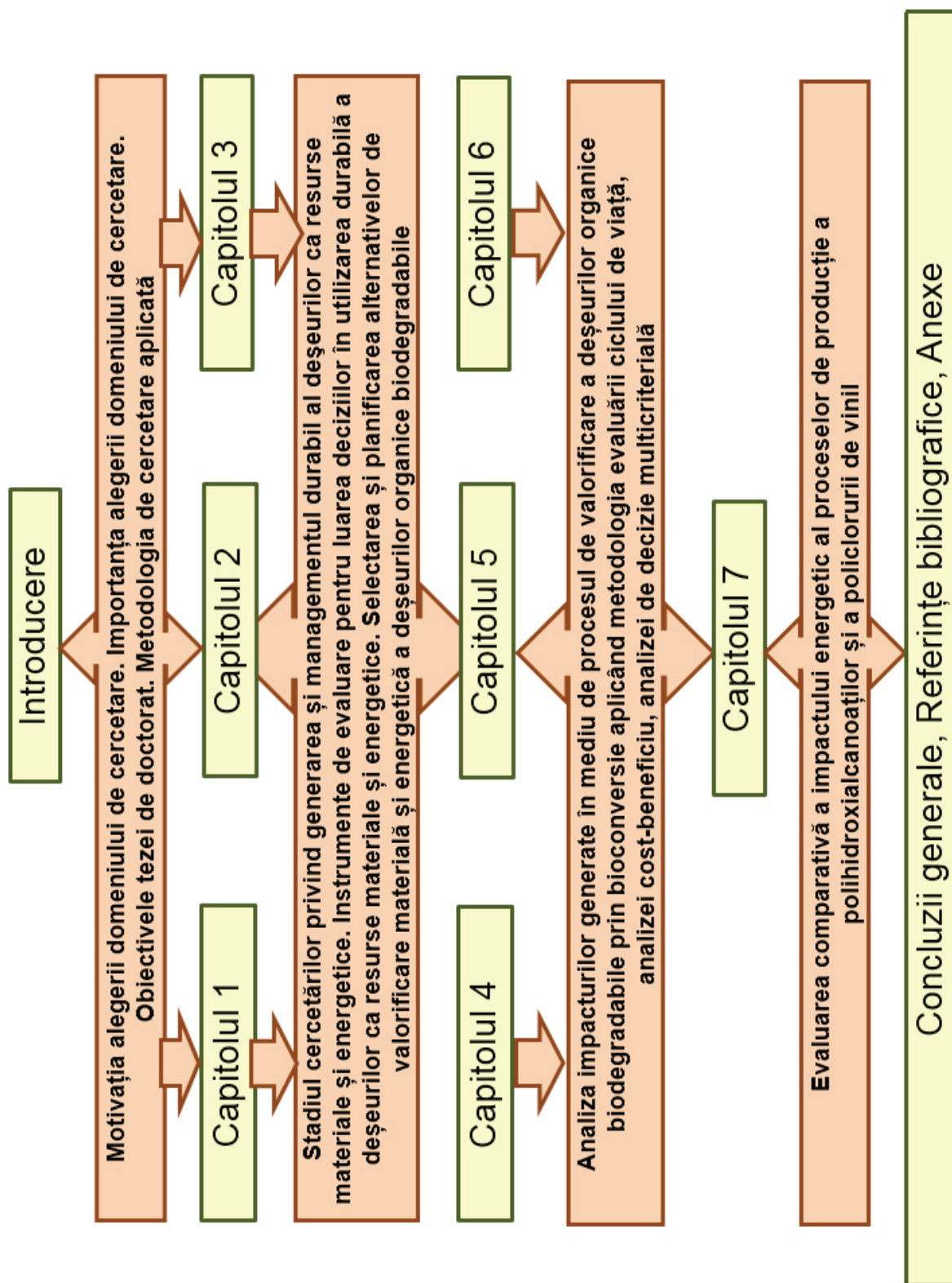
Capitolul 6.

ANALIZA INTEGRATĂ A PERFORMANTELOR TEHNICO-ECONOMICE ȘI ECOLOGICE ALE PROCESULUI DE VALORIFICARE PRIN BIOCONVERSIE A DEȘEURILOR ORGANICE BIODEGRADABILE APLICÂND METODE

SPECIFICE ANALIZEI DE DECIZIE MULTICRITERIALĂ	163
6.1. Definirea scopului studiului și domeniului de aplicare al analizei	163
6.2. Analiza de decizie multicriterială	164
6.3. Evaluarea proceselor de producție a PHAs și PVC prin aplicarea metodei <i>Elimination Et Choix Traduisant la Réalité</i> (ELECTRE).....	165
6.3.1. Principiul metodei	165
6.3.2. Stabilirea criteriilor de evaluare	166
6.3.3. Determinarea coeficienților de importanță K_j pentru fiecare criteriu	167
6.3.4. Determinarea matricii utilităților a_{ij}^*	168
6.3.5. Calculul indicatorilor de concordanță	170
6.3.6. Calculul indicatorilor de discordanță	171
6.3.7. Alegerea variantei optime aplicând metoda diferenței	171
6.3.8. Analiza soluției obținute prin aplicarea metodei ELECTRE	172
6.4. Evaluarea proceselor de producție a PHAs și PVC prin aplicarea metodologiei <i>Procesul Analitic Ierarhic</i> (AHP)	173
6.4.1. Metodologia Procesul Analitic Ierarhic (AHP)	173
6.4.2. Definirea problemei de analizat și selecția factorilor de decizie	174
6.4.3. Stabilirea criteriilor de decizie	175
6.4.3.1. Criterii economice	176
6.4.3.2. Criterii de mediu	176
6.4.3.3. Criterii tehnice	177

6.4.4. Analiza proceselor de obținere a PVC și PHAs folosind metodele Ranking și Rating	178
6.4.5. Analiza proceselor de obținere a PVC și PHAs folosind metoda comparației prin perechi	181
6.5. Concluzii	184
 Capitolul 7.	
EVALUAREA COMPARATIVĂ A IMPACTULUI ENERGETIC	
AL PROCESELOR DE PRODUCȚIE A POLIHIDROXIALCANOATILOR	
ȘI A POLICLORURII DE VINIL	187
7.1. Scopul și importanța cercetării	187
7.2. Potențialul energetic al deșeurilor organice alimentare	188
7.3. Aplicarea metodologiei ECV pentru evaluarea impacturilor în mediu asociate resursele energetice	192
7.3.1. Definirea scopului și a domeniului de aplicare al analizei	192
7.3.2. Analiza de inventariere	192
7.3.3. Evaluarea impactului energetic a procesului de producție a PHAs comparativ cu procesul de producție a PVC	193
7.3.3.1. Evaluarea comparativă a impactului energetic în procesele de obținere a PHAs și PVC folosind metodologia CML	194
7.3.3.2. Evaluarea comparativă a impactului energetic în procesele de obținere a PVC și PHAs folosind metodologia ReCiPe	195
7.4. Concluzii	196
 CONCLUZII GENERALE	199
 BIBLIOGRAFIE	213

În rezumatul tezei de doctorat se prezintă o parte din rezultatele cercetărilor experimentale proprii, concluziile generale și bibliografie selectivă. La redactarea rezumatului s-au păstrat aceleași notații pentru capitole, paragrafe, figuri, tabele și ecuații utilizate în textul tezei de doctorat.



INTRODUCERE

Dezvoltarea durabilă a societății umane este în strânsă legătură cu modul în care sunt gestionate, la ora actuală dar și în viitor, resursele naturale și energetice în raport cu obiective precum creșterea economică și asigurarea unei calități cât mai bune a vieții și a mediului (Martuzzi și colab., 2010). Prin urmare, dezvoltarea societății și asigurarea bunăstării umanității sunt indispensabil legate de exploatarea, prelucrarea durabilă și conservarea a resurselor (Tabasová și colab., 2012). Marea majoritate a produselor destinate consumului sunt rezultatul activităților economico-industriale, dar este din ce în ce mai evident că producția și consumul sunt generatoare de pierderi sub formă de emisii și deșeuri, cu consecințe majore asupra performanțelor economice și ecologice ale sistemelor antropogene (Palmiotto și colab., 2014).

Pe de o parte producția și mai ales consumul de alimente și alte produse naturale pe plan mondial duc la generarea unor cantități uriașe de deșeuri organice biodegradabile, care reprezintă o problemă pentru mediul înconjurător și societate, cu conotații și de ordin economic. Deșeurile organice biodegradabile se referă în special la acele fracții devenite deșeu rezultate din producție, post-recoltare și procesarea produselor alimentare, precum și din etapele de distribuție și consum (Kummu și colab., 2012).

Conținutul tot mai variat al acestor deșeuri fac ca procesul de degradare și eliminare naturală, prin acțiunea microorganismelor, să fie tot mai dificil, determinând creșterea perioadei de remanență a acestora în mediu (De Feo și colab., 2013). Cantitățile mari de deșeuri organice biodegradabile au un impact negativ sever asupra mediului și economiei sociale. În primul rând, aceste categorii de deșeurile sunt asociate cu emisii mari de gaze cu efect de seră și cu utilizarea nerațională a resurselor cum ar fi apa, terenul agricol, nutrienții pentru sol sau combustibili fosili (Kummu și colab., 2012).

Generarea deșeurilor reprezintă o consecință a utilizării ineficiente și nesustenabile a resurselor naturale, a energiei în procesele de producție și alte activități umane, concretizate de cele mai multe ori în pierderi economice (De Feo și colab., 2013; Heaney și colab., 2011). *Aquis-ul* Uniunii Europene include reglementări și directive privind managementul deșeurilor. O astfel de reglementare în domeniu este Directiva-Cadru privind deșeurile din 1975 (75/442/EEC) menită să armonizeze măsurile naționale privind deșeurile (prevenirea generării deșeurilor și reciclarea acestora) și să încurajeze întocmirea planurilor de management al deșeurilor (Blumberga, 2010). Directiva a fost actualizată continuu în acord cu evoluția problematicii deșeurilor la nivel european și în fiecare stat membru.

La nivel global se fac eforturi pentru implementarea unor sisteme de management al deșeurilor într-un sistem integrat, mai dificil de aplicat în unele țări precum România, deoarece se întâmpină probleme majore în ceea ce privește aplicabilitatea lor din cauza gradului scăzut de colectare selectivă a deșeurilor (Chemel și colab., 2012). Directiva 99/31/EC privind *depozitarea deșeurilor*, transpusă în legislația națională prin Hotărârea de Guvern nr. 349/2005, impune tratarea deșeurilor înainte de depozitare, pentru reducerea conținutului fermentabil, precum și

reducerea conținutului de materie organică din deșeurile municipale care urmează a fi depozitate (Directiva CE, 1999). Articolul 5 al Directivei 1999/31/CE cuprinde ținte pentru reducerea progresivă a depozitării deșeurilor biodegradabile la: 25% - *nivelul anului 2006*, 50% - *nivelul anului 2009* și 35% - *nivelul anului 2016*, din cantitatea totală la nivelul anului de referință - 1995. Statele membre care în anul 1995 sau în ultimul an dinaintea anului 1995, pentru care există date Eurostat au depus în depozite mai mult de 80% din deșeurile municipale colectate, pot amâna atingerea obiectivelor, perioada nedepășind patru ani.

Deși la nivel internațional problema managementului integrat al deșeurilor este de actualitate și incită numeroase eforturi pentru rezolvarea ei pe principiile dezvoltării durabile, mai sunt necesare o serie de investigații pentru luarea celor mai bune decizii în ceea ce privește transformarea deșeurilor cu potențial recuperabil în resurse materiale și energetice (Reddy și colab., 2003). În ultimele decenii, cercetările în domeniul managementului deșeurilor organice biodegradabile au fost orientate spre procese și tehnologii care să pună în valoare potențialul acestora ca resurse materiale și energetice prin bioconversie în condiții controlate, aplicând strategii ecologice de producție. Performanțele acestora din punct de vedere economic, ecologic și social trebuie să asigure reducerea presiunii pe care procesele și tehnologiile tradiționale, care se bazează pe resurse de materii prime și energie convenționale (în principal combustibili fosili) le generează în mediu, asupra costurilor și societății. Prin urmare, înainte de luarea unei decizii privind punerea în practică a unui astfel de proiect este necesară evaluarea acestor performanțe, care să demonstreze viabilitatea procesului de bioconversie din punct de vedere economic, ecologic și social. În acest scop este necesară cunoașterea premiselor de la care pleacă proiectul, alternativele de lucru și stabilirea unei referințe pentru comparație.

Biopolimerii obținuți din resurse organice naturale regenerabile ori deșeuri biodegradabile, organice, pot constitui o parte a soluției pentru rezolvarea problemelor generate pentru mediu de polimerii sintetici și din cauza consumului de materii prime din resurse (țitei). Polihidroxicanoatii (PHAs) reprezintă o clasă de biopolimeri (bioesteri) care, datorită proprietăților lor similare cu cele ale materialelor plastice convenționale și biodegradabilității lor, au atras atenția ca potențiali înlocuitori ai polimerilor sintetici, deoarece pot fi produși din resurse regenerabile prin procedee ecologice. Din aceste motive se apreciază că producția polihidroxicanoatilor prin biosinteza microbiană prezintă interes atât din punct de vedere economic, cât și din punct de vedere ecologic, având în vedere multiplele lor aplicații: ambalaje, aditivi alimentari, materiale biomedicale, absorbanti, biosenzori etc. (Magdouli și colab., 2015). *Totuși, luarea în considerare a acestei soluții de valorificare a deșeurilor organice pentru obținerea de biopolimeri necesită o analiză a durabilității procesului de producție și luarea deciziei de materializare a unui astfel de proiect pe baza unui suport științific. Acesta poate fi oferit de informațiile obținute în urma analizei performanței economice și ecologice utilizând instrumente de evaluare specifice, astfel încât un proces de producție de acest tip să nu inducă impacturi majore în mediu. De asemenea, o astfel de analiză trebuie elaborată comparativ cu un proces tradițional de sinteză a unui polimer sintetic, din monomeri derivați din petrol.*

În acest context **obiectivul fundamental al tezei de doctorat constă în:**

- **evaluarea durabilității procesului de valorificare a unor deșeuri organice biodegradabile pentru obținerea de noi materiale și energie, respectiv biopolimeri de tip polihidroxialcanoți (PHAs) și biogaz sau biohidrogen, comparativ cu procesul clasic de obținere a policlorurii de vinil (PVC), care utilizează materii prime din resurse neregenerabile, pe bază de petrol și care generează produse și deșeuri cu potențial redus de (bio)degradare, prin**

- **aplicarea unor instrumente de evaluare specifice:**

Evaluarea Ciclului de Viață (ECV)

Analiza Cost – Beneficiu (ACB)

Analiza de Decizie Multicriterială (MCDA)

care să ofere o bază științifică bine fundamentată pentru luarea deciziilor privind oportunitatea punerii în practică a unui proiect de valorificare a deșeurilor organice biodegradabile pentru obținerea de noi materiale și energie.

Pentru îndeplinirea obiectivului fundamental au fost stabilite o serie de **obiective specifice:**

- analiza critică a datelor și informațiilor privind situația deșeurilor solide pe plan mondial, european și național, a impacturilor economice și ecologice generate de deșeurile organice biodegradabile, a potențialului de valorificare materială și energetică (pentru obținere de biopolimeri de tip polihidroxialcanoți și, respectiv biogaz) și a potențialului acestei opțiuni de a reduce presiunea asupra mediului generată atât de deșeurile organice biodegradabile, cât și de deșeurile din plastic convențional, cu potențial redus de biodegradare;
- selectarea și planificarea alternativelor de valorificare materială și energetică a deșeurilor organice biodegradabile și a referinței pentru compararea performanțelor;
- selectarea tehnologiilor de fabricație, trasarea frontierelor sistemelor, elaborarea schemelor bloc și a bazelor de date pentru analiza durabilității proceselor de producție selectate pentru analiza comparativă a performanțelor tehnico-economice, ecologice și sociale (PHAs și PVC);
- selectarea și aplicarea metodologiilor de evaluare a durabilității proceselor de producție a PHAs și PVC din punct de vedere tehnico-economic și ecologic, precum și a instrumentelor software pentru aplicare;
- analiza comparativă a impacturilor generate în mediu de procesele de producție a PHAs și respectiv PVC aplicând metodologia evaluării ciclului de viață, utilizând instrumentele software GaBi și SimaPro;
- analiza comparativă a impacturilor economice, a costurilor și beneficiilor de mediu ale proceselor de producție a impacturilor generate în mediu de procesele de producție a PHAs și respectiv PVC aplicând metodologia evaluării ciclului de viață, utilizând instrumentele software GaBi și SimaPro prin aplicarea metodologiei de evaluare specifică analizei cost-beneficiu;

- analiza integrată a performanțelor tehnico-economice și ecologice ale proceselor de producție a PHAs și PVC prin metodologii specifice analizei de decizie multicriterială (metodele *Elimination Et Choix Traduisant la Realité – ELECTRE* și *Procesul Analitic Ierarhic - AHP*), compararea rezultatelor și formularea de recomandări;
- evaluarea comparativă a eficienței energetice a proceselor de producție a PHAs și PVC prin aplicarea metodologiei evaluării ciclului de viață;
- analiza globală a rezultatelor, formularea de concluzii și recomandări pentru luarea deciziilor în vederea valorificării durabile a deșeurilor biodegradabile (organice) pentru producția de bioplastice și energie și a alternativelor de reducere a amprente ecologice a proceselor de producție a PHAs și PVC, precum și a deșeurilor din plastic convențional.

Evaluarea celor două procese de producție a policlorurii de vinil (PVC) și respectiv a polihidroxicloroalcanolilor (PHAs) s-a bazat pe două tipuri de metodologii: **(i) calitative**, care analizează datele de intrare și de ieșire din procese precum și modul de funcționare a celor două procese, **(ii) cantitativă**, care implică cuantificarea impacturilor economice, ecologice și sociale generate de procesele de producție a PHAs și PVC în vederea determinării viabilității tehnico-economice și de mediu corespunzătoare fiecărui proces în parte.

Teza de doctorat ***Instrumente pentru luarea deciziilor în utilizarea durabilă a deșeurilor ca resurse materiale și energetice*** este structurată în două părți care cuprind 7 capitole, urmate de concluzii finale și bibliografie.

Prima parte a lucrării cuprinde 3 capitole, în care se analizează stadiul cercetărilor privind generarea și managementul durabil al deșeurilor ca resurse materiale și energetice, instrumentele de evaluare a performanțelor tehnico-economice, ecologice și sociale pentru luarea deciziilor în utilizarea durabilă a deșeurilor ca resurse materiale și energetice, precum și o serie de aspecte particulare legate selectarea și planificarea alternativelor de valorificare materială și energetică a deșeurilor organice biodegradabile și a referinței pentru compararea performanțelor utilizate în teza de doctorat.

În partea a 2-a a lucrării sunt prezentate studiile și cercetările originale elaborate în legătură cu analiza impacturilor generate în mediu de procesul de valorificare a deșeurilor organice biodegradabile prin bioconversie aplicând metodologia evaluării ciclului de viață (Capitolul 4), evaluarea impacturilor economice, a costurilor și beneficiilor de mediu rezultate în procesul de valorificare prin bioconversie a deșeurilor organice biodegradabile aplicând analiza cost-beneficiu (Capitolul 5). De asemenea în această parte a tezei se realizează o analiză integrată a performanțelor tehnico-economice și ecologice ale procesului de valorificare prin bioconversie a deșeurilor organice biodegradabile prin metodologii specifice analizei de decizie multicriterială (Capitolul 6), urmată de evaluarea comparativă a impactului energetic al proceselor de producție a polihidroxicloroalcanolilor prin bioconversia deșeurilor organice biodegradabile și a policlorurii de vinil care utilizează materii prime din resurse neregenerabile, pe bază de petrol (Capitolul 7).

Primul capitol intitulat ***Stadiul cercetărilor privind generarea și managementul durabil al deșeurilor ca resurse materiale și energetice*** este o analiză critică a literaturii de specialitate privind cercetările legate de generarea și managementul durabil al deșeurilor, evidențiindu-se faptul că, la ora actuală generarea deșeurilor și managementul acestora constituie probleme cu implicații economice, sociale și, mai ales pentru mediul înconjurător, care trebuie rezolvate în acord cu ierarhia managementului deșeurilor și cu cerințele *aquis*-ului european. De asemenea se evidențiază potențialul deșeurilor ca resurse materiale și energetice, accentuându-se asupra faptului că modul de valorificare și avantajele din punct de vedere economic, ecologic și social trebuie să fie rezultatul unor decizii luate pe baza unor informații prelucrate aplicând instrumente specifice, capabile să ofere un suport științific robust pentru alegerea celor mai adecvate scenarii de valorificare pe baza performanțelor economice și de mediu, raportate la procesele similare care pleacă de la materii prime convenționale sau procese care utilizează resurse limitate sau neregenerabile.

În Capitolul 2, ***Instrumente de evaluare pentru luarea deciziilor în utilizarea durabilă a deșeurilor ca resurse materiale și energetice*** sunt prezentate o serie de instrumente suport care se aplică pentru evaluarea sistemelor în vederea orientării spre deciziile corecte privind soluționarea problemelor asociate unui proces, produs, serviciu, aflat în faza de proiect sau pentru optimizarea funcțiilor acestora. Totodată, acest capitol oferă o imagine de ansamblu asupra metodelor și metodologiilor care pot fi aplicate pentru luarea unor decizii durabile în problemele de mediu sau în legătură cu noi proiecte sau investiții performante în raport cu mediul:

- *evaluarea ciclului de viață (ECV)*,
- *analiza cost-beneficiu (ACB)*,
- *analiza de decizie multicriterială (MCA)*.

De asemenea sunt discutate în detaliu instrumentele de luare a deciziilor, definiții ale acestora, clasificări, componente și direcții de dezvoltare, apoi se discută despre posibilitatea de aplicarea a acestora și a unora dintre metodele conținute în vederea evaluării comparative a impacturilor generate în mediu de procesele de producție a PHAs și, respectiv PVC aplicând metodologia evaluării ciclului de viață, în mediile software GaBi și SimaPro.

