

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

**Școala Doctorală a Facultății de Inginerie  
Chimică și Protecția Mediului "Cristofor  
Simionescu"**



# **VALORIFICAREA SUSTENABILĂ A NĂMOLURILOR DIN STAȚIILE DE EPURARE**

**Teză de doctorat – Rezumat extins**

**Coordonatori științifici:**

**Prof.univ.dr.ing. Carmen TEODOSIU**

**Conf.dr.habil.ing. Sabino DE GISI**

**Doctorand:**

**Ing. Andreea GHERGHEL**

***Iași, 2020***

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

Către

---

Vă facem cunoscut că, în ziua de **20 Noiembrie 2020** la ora **12.00**, la adresa de link: <https://teams.microsoft.com/l/team/19%3a47fb39fb4be74247994c3c3714fdaf74%40thread.tacv2/conversations?groupId=c077108e-984b-4843-8f20-359308794b7e&tenantId=607d63ca-9f36-4ad8-9f71-8b3efc392eb1>, va avea loc **susținerea publică online** a tezei de doctorat intitulată:

**"SUSTAINABLE VALORISATION OF WASTEWATER SLUDGE (VALORIFICAREA SUSTENABILĂ A NĂMOLURILOR DIN STAȚIILE DE EPURARE)"**

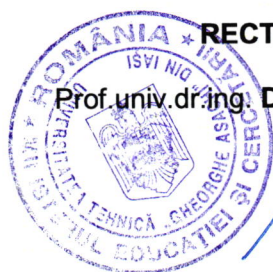
elaborată de domnișoara **Andreea Gherghel** în vederea conferirii titlului științific de doctor.

Comisia de doctorat este alcătuită din:

- |                                                     |                     |
|-----------------------------------------------------|---------------------|
| 1. Prof.univ.dr.habil.ing. <b>Irina Volf</b>        | președinte          |
| Universitatea Tehnică „Gheorghe Asachi” din Iași    |                     |
| 2. Prof.univ.dr.ing. <b>Carmen Teodosiu</b>         | conducător doctorat |
| Universitatea Tehnică „Gheorghe Asachi” din Iași    |                     |
| 3. Conf.dr.habil.ing. <b>Sabino De Gisi</b>         | conducător doctorat |
| Politecnico di Bari, Italia                         |                     |
| 4. Prof.univ.dr.habil.ing. <b>Cristina Orbeci</b>   | referent oficial    |
| Universitatea Politehnică București                 |                     |
| 5. Prof.univ.dr.habil.ing. <b>Florica Manea</b>     | referent oficial    |
| Universitatea Politehnică Timișoara                 |                     |
| 6. Conf.univ.dr.ing. <b>Brîndușa Mihaela Slușer</b> | referent oficial    |
| Universitatea Tehnică „Gheorghe Asachi” din Iași    |                     |

Cu această ocazie vă invităm să participați la susținerea publică online a tezei de doctorat accesând link-ul:

<https://teams.microsoft.com/l/team/19%3a47fb39fb4be74247994c3c3714fdaf74%40thread.tacv2/conversations?groupId=c077108e-984b-4843-8f20-359308794b7e&tenantId=607d63ca-9f36-4ad8-9f71-8b3efc392eb1>.



**RECTOR,**

Prof.univ.dr.ing. **DAN CAȘCAVAL**

**Secretar universitate,**

Ing. Cristina Nagiț

## **Mulțumiri**

*Această teză de doctorat este rezultatul a 4 ani de eforturi susținute și a fost realizată sub îndrumarea competentă a celor doi conducători de doctorat.*

*În primul rând, aș dori să-mi exprim recunoștința, adresând mulțumiri doamnei prof.univ.dr.ing. **Carmen Teodosiu** pentru sprijinul și îndrumarea acordate pe întreaga perioadă de pregătire a tezei de doctorat, în calitate de conducător științific. M-am simțit onorată să lucrez sub coordonarea unei persoane atât de profesioniste și cu o experiență atât de vastă.*

*Mulțumirile mele se îndreaptă și către domnul conf.dr.habil.ing. **Sabino De Gisi**, din cadrul Politecnico di Bari, Italia pentru acceptul de a co-superviza această lucrare, pentru îndrumarea competentă și pentru sprijinul oferit pe durata stagiului de cercetare.*