Capitolul 3 intitulat ***Selectarea și planificarea alternativelor de valorificare materială și energetică a deșeurilor organice biodegradabile și a referinței pentru compararea performanțelor*** vizează analiza situației actuale a managementului deșeurilor organice biodegradabile în vederea valorificării lor ca surse de materiale și energie. Studiul oferă și analizează comparativ date privind procesul de producție a biopolimerilor de tip polihidroxicacanoat (PHAs) obținuți prin transformarea biologică, în condiții controlate a materiei organice din deșeuri organice biodegradabile, cu procesul de producție a policlorurii de vinil (PVC), unul din primii polimeri sintetici, obținut din materii prime neregenerabile, pe bază de petrol, luat ca referință. Analiza are în vedere stabilirea premiselor pentru analiza comparativă a performanțelor economice și ecologice aplicând instrumentele de analiză și decizie

descrise în Capitolul 2 (ECV, ACB, MCDA), în vederea găsirii celei mai bune alternative de proces, din punct de vedere economic și ecologic. Cercetarea efectuată în acest capitol au evidențiat o serie de aspecte importante privind anumite probleme și oportunități în managementul deșeurilor organice biodegradabile legate, în principal de generarea acestora, precum și de alternative de valorificare.

Capitolul 4 intitulat *Analiza impacturilor generate în mediu de procesul de valorificare a deșeurilor organice biodegradabile prin bioconversie aplicând metodologia evaluării ciclului de viață* include evaluarea comparativă a impacturilor potențiale asupra mediului și sănătății umane induse de procesele de producție a polihidroxialcanoatilor (PHA) obținuți prin conversia biologică a unor deșeuri organice biodegradabile și a policlorurii de vinil (PVC) obținută din materii prime neregenerabile. Cele două procese au fost evaluate prin aplicarea unor metode conținute în metodologia evaluării ciclului de viață în acord cu standardele ISO 14000 și utilizând două medii software dedicate care suportă fiecare etapă a unui studiu ECV (GaBi și SimaPro). Softul SimaPro a fost oferit de *Universitatea Alma Mater Studiorum din Bologna*. Unitate funcțională aleasă a fost 1 kg de polihidroxialcanoat (din deșeuri organice prin conversie biologică) și, respectiv 1 kg de policlorură de vinil (din materii prime derivate din petrol prin sinteză chimică). Analiza ciclului de viață efectuată în cadrul acestui studiu este de tipul “gate-to-gate”, adică au fost luate în considerare, în toate scenariile selectate, toate procesele necesare obținerii produsului finit plecând de la materiile prime avute în vedere. Valorificarea și utilizarea produselor (dincolo de poarta amplasamentului de generare) nu a fost inclusă în proces. Rezultatele evaluării arată faptul că materiale plastice sintetice de tip PVC induc impacturi negative majore asupra mediului și asupra sănătății umane ca urmare a consumului ridicat de petrol ca materie primă și a cantităților de deșeuri din plastic generate. De aceea se poate afirma că bioplasticele pot înlocui cu succes PVC, luând în considerare performanța de mediu.

În capitolul 5, *Evaluarea impacturilor economice, a costurilor și beneficiilor de mediu rezultate în procesul de valorificare prin bioconversie a deșeurilor organice biodegradabile aplicând analiza cost-beneficiu* s-a realizat un studiu economic aplicând metode specifice analizei cost-beneficiu cu scopul de a identifica și cuantifica toate impacturile costurilor proceselor de producție a PHAs și PVC, a costurilor și beneficiilor asociate celor două procese. Pentru ambele procese de producție s-au parcurs etapele de inventariere și calcul în vederea identificării costurilor totale. Eficiența economică a proceselor de obținere a PHAs și a PVC a fost determinată utilizând indicatori specifici analizei cost-beneficiu precum: raportul cost – beneficiu și beneficiu-cost.

În capitolul 6 intitulat *Analiza integrată a performanțelor tehnico-economice și ecologice ale procesului de valorificare prin bioconversie a deșeurilor organice biodegradabile prin metodologii specifice analizei de decizie multicriterială* au fost evaluate impacturile tehnico-economice și ecologice ale proceselor de obținere a PHAs și PVC prin aplicarea a două metode de decizie multicriterială: *Elimination Et Choix Traduisant la Realité - Eliminare (ELECTRE)* și *Procesul Analitic Ierarhic (AHP)* capabile să lucreze cu criterii discrete, atât de natură cantitativă

cât și calitativă care oferă o ordonare completă a alternativelor evaluate. Rezultatele obținute în urma aplicării metodei *ELECTRE* au arătat că procesul de producție a PHAs este varianta optimă, iar ca alternative mai puțin favorabile au fost evaluate obținerea de bioplastice din amidon, obținere de policlorură de vinil și obținerea de acid polilactic. Aplicarea metodologiei *Procesul Analitic Ierarhic (AHP)* a inclus evaluarea unui set de criterii economice, de mediu și tehnice și aplicarea tehnicilor *ranking-rating* și *compararea prin perechi*. Rezultatele obținute au evidențiat procesul cel mai adecvat pentru implementare luând în considerare criteriile de evaluare selectate.

Capitolul 7 intitulat *Evaluarea comparativă a impactului energetic al proceselor de producție a polihidroxialcanoatilor și a policlorurii de vinil* include rezultatele evaluării și comparării impactului consumului de energie și resurse regenerabile în procesele de obținere a polihidroxialcanoatilor și a policlorurii de vinil cu ajutorul instrumentului de evaluare a ciclului de viață. În prima parte a capitolului este prezentată o abordare a problemei eficienței energetice la nivelul mondial. În a doua etapă este dezvoltată evaluarea comparativă a impactului consumului de energie în procesele de obținere a PVC comparativ cu procesul de obținere a PHAs. În evaluarea ECV au fost utilizate metodologiile CML și ReCiPe.

În finalul lucrării se prezintă Concluziile finale și Bibliografia consultată pentru elaborarea tezei de doctorat.

Teza de doctorat a fost elaborată în cadrul Universității Tehnice Gheorghe Asachi din Iași, Facultatea de Inginerie Chimică și Protecția Mediului – Departamentul de Ingineria și Managementul Mediului. Evaluarea impacturilor de mediu prin metodologia evaluării ciclului de viață în mediul software SimaPro a fost realizată la Universitatea *Alma Mater Studiorum* din Bologna, Italia, în contextul unui stagiu de cercetare Erasmus+.

Capitolul 1.

STADIUL CERCETĂRILOR PRIVIND GENERAREA ȘI MANAGEMENTUL DURABIL AL DEȘEURILOR CA RESURSE MATERIALE ȘI ENERGETICE

1.1. Aspecte generale privind dinamica generării deșeurilor și managementul acestora

Societatea umană s-a dezvoltat progresiv, începând din secolul al 17-lea, odată cu progresele revoluției industriale, mai mult în ultimii 200-300 de ani decât în precedentii 2000 de ani. Industrializarea masivă ce a urmat s-a făcut pe seama utilizării intensive a resurselor, promovând un consum care a pus presiuni suplimentare asupra biocapacității planetei de a asimila deșeurile generate și de a-și regenera resursele. Toate tentativele de a asigura societății bunăstare și condiții de viață prospere, în special în epoca postbelică, s-au bazat aproape exclusiv

pe consumul de materii prime și energie din diverse resurse naturale, atât regenerabile cât și neregenerabile, care, la finalul ciclului de viață, ca produse finite dedicate consumului se transformă în deșeuri (Palmiotto și colab., 2014).

1.1.1. Contextul actual al generării și managementului deșeurilor

Unul din primele advertismente de răsunet pe plan mondial despre consecințele dezvoltării în condiții nesustenabile a fost formulat de Clubul de la Roma care, în programul său publicat în anul 1972 cu titlul *Limits to Growth* a analizat modelul de dezvoltare a societății bazat pe industrializare masivă și o rată mare de consum a resurselor regenerabile și energetice, utilizând date specifice culese între anii 1900-1970 (Barr, 2016). Deși o parte din analizele raportului Clubului de la Roma sunt astăzi contestate, aspectele cantitative care se referă la intensificarea gradului de poluare, la dezechilibrele dintre asigurarea prosperității economice, calitatea mediului și consumul de resurse continuă să fie în atenția specialiștilor, factorilor de decizie, a autorităților și a societății actuale.

Prin urmare, această situație poate fi privită ca o consecință a exploataării ineficiente și nesustenabile a resurselor naturale și a energiei, atât în procesele de producție precum și în alte activități antropogene, fiind concretizată, de cele mai multe ori în pierderi economice, dar și în impacturi majore în mediu și asupra sănătății umane (De Feo și colab., 2013; Heaney și colab., 2011). Legislația europeană definește termenul “deșeu” în Articolul 1 al Directivei 75/442/CEE privind deșeurile (Directiva CE 442, 1975) ca fiind: “orice substanță sau obiect de care posesorul se debarasează sau i se cere să se debaraseze conform prevederilor legilor naționale în vigoare”. Definiția a fost modificată de Directiva Cadru 91/156/CEE (Directiva 156, 1991) astfel: “deșeu va însemna orice substanță sau obiect pe care posesorul îl aruncă, sau intenționează ori este obligat să-l arunce” (Oros și Drăghici, 2002).

1.1.4. Managementul deșeurilor biodegradabile

Deșeurile biodegradabile sunt o categorie aparte de deșeuri provenite din grădini și parcuri, resturi alimentare de la bucătăriile gospodăriilor, sediile restaurantelor, firmele de catering și distribuitorii cu amănuntul, precum și deșeuri asimilate de la unități de procesare a alimentelor. Această categorie nu include deșeuri forestiere sau reziduuri agricole, gunoiul de grajd, nămolul de epurare sau alte deșeuri biodegradabile cum ar fi materialele textile naturale, hârtia sau lemnul prelucrat (COM 111, 2008; Directiva 98, 2008; Veeken, 2011). În prezent, principala problemă de mediu asociată cu această categorie de deșeuri este generarea de biogaz prin descompunerea deșeurilor în depozitele de deșeuri, care au reprezentat circa 3% din totalul emisiilor de gaze cu efect de seră în UE-15 în 1995.

Directiva Landfill (Directiva CE 31, 1999) privind depozitele de deșeuri nu prevede opțiuni specifice de tratament pentru deșeurile biodegradabile. Cele mai importante beneficii ale

gestionării corecte a deșeurilor biologice - în afară de evitarea emisiilor de gaze cu efect de seră - ar fi producerea de compost (care contribuie la sporirea calității solului) și a biogazului (gaz metan și biohidrogen) (care contribuie la utilizarea eficientă a resurselor, precum și un nivel mai ridicat al eficienței energetice). Cu toate acestea, documentele oficiale arată că statele membre ale UE sunt adesea înclinate să nu opteze pentru producția de compost sau biogaz și aleg în schimb aparent cele mai ușoare și mai ieftine opțiuni (incinerarea sau depozitarea), fără a ține cont de beneficiile și costurile de mediu reale (COM 111, 2008).

Cantitatea anuală totală de deșeuri biologice în UE se estimează a fi între 76,5 și 102 Mt pentru deșeurile alimentare și de grădină (incluse în categoria din deșeurilor municipale solide mixte) și, respectiv 37 Mt pentru deșeurile din industria alimentară și cea a băuturilor (Directiva CE 31, 1999; Directiva 98, 2008; Directiva CE 1127, 2015). Printre opțiunile de management/tratare a deșeurilor biodegradabile se pot enumera (alături de prevenirea la sursă), digestia anaerobă și compostarea, incinerarea și depozitarea deșeurilor. Tratarea biologică (inclusiv compostarea și digestia anaerobă) poate fi considerată similară cu reciclarea în cazul în care compostul sau digestatul sunt aplicate pentru ameliorarea calității terenurilor agricole sau pentru producerea de substraturi de cultură.

1.3. Valorificarea deșeurilor cu potențial reciclabil, reutilizabil și recuperabil și selectarea instrumentelor suport în luarea deciziilor pentru alegerea alternativelor și scenariilor de management

1.3.1. Valorificarea potențialului material energetic al deșeurilor biodegradabile

Simultan cu dezvoltarea tehnologică și creșterea gradului de civilizație, resursele naturale existente la nivel global sunt din ce în ce mai limitate. Pe de altă parte, operarea industrială și alte activități antropogene desfășurate în dezacord cu principiile dezvoltării durabile duc la pierderi de resurse sub formă de emisii poluante și deșeuri. În acest mod se pierde anual tone de material precum hârtie, metale, plastic, sticlă, textile, materiale vegetale și alimentare etc. În acord cu politica și strategia europeană în domeniul mediului, exploatarea potențialului deșeurilor de a fi valorificate, adică reciclate, reutilizate sau recuperate, reprezintă o prioritate cu rezonanțe economice, ecologice și sociale. Prima definiție a valorificării deșeurilor a apărut în Legea nr. 211 din 2011 care specifică că prin valorificare se înțelege *“orice operațiune care are drept rezultat principal faptul că deșeurile servesc unui scop util prin înlocuirea altor materiale care ar fi fost utilizate într-un anumit scop sau faptul că deșeurile sunt pregătite pentru a putea servi scopului respectiv în întreprinderi ori în economie, în general”* (Legea 211, 2011). Valorificarea unui deșeu se face luând în considerare ierarhia managementului deșeurilor, conform căreia **deșeurile a căror generare nu poate fi evitată trebuie valorificate sub formă materială sau energetică.**

Valorificarea potențialului deșeurilor ca surse materiale și energetice are următoarele obiective subsidiare (Kranert și colab, 2010): dezvoltarea pieței pentru materiile prime secundare și susținerea promovării utilizării produselor obținute din materiale reciclate; decuplarea generării deșeurilor de creșterea economică și realizarea unei reduceri globale a volumului de deșeuri; promovarea prioritară a valorificării materiale în măsura posibilităților tehnice și economice în condiții de siguranță pentru sănătatea populației și mediu; promovarea valorificării energetice a deșeurilor în instalații cu randament energetic ridicat.

Valorificarea unui deșeu presupune parcurgerea a uneia din etapele enumerate (Malkow, 2007):

- etapa de valorificare materială – constă în substituirea materiilor prime;
- etapa de valorificare biologică (compostare, fermentație) – presupune valorificarea deșeurilor organice ca resurse materiale sau energetice;
- etapa de valorificare energetică - presupune folosirea deșeurilor ca resurse energetice.

Capitolul 2.

INSTRUMENTE DE EVALUARE PENTRU LUAREA DECIZIILOR ÎN UTILIZAREA DURABILĂ A DEȘEURILOR CA RESURSE MATERIALE ȘI ENERGETICE

2.1. Contextul dezvoltării și aplicării instrumentelor pentru luarea deciziilor în domeniul mediului

În ultimele decenii informațiile și reglementările în legătură cu prevenirea și controlul poluării și asigurarea aplicării principiilor dezvoltării durabile în producție, consum, servicii au intensificat presiunea exercitată asupra comunității științifice, autorităților, operatorilor în direcția justificării logicii și necesității aplicării unor politici, strategii și instrumente asociate problematicei mediului înconjurător. În acest context, diversele părți interesate au considerat oportune elaborarea unor instrumente de evaluare a performanțelor proceselor, produselor, serviciilor pentru generarea unei baze de informații ca suport științific pentru luarea de decizii care să răspundă unor criterii prestabilite.

Conceptul de *instrument de luare a deciziilor* în domeniul protecției mediului a evoluat începând cu anul 1950, când Institutul Național de Statistică și Tehnică din Germania (Statistisches Bundesamt) a realizat studii privind sistemul de luare a deciziilor de mediu (fig. 1) (Coteur și colab., 2015; Evers și colab., 2016).

Procesul de luare a deciziilor poate include mai multe tipuri de decizie stabilite pe baza unor criterii (Gupta și Mohanty, 2016; Turner și colab., 2016):

- criterii privind exactitatea și corectitudinea informațiilor (decizii euristice, decizii stabilite aplicând modele de tip fuzzy);

- criterii privind amploarea problemei (decizii individuale și decizii de grup);
- criterii privind implicarea în organizație (decizii tactice și decizii strategice).

Sistemul de implementare a deciziilor cu ajutorul instrumentelor decizionale presupune parcurgerea a patru etape interdependente: (i) colectarea datelor și informațiilor privind problema, (ii) planificarea demersului privind rezolvarea problemei, (ii) adoptarea soluției optime pentru rezolvarea problemei, (iv) implementarea deciziei și evaluarea soluției optime (fig. 2.3) (Qu și colab., 2016).

În teza de doctorat au fost aplicate trei instrumente de evaluare a performanțelor tehnico-economice, ecologice și sociale ale procesului de bioconversie a deșeurilor organice biodegradabile în noi materiale și energie (respectiv biopolimeri de tip polihidroxiclcanoți și biogaz sau biohidrogen), în paralel cu evaluarea procesului de producție a policlorurii de vinil din monomerul vinilic, din resurse pe bază de petrol. Obiectivul acestor evaluări este de a elabora suportul științific care să permită compararea acestor performanțe în procesul de luare a deciziilor privind valorificarea deșeurilor ca resurse materiale și energetice.

În acest scop au fost aplicate următoarele instrumente de evaluare a performanțelor proceselor considerate:

- *evaluarea ciclului de viață (ECV)*,
- *analiza cost-beneficiu (ACB)*,
- *analiza de decizie multicriterială (MCA)*.

În continuare se realizează o analiză a acestor instrumente și a modului de aplicare pentru atingerea obiectivelor tezei de doctorat.

Capitolul 3.

SELECTAREA ȘI PLANIFICAREA ALTERNATIVELOR DE VALORIFICARE MATERIALĂ ȘI ENERGETICĂ A DEȘEURILOR ORGANICE BIODEGRADABILE ȘI A REFERINȚEI PENTRU COMPARAREA PERFORMANȚELOR

3.1. Scopului și importanța cercetării

Reglementările din ce în ce mai stricte privind deșeurile organice, precum și cererea de produse chimice și combustibili din resurse regenerabile au propulsat cercetarea și industria spre găsirea de soluții durabile pentru a îmbunătăți eficiența costurilor și satisface cererea clienților. Valorificarea deșeurilor organice biodegradabile ca resurse pentru noi materiale și energie este una dintre direcțiile actuale de cercetare în contextul conceptului de biorafinare, privită ca o alternativă potențială la eliminarea unei game largi de deșeuri în depozitele de deșeuri, atât al celor biodegradabile cât și a celor cu (bio)degradabilitate redusă (Arancon și colab., 2013). În

mod particular, dezvoltarea unor strategii ecologice și inovatoare pentru a procesa deșeurile organice biodegradabile devine din ce în ce mai importantă pentru societatea noastră actuală.

În Capitolul 1 s-a evidențiat faptul că depozitarea, incinerarea, compostarea sunt tehnologii comune, mature de eliminare a deșeurilor. Aceste practici de tratare a deșeurilor organice nu sunt satisfăcătoare deoarece: (i) sunt asociate cu generarea de gaze toxice, compuși organici volatili cu miros neplăcut, gaz metan cu efect asupra fenomenului de încălzire globală și amprente de carbon, (ii) necesită adesea un consum ridicat de energie, (iii) cinetica reacției de biodegradare este lentă. Din acest motiv, cercetările în domeniul managementului deșeurilor organice biodegradabile au fost orientate spre procese și tehnologii care să pună în valoare potențialul acestora ca resurse materiale și energetice prin bioconversie în condiții controlate (via biorafinare sau așa-numita "biotehnologie albă"), aplicând strategii ecologice de producție. Performanțele acestora din punct de vedere economic, ecologic și social trebuie să asigure reducerea presiunii pe care procesele și tehnologiile tradiționale, care se bazează pe resurse de materii prime și energie convenționale (în principal combustibili fosili) le generează în mediu, asupra costurilor și societății. Prin urmare, înainte de luarea unei decizii privind punerea în practică a unui astfel de proiect este necesară evaluarea acestor performanțe, care să demonstreze viabilitatea procesului de bioconversie din punct de vedere economic, ecologic și social.

În acest context, obiectivul acestui capitol vizează analiza situației actuale a managementului deșeurilor organice biodegradabile în vederea valorificării lor ca surse de materiale și energie. Studiul oferă și analizează comparativ date privind procesul de **producție a biopolimerilor de tip polihidroxialcanoat (PHAs)** obținuți prin transformarea biologică, în condiții controlate a materiei organice din deșeuri organice biodegradabile, cu procesul de **producție a policlorurii de vinil (PVC)**, unul din primii polimeri sintetici, obținut din materii prime neregenerabile, pe bază de petrol, luat ca referință. Analiza are în vedere stabilirea premiselor pentru **analiza comparativă a performanțelor economice și ecologice** aplicând instrumentele de analiză și decizie descrise în Capitolul 2 (ECV, ACB, MCDA), în vederea găsirii celei mai bune alternative de proces, din punct de vedere economic și ecologic. În vederea îndeplinirii obiectivului principal s-au stabilit următoarele **obiective specifice**:

- analiza critică a informațiilor din literatura de specialitate privind opțiunile de valorificare a deșeurilor organice biodegradabile considerând structura, compoziția, managementul, costurile, impacturile în mediu etc., în opoziție cu deșeurile cu potențial de biodegradare redus;
- selectarea și dezvoltarea alternativelor de valorificare a deșeurilor ca resurse materiale și energetice și a scenariilor asociate, selectând pentru analiză procesul de biorafinare a materiei organice cu obținerea de biopolimeri tip PHAs și bioenergie;
- justificarea selectării și planificării alternativelor de valorificare materială și energetică a deșeurilor organice biodegradabile și a referinței pentru compararea performanțelor.

Îndeplinirea acestor obiective a fost posibilă prin efectuarea analizei de inventariere a datelor colectate din documentele privind managementul deșeurilor la nivel național și internațional.

3.4. Polihidroxiclcanoți vs. policlorura de vinil

În această secțiune se prezintă succint o serie de aspecte legate de producția și utilizarea celor doi polimeri (PHAs și PVC) fără a intra în detalii de ordin tehnologic care vor fi prezentate în Capitolul 4.

3.4.3. Justificarea alegerii PVC și PHAs pentru analiza comparativă a performanței proceselor tehnologice de obținere a polimerilor

Studiul propus în teza de doctorat se focalizează pe analiza comparativă a performanțelor ecologice și economice ale proceselor tehnologice de obținere a două tipuri de polimeri și anume: **polihidroxiclcanoții** (PHAs), prin valorificarea deșeurilor organice prin bioconversie, ca țintă principală a obiectivelor tezei; **policlorura de vinil** (PVC), plecând de la materii prime obținute din petrol, o resursă neregenerabilă și sinteză chimică, în competiție cu biopolimerii.