*Recunoștința mea se îndreaptă către toți membrii comisiei de îndrumare, către întregul personal din cadrul Departamentului de Ingineria și Managementul Mediului, precum și cel al Facultății de Inginerie Chimică și Protecția Mediului „Cristofor Simionescu” pentru formarea mea ca specialist, pentru sprijinul și suportul lor constant.*

*Tuturor colegilor și prietenilor le mulțumesc pentru momentele frumoase pe care le-am petrecut împreună.*

*În cele din urmă, doresc să mulțumesc familiei mele pentru toată dragostea și sprijinul acordat în toți acești ani. Vă iubesc pe toți!*

# CUPRINS

|                                                                                                    |           |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>INTRODUCTION.....</b>                                                                           | <b>6</b>  |
| Aim and objectives of the study .....                                                              | 8         |
| Structure of the PhD Thesis .....                                                                  | 10        |
| <b>CHAPTER 1. STATE-OF-THE-ART ON THE PRACTICES OF WASTEWATER SLUDGE<br/>MANAGEMENT (WWS).....</b> | <b>12</b> |
| 1.1. Wastewater sludge production .....                                                            | 12        |
| 1.2. Sludge treatment and disposal practices.....                                                  | 20        |
| 1.3. Legislative framework on wastewater sludge management.....                                    | 25        |
| 1.3.1. International and European legislation and standards .....                                  | 25        |
| 1.3.2. Particularities in the Romanian and Italian wastewater sludge legislation.....              | 27        |
| 1.4. Trends in the sustainable wastewater sludge management .....                                  | 30        |
| 1.4.1. Technologies used for resources/energy recovery from sewage sludge.....                     | 30        |
| 1.4.2. Materials recovery from sewage sludge .....                                                 | 41        |
| 1.4.2.1. Nutrients .....                                                                           | 41        |
| 1.4.2.2. Adsorbents.....                                                                           | 44        |
| 1.4.2.3. Construction materials .....                                                              | 46        |
| 1.4.2.4. Heavy metals .....                                                                        | 48        |
| 1.4.2.5. Proteins.....                                                                             | 48        |
| 1.4.2.6. Enzymes .....                                                                             | 49        |
| 1.4.2.7. Bio-plastics .....                                                                        | 50        |
| 1.4.3. Energy recovery from sewage sludge .....                                                    | 50        |
| 1.4.3.1. Biogas.....                                                                               | 50        |
| 1.4.3.2. Energy from biofuels .....                                                                | 52        |
| <b>CHAPTER 2. METHODOLOGIES FOR ASSESSING THE PERFORMANCES OF WWS<br/>MANAGEMENT SYSTEMS .....</b> | <b>56</b> |
| 2.1. Methodology according to a mono-criteria approach.....                                        | 56        |
| 2.1.1. Energy Performance and Carbon Emissions Assessment and Monitoring (ECAM).....               | 56        |
| 2.1.2. GHG assessment.....                                                                         | 60        |
| 2.1.2.1. Direct GHG emissions assessment.....                                                      | 61        |
| 2.1.2.2. Indirect GHG emissions assessment .....                                                   | 63        |
| 2.1.3. Performance indicators .....                                                                | 64        |
| 2.2. Methodology according to a multi-criteria approach .....                                      | 65        |
| 2.2.1 Background and Multi-Criteria Decision Analysis (MCDA) methods .....                         | 65        |
| 2.2.2. Analytic Hierarchy Process (AHP).....                                                       | 69        |
| 2.2.3. Composite indicator construction .....                                                      | 71        |

|                                                                                                                                      |            |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>CHAPTER 3. SUSTAINABLE DESIGN OF A MUNICIPAL WASTEWATER TREATMENT PLANT BASED ON MULTI-CRITERIA DECISION ANALYSIS.....</b>        | <b>74</b>  |
| 3.1. MCDA framework definition .....                                                                                                 | 75         |
| 3.2. Municipal wastewater treatment alternative schemes .....                                                                        | 75         |
| 3.3. Evaluation criteria and development of the composite indicator .....                                                            | 83         |
| 3.4. Results and discussion .....                                                                                                    | 88         |
| 3.4.1. The stakeholders' points of view .....                                                                                        | 88         |
| 3.4.2. The impartiality of the alternatives matrix .....                                                                             | 91         |
| 3.4.3. Multi-criteria problem resolution .....                                                                                       | 99         |
| 3.5. Partial conclusions .....                                                                                                       | 101        |
| <b>CHAPTER 4. SUSTAINABILITY ASSESSMENT OF A ROMANIAN WASTEWATER SLUDGE MANAGEMENT SYSTEM. CASE STUDY: SC APAVITAL SA, IAȘI.....</b> | <b>104</b> |
| 4.1. Environmental assessment of the WWS management system.....                                                                      | 104        |
| 4.2. Wastewater sludge management in Romania .....                                                                                   | 105        |
| 4.3. Methodological approach .....                                                                                                   | 109        |
| 4.3.1. Framework.....                                                                                                                | 109        |
| 4.3.2. Iași MWWTP data influent and effluent wastewater characterization.....                                                        | 110        |
| 4.3.3. ECAM Assessment .....                                                                                                         | 115        |
| 4.4. Results and discussion .....                                                                                                    | 118        |
| 4.4.1. Evaluation of GHG emissions .....                                                                                             | 118        |
| 4.4.2. Evaluation of energy consumption .....                                                                                        | 121        |
| 4.4.3. Scenarios development to enhance Iași MWWTPs performances .....                                                               | 122        |
| 4.5. Partial conclusions .....                                                                                                       | 124        |
| <b>CHAPTER 5. GENERAL CONCLUSIONS.....</b>                                                                                           | <b>126</b> |
| <b>REFERENCES.....</b>                                                                                                               | <b>132</b> |
| <b>SCIENTIFIC ACTIVITY .....</b>                                                                                                     | <b>152</b> |

*Notă: numerotarea capitolelor, tabelelor, figurilor și abrevierile sunt cele corespunzătoare tezei de doctorat complete.*

## INTRODUCERE

Unele dintre problemele globale cu care se confruntă omenirea la începutul mileniului al treilea sunt: lipsa apei, degradarea calității sale și modificările din ciclul apei în contextul schimbărilor climatice. Activitatea umană și dezvoltarea economică pun presiune asupra resurselor de apă, care sunt distribuite neuniform pe suprafața Pământului. Mai mult, urbanizarea accelerată, extinderea sistemelor municipale de alimentare cu apă și canalizare, precum și schimbările climatice contribuie la creșterea consumului, făcând mai vizibile discrepanțele dintre aprovizionarea cu apă și cererea de apă. La nivel global, se preconizează că cererea de apă va crește semnificativ în deceniile următoare. După o monitorizare extinsă a "crizei apei", desfășurată pe parcursul a cinci ani, Forumul Economic Mondial a ajuns la concluzia că această criză constituie un risc global care va deveni o preocupare majoră în următorii ani, atât pentru oameni cât și pentru economii (WEF, 2016).

În general, în contextul deficitului de apă, din punct de vedere social și politic, managementul apelor uzate primește mai puțină atenție în comparație cu sectorul de alimentare cu apă, deși cele două sunt legate intrinsec. Apele uzate au un impact negativ ridicat asupra sustenabilității sistemului de alimentare cu apă, a sănătății umane, a economiei și a mediului înconjurător (UNWWD, 2017). Conform bazei de date FAO's AQUASTAT (2016), 56% ( $2.212 \text{ km}^3 / \text{an}$ ;  $1 \text{ km}^3 = 1.0 \times 10^9 \text{ m}^3$ ) din captările globale de apă dulce ( $3.928 \text{ km}^3/\text{an}$ ) sunt eliberate în mediu ca ape uzate (sub formă de efluenți industriali și ape agricole de drenaj) iar restul de 44% ( $1.716 \text{ km}^3/\text{an}$ ) sunt consumate în agricultură, pentru irigarea terenurilor. Deversările crescute de ape uzate industriale epurate necorespunzător, ape uzate neepurate și infiltrațiile de ape uzate provenite din activități agricole (de pe soluri direct în pânza de apă freatică) au dus la degradarea calității apei în întreaga lume. Chiar și astăzi, în multe țări dezvoltate, majoritatea apelor uzate sunt evacuate direct în mediu fără o epurare adecvată.

Astfel, stațiile de epurare a apelor uzate (WWTP) au un rol important în ciclul apei și în atingerea conceptului de sustenabilitate, prin integrarea celor trei dimensiuni (de mediu, economice și sociale). Potrivit Spinosa și colab. (2011), implementarea conceptului de sustenabilitate are loc atunci când resursele naturale sau regenerabile sunt consumate cu o rată mai mică sau cel puțin egală cu capacitatea naturii de a le reface.