Pe lângă acest aspect, analiza critică a literaturii de specialitate în domeniul generării, valorificării și impactului indus de cele două categorii de deșeuri aflate la extreme din punctul de vedere al biodegradabilității, adică deșeurile organice biodegradabile, pe de o parte și deșeurile din plastic convențional, pe de altă parte, a permis identificarea următoarelor probleme:

- la ora actuală rata de generare a celor două categorii de deșeuri este pozitivă și ascendentă;
- ambele categorii de deșeuri generează impacturi economice și ecologice negative;
- ambele categorii de deșeuri pot fi valorificate pentru obținerea de noi materiale și energie, dar prin alternative și tehnologii diferite.

De asemenea, analiza problemelor economice și de mediu generate de cele două categorii de deșeuri arată faptul că valorificarea deșeurilor organice biodegradabile în producția de polimeri ar contribui la reducerea presiunii generate în mediu de deșeuri plastice convenționale.

În acest context teza de doctorat, prin obiectivul său principal și obiectivele specifice prezentate propune analiza performanțelor din punct de vedere economic și ecologic a procesului tehnologic de obținere a biopolimerilor de tip polihidroxiclcanoți (PHAs) comparativ cu procesul tehnologic de obținere a policlorurii de vinil (PVC) prin aplicarea instrumentelor descrise în Capitolul 2 (evaluarea ciclului de viață, analiza cost-beneficiu și analiza de decizie multicriterială). În acest mod se obțin date fundamentate științific ca suport pentru luarea unei decizii referitoare la oportunitatea conceperii, proiectării și aplicării procesului alternativ de obținere a biopolimerilor de tip PHA din deșeuri organice, în condițiile în care acesta s-ar dovedi performant și durabil.

Având în vedere faptul că bioplasticele nu vor putea substitui în totalitate polimerii clasici, decizia pe baza informațiilor oferite de instrumentele aplicate în acest studiu va ține seama de rezultatele analizei comparative a celor două procese de producție: PHAs și a PVC.

Capitolul 4.

ANALIZA IMPACTURILOR GENERATE ÎN MEDIU DE PROCESUL DE VALORIFICARE PRIN BIOCONVERSIE A DEȘEURILOR ORGANICE BIODEGRADABILE APLICÂND METODOLOGIA EVALUĂRII CICLULUI DE VIAȚĂ

4.1. Scopul și importanța cercetării

Deșeurile organice sunt componente majoritare ale deșeurilor solide municipale, la nivel mondial, european și național. În UE se generează 88 de milioane tone/an de deșeuri organice biodegradabile (deșeuri alimentare, deșeuri din grădini și zone publice), cu o rată de generare de 150 kg/ per capita/ an. În cazul în care sunt depozitate, aceste deșeuri biodegradabile eliberează substanțe nocive, ca urmare a biodegradării naturale, cauzând poluarea solului și a apelor subterane și generând emisii majore de gaze cu efect de seră (gaz metan).

Valorificarea deșeurilor organice biodegradabile prin bioconversie pentru obținerea de biopolimeri (polihidroxialcanoati), care pot fi procesați în continuare la bioplastice, cu generare suplimentară de biogaz sau biohidrogen este una din alternativele selectate pentru analiză în teza de doctorat. Prin aplicarea acestei alternative se estimează că se va reduce presiunea generată asupra mediului, atât de **deșeurile organice biodegradabile, dar și de deșeurile din plastic** obținute prin procese tradiționale de sinteză plecând de la materii prime din resurse neregenerabile, **ca urmare a substituției treptate a plasticelor nebiodegradabile cu plastice biodegradabile.** Totodată, se are în vedere ca obținerea biopolimerilor să se realizeze în procese de producție care să genereze **impacturi ecologice cel mult la nivelul proceselor clasice de sinteză a polimerilor tradiționali.** În acest context, **obiectivul acestui capitol este de a analiza comparativ, în acord cu metodologia evaluării ciclului de viață, impacturile generate în mediu de procesul de producție a polihidroxialcanoatilor - prin valorificarea deșeurilor organice biodegradabile și, respectiv de procesul de producție a policlorurii de vinil, unul dintre cei mai cunoscuți și utilizați polimeri obținuți din monomeri pe bază de petrol și care generează produse și deșeuri cu potențial redus de (bio)degradare.**

În acest studiu s-a avut în vedere și **analiza unor diferențe în magnitudinea impacturilor evaluate prin aplicarea diverselor metode asociate metodologiei ECV pentru același proces,** precum și a unor **diferențe generate de utilizarea mediilor software dedicate pentru analiza ECV, respectiv GaBi și SimaPro** pentru aceleași categorii de impact în cadrul acelui proces. Aceste analize sunt utile ca support științific atunci când se utilizează informațiile obținute aplicând aceste instrumente pentru luarea deciziilor în utilizarea durabilă a deșeurilor ca resurse materiale și energetice.

În vederea atingerii acestui obiectiv, au fost parcurse toate etapele specifice într-un studiu ECV: stabilirea obiectivelor, stabilirea limitelor de sistem, unități funcționale și analiza de

inventar. Toate datele necesare pentru întocmirea inventarului ciclului de viață au fost colectate din literatura de specialitate, din bazele de date ale mediilor software în care sau realizat studiile ECV și din discuții cu specialiști.

4.2. Identificarea domeniului de cercetare, definirea scopului, unității funcționale și limitelor sistemelor

Pornind de la premisa Programului 7 de Acțiune pentru mediu *"turning waste into resources"*, transformarea deșeurilor în resurse materiale și energetice valoroase conduce la creșterea gradului de aplicare a principiilor dezvoltării durabile, în contextul țintei "zero deșeurii".

Polihidroxialcanoatii (PHAs) reprezintă o clasă de biopolimeri care, datorită proprietăților lor similare cu cele ale materialelor plastice convenționale și biodegradabilității lor, au atras atenția ca potențiali înlocuitori ai polimerilor sintetici, deoarece pot fi produși din materii prime provenind din resurse regenerabile sau deșeurii organice biodegradabile (Reddy și colab., 2013). Din aceste motive se apreciază că **producția polihidroxialcanoatilor prin bioconversia deșeurilor organice biodegradabile prezintă interes atât din punct de vedere economic, cât și din punct de vedere ecologic, deoarece deșeurile se valorifică sub formă de noi materiale (biopolimeri tip PHAs) și energie (biogaz sau biohidrogen).**

Policlorura de vinil (PVC) este un polimer sintetic care se utilizează în cantități mari în industria materialelor plastice, prin prelucrarea unor polimeri și copolimeri vinilici (Saisinchai, 2013). Industriile producătoare de polimeri sintetici și de materiale plastice au fost întotdeauna considerate mari consumatoare de energie și resurse, dar și generatoare de emisii (CO₂, CH₄, COV, care conduc la accentuarea fenomenului de încălzire globală; NO_x, SO₂ care accentuează fenomenele de acidifiere etc.) și deșeurii polimerice nebiodegradabile (Gregory, 2009; Li și colab., 2013).

Pentru a justifica oportunitatea alegerii variantei de valorificare a deșeurilor organice biodegradabile ca resurse materiale și energetice și a avantajelor/dezavantajelor procesului de producție a PHAs comparativ cu un proces clasic de producție a polimerilor s-a realizat analiza impacturilor generate în mediu de cele două procese de producție (PHAs vs. PVC) aplicând metodologia specifică evaluării ciclului de viață (ECV). Rezultatele aplicării acestui instrument de evaluare pot constitui suportul științific pentru luarea deciziei de implementare a procesului de producție a PHAs, prin prisma fezabilității de mediu.

Pentru realizarea obiectivului propus în acest capitol s-au avut în vedere următoarele obiective specifice:

1. analiza proceselor tehnologice de producție a PHAs și, respectiv PVC și elaborarea schemelor bloc simplificate ale proceselor;
2. colectarea informațiilor, a datelor specifice proceselor de producție a PHAs și PVC necesare pentru studiul ECV;

3. analiza impacturilor ciclului de viață pentru cele două procese în mediile software GaBi și SimaPro prin aplicarea mai multor metode specifice, descrise în Capitolul 2, pentru a lua în discuție cât mai multe categorii de impact;
4. interpretarea rezultatelor și elaborarea concluziilor studiului ECV.

În vederea descrierii clare a domeniului de studiu, definirea unității funcționale se consideră a fi determinantă, ca bază de calcul pentru bilanțurile de materiale și energie asociate metodologiei ECV (ISO 14040, 2006). În acest studiu s-a ales ca unitate funcțională **1 kg de produs obținut** (PHAs și, respectiv PVC). Toate datele de intrare și de ieșire din inventarul ciclului de viață precum și rezultatele obținute în etapa de evaluare a impactului sunt raportate la această unitate funcțională. De asemenea, pe baza schemelor bloc elaborate anterior s-au stabilit frontierele (limitele, granițele) fiecărui proces de producție (figurile 4.1a, 4.1b). Evaluarea ciclului de viață efectuată pentru cele două procese este de tipul “cradle-to-gate”. Pentru fiecare etapă de fabricație din cadrul celor două procese au fost definite condițiile specifice de lucru și au fost setați parametrii funcționali. Limitele impuse pentru fiecare proces evaluat și analiza de inventar au evidențiat necesitatea evaluării amănunțite a etapei de digestie anaerobă în cadrul procesului de obținere a PHAs și, respectiv de polimerizare în cadrul procesului de obținere a PVC. În procesul de obținere a PHAs materia primă este reprezentată de deșeurile organice alimentare. Conform bilanțului de materiale (elaborat în cadrul softului GaBi), **cantitatea de deșeuri luată în calcul pentru procesul de obținere a PHAs este de aproximativ 12 kg**. În cazul procesului de obținere a PVC materia primă este **petrolul, estimată ca reprezentând 0,9837 kg**. **Ambele intrări se raportează la 1 kg produs**. Transportul și valorificarea produselor (de la poarta amplasamentului de producție) nu au fost luate în considerare în evaluare.

Evaluarea impacturilor a fost realizată aplicând metodologia evaluării ciclului de viață în două medii software: **Gabi** și **SimaPro**, descrise în Capitolul 2. Ambele instrumente software includ: a) o interfață de utilizator pentru modelarea sistemului, b) o bază de date pentru ciclul de viață a unor procese unitare, c) o bază de date care suportă mai multe metode de evaluare a impactului ciclului de viață, d) interfața cu utilizatorul (PE International, 2012b; Pre-sustainability, 2012).

4.3. Evaluarea impacturilor generate în mediu de procesele de producție a PHAs și PVC în mediul software GaBi

Într-o primă etapă, studiile de evaluare a impacturilor de mediu s-au realizat prin utilizarea mediului software educațional GaBi în varianta 6, elaborat de *PE Internațional GmbH* (PE Internațional, 2012a). Pentru evaluarea impactului proceselor de producție a PHAs și PVC au fost aplicate metodele existente în acest software: CML 2001, CML 96, ReCiPe08, EDIP 97, EDIP, 2003, EcoIndicator95 și EcoIndicator99. În tabelul 4.1 sunt prezentate cele mai relevante

categorii de impact incluse în metodele utilizate în studiul de evaluare a ciclului de viață pentru procesul de producție a PVC și care au fost evaluate în teza de doctorat.

Pentru a asigura o referință comună pentru toate categoriile de impact evaluate și pentru a asigura baza de comparare a rezultatelor s-a realizat **normalizarea** acestora. Normalizarea a însemnat calcularea *impactului de fond generat de o persoană pe parcursul unui an în aria de interes pentru care se calculează impactul, indiferent dacă se are în vedere o abordare globală sau regională*. În acest mod rezultatele pentru diferite categorii de impact devin comparabile, fiind exprimate prin „**impactul potențial generat per persoană și per an**” pentru fiecare categorie de impact sau „**persoane echivalente**”, adică fracții din contribuții la impactul care rezultă în medie per persoană în zona afectată (EPA, 2005; Wenzel și colab., 1997). **În această lucrare referința pentru normalizare este EU27, dar în unele metode s-a luat ca referință și EU25.**

Tabelul 4.1. Lista de categoriilor de impact aferente metodelor utilizate în studiul ECV

<i>Categorie de impact</i>	<i>Abreviere</i>	<i>Metoda</i>
Potențialul de toxicitate umană	HTP	CML 2001
Potențialul de formare a ozonului foto-chimic	POCP	
Potențialul de eutrofizare	EP	
Potențialul de acidifiere	AP	
Potențialul de epuizare a resurselor abiotice	ADP	
Potențialul de încălzire globală	GWP	
Potențialul de epuizare a resurselor abiotice	ADP	CML 96
Potențialul de încălzire globală	GWP	
Potențialul de formare a ozonului fotochimic	POCP	
Potențialul de acidifiere	AP	
Potențialul de toxicitate umană	HTP	
Potențialul de ecotoxicitate acvatică	AETP	
Potențialul de eutrofizare	EP	ReCiPe08
Schimbările climatice asociate deteriorării sănătății umane	CCHh	
Schimbările climatice asociate ecosistemelor	Cce	
Toxicitatea umană prin formarea particulelor (PMF)	HT	
Formarea particulelor	PMF	Eco-indicator 95
Substanțe carcinogenice	CS	
Metale grele	HM	
Pesticide	P	
Smogul de iarnă	WS	Eco-indicator 99
Calitatea ecosistemelor – ecotoxicitate	EQe	
Sănătatea umană – efecte cancerigene	HhEc	
Sănătatea umană – schimbări climatice	HhCc	
Sănătatea umană – respirație	HhR	EDIP 97
Potențialul de încălzire globală	GWP	
Potențialul de oxidare fotochimică (NOx mare)	POP high NOx	
Potențialul de oxidare fotochimică (NOx mic)	POP low NOx	EDIP 2003
Potențialul de acidifiere	AP	
Formarea fotochimică a ozonului - impactul asupra vegetației	POFv	
Eutrofizare terestră	TE	

4.4.3. Analiza comparativă a impacturilor generate în mediu de procesele de producție a PHAs și PVC

În vederea realizării obiectivului propus în teza de doctorat ce privește analiza performanței de mediu a procesului de bioconversie a deșeurilor organice biodegradabile cu obținere de PHAs s-a realizat un studiu comparativ al impacturilor de mediu cu cele generate de procesul de producție a PVC, considerând rezultatele prezentate mai sus obținute prin aplicarea metodelor CML 2001, CML 1996, EDIP 1997, EDIP 2003, Eco-Indicator 95 și Eco-Indicator 99 din metodologia ECV (în mediul software GaBi).

4.4.3.1. Analiza comparativă a impacturilor generate în mediu de procesele de producție a PHAs și PVC evaluate cu metoda CML

A. Aplicarea metodei CML 2001

În cazul procesului de obținere a PVC rezultatele arată că impactul asupra mediului este influențat în mare parte de cantitățile de energie utilizate în proces, mai exact consumul de petrol și gaze naturale (fig. 4.26, a). Consumul de energie afectează majoritar categoriile de impact: *epuizarea resurselor abiotice (ADP)* și *potențialul de acidifiere (AP)* în procesul de obținere a PVC. Pentru procesul de obținere al PHAs impactul consumului de energie se manifestă de asemenea, prioritar prin categoriile ADP și AP, dar magnitudinea impactelor este cu circa 4-5 ordine de mărime mai mici față de cele rezultate în producția de PVC, situație pusă și pe seama recuperării energiei sub formă de biogaz în faza de biodegradare anaerobă.

Principalele substanțe care influențează **potențialul de eutrofizare** în procesul de obținere al PHAs (fig. 4.26, b) sunt nutrienții care se găsesc în materia primă, CCO și CBO₅ (emisii în apă), și NO_x (emisii în aer), dar și această categorie de impact este cu circa 4 ordine de mărime mai mică în cazul procesului de producție a PHAs comparativ cu PVC.

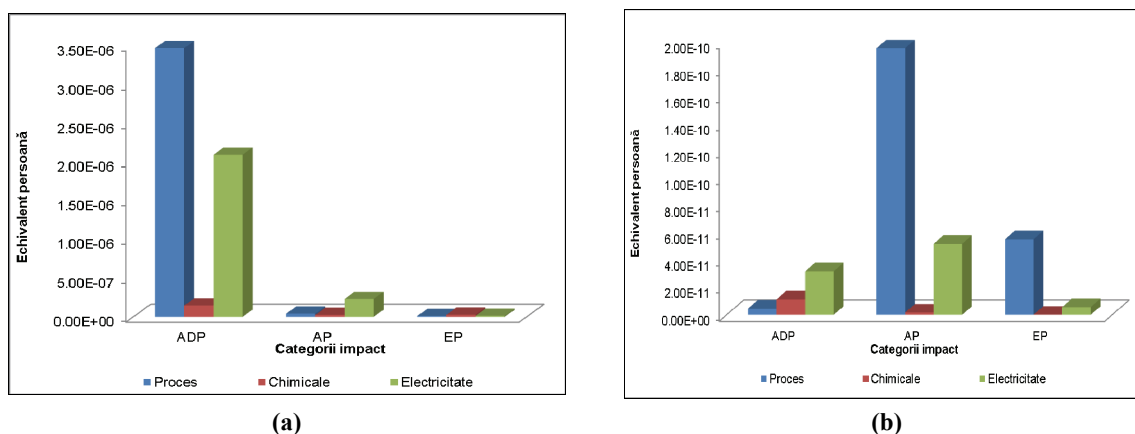


Fig. 4.26. Compararea unor categorii de impact generat în mediu în procesul de producție a PVC (a) și PHA (b) (metoda CML 2001_EU+25, GaBi)

4.4.3.2. Analiza comparativă a impacturilor generate în mediu de procesele de producție a PHAs și PVC evaluate cu metoda ReCiPe

Comparând informațiile din Fig. 4.29 se poate observa faptul că **magnitudinea categoriilor de impact menționate sunt cu circa un ordin de mărime mai mici pentru producția de PHAs decât cele rezultate pentru producția de PVC**. De asemenea dintre cele două categorii de impact, CCHh are valorile cele mai mari în cazul producției de PVC, contribuția la această categorie de impact având-o emisiile de COV, NO_x, SO₂ provenite de la etapa de polimerizare.

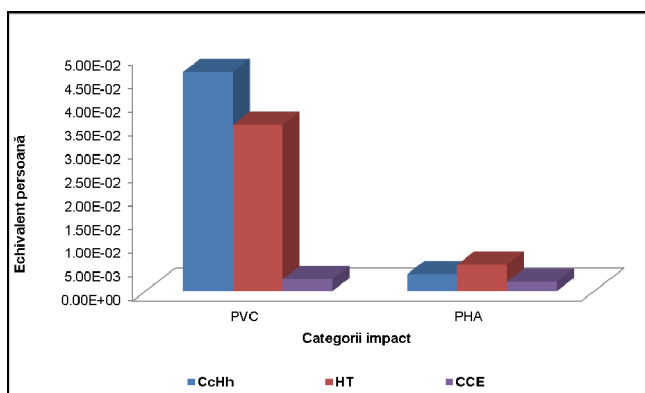


Fig. 4.29. Compararea impacturilor generate în mediu de procesele de producție a PHAs și PVC (metoda ReCiPe, GaBi)

În fig. 4.30 se poate observa faptul că un efect semnificativ asupra categoriilor de impact induse în mediu de procesul de producție a PVC îl are consumul de materii prime provenite din petrol și consumul de electricitate. **Impacturile rezultate din procesul de obținere a PHA sunt în general cu două ordine de mărime mai reduse** față de cele generate în procesul de producție a PVC, situație determinată în principal de utilizarea materiilor prime cu potențial recuperabil, a biopolimerilor care sunt biodegradabili și a biogazului obținut.

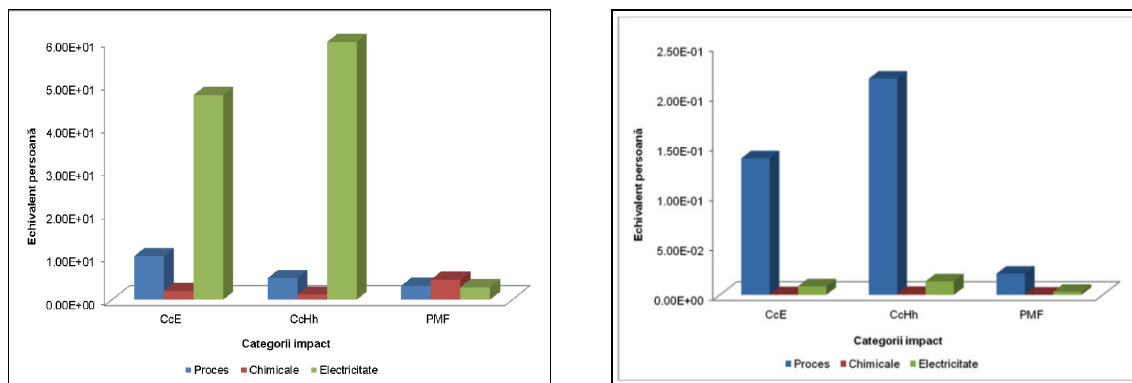


Fig. 4.30. Analiza comparativă a impacturilor generate în mediu în procesul de producție al PVC (a) și PHA (b) (metoda ReCiPe08, GaBi)

4.4.3.3. Analiza comparativă a impacturilor generate în mediu de procesele de producție a PHAs și PVC evaluate cu metoda Eco-Indicator 95

În fig. 4.31 se prezintă comparativ categoriile de impact generate în mediu de cele două procese de producție (PHAs și PVC) evaluate cu metoda Eco-Indicator 95. Se poate constata că, pentru toate categoriile de impact evaluate, procesul în sine și utilizarea surselor de energie induc impacturi negative în mediu, la toate categoriile evaluate cu metoda Eco-Indicator 95, dar **magnitudinea categoriilor de impact generate de procesul de producție a PHAs sunt cu 2-3 ordine de mărime mai mici decât în cazul PVC** (Fig. 4.31).

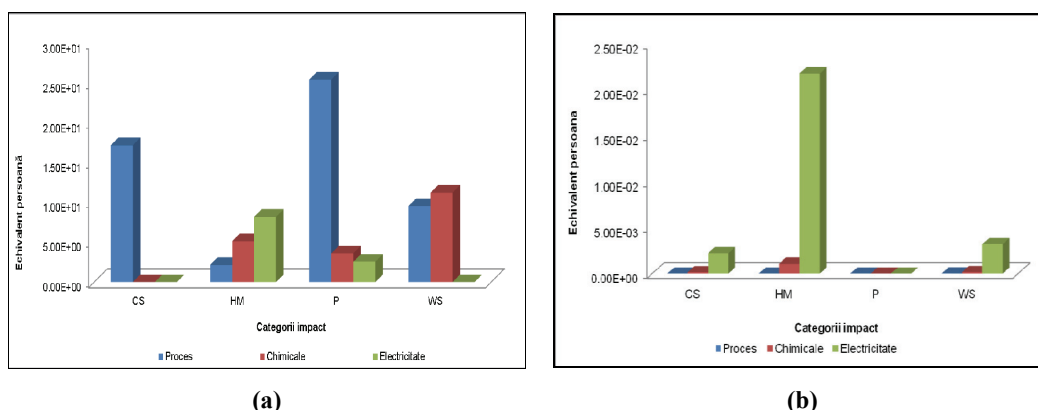


Fig. 4.31. Compararea impacturilor generate în mediu de procesele de producție a PHAs și PVC (metoda Eco-Indicator 95, GaBi)

4.5. Evaluarea impacturilor generate în mediu de procesele de producție a PHAs și PVC în mediul software SimaPro

În această etapă a studiului, pentru evaluarea impacturilor induse în mediu de cele două procese (producția PHAs și producția PVC) s-au aplicat metodele posibil de aplicat în mediul software SimaPro și anume: CML 2001, Eco-Indicator 99, EDIP 2003, ReCiPe. Abrevierile folosite în cadrul acestui studiu pentru categoriile de impact considerate relevante pentru evaluarea performanței de mediu a proceselor de producție a PVC și PHAs și incluse în metodele enumerate în cele de mai sus sunt prezentate în tabelul 4.2.

Tabelul 4.2. Lista categoriilor de impact aferente metodelor utilizate (SimaPro)

<i>Categorie de impact</i>	<i>Abreviere</i>	<i>Metoda</i>
Potențialul de epuizare a resurselor abiotice	ADP	CML 2001
Potențialul de eutrofizare	EP	
Potențialul de acidifiere	AP	
Potențialul de formare a ozonului fotochimic	POP	
Substanțe cancerigene	C	Eco-indicator 99
Sănătatea umană - respirație	R	
Schimbările climatice	CC	
Potențialul de acidifiere/Potențialul de eutrofizare	AP/EP	
Potențialul de încălzire globală (100 ani)	GWP	EDIP 2003

Potențialul de formarea a ozonului	OFP	
Potențialul de acidifiere	AP	
Potențialul de eutrofizare terestră	TEP	
Potențialul de eutrofizare acvatică	AEP	
Potențialul de toxicitate umană	HTP	
Schimbările climatice asociate deteriorării sănătății umane	CCHh	ReCiPe08
Toxicitatea umană	HT	
Formarea particulelor	PMF	
Schimbările climatice asociate deteriorării ecosistemelor	CCE	
Amprenta de carbon (dioxid de carbon)	DC	Ecological footprint
Utilizarea energiei nucleare	NP	
Gradul de ocupare a terenurilor	LO	

Toate rezultatele obținute în cadrul metodelor aplicate au fost normalizate. Normalizarea s-a realizat pentru a putea compara toate categoriile de impact (în manieră similară cu descrierea inclusă la softul GaBi). În urma normalizării s-au obținut valori ale categoriilor de impact exprimate în *Echivalent persoană (PE)*.

4.5.3. Analiza comparativă a impactului asupra mediului induse de procesele de producție a PVC și PHAs

4.5.3.1. Evaluarea comparativă a impactului de mediu cu metoda CML 2001 (SimaPro)

Din fig. 4.43 (a-d) se poate constata că producția PVC induce un impact major asupra mediului pentru toate cele patru categorii de impact evaluate cu metoda CML 2001 și mediul software SimaPro. Contribuția consumului de energie și a utilizării resurselor neregenerabile în procesul de obținere a PVC influențează major categoria de impact *potențialul de epuizare a resurselor abiotice* (ADP) (fig. 4.43 a). *Potențialul de acidifiere* este major în procesul de producție a PVC ca urmare a generării emisiilor de SO₂, NO₂ și HCl din etapele de rafinare, electroliză, clorurare și polimerizare (fig. 4.43 b). Procesul de producție a PVC are o contribuție semnificativă la mărimea *potențialului de eutrofizare*, din cauza concentrației ridicate de nutrienți, cum ar fi azot și fosfor utilizate în materia primă, substanțe chimice și apă uzată, dar și nivelelor COD, BOD (fig. 4.43 c). În ceea ce privește procesul de producție a PHA, în fig. 4.43 se poate observa că acesta induce impacturi semnificativ mai mici comparativ cu PVC, ca urmare a unui consum redus de energie și utilizarea de materii prime din deșeuri.

4.5.3.2. Evaluarea comparativă a impactului de mediu cu metoda ReCiPe (SimaPro)

Comparând informațiile din fig. 4.44 (a-d) se poate observa că valorile categoriei de impact *schimbări climatice asociate deteriorării sănătății umane* sunt mai mici pentru producția de PHAs față de cele rezultate pentru producția de PVC.

În ceea ce privește producția de PHAs, emisiile care contribuie la *potențialul de toxicitate umană* sunt COV și NO_x care provin din etapa de digestie anaerobă, de la uscare, sortare (fig. 4.47b). Impactul din procesul de obținere a PHA are o pondere mai mică pentru categoria

schimbări climatice asupra ecosistemului determinată în principal de utilizarea materiilor prime cu potențial recuperabil, precum și a posibilității de degradare mai rapidă a biopolimerilor (fig. 4.47c-d).

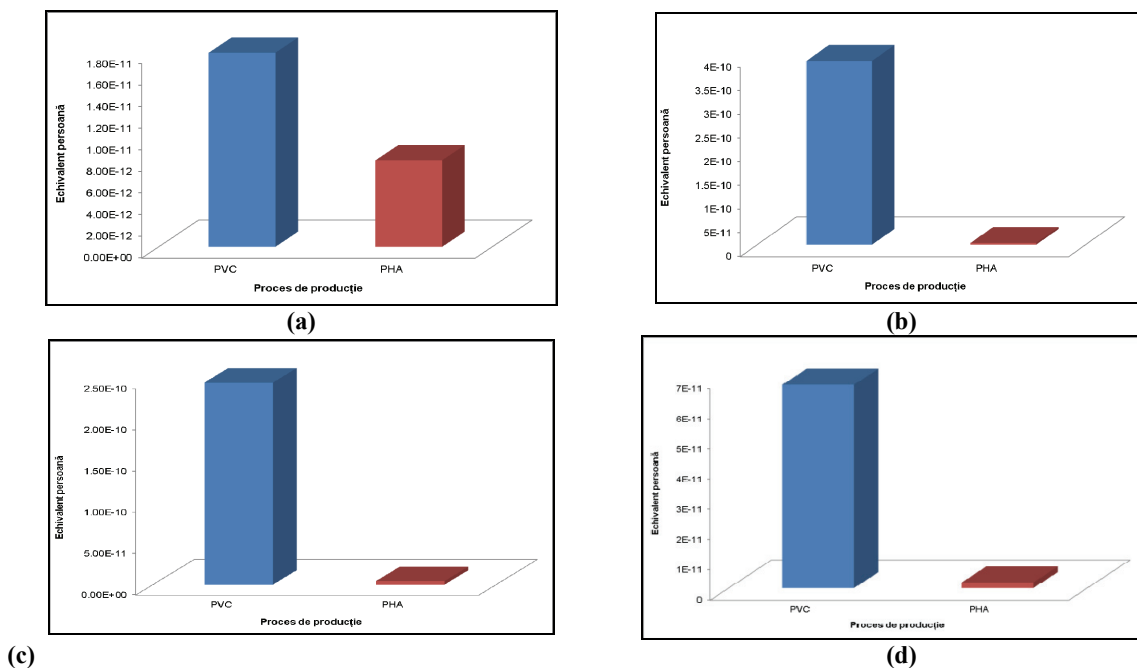


Fig. 4.43. Impacturile generate în mediu de procesele de producție a PVC și PHAs aplicând metoda CML 2001 (SimaPro): (a) ADP, (b) AP, (c) EP, (d) POP

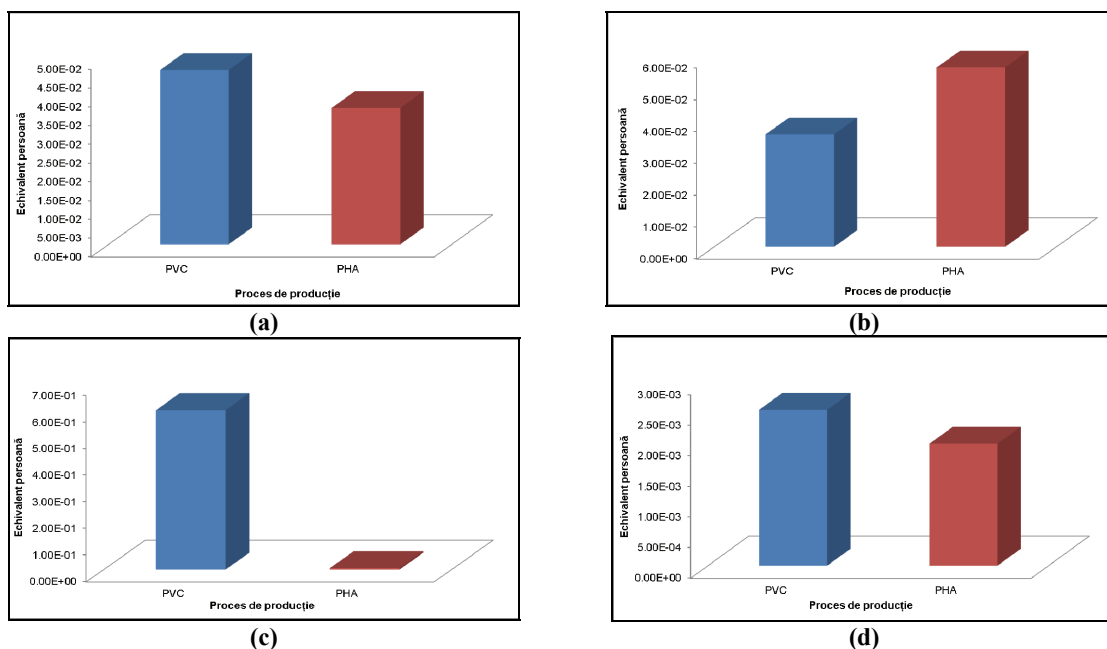


Fig. 4.44. Impacturile de mediu în producția de PVC și PHA utilizând metoda ReCiPe: (a) CcHh, (b) HT, (c) PMF, (d) CCE

4.5.3.5. Evaluarea comparativă a impactului de mediu cu metoda Ecological Footprint (SimaPro)

Rezultatele evaluărilor de impact prin aplicarea metodei Ecological Footprint au evidențiat valori mai mici ale amprente de carbon pentru procesul de producție a PHAs (Fig. 4.47a), dar amprenta asociată cu gradul de ocupare al terenurilor în cazul PHAs este mai mare decât în cazul procesului de producție a PVC.

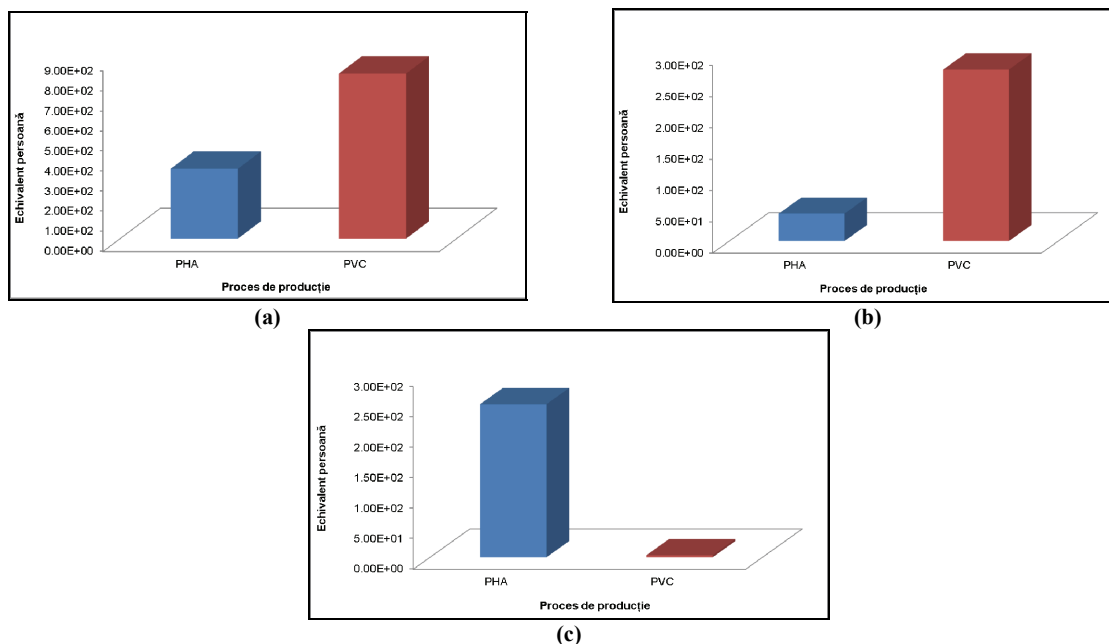


Fig. 4.47. Compararea impacturilor din mediu generate în producția de PVC și PHA cu metoda Ecological Footprint (SimaPro): (a) DC, (b) NP, (c) LO

4.6. Evaluarea comparativă a impactului generat în mediu de procesele de producție a PVC și PHAs cu instrumentele software GaBi și SimaPro

Scopul acestui studiu a constat în realizarea unei evaluări comparative a impacturilor induse în mediu de procesul de producție a polihidroxialcanoatilor prin bioconversia deșeurilor organice biodegradabile cu cele generate de procesul de producție a policlorurii de vinil din monomeri pe bază de petrol, cuantificate folosind instrumentele software GaBi și, respectiv SimaPro (instrumente considerate lideri software utilizate pentru evaluarea ciclului de viață) considerând 1 kg de produs ca unitate funcțională, aplicând metodele CML 2001, ReCiPe și Eco-Indicator 99. Compararea are drept obiectiv evidențierea eventualelor diferențe între SimaPro și GaBi care ar putea influența rezultatele și deciziile bazate pe acestea.

În fig. 4.47 – 4.49 sunt evidențiate diferențele dintre valorile rezultatelor ECV pentru procesele de producție a PHAs și PVC evaluate în mediile software GaBi și SimaPro. În cazul aplicării metodelor CML 2001 (fig. 4.47) și ReCiPe (fig. 4.48) se poate observa că magnitudinea impacturilor cuantificate cu softul GaBi diferă de cele cuantificate în mediul software SimaPro,

pentru ambele procese studiate. În cazul aplicării metodei Eco-Indicator 99 (fig. 4.49) diferențele sunt considerabile.

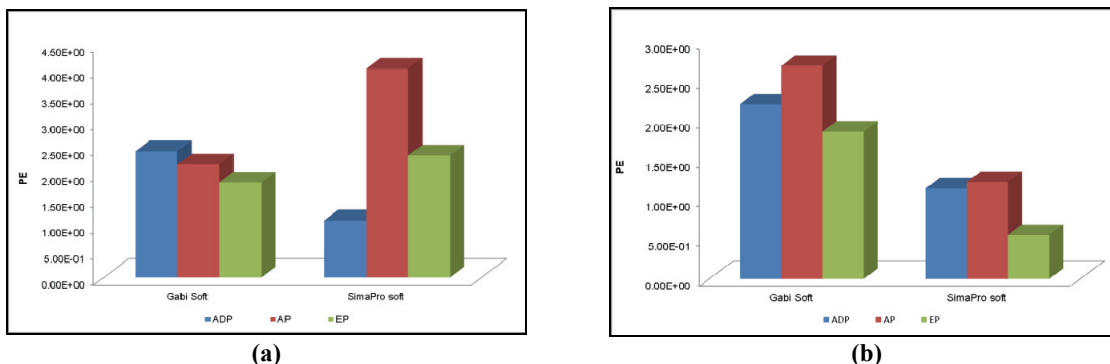


Fig. 4.47. Impactul de mediu asociat producției de (a) PVCși (b) PHAs evaluat cu softurile GaBi și SimaPro - metoda CML2001

Diferențele observate de unii cercetători par să provină în principal din erori în bazele de date software atât pentru inventarierea cât și evaluarea impactului. SimaPro și GABI sunt folosite pentru evaluarea ciclului de viață de mulți practicieni ECV în întreaga lume ca instrument suport decizional; în cazul în care rezultatele analizei sunt reprezentative pentru eventuale diferențele obținute, atunci când se utilizează unul sau celălalt dintre software, atunci implicațiile în luarea deciziilor pot fi îngrijorătoare (Herrmann și Moltesen, 2015).

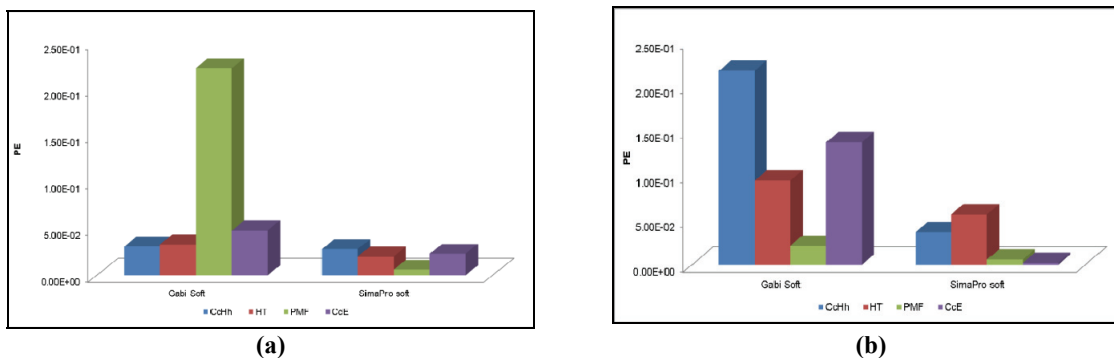


Fig. 4.48. Impactul de mediu asociat producției de (a) PVCși (b) PHAs evaluat cu softurile GaBi și SimaPro - metoda ReCiPe

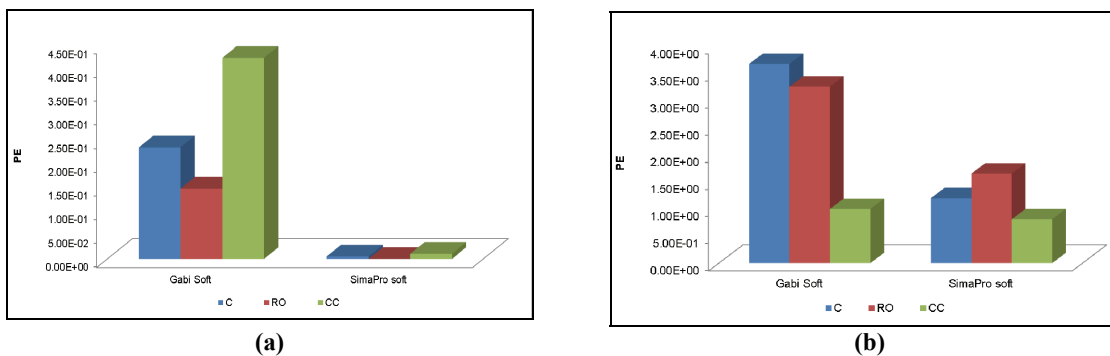


Fig. 4.49. Impactul de mediu asociat producției de (a) PVCși (b) PHAs evaluat cu softurile GaBi și SimaPro - metoda Eco-Indicator 99

Capitolul 5.

EVALUAREA IMPACTURILOR ECONOMICE, A COSTURILOR ȘI BENEFICIILOR DE MEDIU REZULTATE ÎN PROCESUL DE VALORIFICARE PRIN BIOCONVERSIE A DEȘEURILOR ORGANICE BIODEGRADABILE APLICÂND ANALIZA COST-BENEFICIU

5.1. Scopul și importanța cercetării

Analiza cost-beneficiu (ACB) este o metodă cantitativă de evaluare financiară, economică și socială a unui proiect sau a unei investiții care poate fi aplicată pentru a alege, dintr-un număr de alternative, pe cea adecvată pentru implementare (Lopez și Froesea, 2016). Metoda de calcul a ACB constă în contabilizarea beneficiilor și a costurilor unor proiecte sau alternative de management și compararea acestora pentru a determina care au cel mai mare beneficiu net, oferind astfel o bază pentru selecția finală a alternativei celei mai favorabile din acest punct de vedere (Petraru și Gavrilescu, 2010).

Obiectivul aplicării ACB în prezentul studiu studiul nostru constă în evaluarea viabilității economice a procesul de valorificare prin bioconversie a deșeurilor organice biodegradabile pentru obținerea polihidroxiclcanoatilor și compararea cu procesul de producție a policlorurii de vinil.

5.2. Definirea scopului și a domeniului de aplicare al analizei

Eficiența economică a proceselor de obținere a PHAs și a PVC a fost determinată utilizând indicatori specifici analizei cost beneficiu precum: raportul cost-beneficiu și beneficiu-cost.

5.4.1.1. Evaluarea costurilor

În aceasta etapă a analizei cost-beneficiu au fost organizate informațiile privind costurile și beneficiile relevante în vederea determinării fezabilității pentru procesul de obținere al PVC luat în considerare.

Actualizarea costurilor pentru implementarea instalației de obținere a PVC se realizează prin multiplicarea factorului de actualizare cu valoarea costurilor. Rezultatele obținute sunt prezentate în tabelul 5.2.

Tabelul 5.2.. Actualizarea costurilor (lei) pentru implementarea instalației de obținere a PVC

<i>Anul (t)</i>	C_{it}	C_{expt}	$C_t = C_{it} + C_{expt}$	f_a	$C_{at} = C_t \cdot f_a$
1	225000	0	225000	0.952	214200
3	0	1033000	1033000	0.907	936931
3	0	1033000	1033000	0.863	891479
4	0	1033000	1033000	0.822	849126
5	0	1033000	1033000	0.783	808839

6	0	1033000	1033000	0.746	770618
7	0	1033000	1033000	0.710	733430
8	0	1033000	1033000	0.676	698308
9	0	1033000	1033000	0.644	665252
10	15000	1033000	1048000	0.613	642424
TOTAL					7210607

C_{it} -costuri pentru construcția instalației; *C_{exp}* -costurile de exploatare și întreținere a instalației; *C_t* -costuri totale privind construcția și întreținerea instalației; *C_{at}* -costuri actualizate.