În general, obiectivul principal al stației de epurare este reprezentat de eliminarea poluanților din apele uzate, cu scopul de a proteja corpul de apă receptor. O importanță

limitată este acordată modurilor în care au fost eliminați acești poluanți sau „câtă energie se consumă pentru îndepărtarea poluanților din apele uzate?” sau „ce cantitate de emisii de gaze cu efect de seră (GHG) sunt produse?”. Introducerea acestor întrebări drept criterii suplimentare, pe lângă cele convenționale luate în considerare în mod normal, ar putea duce la modificări semnificative ale schemelor de epurare convenționale, utilizate de regulă în stațiile de epurare.

O altă problemă importantă este reprezentată de gestionarea nămolului care rezultă din procesul de epurare, nămol în care sunt concentrați majoritatea poluanților prezenți în apele uzate. O schemă tipică de tratare a nămolului prevede reducerea preliminară a conținutului de apă din nămolul inițial, stabilizarea biologică/chimică, cu sau fără producție de energie electrică și o fază ulterioară de condiționare chimică și deshidratare mecanică, menită să reducă, în continuare, conținutul de apă din nămolul. În mod clar, intenția este de a minimiza volumul de nămol care trebuie eliminat în afara stației de epurare. În funcție de dimensiunea stației, pot fi aplicate și tehnologii termice, cum ar fi incinerarea.

Exemplele de întrebări menționate anterior, despre energia necesară și emisiile de GHG produse, sunt rareori luate în considerare în selecția proceselor de tratare a nămolului. În general, se poate afirma că aceste criterii nu sunt luate în considerare în alegerea celei mai potrivite scheme pentru epurarea apelor uzate, sau de tratare a nămolului, din cadrul stației de epurare municipală (MWWTP). Prin urmare, în prezent, este nevoie de o viziune diferită în ceea ce privește proiectarea stațiilor de epurare, bazată pe criterii multiple. Criteriile care aparțineau doar domeniului cercetării, precum emisiile de GHG produse în procesul de epurare, nu mai pot fi ignorate.

În acest context, teza de doctorat are în vedere definirea și aplicarea unor metodologii inovatoare pentru a sprijini factorii de decizie în selectarea celei mai potrivite scheme de epurare a apei uzate municipale, capabile să ia în considerare noile provocări impuse de schimbările climatice, cum ar fi reducerea emisiilor de GHG și recuperarea materialelor și a energiei din nămol. Metodologiile vizează faza de proiectare a unei stații de epurare a apelor uzate municipale pentru alegerea celei mai potrivite scheme de epurare a apei uzate și de tratare a nămolului, dar și faza de funcționare a unei stații deja existente, pentru optimizarea consumului de energie și a emisiile de GHG produse. În acest scop, au fost luate în considerare două studii de caz, unul din Italia și unul din România.

Această teză de doctorat, elaborată în limba engleză, are la bază un acord de cotutelă încheiat între Universitatea Tehnică „Gheorghe Asachi” din Iași (România), reprezentată de conducătorul științific Prof. dr. ing. Carmen Teodosiu și Universitatea

Politehnică din Bari (Italia), reprezentată de conducătorul științific Conf.dr. habil. ing. Sabino De Gisi.

### **Scopul și obiectivele studiului**

Construirea și funcționarea stației de epurare a apelor uzate municipale, precum și cantitățile de apă uzată și nămol generat, influențează calitatea vieții umane și a mediului înconjurător. Luând în considerare principiile conceptului de sustenabilitate, este necesară implementarea de noi metodologii pentru a reduce impactul procesului de epurare al apelor uzate, începând din faza de proiectare și construcție a stației de epurare și până la destinația finală a nămolului. În plus, evaluarea performanțelor stațiilor de epurare municipale, în afară de criteriile tehnice și economice, trebuie să includă și evaluarea performanței de mediu.

**Obiectivul principal** al acestei teze de doctorat este reprezentat de dezvoltarea și aplicarea de metodologii noi și inovative, pentru a evalua performanțele stațiilor de epurare a apelor uzate municipale și de tratare a nămolului și pentru a sprijini factorii de decizie în selectarea celei mai bune variante de proiectare a stațiilor de epurare, pentru îmbunătățirea sustenabilității pe considerente care țin de consumul de energie, emisiile de gaze cu efect de seră și valorificarea nămolului rezultat din epurarea apelor uzate.