5.4.1.2. Evaluarea beneficiilor

Valoarea actualizată netă a beneficiilor se determină folosind rata de actualizare, egală cu rata inflației și perioada de actualizare de 10 ani. Rezultatele obținute sunt prezentate în tabelele 5.3-5.4.

Tabelul 5.4. Evaluarea beneficiilor proiectului

Anul (t)	Beneficii anuale (B_a) (lei)	Factorul de actualizare (f_a)	Beneficii actualizate (B_{at}) (lei)
1	0	0.952	0
2	128187	0.907	116265.609
3	128187	0.863	110625.381
4	128187	0.822	105369.714
5	128187	0.783	100370.421
6	128187	0.746	95627.502
7	128187	0.710	91012.77
8	128187	0.676	86654.412
9	128187	0.644	82552.428
10	0	0.613	0
TOTAL			788478.237

5.4.1.3. Determinarea și analiza rapoartelor cost - beneficiu și beneficiu-cost

Rapoartele cost-beneficiu (C/B) și beneficiu-cost (B/C) se pot calcula cu ec. 5.2 și 5.3 (Noel și McCormack, 2014):

$$C/B = \text{costuri totale actualizate/beneficii totale actualizate} \quad (5.2)$$

$$B/C = \text{beneficii totale actualizate/costuri totale actualizate} \quad (5.3)$$

În cazul procesului de producție a PVC valorile C/B și B/C sunt:

$$C/B = 7210607/788478.237 = \mathbf{9,14} \text{ lei cheltuiți la 1 leu beneficii}$$

$$B/C = 788478.237/7210607 = \mathbf{0,10} \text{ lei beneficii la 1 leu cheltuit}$$

Raportul cost - beneficiu are valoarea 9, iar raportul beneficiu-cost are valoarea 0,11 - de unde rezultă că proiectul este foarte puțin viabil. Factorul agravant constă în faptul că procesul consumă foarte multă energie și nu produce produse prietenoase mediului.

5.4.2. Evaluarea impactului economic al procesului de producție a PHAs

Actualizarea costurilor pentru implementarea instalației de obținere a polihidroxicianoatilor (PHAs) se realizează prin înmulțirea factorului de actualizare cu valoarea costurilor. Rezultatele obținute sunt prezentate în tabelul 5.6.

Tabelul 5.6. Actualizarea costurilor pentru implementarea instalației de obținere a (PHAs)

<i>Anul (t)</i>	C_{it}	C_{expt}	$C_t = C_{it} + C_{expt}$	f_a	$C_{at} = C_t \cdot f_a$
1	663000	0	663000	0.952	631176
3	0	568000	568000	0.907	515176
3	0	568000	568000	0.863	490184
4	0	568000	568000	0.822	466896
5	0	568000	568000	0.783	444744
6	0	568000	568000	0.746	423728
7	0	568000	568000	0.710	403280
8	0	568000	568000	0.676	383968
9	0	568000	568000	0.644	365792
10	10000	568000	668000	0.613	409484
TOTAL					4534428

C_{it} -costuri pentru construcția instalației; C_{expt} -costurile de exploatare și întreținere a instalației; C_t -costuri totale privind construcția și întreținerea instalației; C_{at} -costuri actualizate.

5.4.2.2. Evaluarea beneficiilor

Valoarea actualizată netă a beneficiilor a fost determinată folosind rata de actualizare egală cu rata inflației și perioada de actualizare de 10 ani. Rezultatele obținute sunt prezentate în tabelele 5.7-5.8.

5.4.2.3. Determinarea și analiza rapoartelor cost - beneficiu și beneficiu-cost

În cazul procesului de obținere a PHAs valorile C/B și B/C sunt: $C/B = 4534428/16058094.62 = 0,2$ lei cheltuiți la 1 leu beneficii; $B/C = 16058094.62/4534428 = 3,54$ lei beneficii la 1 leu cheltuit.

Raportul cost-beneficiu este de 0,2 iar raportul beneficiu-cost este 3,5. Rezultă că proiectul este viabil, iar implementarea lui va aduce atât beneficii de mediu, cât și economice (fig.5.6).

5.5. Analiza de sensibilitate pentru procesul de obținere a policlorii de vinil și procesul de obținere a polihidroxicianoatilor

5.5.2. Analiza variației indicelui de sensibilitate

Variația indicelui de sensibilitate în funcție de variabilele selectate în cadrul analizei de sensibilitate și anume: reducerea costurilor de exploatare (V1); reducerea costurilor privind

consumul de energie (V2); reducerea costurilor de întreținere (V3) sunt prezentate în fig. 5.7.

Din fig. 5.7 se poate observa că în scenariul optimist, variabila 3 a suferit modificări pozitive, ceea ce conduce la concluzia că se poate realiza o reducere a costurilor de întreținere a instalației de obținere a policlorurii de vinil. De asemenea în scenariul pesimist, variabila 2 conduce la concluzia că nu se poate realiza o reducere a consumului de energie în procesul de obținere a policlorurii de vinil. Se poate observa, de asemenea, că atât în cazul scenariului optimist cât și în cazul scenariului pesimist pentru producția de PHAs, cele trei variabile au suferit modificări pozitive semnificative ceea ce conduce la concluzia că se poate realiza o reducere costurilor de exploatare, a costurilor de întreținere a instalației de obținere a policlorurii de vinil și a costurilor de întreținere.

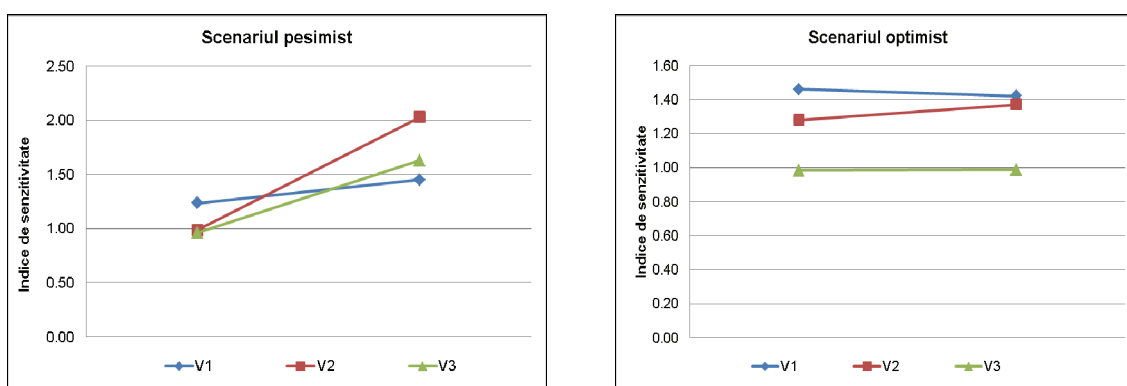


Fig. 5.7. Variația indicelui de sensibilitate pentru variabile cheie considerate în cadrul analizei de sensibilitate pentru procesul de obținere a policlorurii de vinil

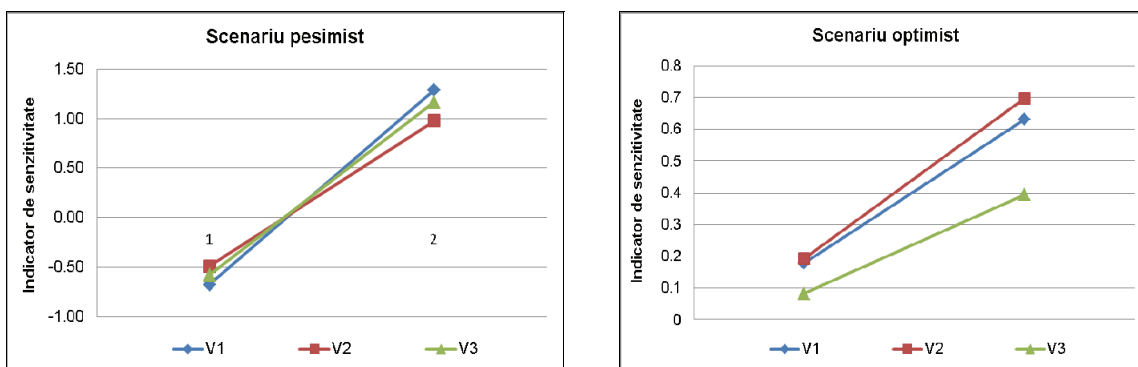


Fig. 5.8. Variația indicelui de sensibilitate pentru variabile cheie considerate în cadrul analizei de sensibilitate pentru procesul de obținere a polihidroxialcanoatilor

Capitolul 6.

ANALIZA INTEGRATĂ A PERFORMANȚELOR TEHNICO-ECONOMICE ȘI ECOLOGICE ALE PROCESULUI DE VALORIFICARE PRIN BIOCONVERSIE A DEȘEURILOR ORGANICE BIODEGRADABILE APLICÂND METODE SPECIFICE ANALIZEI DE DECIZIE MULTICRITERIALĂ

6.1. Definirea scopului studiului și domeniului de aplicare al analizei

Obiectivul acestui studiu a constat în aplicarea analizei de decizie multicriterială (MCDA) ca o abordare structurată astfel încât să se evidențieze, într-o analiză integrată, performanțele tehnico-economice și ecologice ale procesului de valorificare a deșeurilor organice biodegradabile prin bioconversie la polihidroxialcanoati (PHAs) și compararea acestora cu procesul de producție a policlorurii de vinil.

Pentru realizarea acestui obiectiv au fost aplicate metodologii specifice MCDA care au permis evaluarea proceselor de producție propuse luând în considerare o gamă largă de criterii de mediu, tehnice și economice, astfel încât să se asigure o abordare integrată (tehnico-economică și ecologică) a celor două alternative de obținere a unor polimeri – din deșeuri organice biodegradabile și, respectiv din materii prime ce provin din resurse neregenerabile (combustibili fosili), cu scopul de a justifica recomandări de punere în aplicare. În acest scop au fost alese pentru aplicare două dintre metodologiile de analiză multicriterială și anume: *Elimination Et Choix Traduisant la Réalité* (ELECTRE) și *Procesul Analitic Ierarhic* (AHP).

6.3. Evaluarea proceselor de producție a PHAs și PVC prin aplicarea metodei *Elimination Et Choix Traduisant la Réalité* (ELECTRE)

6.3.2. Stabilirea criteriilor de evaluare

Principiul acestei metode are la baza ideea că fiecare alternativă este în competiție cu celelalte și alegerea unei alternative considerate a fi cea mai bună trebuie să se facă numai în cazul în care aceasta este cu adevărat mai bună decât toate celelalte. Altfel spus, *varianta optimă este cea care surclasează celelalte variante* (Buchanan și Sheppard, 2012).

În vederea identificării planului de acțiune optim am propus patru variante, notate $V_1 - V_n$ (Buchanan și Sheppard, 2012). Acestea sunt variante de obținere a polimerilor/biopolimerilor și anume:

V_1 – obținerea de polimeri de tip policlorură de vinil din monomer din produse (PVC);

V_2 – obținerea de biopolimeri de tip polihidroxialcanoati din deșeuri organice biodegradabile (PHA);

V₃ – obținerea de biopolimeri de tip acid polilactic (PLA);

V₄ – obținerea de biopolimeri din amidon (BA).

La baza stabilirii acestor variante au stat următoarele criterii notate C₁ – C₆. Criteriile de apreciere a variantelor sunt prezentate în continuare:

C₁ – beneficiul realizat prin aplicarea soluției (exprimat în valoarea monetară, Euro);

C₂ – armonizarea cu prioritățile legislației UE (Directiva Cadru a Deșeurilor 2008/98, Ierarhia managementului deșeurilor (exprimat în calificative));

C₃ – magnitudinea degradării produsului finit obținut (exprimată în calificative);

C₄ – costuri de implementare ale proiectului (exprimate în valoarea monetară, Euro);

C₅ – cantitatea de deșeuri recuperate (exprimată în %);

C₆ – energia recuperată din deșeuri organice alimentare (exprimată în %).

Fiecare variantă V₁ - V₄ a fost apreciată în funcție de criteriile C₁ – C₆ stabilite, iar cu ajutorul calificativelor acordate s-a construit o matrice denumită *matricea consecințelor* (Figueira și colab., 2013).

6.3.3. Determinarea coeficienților de importanță K_j pentru fiecare criteriu în parte

Coeficienții de importanță K_j au valori între 0 și 1 în funcție de influența participanților implicați în variantele propuse și în funcție de criteriile stabilite (Doumpos și colab., 2009).

Coeficienții de importanță au fost calculați utilizând ec. (6.1) (Figueira și colab., 2009; Figueira și colab., 2012):

$$K_{ij} = \frac{\sum n_{ij}}{\sum \sum n_{ij}} \quad (6.1)$$

unde:

$\sum n_{ij}$ se obține pentru criteriile care reprezintă concordanța între variante, $n_{ij} \geq n_{ij}$; K_{ij} - coeficienții de importanță acordați criteriilor.

În urma aplicării ec. (6.1) s-au obținut următoarele valori ale coeficienților de importanță:

$$K_1 = \frac{42}{246} = 0,17$$

$$K_1 = \frac{41}{246} = 0,16$$

$$K_1 = \frac{40}{246} = 0,16$$

$$K_1 = \frac{34}{246} = 0,13$$

$$K_1 = \frac{38}{246} = 0,15$$

$$K_1 = \frac{37}{246} = 0,15$$

6.3.4 Determinarea matricii utilităților a_{ij}^*

În vederea determinării matricii utilităților este necesară parcurgerea următoarelor etape: *stabilirea utilităților și calculul utilităților* (Figueira și colab., 2013; Fülöp, 2005).

Având în vedere că surclasarea este o metodă de comparație între fiecare pereche de opțiuni luată în considerare, următoarea etapă constă în calcularea indicilor de concordanță între perechi de variante decizionale, pe baza ponderilor de importanță acordate fiecărei caracteristici.

6.3.5. Calculul indicatorilor de concordanță

Calcul indicatorilor de concordanță se realizează aplicând ec. (6.3) (Figueira și colab., 2012). Valorile indicatorilor de concordanță sunt prezentate în tabelul 6.4.

$$C_{VgVh} = \frac{1}{\sum_{k=1}^n K_j} \sum K_j; a_{gj} \geq a_{hj} \quad (6.3)$$

unde: C_{VgVh} reprezintă indicatorul de concordanță; K_j – coeficientul de importanță al criteriului j ; a_{gj} , a_{hj} - note de apreciere funcție de utilitate.

Matricea indicilor de concordanță obținută este prezentată în tabelul 6.5.

Tabelul 6.5. Matricea de concordanță

$V \backslash V$	V_1	V_2	V_3	V_4
V_1		0,28	0,45	0,28
V_2	0,66		0,66	0,66
V_3	0,66	0,28		0,16
V_4	0,66	0,43	0,92	

6.3.6. Calculul indicatorilor de discordanță

Calcul indicatorilor de discordanță s-a efectuat cu ec. (6.4) (Lupu, 2012). Odată calculați toți indicatorii de discordanță, am construit matricea de discordanță (tabelul 6.6).

$$D_{VgVh} = \begin{cases} a_{gj} > a_{hj} \\ \frac{1}{d} \max |a_{gj} - a_{hj}|; a_{gj} \leq a_{hj} \end{cases} \quad (6.4)$$

unde: d reprezintă ecartul, adică distanța maximă între notele de apreciere a_{ij} acordate; $d = 1$.

Tabel 6.6. Matricea de discordanță

$V \backslash V$	V_1	V_2	V_3	V_4
V_1		1	0,5	0,7
V_2	1		0,3	0,2
V_3	0,5	0,5		0,5
V_4	1	0,7	0,5	

6.3.7. Alegerea variantei optime aplicând metoda diferenței

Determinarea variantei optime prin metoda diferenței se realizează utilizând ec. 6.5 (Miettinen și Salminen, 1999):

$$\Delta_{V_g V_h} = C_{V_g V_h} - D_{V_g V_h} \quad (6.5)$$

unde: $\Delta_{V_g V_h}$ reprezintă indicatorul de diferență, $C_{V_g V_h}$ reprezintă indicatorul de concordanță, $D_{V_g V_h}$ reprezintă indicatorul de discordanță. Varianta optimă este maximul sumei $\sum \Delta V_g V_h$

Ierarhia rezultată pentru cele patru variante este următoarea: $V_2 > V_4 > V_1 > V_3$. Varianta V_2 este preferată pentru studiul efectuat (fig. 6.1). Prin urmare, *alternativa referitoare la producția de polihidroxialcanoati prin bioconversia deșeurilor organice biodegradabile reprezintă cea mai promițătoare variantă de valorificare a deșeurilor organice biodegradabile din punct de vedere tehnico-economic și ecologic*, urmată de varianta care implică obținerea de biopolimeri din amidon.

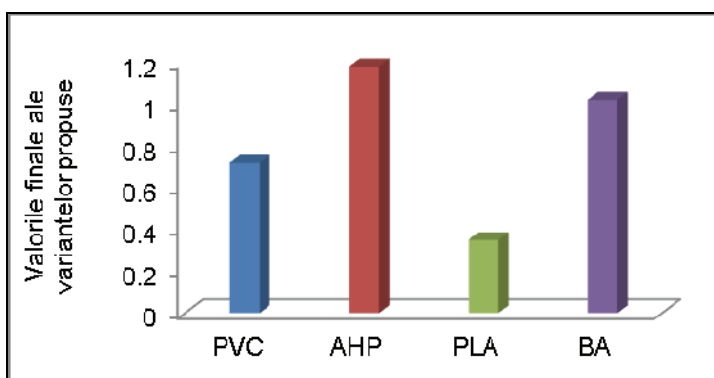


Fig. 6.1. Graficul surclasării opțiunilor

6.4. Evaluarea proceselor de producție a PHAs și PVC prin aplicarea metodologiei *Procesul Analitic Ierarhic* (AHP)

6.4.1. Metodologia *Procesul Analitic Ierarhic* (AHP)

Metodologia *Procesul Analitic Ierarhic* (AHP) se constituie într-un suport de luare a deciziilor în legătură cu aspecte complexe ce privesc durabilitatea sistemelor și poate sprijini recunoașterea și definirea unei probleme în contextul menționat, în detaliu. Metoda multicriterială *Procesul Analitic Ierarhic* (AHP), dezvoltată de către Thomas L. Saaty este una dintre cele mai aplicate metode în cadrul metodologiei de decizie multicriterială.

6.4.2. Definirea problemei de analizat și selecția factorilor de decizie

Obiectivul aplicării metodologiei AHP în acest studiu îl constituie evaluarea comparativă, din punct de vedere al performanțelor tehnico-economice și ecologice ale proceselor de producție a PHAs și PVC, care au fost anterior analizate cu metodologiile și modelele ECV și ACB (din care au fost reținute o serie de elemente utile în stabilirea criteriilor de evaluare).

6.4.3. Stabilirea criteriilor de decizie

Evaluarea performanțelor a proceselor de obținere a PVC și PHA s-a efectuat în raport cu criteriile specific menționate în fig. 6.3, de natură diferită, care sunt adesea în conflict. În tabelul 6.8 sunt prezentate criteriile și subcriteriile utilizate în acest studiu.

6.4.4. Analiza proceselor de obținere a PVC și PHAs folosind metodele *Ranking* și *Rating*

Metodele *Ranking* și *Rating* au fost aplicate pentru identificarea și selectarea criteriilor și indicatorilor relevanți pentru evaluarea sistemelor analizate. Criteriile de decizie sunt evaluate prin intermediul unor scoruri particulare metodelor *Ranking* și *Rating* (Forman și Gass, 2001). În cazul metodei *Ranking* scorurile sunt cuprinse între valorile 1 și 9, iar în cazul metodei *Rating* scorurile se încadrează în intervalul 1-100 (Forman și Gass, 2001).

Echipa de experți implicați în realizarea acestui studiu este formată din: expert mediu, inginer proiectant, reprezentant guvernamental, consumator. Fiecăruia expert i s-a cerut să ordoneze lista elementelor de decizie (indicatorii de performanță asociați criteriilor stabilite) în ordinea importanței (*ranking*) și apoi să acorde fiecărui element de decizie un scor între 0 și 100 (*rating*), după care s-a trecut la analiza răspunsului experților. Prin intermediul setului de valori corespunzătoare celor două metode s-au calculat sumele *Ranking* și *Rating*, care apoi au fost utilizate pentru a calcula ponderea relativă a fiecărei valori acordate (tabelele 6.9, 6.10).

Tabelul 6.9. Suma scorurilor acordate de experți

<i>Criteria</i>	<i>PHAs</i>		<i>PVC</i>	
	<i>Ranking</i>	<i>Rating</i>	<i>Ranking</i>	<i>Rating</i>
C1	23	230	8	155
C2	32	210	11	85
C3	29	205	10	45
C4	30	240	10	36
C5	20	150	16	140
C6	20	120	19	140
C7	19	95	15	95
C8	21	95	16	80
C9	23	165	8	155
C10	32	290	11	85
C11	29	300	10	45
C12	30	300	10	36

Tabelul 6.10. Ponderea relativă specifică fiecărui scor acordat folosind metodele *Ranking* și *Rating*

<i>Criterii</i>	<i>PHAs</i>		<i>PVC</i>	
	<i>Ranking</i>	<i>Rating</i>	<i>Ranking</i>	<i>Rating</i>
C1	25,25	25,98	25,30	25,75
C2	24,24	23,72	26,50	27,27
C3	24,242	23,16	21,68	21,96
C4	26,26	27,11	26,50	25,11
C5	25,03	32,60	24,24	30,76
C6	25,15	26,08	28,78	30,76
C7	23,75	20,65	22,72	20,87
C8	26,25	20,65	24,24	17,58
C9	20,17	15,63	20,51	48,28
C10	28,07	27,48	28,20	26,47
C11	25,43	28,43	25,64	14,01
C12	26,31	28,43	25,64	11,21

Eficiența celor două procese analizate s-a determinat cu ajutorul raportului R (ec. 6.9):

$$R = \frac{scor}{100} \quad (6.9)$$

Scorurile au fost acordate în funcție de scala scorurilor descrise în tabelul 6.12. Rezultatele finale ale scorurilor sunt prezentate în tabelul 6.13.