Pentru atingerea acest obiectiv, au fost dezvoltate **două direcții principale de cercetare**, după cum urmează:

1. Studii privind evaluarea proiectării sustenabile a stațiilor de epurare a apelor uzate, pe baza unei metodologii de analiză multicriteriale (Italia);

2. Studii privind evaluarea sustenabilității sistemului de gestionare a nămolului provenit de la epurarea apelor uzate municipale din Iași (România).

Pentru a realiza cele două direcții menționate mai sus, au fost dezvoltate următoarele obiective/activități specifice:

1. Realizarea unui studiu de literatură privind producția și principalele caracteristici ale nămolului din ape uzate, practicile și tehnologiile utilizate pentru tratarea și stocarea nămolului și tendințele privind sustenabilitatea managementului apelor uzate și a nămolului;

2. Propunerea unei metodologii, care poate fi aplicată pentru evaluarea sustenabilității opțiunilor de gestionare a nămolului de epurare, pe baza unor instrumente de analiză multicriterială, cum ar fi: Evaluarea și Monitorizarea Performanței Energetice și a Emisiilor de Carbon (ECAM) și Metodele de Analiză Decizională Multi-Criterială (MCDA), în contextul a două țări: Italia și România;



3. Identificarea celei mai sustenabile variante de proiectare a stației de epurare a apelor uzate municipale, bazată pe o analiză multi-criterială, bazate pe:

- luarea în considerare a celor mai reprezentative scheme de epurare a apelor uzate și de tratare a nămolului;
- specificarea principalilor parametri de proiectare ai proceselor și a caracteristicilor dimensionale pentru fiecare schemă de epurare propusă;
- identificarea criteriilor de evaluare;
- identificarea și implicarea părților interesate în procesul decizional;
- prioritizarea criteriilor de evaluare pentru fiecare factor de decizie;
- determinarea ierarhiei finale.

4. Evaluarea sustenabilității unui stații de epurare a apelor uzate municipale aflate în funcționare, (S.C APAVITAL S.A, Iași, România) prin:

- evaluarea emisiilor de GHG;
- evaluarea eficienței energetice;
- dezvoltarea de noi scenarii pentru îmbunătățirea eficienței energetice și diminuarea impactului viitor al emisiilor de GHG.

### Structura tezei de doctorat

Această teză este structurată în cinci capitole, după cum se poate vedea în Figura 1, și conține în total 42 de tabele, 34 de figuri, 49 de ecuații și 250 de referințe bibliografice.

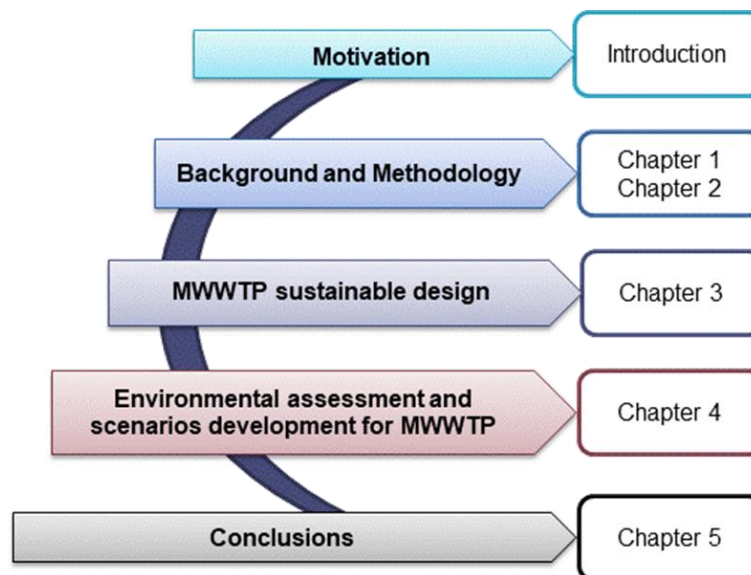


Figura 1. Schema generală a tezei de doctorat

**Introducerea** prezintă aspectele referitoare la criza apei, procesele de epurare a apelor uzate, subliniind impactul stației de epurare a apelor uzate municipale și necesitatea unui design nou și sustenabil. În această secțiune sunt prezentate, de

asemenea, obiectivul principal al tezei, direcțiile urmate pentru atingerea acestui obiectiv și activitățile de cercetare.