Tabelul 6.12. Scara de acordare a scorurilor pentru determinarea eficienței proceselor

<i>Descriere</i>	<i>Scor</i>
Imposibilitatea de a acorda un scor la momentul evaluării	*
Criteriul sau indicatorul nu este aplicabil	0
Performanță foarte scăzută	1
Performanță scăzută, nefavorabilă, sunt necesare multe îmbunătățiri	2
Performanță acceptabilă, la sau peste norma pentru o funcționare bună	3
Performanță foarte bună, sunt necesare îmbunătățiri pentru a deveni state-of-the-art	4
Performanță excepțională (alternativa reprezintă <i>state-of-the-art</i> în regiune)	5

Tabelul 6.13. Scorurile finale ale proceselor evaluate

<i>Criterii</i>	<i>PHA</i>	<i>PVC</i>
C1	22,85	16,09
C2	28,52	8,47
C3	28,19	13,76
C4	15,87	16,27
C5	15,97	10,61
C6	15,34	10,21
C7	18,55	12,89
C8	28,32	13,09
C9	22,35	18,99
C10	25,53	12,39
C11	29,45	4,53
C12	30,40	4,62
Total	281,34	141,92

6.4.5. Analiza proceselor de obținere a PVC și PHAs folosind metoda comparației prin perechi

Metoda comparației prin perechi implică comparații *unu-la-unu* între fiecare dintre indicatorii avuți în vedere la evaluarea alternativelor (Mendoza și colab., 1999). Metodologia de lucru constă în compararea criteriilor, două câte două, pentru realizarea matricei procentelor folosind scala numerică a lui Saaty (Saaty, 2008), urmărindu-se trei pași esențiali:

- acordarea unei valori de la 1 (importanță egală) la 9 (importanță extremă) pentru a genera matricei comparative pentru criteriile economice, tehnice și de mediu considerate în studiu (tabelul 6.14). Întotdeauna pe diagonala matricei s-a păstrat valoarea 1. În continuare s-au construit matricei de comparare a criteriilor pentru fiecare scenariu, reprezentate în tabelele 6.15, 6.16.
- calculul ponderii relative finale prin parcurgerea următoarelor etape: (i) calculul sumei pe coloane a fiecărui criteriu, (ii) împărțirea fiecărui element al matricei la suma corespunzătoare coloanei pentru fiecare criteriu pentru a normaliza matricea, (iii) calcul mediei aritmetice a elementelor de pe fiecare linie a matricei normalizate.
- determinarea vectorului de priorități (VP) prin înmulțirea ponderii criteriului i cu coloana matricei inițiale, după care se realizează suma valorilor pe linie. În continuare se determină vectorul de priorități prin împărțirea vectorului sumă la ponderea criteriilor, după care se realizează media aritmetică a valorilor vectorului de priorități cu ajutorul ec. (6.10).

$$\lambda_{VP} = \frac{\sum pr}{n} \quad (6.10)$$

Tabelele 6.17 și 6.18 prezintă rezultatele scorurilor finale ale alternativelor în funcție de importanța acordată de experți. Prin urmare, în urma analizei rezultatelor obținute prin aplicarea metodei comparației prin perechi am constatat că procesul de producție a policlorurii de vinil are o performanță mai scăzută din punct de vedere al criteriilor selectate – economice, de mediu și tehnice comparativ cu procesul de producție a polihidroxialcanoatilor (fig. 6.5). În cazul procesului de obținere a polihidroxialcanoatilor s-au obținut valori care semnifică o performanță mai bună a procesului (fig. 6.5). Diferența scorurilor finale de performanță este de circa două procente.

Tabelul 6.17. Calculul scorurilor finale prin utilizarea metodei comparației pentru procesul de obținere al polihidroxialcanoatilor

<i>Pondere relativă</i>	<i>Scor</i>	<i>Scor final</i>	<i>Scor final (ec. 6.9)</i>
3,23	1	3,23	0,0323
5,17	2	10,34	0,1034
7,18	1	7,18	0,0718
6,94	1	6,94	0,0694
8,57	2	17,14	0,1714
10,15	1	10,15	0,1015
10,56	1	10,56	0,1056

9,56	1	9,56	0,0956
10,70	7	74,9	0,7490
10,99	7	76,93	0,7693
15,21	9	136,89	1,3689
15,05	8	120,4	1,2040
		484,22	
Scor final obținut în urma aplicării metodei comparației prin perechi			4,8422

Tabelul 6.18. Calculul scorurilor finale prin utilizarea metodei comparației pentru procesul de obținere al policlorurii de vinil

<i>Pondere relativă</i>	<i>Scor</i>	<i>Scor final</i>	<i>Scor final (ec. 6.9)</i>
19,46	1	19,46	0,1946
4,07	4	16,28	0,1628
6,34	2	12,68	0,1268
7,71	2	15,42	0,1542
12,31	2	24,62	0,2462
11,25	1	11,25	0,1125
14,60	3	43,80	0,4380
10,69	1	10,69	0,1069
9,57	7	66,99	0,6699
5,91	5	29,55	0,2955
4,31	8	34,48	0,3448
3,35	8	26,80	0,2680
		312,02	
Scor final obținut în urma aplicării metodei comparației prin perechi			3,1202

Capitolul 7.

EVALUAREA COMPARATIVĂ A IMPACTULUI ENERGETIC AL PROCESELE DE PRODUCȚIE A POLIHIDROXIALCANOAȚILOR ȘI A POLICLORURII DE VINIL

7.1. Scopul și importanța cercetării

În contextul importanței pe care o are pe plan mondial problematica energetică și, în particular resursele energetice alternative, **în acest capitol s-a elaborat o analiză a impacturilor generate în mediu de consumul/producția de resurse energetice în procesele de producție a PHAs și PVC, pentru a evidenția cu claritate diferențele dintre cele două procese de producție din punct de vedere energetic.** În acest scop s-au estimat o serie de categorii de impact prin aplicarea a două metode din cadrul metodologiei evaluării ciclului de viață (ECV) și anume CML 2001 și ReCiPe, descrise în Capitolele 2 și 4.

7.3. Aplicarea metodologiei ECV pentru evaluarea impacturilor în mediu asociate resursele energetice

7.3.1. Definirea scopului și a domeniului de aplicare al analizei

Analiza impacturilor generate în mediu de resursele energetice (consumate/generate) în procesele de producție a PHAs și PVC prin metodele asociate evaluării ciclului de viață (ECV), respectiv CML 2001 și ReCiPe a fost aplicată sistemelor ale căror frontiere sunt cele prezentate în fig. 4.1. **Unitatea funcțională** luată în calcul a fost de **1 kg de PHAs** și, respectiv **1 kg PVC**.

7.3.3. Evaluarea impactului energetic a procesului de producție a PHAs comparativ cu procesul de producție a PVC

Categoriile de impact precum: epuizarea resurselor abiotice, încălzirea globală, schimbarea climatică, toxicitatea umană, acidifierea, eutrofizarea, au fost cuantificate în faza de evaluare a impactului (tabelul 7.2).

7.3.3.1. Evaluarea comparativă a impactului energetic în procesele de obținere a PHAs și PVC folosind metodologia CML

În fig.7.7 sunt prezentate impacturile asupra mediului pentru procesul de obținere a policlorurii de vinil (PVC) și a procesului de obținere a polihidroxiclcanoatilor (PHAs) considerând metodologia CML 2001. Așa cum se poate observa în fig. 7.7, toate categoriile de impact analizate pentru procesul de obținere a PVC au valori pozitive, ceea ce înseamnă că impactul asupra mediului înconjurător este negativ.

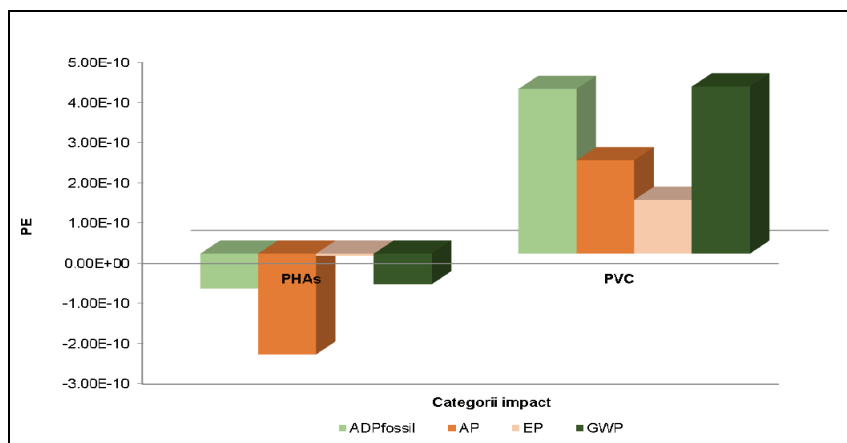


Fig. 7.7. Impacturile potențiale asupra mediului a procesului de producție a biogazului din deșeuri organice – metodologia CML 2001

Ordinea în care descresc categoriile de impact cuantificate este următoarea: **GWP>ADP>AP>EP**. Analiza acelorași categorii de impact pentru procesul de obținere a PHAs a condus la valori negative, ceea ce înseamnă că, din punct de vedere energetic procesul de producție a PHAs generează impacturi pozitive. Ordinea în care descresc impacturile este următoarea: **AP>ADP>GWP>EP**. În cazul procesului de obținere a PHAs sunt reduse cantitativ următoarele categorii de impact, ca urmare a generării de biogaz: *potențialul de epuizare a resurselor abiotice, potențialul de eutrofizare, potențialul de acidifiere, potențialul de încălzire globală*. Aceste aspecte sunt argumentate de posibilitatea de reducere a gazelor cu efect de seră. Valorile îmbunătățite ale potențialul de eutrofizare sunt datorate nutrienților care pot rezulta în procesul de obținere a PHAs și care pot fi utilizați ca fertilizanți pentru sol.

7.3.3.2. Evaluarea comparativă a a impactului energetic în procesele de obținere a PVC și PHAs folosind metodologia ReCiPe

În fig.7.8 sunt prezentate impacturile asupra mediului pentru induse de procesul de producție a PHAs și PVC prin aplicarea metodei ReCiPe.

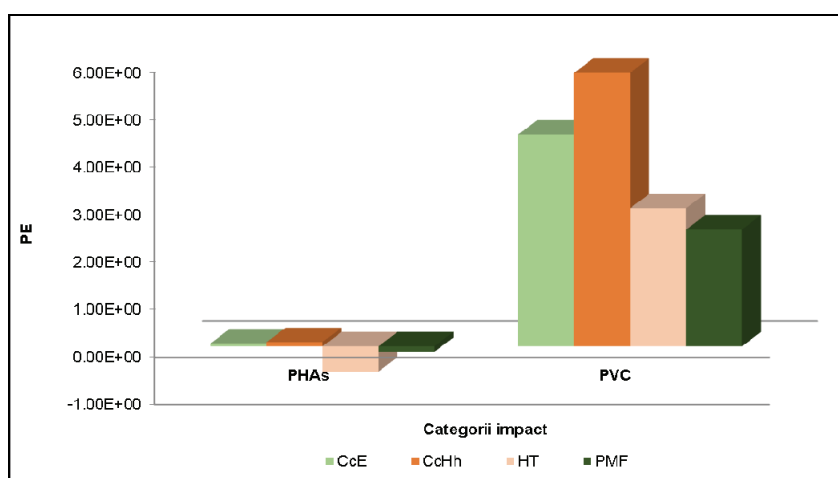


Fig. 7.8. Impacturile potențiale asupra mediului induse de procesele de producție a PHAs și PVC evaluate cu metoda ReCiPe 08

Așa cum se poate constata din fig. 7.8, toate categoriile de impact analizate pentru procesul de obținere a PVC au valori pozitive, ceea ce înseamnă că impactul asupra mediului înconjurător este negativ. Ordinea în care descresc este următoarea: **CcHh>CcE>HT>PMF**. În cazul acelorași categorii de impact, induse de procesul de producție a PHAs, s-au obținut valori negative, ceea ce înseamnă că procesul de producție a PHAs induce efecte pozitive în mediu. Ordinea în care descresc este următoarea: **HT>CcHh>PMF>CcE**.

Comparativ cu procesul de producție a PVC, procesul de producție a PHAs aduce beneficii pentru sănătatea umană și pentru mediul înconjurător atât prin reducerea gazelor cu efect de seră cât și prin posibilitatea de generare a biogazului cu potențial energetic și a nutrienților.

CONCLUZII FINALE

Problema managementului integrat al deșeurilor, a valorificării acestora este de actualitate la nivel internațional și incită numeroase eforturi pentru rezolvarea ei pe principiile dezvoltării durabile, dar mai sunt necesare o serie de investigații pentru luarea celor mai bune decizii în ceea ce privește transformarea deșeurilor cu potențial recuperabil în resurse materiale și energetice. În ultimele decenii, cercetările în domeniul managementului deșeurilor organice biodegradabile au fost orientate spre procese și tehnologii care să pună în valoare potențialul acestora ca resurse materiale și energetice prin bioconversie în condiții controlate, aplicând strategii ecologice de producție. Performanțele acestor procese din punct de vedere economic, ecologic și social trebuie să asigure reducerea presiunii pe care procesele și tehnologiile tradiționale, care se bazează pe resurse de materii prime și energie convenționale (în principal combustibili fosili) le generează în mediu, asupra costurilor și societății. Prin urmare, înainte de luarea unei decizii privind punerea în practică a unui astfel de proiect este necesară evaluarea acestor performanțe, care să demonstreze viabilitatea procesului de bioconversie din punct de vedere economic, ecologic și social. În acest scop este necesară cunoașterea premiselor de la care pleacă proiectul, alternativele de lucru și stabilirea unei referințe pentru comparație.

În acest context **obiectivul fundamental al tezei de doctorat constă în:**

- **evaluarea durabilității procesului de valorificare a unor deșeuri organice biodegradabile pentru obținerea de noi materiale și energie, respectiv biopolimeri de tip polihidroxialcanoati (PHAs) și biogaz sau biohidrogen, comparativ cu procesul clasic de obținere a policlorurii de vinil (PVC), care utilizează materii prime din resurse neregenerabile, pe bază de petrol și care generează produse și deșeuri cu potențial redus de (bio)degradare, prin**

- **aplicarea unor instrumente de evaluare specifice: *Evaluarea Ciclului de Viață* (ECV), *Analiza Cost – Beneficiu* (ACB), *Analiza de Decizie Multicriterială* (MCDA) care să ofere o bază științifică bine fundamentată pentru luarea deciziilor privind oportunitatea punerii în practică a unui proiect de valorificare a deșeurilor organice biodegradabile pentru obținerea de noi materiale și energie.**

Pentru îndeplinirea obiectivului fundamental au fost stabilite o serie de **obiective specifice:**

- analiza critică a datelor și informațiilor privind situația deșeurilor solide pe plan mondial, european și național, a impacturilor economice și ecologice generate de deșeurile organice biodegradabile, a potențialului de valorificare materială și energetică (pentru obținere de biopolimeri de tip polihidroxialcanoati și, respectiv biogaz) și a potențialului acestei opțiuni de a reduce presiunea asupra mediului generată atât de deșeurile organice biodegradabile, cât și de deșeurile din plastic convențional, cu potențial redus de biodegradare;
- selectarea și planificarea alternativelor de valorificare materială și energetică a deșeurilor organice biodegradabile și a referinței pentru compararea performanțelor;
- selectarea tehnologiilor de fabricație, trasarea frontierelor sistemelor, elaborarea schemelor bloc și a bazelor de date pentru analiza durabilității proceselor de producție

- selectate pentru analiza comparativă a performanțelor tehnico-economice, ecologice și sociale (PHAs și PVC);
- selectarea și aplicarea metodologiilor de evaluare a durabilității proceselor de producție a PHAs și PVC din punct de vedere tehnico-economic și ecologic, precum și a instrumentelor software pentru aplicare;
 - analiza comparativă a impacturilor generate în mediu de procesele de producție a PHAs și respectiv PVC aplicând metodologia evaluării ciclului de viață, utilizând instrumentele software GaBi și SimaPro;
 - analiza comparativă a impacturilor economice, a costurilor și beneficiilor de mediu ale proceselor de producție a a impacturilor generate în mediu de procesele de producție a PHAs și respectiv PVC aplicând metodologia evaluării ciclului de viață, utilizând instrumentele software GaBi și SimaPro prin aplicarea metodologiei de evaluare specifică analizei cost-beneficiu;
 - analiza integrată a performanțelor tehnico-economice și ecologice ale proceselor de producție a PHAs și PVC prin metodologii specifice analizei de decizie multicriterială (metodele *Elimination Et Choix Traduisant la Realité – ELECTRE* și *Procesul Analitic Ierarhic - AHP*), compararea rezultatelor și formularea de recomandări;
 - evaluarea comparativă a eficienței energetice a proceselor de producție a PHAs și PVC prin aplicarea metodologiei evaluării ciclului de viață;
 - analiza globală a rezultatelor, formularea de concluzii și recomandări pentru luarea deciziilor în vederea valorificării durabile a deșeurilor biodegradabile (organice) pentru producția de bioplastice și energie și a alternativelor de reducere a amprente ecologice a proceselor de producție a a PHAs și PVC, precum și a deșeurilor din plastic convențional.

Evaluarea celor două procese de producție a policlorurii de vinil (PVC) și respectiv a polihidroxicanoatilor (PHAs) s-a bazat pe două tipuri de metodologii: **(i) calitative**, care analizează datele de intrare și de ieșire din procese precum și modul de funcționare a celor două procese, **(ii) cantitativă**, care implică cuantificarea impacturilor economice, ecologice și sociale generate de proceselor de producție a PHAs și PVC în vederea determinării viabilității tehnico-economice și de mediu corespunzătoare fiecărui proces în parte.

Prima parte a lucrării cuprinde 3 capitole, în care se analizează stadiul cercetărilor privind generarea și managementul durabil al deșeurilor ca resurse materiale și energetice, instrumentele de evaluare a performanțelor tehnico-economice, ecologice și sociale pentru luarea deciziilor în utilizarea durabilă a deșeurilor ca resurse materiale și energetice, precum și o serie de aspecte particulare legate selectarea și planificarea alternativelor de valorificare materială și energetică a deșeurilor organice biodegradabile și a referinței pentru compararea performanțelor utilizate în teza de doctorat.

În partea a 2-a a lucrării sunt prezentate studiile și cercetările originale elaborate în legătură cu analiza impacturilor generate în mediu de procesul de valorificare a deșeurilor organice biodegradabile prin bioconversie aplicând metodologia evaluării ciclului de viață (Capitolul 4), evaluarea impacturilor economice, a costurilor și beneficiilor de mediu rezultate în procesul de valorificare prin bioconversie a deșeurilor organice biodegradabile aplicând analiza cost-beneficiu (Capitolul 5). De asemenea în această parte a tezei se realizează o analiză integrată a

performanțelor tehnico-economice și ecologice ale procesului de valorificare prin bioconversie a deșeurilor organice biodegradabile prin metodologii specifice analizei de decizie multicriterială (Capitolul 6), urmată de evaluarea comparativă a impactului energetic al proceselor de producție a polihidroxicanoatilor prin bioconversia deșeurilor organice biodegradabile și a policlorurii de vinil care utilizează materii prime din resurse neregenerabile, pe bază de petrol (Capitolul 7).

A. Studiile și cercetările din literatura de specialitate, precum și conținutul politicilor și strategiilor de mediu la nivel european **evidențiază potențialul deșeurilor ca resurse materiale și energetice**, dar modul de valorificare și avantajele din punct de vedere economic, ecologic și social trebuie să fie rezultatul unor decizii luate pe baza unor informații prelucrate aplicând instrumente specifice care să ofere suportul științific pentru alegerea celor mai adecvate scenarii de valorificare pe baza performanțelor economice și de mediu, raportate la procesele similare care pleacă de la materii prime convenționale sau procese care utilizează resurse limitate sau neregenerabile.

În acest context alegerea temei de cercetare care constituie subiectul tezei de doctorat intitulată *Instrumente de luare a deciziilor în utilizarea durabilă a deșeurilor ca resurse materiale și energetice* și obiectivele propuse sunt pe deplin justificate, întrucât se elaborează o analiză complexă a durabilității și oportunității procesului de valorificare avansată și complexă a unor deșeuri organice biodegradabile prin bioconversie, cu obținerea de biopolimeri aplicați pentru producția de bioplastice și generare de biogaz.

De asemenea, alegerea și analiza se argumentează prin evidențierea performanțelor economice și de mediu ale acestei variante și compararea cu un proces convențional, de sinteză chimică a polimerilor plecând de la combustibili fosili pe baza unui suport științific construit prin aplicarea unor instrumente de evaluare dedicate și consacrate.

B. În lucrare sunt prezentate instrumentele suport utilizate în evaluarea sistemelor în vederea orientării spre deciziile corecte privind soluționarea problemelor asociate unui proces, produs, serviciu, aflat în faza de proiect sau pentru optimizarea funcțiilor acestora. Totodată, se oferă o imagine de ansamblu asupra metodelor și metodologiilor care pot fi aplicate pentru luarea unor decizii durabile în problemele de mediu sau în legătură cu noi proiecte sau investiții performante în raport cu mediul. Se subliniază faptul că fiecare instrument avut în vedere prezintă o serie de beneficii, dar și o serie de dezavantaje în aplicarea lor. Dintre cele mai utilizate instrumente care pot oferi informații fundamentate științific ca suport pentru luarea deciziilor, în teza de doctorat s-au ales pentru aplicare: *Evaluarea Ciclului de Viață*, *Analiza Cost-Beneficiu* și *Analiza de Decizie Multicriterială* deoarece oferă o serie de avantaje care le recomandă în acest context.

Lucrarea de doctorat utilizează cele trei categorii de instrumente pentru evaluarea durabilității procesului de valorificare a unor deșeuri organice pentru obținerea polihidroxicanoatilor – biopolimeri utilizați pentru bioplastice, comparativ cu procesul clasic de obținere a policlorurii de vinil, care se bazează pe resurse neregenerabile (petrol), pentru obținerea monomerului. Rezultatele obținute pot constitui un suport științific, foarte bine fundamentat din punctul de vedere al performanței economice și ecologice, în vederea luării deciziei de aplicare a proiectului propus, care poate facilita, printre altele,

substituția (parțială) a plasticului sintetic cu bioplastic obținut prin valorificarea deșeurilor organice și diminuarea presiunii energetice prin generare de biogaz sau biohidrogen.

C. Cercetarea efectuată în prima parte a tezei a evidențiat o serie de aspecte importante privind anumite probleme și oportunități în managementul deșeurilor organice biodegradabile legate, în principal de generarea acestora, precum și de alternative de valorificare. Din analiza acestor aspecte au rezultat numeroase concluzii:

- deșeurile organice biodegradabile din diverse surse (industria alimentară, de alimentație publică, deșeuri agricole de biomasă etc.) reprezintă un procent semnificativ (până la 50%) în compoziția deșeurilor solide, iar valorificarea lor pentru obținerea de biopolimeri ar putea fi benefică atât din punct de vedere economic cât și pentru mediu, pentru că s-ar diminua impactul generat de aceste deșeuri, de costurile de management și ar scădea presiunea generată în mediu de deșeurile din plastic tradițional prin substituirea treptată a produselor din polimeri sintetici cu cele din biopolimeri;

- prin valorificarea deșeurilor organice biodegradabile prin bioconversie se pot obține biopolimeri de tipul polihidroxialcanoatilor (PHAs);

- procesul de producție a PHAs trebuie analizat din punct de vedere al performanței ecologice și economice, comparativ cu un proces tradițional binecunoscut prin aplicarea instrumentelor specifice de analiză (evaluarea ciclului de viață, analiza cost-beneficiu, analiza de decizie multicriterială);

- în acest context a fost ales pentru comparație procesul de producție al policlorurii de vinil, în condițiile în care producția acestui polimer, dar și consumul de materiale plastice este în progres, atât în Europa cât și pe plan mondial;

- fabricarea și utilizarea materialelor plastice tradiționale pe bază de polimeri obținuți din monomeri pe bază de petrol generează impacturi semnificative în mediul înconjurător.

- deșeurile din materiale plastice pot fi valorificate prin reciclare, reutilizare sau pot fi depozitate, dar biodegradabilitatea lor scăzută îngreunează managementul acestora, astfel încât una din soluțiile posibile ar fi substituirea plasticelor tradiționale cu materiale similare biodegradabile;

- rezultatul acestei analize comparative reprezintă suportul științific pentru luarea deciziilor în vederea considerării procesului de obținere a PHAs pentru aplicarea în vederea valorificării unor deșeuri organice și diminuării ponderii materialelor plastice tradiționale în producția și consumul de materiale plastice.

Unul din obiectivele tezei de doctorat a constatat în analiza comparativă a impacturilor generate în mediu de procesul de producție a polihidroxialcanoatilor (PHAs) - prin valorificarea deșeurilor organice biodegradabile și, respectiv de procesul de producție a policlorurii de vinil (PVC), unul dintre cei mai cunoscuți și utilizați polimeri obținuți din monomeri pe bază de petrol și care generează produse și deșeuri cu potențial redus de (bio)degradare. Pentru a justifica oportunitatea alegerii variantei de valorificare a deșeurilor organice biodegradabile ca resurse materiale și energetice și a avantajelor/dezavantajelor procesului de producție a PHAs comparativ cu un proces clasic de producție a polimerilor s-a realizat analiza impacturilor generate în mediu de cele două procese de producție (PHAs vs. PVC) aplicând metodologia specifică evaluării ciclului de viață (ECV). Rezultatele aplicării acestui instrument de evaluare

pot constitui suportul științific pentru luarea deciziei de implementare a procesului de producție a PHAs, prin prisma fezabilității de mediu.

De asemenea au fost evidențiate și analizate unele diferențe în magnitudinea impacturilor evaluate prin aplicarea diverselor metode asociate metodologiei ECV pentru același proces, precum și a unor diferențe generate de utilizarea mediilor software dedicate pentru analiza ECV, respectiv GaBi și SimaPro pentru aceleași categorii de impact în cadrul aceluiași proces, pentru a asigura robustețea și reproductibilitatea informațiilor obținute aplicând aceste instrumente ca suport în luarea deciziilor pentru utilizarea durabilă a deșeurilor ca resurse materiale și energetice.

D. În vederea atingerii acestui obiectiv, au fost parcurse toate etapele specifice într-un studiu ECV: definirea problemei, stabilirea limitelor de sistem, unități funcționale și analiza de inventar. Toate datele necesare pentru întocmirea inventarului ciclului de viață au fost colectate din literatura de specialitate, din bazele de date ale mediilor software în care s-au realizat studiile ECV și din discuții cu specialiști. De asemenea s-au realizat următoarele obiective specifice:

1. analiza proceselor tehnologice de producție a PHAs și, respectiv PVC și elaborarea schemelor bloc simplificate ale proceselor;
2. colectarea informațiilor, a datelor specifice proceselor de producție a PHAs și PVC necesare pentru studiul ECV;
3. analiza impacturilor ciclului de viață pentru cele două procese în mediile software GaBi și SimaPro prin aplicarea mai multor metode specifice ECV, pentru a lua în discuție cât mai multe categorii de impacturi;
4. interpretarea rezultatelor și elaborarea concluziilor studiului ECV.

Pentru descrierea clară a domeniului de studiu, a fost definită unitatea funcțională, respectiv 1 kg de produs obținut (PHAs și, respectiv PVC), ca bază de calcul pentru bilanțurile de materiale și energie asociate metodologiilor ECV. Toate datele de intrare și de ieșire din inventarul ciclului de viață precum și rezultatele obținute în etapa de evaluare a impactului au fost raportate la această unitate funcțională. De asemenea, pe baza schemelor bloc elaborate anterior s-au stabilit frontierele (limitele, granițele) fiecărui proces de producție.

Analiza inventarului ciclului de viață a implicat proceduri pentru colectarea și calculul datelor necesare, specifice bilanțurilor de materiale ale proceselor de obținere a PVC și PHAs, care au fost incluse în inventar și organizate pe categorii de intrări și ieșiri.

Evaluarea impacturilor a fost realizată aplicând metodologia evaluării ciclului de viață în două medii software: Gabi și SimaPro. Ambele instrumente software includ: a) o interfață de utilizator pentru modelarea sistemului, b) o bază de date pentru ciclul de viață a unor procese unitare, c) o bază de date care suportă mai multe metode de evaluare a impactului ciclului de viață, d) interfața cu utilizatorul.

Într-o prima etapă, studiile de evaluare a impacturilor de mediu s-au realizat prin utilizarea mediului software educațional GaBi în varianta 6, elaborat de *PE Internațional GmbH*, aplicând metodele existente în acest software: CML 2001, CML 96, ReCiPe08, EDIP 97, EDIP, 2003, EcoIndicator 95 și EcoIndicator 99. Pentru a asigura o referință comună pentru toate categoriile de impact evaluate și pentru a stabili o bază de comparare a rezultatelor s-a realizat **normalizarea** acestora, astfel încât rezultatele pentru diferite categorii de impact să fie

comparabile, fiind exprimate prin „impactul potențial generat per persoană și per an” pentru fiecare categorie de impact sau „persoane echivalente”.

Analiza impacturilor prin metodologia ECV a evidențiat faptul că ambele procese de producție generează impacturi cu efecte negative în mediu. Procesul de producție a PVC induce, de regulă, impacturi mai mari decât procesul de producție a PHAs. Cele mai mari valori s-au constatat pentru categoria de impact *potențialul de epuizare a resurselor abiotice* (ADP). Acest impact este cauzat de faptul că, în producția de PVC sunt utilizate cantități mari de petrol. De asemenea, în etapa de obținere a etenei din petrol sunt generate o serie de emisii precum compuși organici volatili (COV), oxizi de azot (NO_x), oxizii de sulf (SO_x) care perturbă ciclul fotolitic normal al NO₂ și generează impact negativ asociat *potențialului de formare a ozonului fotochimic* (POCP). Un impact semnificativ a fost înregistrat și în cazul *potențialului de eutrofizare* (EP) și *potențialului de încălzire globală* (GWP). Acest impact poate fi indus de emisiile de hidrocarburi, clorură de vinil, NO_x, SO_x provenite de la etapa de pregătire a materiilor prime și de polimerizare. Cea mai mare contribuție la *potențialul de acidifiere* a întregului proces de producție a PVC o au emisiile de SO₂ și NO_x asociate cu utilizarea combustibililor fosili (petrol). Un impact semnificativ a fost observat pentru categoria de impact *epuizarea resurselor abiotice* generat din cauza consumului de energie provenită din utilizarea combustibililor fosili - petrol și gaze naturale. Datele obținute arată faptul că unele categorii de impact precum: *schimbările climatice asociate ecosistemelor* și *schimbările climatice asociate deteriorării sănătății umane* au valori pozitive pentru procesul de producție a PVC, indicând faptul că etapele de proces analizate generează impacturi negative în mediu. Categoria de impact *schimbările climatice asociate deteriorării sănătății umane* sunt consecința emisiilor de gaze cu efect de seră: CH₄, CO₂, hidrocarburi halogenate, compuși organici volatili, oxizi de azot, toate rezultate din etapele de pregătire a materiilor prime.

Valorile impacturilor induse în mediul de procesul de producție a PHAs sunt cu 2-4 ordine de mărime mai mici decât cele rezultate în procesul de producție a PVC. Procesul de conversie biologică a deșeurilor organice pentru obținerea PHAs generează impacturi negative asociate cu *potențialul de încălzire globală* produs de emisiile de CO₂, N₂O, CH₄, rezultate de la procesul de degradare anaerobă. Cea mai importantă contribuție la categoria de impact *potențialul de eutrofizare* o are etapa de degradare aerobă. Principalii poluanți care contribuie la indicatorul de *toxicitate umană* sunt particulele PM₁₀ și PM_{2,5}, oxizii de azot și amoniacul, eliberate în mediu la obținerea biogazului și a digestatului. Contribuția la *potențialul de încălzire globală* este asociată cu emisiile de: gaz metan, vapori de apă încălțați cu nitrați etc. în principal în etapele de producție precum digestia anaerobă, biosinteză și purificare. Digestia anaerobă are ca rezultat producția de biogaz, prin urmare o parte din energia consumată în proces este recuperată. Principalele substanțe chimice care influențează *potențialul de eutrofizare* sunt nutrienții care se găsesc în deșeurile organice: CCO și CBOs (emisii în apă), și NO_x (emisii în aer). Procesul de producție a PHAs contribuie foarte puțin la categoria de impact *schimbările climatice asociate deteriorării sănătății umane*. Emisiile care contribuie la această categorii de impact sunt SO₂, NO_x, care au însă valori cu circa două ordine de mărime mai mici decât în cazul procesului de producție a PVC. Rezultatele evaluării evidențiază generarea unor impacturi potențiale cu valori mari pentru categorie de impact *sănătatea umană – respirație* din cauza

emisiilor de SO₂ și NO₂, rezultate de la procesul de degradare anaerobă. Principalele substanțe care influențează *potențialul sănătatea umană – schimbări climatice* sunt nutrienții care se găsesc în deșeurile organice alimentare.

Studiul comparativ al impacturilor de mediu induse de procesul de producție a PHAs cu cele generate de procesul de producție a PVC a considerat rezultatele obținute prin aplicarea metodelor CML 2001, CML 1996, EDIP 1997, EDIP 2003, Eco-Indicator 95 și Eco-Indicator 99 din metodologia ECV, în mediul software GaBi. Analiza a arătat că diferențele depind de metoda aplicată.

Consumul de energie afectează majoritar categoriile de impact: *epuizarea resurselor abiotice* (ADP) și *potențialul de acidifiere* (AP) în procesul de obținere a PVC. Pentru procesul de obținere al PHAs impactul consumului de energie se manifestă de asemenea, prioritar prin categoriile ADP și AP, dar magnitudinea impactelor este cu circa 4-5 ordine de mărime mai mici față de cele rezultate în producția de PVC, ca o consecință a recuperării energiei sub formă de biogaz în faza de biodegradare anaerobă. Principalele substanțe care influențează potențialul de eutrofizare în procesul de obținere al PHAs sunt nutrienții care se găsesc în materia primă, CCO și CBO₅ (emisii în apă), și NO_x (emisii în aer), dar și această categorie de impact este cu circa 4 ordine de mărime mai mică în cazul procesului de producție a PHAs comparativ cu PVC. Procesul de obținere a PVC induce un impact semnificativ la categoria *epuizarea resurselor abiotice în principal ca o consecință a materiei prime utilizate*, fiind cu 5 ordine de mărime mai mare decât în cazul PHAs. **Se poate constata însă că diferența dintre magnitudinea unor categorii de impact asociate cu producția de PVC și, respectiv PHAs este de 2-3 ordine de mărime** atunci când se aplică metoda CML 96, față de metoda CML 2001 (unde diferența este de 4-5 ordine de mărime). **Impacturile rezultate din procesul de obținere a PHA referitoare la schimbările climatice asociate cu deteriorarea sănătății și a ecosistemelor sunt în general cu două ordine de mărime mai reduse** față de cele generate în procesul de producție a PVC, situație determinată în principal de utilizarea materiilor prime cu potențial recuperabil, a biopolimerilor care sunt biodegradabili și a biogazului obținut. **Diferențele rezultate din evaluarea cu metoda EDIP 2003 pentru categoria potențialul de acidifiere (AP) sunt cu 3-4 ordine de mărime mai mici decât în cazul metodei CML 2001.**

În a doua etapă a studiului, pentru evaluarea impacturilor induse în mediu de cele două procese (producția PHAs și producția PVC) s-au aplicat metodele din mediul software SimaPro și anume: CML 2001, Eco-Indicator 99, EDIP 2003, ReCiPe. **Toate categoriile de impact au valori pozitive, ceea ce înseamnă că efectele asupra mediului înconjurător sunt negative.**

Evaluarea impacturilor generate în mediu de procesul de producție a PVC a evidențiat impacturi semnificative în cazul categoriei *potențialul de epuizare a resurselor abiotice*, ca o consecință a consumului de energie pe bază de combustibili fosili în faza de producție și utilizării petrolului ca materie primă, în principalele faze ale procesului. Procesul de producție a PVC contribuie la încălzirea globală ca urmare a generării emisiilor de NO₂, COV, CH₄, SO₂ provenite în special de la etapa de polimerizare. Procesul induce efecte negative în mediu asociate cu categoriile de impact *potențialul cancerigen* și *sănătatea umană - respirație* care sunt consecința unor emisii de clor din etapa de electroliză a clorurii de sodiu. Emisiile de SO₂ și NO_x generate în special în timpul etapei de polimerizare contribuie la categoria de impact

potențialul de acidifiere. Prin aplicarea metodei amprente ecologice, specifică mediului software SimaPro se evidențiază faptul că indicatorul cu cel mai mare impact asupra mediului înconjurător este reprezentat de amprenta de carbon rezultată din emisiile de CO₂ sau echivalente din etapele de rafinare, omogenizare și polimerizare. Etapa de rafinare este cea care generează un impact major asupra mediului înconjurător din cauza emisiilor de CO₂.

Evaluarea impacturilor generate în mediu de procesul de producție a PHAs a evidențiat faptul că emisii de protoxid de azot (N₂O), compuși organici volatili (COV), amoniac (NH₄), dioxid de azot (NO₂) din etapa de degradare anaerobă, care, deși au valori relativ scăzute, contribuie la diferite categorii de impact precum: *potențialul de acidificare*, *potențialul de formare a ozonului fotochimic*, *potențialul de eutrofizare*. Emisiile de SO₂, NO_x, COV generate în etapele de degradare anaerobă, sinteză și extracție a PHAs au un impact negativ asupra categoriilor de impact *schimbări climatice asociate deteriorării sănătății umane* și *potențialul de toxicitate umană*. Emisiile de metan din etapa de degradare anaerobă sunt asociate *potențialului de formarea a ozonului* și *potențialului de toxicitate umană*.

Analiza comparativă a impactului asupra mediului induse de procesele de producție a PVC și PHAs a pus în evidență faptul că valorile categoriei de impact *schimbări climatice asociate deteriorării sănătății umane* sunt mai mici pentru producția de PHAs față de cele rezultate pentru producția de PVC. Pentru categoria *schimbări climatice asupra ecosistemului* impactul din procesul de obținere a PHA are o pondere mai mică față de PVC, determinată în principal de utilizarea materiilor prime cu potențial recuperabil, precum și a posibilității de degradare mai rapidă a biopolimerilor. În mediul software SimaPro a rezultat faptul că unele categorii de impact precum: *substanțe cancerigene*, *sănătatea umană - respirație*, *schimbări climatice* și *potențialul de acidifiere* au valori mai mari în cazul procesului de producție a PHAs, cauzate, în principal, de emisiile de NO_x, SO_x, COV rezultate din etapele de biosinteză și degradare anaerobă. Categoriile de impact *potențialul de acidificare*, *potențialul de eutrofizare acvatică*, *potențialul de toxicitate umană* au valori mici pentru procesul de obținere a PHA, determinate în principal de utilizarea materiilor prime cu potențial recuperabil (deșeuri organice), precum și a posibilității de degradare mai rapidă a biopolimerilor.

În a treia etapă a studiului s-a efectuat o analiză comparativă a impacturilor induse în mediu de procesul de producție a polihidroxialcanoatilor prin bioconversia deșeurilor organice biodegradabile cu cele generate de procesul de producție a policlorurii de vinil din monomeri pe bază de petrol, cuantificate folosind instrumentele software GaBi și, respectiv SimaPro, pentru a evidenția eventualele diferențe între SimaPro și GaBi care ar putea influența rezultatele și deciziile bazate pe acestea. S-a constatat că magnitudinea impacturilor cuantificate cu softul GaBi diferă de cele cuantificate în mediul software SimaPro, pentru ambele procese studiate, care pot proveni în principal din erori în bazele de date software, atât pentru inventarierea cât și evaluarea impactului.

E. Procesele de producție a polihidroxialcanoatilor și a policlorurii de vinil au fost evaluate aplicând analiza cost-beneficiu (ACB) în vederea determinării fezabilității economice a celor două procese și pentru evaluarea impacturilor economice, a costurilor și beneficiilor de mediu rezultate în procesul de valorificare prin bioconversie a deșeurilor organice cu obținere de PHAs și compararea cu procesul de producție a PHAs cu cel al PVC.

Analiza cost-beneficiu a celor două procese a indicat faptul că procesul de producție a PHAs este alternativa cea mai potrivită pentru implementare, deoarece aduce beneficii semnificative precum obținerea de energie și biomateriale și necesită un consum redus de materii prime, substanțe chimice, gaz natural. Procesul de producție a PVC are cea mai mare valoare a raportului cost - beneficiu și cea mai mică valoare a raportului beneficiu - cost, evidențiind faptul că induce un impact economic și costuri pentru mediu, ca urmare a consumului ridicat de petrol precum și a emisiilor și deșeurilor din plastic generate.

Analiza de sensibilitate a ținut cont de trei variabile: reducerea costurilor de exploatare (V1), reducerea costurilor privind consumul de energie (V2), reducerea costurilor de întreținere (V3). Valoarea negativă a ratei de rentabilitate a condus la concluzia că implementarea tehnologiei de obținere a policlorurii de vinil nu este rentabilă deoarece beneficiile rezultate sunt mai mici decât cheltuielile necesare investiției. Totodată, pentru rata de rentabilitate a procesului de obținere a policlorurii de vinil au rezultat valori pozitive, fapt ce a condus la concluzia că implementarea tehnologiei de obținere a PHAs prin valorificarea deșeurilor organice biodegradabile prin bioconversie este rentabilă, deoarece beneficiile rezultate sunt mai mari decât cheltuielile necesare investiției.

F. Analiza de decizie multicriterială (MCDA) a permis analiza integrată a performanțelor tehnico-economice și ecologice ale procesului de valorificare prin bioconversie a deșeurilor organice biodegradabile, comparativ cu procesul de producție a policlorurii de vinil, prin aplicarea două dintre metodologiile cel mai des folosite în cadrul analizei de decizie multicriterială, respectiv *Elimination Et Choix Traduisant la Réalité* (ELECTRE) și *Procesul Analitic Ierarhic* (AHP). Obiectivul principal al studiului a vizat evidențierea, într-o analiză integrată, a performanțelor tehnico-economice și ecologice ale procesului de producție a PHAs și compararea acestora cu procesul de producție a policlorurii de vinil și, eventual cu alte procese de obținere a unor biopolimeri.

Pentru îndeplinirea obiectivului principal s-au avut în vedere următoarele obiective specifice: (i) stabilirea opțiunilor și formularea problematicei care impune evaluarea pe baza metodologiilor MCDA; (ii) stabilirea criteriilor de analiză și anume: criterii economice, criterii tehnice, criterii de mediu; (iii) selectarea factorilor procesului decizional; (iv) parcurgerea etapelor de analiză; (v) evaluarea proceselor propuse spre analiză utilizând metoda ELECTRE; (vi) evaluarea proceselor propuse spre analiză utilizând metoda Procesul Analitic Ierarhic (AHP); (vi) interpretarea rezultatelor și formularea de recomandări pentru luarea deciziilor.

Pentru a lărgi sfera de comparație a performanței integrate a proceselor de producție, metodologia ELECTRE au fost aplicată pentru evaluarea a 4 variante de procese: (V₁) procesul de producție a polimerului de tip policlorură de vinil (PVC), (V₂) procesul de producție de biopolimeri de tip polihidroxialcanoati (PHA), (V₃) procesul de producție de biopolimeri din acid polilactic (PLA), (V₄) procesul de producție de biopolimeri din amidon (BA). La baza stabilirii acestor variante au stat următoarele criterii: C₁ – beneficiul realizat prin aplicarea soluției (exprimat în valoarea monetară, Euro); C₂ – armonizarea cu prioritățile legislației UE, respective Directiva Cadru a Deșeurilor 2008/98, Ierarhia managementului deșeurilor (exprimat în calificative); C₃ – magnitudinea degradării produsului finit obținut (exprimată în calificative); C₄ – costuri de implementare ale proiectului (exprimate în valoarea monetară, Euro); C₅ –

cantitatea de deșeuri recuperate (exprimată în %); C_6 – energie recuperată din deșeuri organice alimentare (exprimată în %). Fiecare variantă $V_1 - V_4$ a fost apreciată în funcție de criteriile $C_1 - C_6$ stabilite, iar cu ajutorul calificativelor acordate s-a construit *matricea consecințelor* și, respective, *matricea notelor*. Alegerea variantei optime dintre setul de variante analizate s-a realizat utilizând *metoda diferenței* care a constatat în însumarea valorilor obținute pentru indicatorii de concordanță și discordanță pentru fiecare variantă propusă.

Ierarhia rezultată pentru cele patru variante este următoarea: $V_2 > V_4 > V_1 > V_3$. Prin urmare, alternativa bazată pe producția de polihidroxialcanoati prin bioconversia deșeurilor organice biodegradabile reprezintă cea mai promițătoare variantă de producție din punct de vedere tehnico-economic și ecologic, deoarece implică valorificarea a deșeurilor organice biodegradabile. Această alternativă este urmată de varianta care implică obținerea de biopolimeri din amidon. Alternativele cu rezultatele cele mai puțin favorabile pentru selecție din punct de vedere tehnico-economic și ecologic sunt obținerea de policlorură de vinil și de acid polilactic.

Metodologia *Procesul Analitic Ierarhic* (AHP) sprijină procesul de decizie și factorii decizionali pe baza unui set de criterii care integrează problemele tehnico-economice, ecologice și sociale. Aplicarea metodologiei AHP a implicat evaluarea unui set de criterii economice (costuri, beneficii, dinamica pieței, gradul de utilizare a terenurilor), de mediu (potențialul de acidifiere, potențialul de eutrofizare, potențialul de toxicitate umană, potențialul de încălzire globală) și tehnice (adaptabilitate, consum de energie, produse ecologice, subproduse energetice).

Metodologia AHP a fost aplicată prin intermediul a două metode: *Ranking și Rating* și *compararea prin perechi*. Rezultatele obținute au evidențiat procesul cel mai adecvat pentru implementare luând în considerare cele trei criterii selectate la începutul studiului – economice, tehnice și de mediu. Metoda *Ranking și Rating* a fost aplicată pentru identificarea și selectarea criteriilor și indicatorilor relevanți pentru evaluarea sistemelor analizate. Criteriile de decizie sunt evaluate prin intermediul unor scoruri particulare metodelor *Ranking și Rating*. Conform rezultatelor scorului final obținut s-a constatat că procesul de producție a PHA este mai eficient decât procesul de producție a PVC din punct de vedere al criteriilor tehnico-economice și ecologice. Rezultatul obținut este influențat de consumului de petrol ca materie primă – o resursă neregenerabilă în procesul de obținere a PVC care generează aspectele și impacturile de mediu. Comparând rezultatele obținute pentru cele două procese se poate constata că procesul de obținere a PHAs este o soluție sustenabilă pentru producția de noi materiale și energie prin valorificarea deșeurilor organice biodegradabile.

Metoda *comparației prin perechi* a implicat estimări comparative *unu-la-unu* între fiecare dintre indicatorii avuți în vedere la evaluarea alternativelor, cu sprijinul echipei de experți care a stabilit importanța relativă a fiecărei perechi de indicatori în ceea ce privește criteriul care le măsoară, prin compararea fiecărui indicator față de ceilalți indicatori relevanți pentru criteriile de care aparține (criterii economice, tehnice sau de mediu). După compararea indicatorilor au fost elaborate matrici de comparare a criteriilor pentru fiecare scenariu. În urma analizei rezultatelor obținute prin aplicarea metodei *comparației prin perechi* s-a constatat că procesul de producție a policlorurii de vinil are o performanță mai scăzută din punct de vedere al criteriilor selectate – economice, de mediu și tehnice comparativ cu procesul de producție a polihidroxialcanoatilor. În

cazul procesului de obținere a polihidroxiclcanoatilor s-au obținut valori care semnifică o performanță mai bună a procesului. Diferența scorurilor finale de performanță este de circa două procente, dar ambele procese de producție sunt cotate cu scoruri mai mari de 3, care indică faptul că ambele alternative sunt acceptabile, fiind la nivelul normelor sau peste normele referitoare la buna operare în regiune.

În urma analizării rezultatelor obținute pentru cele două procese s-a observat că procesul de obținere a PHAs oferă soluții sustenabile de valorificare a deșeurilor organice alimentare prin obținerea de biomateriale – biopolimeri și bioenergie – biogaz și biohidrogen.

Analiza impacturilor generate în mediu de consumul/producția de resurse energetice în procesele de producție a PHAs și PVC a fost realizată pentru a accentua diferențele existente între cele două procese de producție din punct de vedere energetic. În acest scop s-au estimat o serie de categorii de impact prin aplicarea a două metode din cadrul metodologiei evaluării ciclului de viață (ECV) și anume CML 2001 și ReCiPe. Analiza a fost considerată necesară deoarece, în capitolele anterioare (2-4) s-a demonstrat că valorificarea prin bioconversie a deșeurilor organice biodegradabile este o alternativă fezabilă din punct de vedere tehnico-economic și al mediului înconjurător și că, pe lângă avantajele generate de transformarea deșeurilor în resurse, procesul de producție al PHAs este avantajos și din punct de vedere energetic, deoarece în procesul de biodegradare se generează gaze care pot fi utilizate drept biocombustibili (biogaz sau biohidrogen). Pe de altă parte, producția de PVC este dependentă de petrol, ca sursă de materii prime și energie pentru desfășurarea procesului de producție.

Analiza impacturilor generate în mediu de resursele energetice (consumate/generate) în procesele de producție a PHAs și PVC s-a realizat prin metodele asociate evaluării ciclului de viață (ECV). Analiza inventarului ciclului de viață a implicat proceduri în acord cu standardele ISO 14000, pentru colectarea și calculul datelor necesare, specifice bilanțurilor de materiale ale proceselor de obținere a PVC și PHAs, care au fost incluse în inventar și organizate pe categorii de intrări și ieșiri.

Studiul a fost realizat în mediul software GaBi dedicat analizei ciclului de viață. Din grupul de metodologii ECV incluse în Gabi, s-au utilizat metodologiile CML 2001 și ReCiPe08 pentru calcularea impacturilor potențiale de mediu. Toate rezultatele obținute în cadrul metodologiilor utilizate au fost normalizate.

Toate categoriile de impact analizate cu metoda CML 2001 pentru procesul de obținere a PVC au valori pozitive, ceea ce înseamnă că impactul asupra mediului înconjurător este negativ. Ordinea în care descresc categoriile de impact cuantificate este următoarea: **GWP>ADP>AP>EP**. Analiza aceluiași categorii de impact pentru procesul de obținere a PHAs a condus la valori negative, ceea ce înseamnă că, din punct de vedere energetic procesul de producție a PHAs generează efecte pozitive în mediu. Ordinea în care descresc impacturile este următoarea: **AP>ADP>GWP>EP**. Procesul de obținere a PVC este caracterizat de valori ridicate pentru *potențialul de epuizare a resurselor abiotice* și *potențialul de încălzire globală* din cauza consumului ridicat de petrol utilizat ca materie primă și a gazelor cu efect de seră generate în process.

Toate categoriile de impact analizate pentru procesul de obținere a PVC cu metoda ReCiPe au valori pozitive, ceea ce înseamnă că efectele în mediul înconjurător sunt negative, cu

următoarea ierarhie: **CcHh>CcE>HT>PMF**. În cazul aceluiași categorii de impact, dar induse de procesul de producție a PHAs s-au obținut valori negative, ceea ce înseamnă că procesul de producție a PHAs induce efecte pozitive în mediu, care descresc în următoarea ordine: **HT>CcHh>PMF>CcE**.

Analiza efectuată în acest capitol a confirmat avantajele utilizării deșeurilor organice biodegradabile ca resurse materiale, dar și energetice în sensul că producția polihidroxicarboxilicilor prin bioconversia deșeurilor este însoțită de generarea de biogaz, a cărui producție și utilizează generează impacturi pozitive în mediul înconjurător.

Teza de doctorat "*Instrumente pentru luarea deciziilor în utilizarea durabilă a deșeurilor ca resurse naturale și energetice*" este primul studiu elaborat în România pentru evaluarea proceselor de producție a două tipuri de materiale plastice: policlorura de vinil (PVC), din materii prime pe bază de resurse neregenerabile și polihidroxicarboxilici (PHAs), din deșeuri organice reciclate, transformate prin bioprocese aerobe și/sau anaerobe din perspectiva dezvoltării durabile în vederea obținerii de biomateriale și energie, utilizând instrumente de luare a deciziilor de mediu.

Studiul realizat în teza de doctorat a condus la concluzia că datele obținute pot fi utilizate ca suport pentru luarea deciziei de valorificare a deșeurilor organice prin bioconversia deșeurilor organice (alimentare) pentru obținerea de bioplastice și bioenergie printr-un proces de producție cu bune performanțe economice, ecologice și sociale.

BIBLIOGRAFIE SELECTIVĂ

- Arancon R.A.D., Lin C.S.K., Chan K.M., Kwan T.H., Luque R., (2013), Advances on waste valorization: new horizons for a more sustainable society, *Energy Science and Engineering*, **1**, 53-71.
- Barr S., (2016), *Environment and Society: Sustainability, Policy and the Citizen*, Routledge, USA.
- Blumberga A., (2010), Basics of system dynamics modeling, Integration of system dynamics into environmental policy, RTU VASSI, Riga, 74-158.
- Buchanan J., Sheppard P., (2012), Ranking Projects Using the ELECTRE Method, On line at: <http://www.orsnz.org.nz/conf33/papers/p58.pdf>.
- Chemel C., Riesenmey C., Batton-Hubert M., Vaillant H. (2012), Odour-impact assessment around a landfill site from weather-type classification, complaint inventory and numerical simulation, *Journal of Environmental Management*, **93**, 85-94.
- COM 111, (2008), Green Paper on the management of bio-waste in the European Union, Comisia Europeană, Brussels, On line at: <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:52008DC0811&from=EN>.
- Coteur I., Marchand F., Debruyne L., Dalemans F., Lauwers L., (2015) A framework for guiding sustainability assessment and on-farm strategic decision making, *Environmental Impact Assessment Review*, **60**, 16-23.
- De Feo G., De Gisi S., Williams I.D, (2013), Public perception of odour and environmental pollution attributed to MSW treatment and disposal facilities: a case study, *Waste Management*, **33**, 974-987.
- Directiva 156, (1991), Directiva nr. 156/1991 de modificare a Directivei 75/442/CEE privind deșeurile, On line la: <http://lege5.ro/en/Gratuit/gi3dqmzugi/directiva-nr-156-1991-de-modificare-a-directivei-75-442-cee-privind-deseurile>.

- Directiva 98, (2008), Directiva 2008/98/CE a Parlamentului European și a Consiliului din 19 noiembrie 2008 privind deșeurile și de abrogare a anumitor directive, On line la: http://www.ecoteca.ro/wp-content/uploads/2012/01/Dir_EU_2008_98_privind-regimul-deseurilor.pdf.
- Directiva CE 1127, (2015), Directiva (UE) 2015/1127 a Comisiei din 10 iulie 2015 de modificare a anexei II la Directiva 2008/98/CE a Parlamentului European și a Consiliului privind deșeurile și de abrogare a anumitor directive (Text cu relevanță pentru SEE), *Official Journal*, **L 184**, 11.7.2015, p. 13–15.
- Directiva CE 31, (1999), Directiva 1999/31/CE a Consiliului din 26 aprilie 1999 privind depozitele de deșeuri, *Official Journal*, **L 182**, 16.7.1999, p. 1–19
- Directiva CE 31, (1999), Directiva 1999/31/CE a Consiliului din 26 aprilie 1999 privind depozitele de deșeuri, *Official Journal*, **L 182**, 16.7.1999, p. 1–19
- Directiva CE 442, (1975), Council Directive of 15 July 1975 on waste (75/442/EEC), *Official Journal*, **L194**, 25.7.1975.
- Directiva CE 442, (1975), Council Directive of 15 July 1975 on waste (75/442/EEC), *Official Journal*, **L194**, 25.7.1975.
- Doumpos M., Marinakis Y., Marinaki M., Zopounidis C., (2009), En evolutionary aproach to construction of outranking models for multicriteria classification: The case of the Electre tri method, *European Journal of Operational Research*, **199**, 496–505.
- EPA, (2005), Impact categories, normalization and weighting in LCA, Environmental News, No. 78, Environment Protection Agency, Copenhagen, Denmark.
- Evers M., Jonoski A., Almoradie A., Lange L., (2016), Collaborative decision making in sustainable flood risk management: A socio-technical approach and tools for participatory governance, *Environmental Science and Policy*, **55**, 335–344.
- Figueira J.R., Greco S., Roy B., (2009), ELECTRE methods with interaction between criteria: An extension of the concordance index, *European Journal of Operational Research*, **199**, 478–495.
- Figueira J.R., Greco S., Roy B., Słowiński R., (2013), An overview of ELECTRE methods and their recent extensions, *Journal of Multi-Criteria Decision Analysis*, **20**, 61–85.
- Forman E.H., Gass S.I., (2001), The Analytic Hierarchy Process - an exposition, *Operations Research*, **49**, 469–486.
- Fülöp J., (2005), Introduction to Decision Making Methods. Working Paper 05-6, Laboratory of Operations Research and Decision Systems, Computer and Automation Institute, Hungarian Academy of Sciences, Budapest, On line at: <http://academic.evergreen.edu/projects/bdei/documents/decisionmakingmethods.pdf>
- Gregory M.R., (2009), Environmental implications of plastic debris in marine settings-entanglement, ingestion, smothering, hangers-on, hitch-hiking and alien invasions, *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, **364**, 2013–2025.
- Gupta M., Mohanty B.K., (2016), An algorithmic approach to group decision making problems under fuzzy and dynamic environment, *Expert Systems with Applications*, **55**, 118–132.
- Heaney C.D., Wing S., Campbell R.L., Caldwell D., Hopkins B., Richardson D., (2011), Relation between malodor, ambient hydrogen sulfide, and health in a community bordering a landfill, *Environmental Research*, **111**, 847–852.
- Heaney C.D., Wing S., Campbell R.L., Caldwell D., Hopkins B., Richardson D., (2011), Relation between malodor, ambient hydrogen sulfide, and health in a community bordering a landfill, *Environmental Research*, **111**, 847–852.
- HG 349, (2005), Hotărârea nr. 349/2005 privind depozitarea deșeurilor, *Monitorul Oficial al României*, Nr. 394/10 mai 2005.
- Kranert M., Gottschall R., Bruns C., Hafner G., (2010), Energy or compost from green waste? – a CO₂-based assessment, *Waste Management*, **30**, pp. 697–701.
- Kummu M., de Moel H., Porkka M., Siebert S., Varis O., Ward P.J., (2012), Lost food, wasted resources: global food supply chain losses and their impacts on freshwater, cropland, and fertiliser use, *Science of the Total Environment*, **438**, 477–489.
- Legea 211, (2011), Legea 211/2011 privind regimul deșeurilor, republicată în 2014, republicată, *Monitorul Oficial*, Partea I, nr. 220/28 martie 2014.
- Li S.X., Wang Z.H., Li S.Q., Gao Y.J., Tian X.H., (2013), Effect of plastic sheet mulch, wheat straw mulch, and maize growth on water loss by evaporation in dryland areas of China, *Agricultural Water Management*, **116**, 39–49.

- Lopeza D., Froesea 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.
- Lupu L., (2012), Curs de Management Organizațional și Performanțe Ecologice.
- Magdouli S., Brar S.K., Blais J.F., Tyagi R.D., (2015), How to direct the fatty acid biosynthesis towards polyhydroxyalkanoates production?, *Biomass and Bioenergy*, **74**, 268–279.
- Malkow T., (2007), Novel and innovative pyrolysis and gasification technologies for energy efficient and environmentally sound MSW disposal, *Waste Management*, **24**, 53–79.
- Martuzzi M., Mitis F., Forastiere F., (2010), Inequalities, inequities, environmental justice in waste management and health, *European Journal of Public Health*, **20**, 21–26.
- Mendoza G.A., Macoun P., Prabhu R., Sukadri D., Purnomo H., Hartanto H., (1999), *Guidelines for Applying Multi-Criteria Analysis to the Assessment of Criteria and Indicators*, Center for International Forestry Research, Jakarta, Indonesia.
- Oros V., Draghici C., (2002), *Managementul deșeurilor*, Editura Universității Transilvania Brasov.
- Palmiotto M., Fattore E., Paiano V., Celeste G., Colombo A., Davoli E. (2014), Influence of a municipal solid waste landfill in the surrounding environment: Toxicological risk and odor nuisance effects, *Environment International*, **68**, 16–24.
- PE International (2012b), Gabi Professional Databases, On line la: <http://www.pe-international.com/nw-eu-english/index/>.
- PE International, (2012a), GaBi Handbook and GaBi Modelling Principles, On line la: www.gabi-software.com.
- Petraru M., Gavrilăscu M., (2010), Pollution prevention, a key to economic and environmental sustainability, *Environmental Engineering and Management Journal*, **9**, 597-614.
- Qu J., Meng X., You H., (2016), Multi-stage ranking of emergency technology alternatives for water source pollution accidents using a fuzzy group decision making tool, *Journal of Hazardous Materials*, **310**, 68–81.
- Reddy C.S.K., Ghai R., Kalia V.C., (2003), Polyhydroxyalkanoates: an overview, *Bioresource Technology*, **87**, 137–146.
- Saaty T., (2008), Decision making with the analytic hierarchy process, *International Journal of Services Sciences*, **1**, 83-98.
- Saisinchai S., (2013), Separation of PVC from PET/PVC mixtures using flotation by calcium lignosulfonate depressant, *Engineering Journal*, **18**, 45–54.
- Tabasová A., Kropáča J., Kermesa V., Nemetb A., Stehlíka P., (2012), Waste-to-energy technologies: Impact on environment, *Energy*, **44**, 146–155.
- Turner D.A., Williams I.D., Kemp S., (2016), Combined material flow analysis and life cycle assessment as a support tool for solid waste management decision making, *Journal of Cleaner Production*, **129**, 234–248.
- Veeken A., (2011), Gestiunea deșeurilor menajere biodegradabile, Twinning Project -RO/2006/IB/EN06-Romania-North East Region,
- Wenzel H., Hauschild M., Alting L., (1997), *Environmental Assessment of Products*, vol. 1. *Methodology, Tools and Case Studies in Product Development*, Chapman and Hall, Londra, UK.

ACTIVITATEA ȘTIINȚIFICĂ

Activitatea de cercetare științifică desfășurată s-a concretizat în:

- elaborarea unui capitol de carte;
- elaborarea a 4 articole publicate în reviste cotate ISI;
- elaborarea a 4 articole publicate în reviste CNCSIS (B+);
- elaborarea a 2 articole publicate în ISI Proceedings
- participarea la 4 conferințe naționale și 9 internaționale (cu 2 comunicări orale și 25 postere) și 6 participări la workshopuri de profil.
- participarea la Școala de Vară *China Sino – EU pentru Logistică, Informații, Management și Știință*, Beijing, China (2015)
- efectuarea unui stagiu de cercetare de trei luni la Universitatea *Alma Mater Studiorum* din Bologna – DICAM (februarie - aprilie 2016).

a. Lucrări publicate în reviste cotate ISI

1. Cristina Ghinea, Elena Niculina Dragoi, **Elena-Diana Comaniță**, Marius Gavrilescu, Teofil Campean, Silvia Curteanu, Maria Gavrilescu, (2016), Forecasting municipal solid waste generation using prognostic tools and regression analysis, *Journal of Environmental Management*, **182**, 80-93. **(IF 3.131)**
2. **Elena-Diana Comaniță**, Cristina Ghinea, Raluca Maria Hlihor, Maria Gavrilescu, (2016), Occurrence of plastic waste in the environment: ecological and health risks, *Environmental Engineering and Management Journal*, **3**, 675 – 687. **(IF 1.008)**
3. **Elena-Diana Comaniță**, Cristina Ghinea, Raluca Maria Hlihor, Isabela Maria Simion, Camelia Smaranda, Lidia Favier, Mihaela Roșca, Irina Gostin, Maria Gavrilescu, (2015), Challenges and opportunities in green plastics: An assessment using the ELECTRE decision-aid method, *Environmental Engineering and Management Journal*, **14**, 689-702. **(IF 1.008)**
4. Maria Valentina Dinu, **Elena Diana Comăniță**, Ecaterina Stela Drăgan, (2012), Kinetic study on heavy metals adsorption by iminodiacetate chelating resins, *Environmental Engineering and Management Journal*, **11**, 1587-1594. **(IF 1.008)**

b. Lucrări publicate în ISI Proceedings

1. **Elena-Diana Comaniță**, Cristina Ghinea, Mihaela Roșca, Isabela Maria Simion, Madalina Petraru, Maria Gavrilescu, (2015), Environmental impacts of polyvinyl chloride (PVC) production process, E-Health and Bioengineering Conference (EHB), doi: 10.1109/EHB.2015.7391486.
2. Mihaela Roșca, Raluca - Maria Hlihor, Petronela Cozma, **Elena - Diana Comăniță**, Isabela Maria Simion, Maria Gavrilescu, Potential of biosorption and bioaccumulation processes for heavy metals removal in bioreactors, E-Health and Bioengineering Conference (EHB), doi: 10.1109/EHB.2015.7391486.

c. Lucrări publicate în reviste CNCSIS (B+)

1. Cristina Ghinea, **Diana Elena Comanita**, Petronela Cozma, Hans Th. A. Bressers, Maria Gavrilescu, (2014), Evaluation of Solid Waste Management Scenarios Using Analytic Hierarchy Process (AHP) Technique”, *Bulletin of the Polytechnic Institute of Iasi, Section Chemistry and Chemical Engineering*, ISSN 0254-7104, 81-89.

2. Camelia Smaranda, **Elena-Diana Comăniță**, Laura Carmen Apostol, Maria Gavrilescu, (2014) Assessment of *Phaseolus Vulgaris L.* Biomass as low-cost adsorbent for the removal of congo red dye from aqueous solutions, *Scientific Papers – Agronomy Series*, **57**, 231-236.

3. Cristina Ghinea, Andreea Spranceana, **Diana Elena Comanita**, Gabriela Constantinescu, Maria Gavrilescu, (2015), Assessment of environmental impacts of municipal solid waste management in Iasi, Romania, *Food and Environmental Safety*, **XIV**, 171 – 180.

4. **Elena Diana Comanita**, Cristina Ghinea, Mihaela Roșca, Camelia Smaranda, Lidia Favier, Irina Gostin, Stefania Iordache, Maria Gavrilescu, Impacts on climate change generated by polyvinyl chloride (Pvc) and polyhydroxyalkanoates (PHAs) production: A comparative approach, *Scientific Papers – Agronomy Series*, **58**, 253-260.

d. Capitole carte:

E.D. Comaniță, M. Roșca, M. Gavrilescu, (2014), *Compușii organici în atmosferă din diverse surse de emisie și impactul lor asupra sănătății*, In: *Metode de evaluare a efectelor poluării aerului cu particule în suspensie asupra sănătății copiilor*, Editori: S. Iordache, D. Dunea, MatrixRom, 221-266.

Teza de doctorat a fost realizată cu sprijinul financiar al proiectului „Sistem integrat de îmbunătățire a calității cercetării doctorale și postdoctorale din România și de promovare a rolului științei în societate”, POSDRU/159/1.5/S/133652, finanțat prin Fondul Social European, Programul Operațional Sectorial Dezvoltarea Resurselor Umane 2007-2013.