**Capitolul 1** prezintă principalele tipuri de nămol produse de stația de epurare a apelor uzate municipale și caracteristicile acestora. De asemenea, sunt menționate tehnologiile utilizate pe linia de apă uzată și linia de tratare a nămolului, acestea din urmă având drept scop principal reducerea cantității de nămol rezultat. În plus, a fost prezentată o scurtă descriere a metodelor de tratare convenționale și de eliminare a nămolului. Pe baza conceptului de sustenabilitate, sunt discutate și tehnologiile care pot fi utilizate pentru recuperarea resurselor și energiei din apele uzate și din nămolurile de epurare.

**Capitolul 2** descrie, în detaliu, metodologiile care au fost aplicate în acest studiu, pentru a evalua performanța MWWTP, cu accent pe opțiunile de gestionare a nămolului. Prima metodologie (abordarea mono-criterială) se bazează pe utilizarea unui singur criteriu, cum ar fi costurile, sau consumul de energie, sau emisiile de GHG, în timp ce a doua categorie (abordarea multi-criterială) ia în considerare mai multe criterii simultan, combinând informațiile.

**Capitolele 3 și 4 prezintă contribuțiile originale ale acestei teze de doctorat în domeniul epurării apelor uzate și gestionării sustenabile a nămolului.**

**Capitolul 3** are în vedere proiectarea sustenabilă a unei stații de epurare a apelor uzate municipale, prin identificarea celei mai bune scheme de epurare. În procesul decizional, pe lângă criteriile tehnice și economice, au fost luate în considerare cantitățile de emisii de GHG generate și suprafața de teren utilizată pentru construcția stației de epurare și pentru depozitul de deșeuri. Prin această abordare (de tipul "de la bază-la vârf"), implicarea factorilor decizionali a jucat un rol deosebit de important, iar multitudinea acestor factori de decizie a permis coroborarea rezultatelor.

**Contribuția originală a acestui studiu o reprezintă multitudinea criteriilor de evaluare și a părților interesate luate în considerare, în procesul de evaluare a opțiunilor de proiectare a unei stații de epurare a apelor uzate municipale de dimensiuni mari, scopul final fiind selectarea celei mai bune alternative de epurare.**

Clasamentul final al schemelor de epurare comparate a fost obținut prin utilizarea indicatorului compozit (CI). Concluzia principală a acestui studiu este aceea că cea mai bună alternativă de epurare a apelor uzate municipale rezultată în urma analizei multicriteriale, este diferită de cea adoptată, în practica actuală de proiectare a stațiilor de epurare.

În **Capitolul 4** este evaluată sustenabilitatea unei MWWTP în operare, în ceea ce privește emisiile de GHG generate și eficiența energetică, prin aplicarea instrumentului

ECAM (versiunea 2.2), considerând ca studiu de caz S.C APAVITAL S.A, Iași, România. Acestă MWWTP include pe linia de epurare a apei uzate următoarele trepte: sedimentare primară, epurare biologică pe bază de nămol activat și o treaptă terțiară pentru îndepărtarea azotului și fosforului. Pe linia de tratare a nămolului, stația include trepte de îngroșare, digestie anaerobă (AD), deshidratare, uscare pe paturi timp de 760 de zile și depozitare la depozitul de deșeuri.

Scopul acestui capitol a fost evaluarea performanțelor energetice la nivel operațional și identificarea etapelor din ciclul de epurare a apelor uzate în care emisiile de GHG și consumul de energie ar putea fi reduse. În plus, au fost elaborate diferite scenarii pentru a îmbunătăți sustenabilitatea generală, bazată pe creșterea populației deservite de stație, eficiența energetică și reducerea cantității de nămol depozitat.

Ultimul capitol prezintă **Concluziile generale** ale acestui studiu, urmate de prezentarea referințelor utilizate în elaborarea tezei de doctorat și lista cu lucrările publicate în reviste de specialitate internaționale cotate ISI și lista cu lucrări prezentate la conferințe naționale și internaționale.

## **CAPITOLUL 1. STADIUL ACTUAL AL CERCETĂRILOR PRIVIND PRACTICILE DE GESTIONARE A APELOR UZATE ȘI A NĂMOLULUI**

### **1.1. Producția de nămol din apele uzate municipale**

Nămolul produs în timpul epurării apelor uzate reprezintă o problemă din ce în ce mai importantă la nivel mondial (Di Iaconi și colab., 2017). Creșterea populației, urbanizarea rapidă și cerințele legislative stricte, privind deversările sau reutilizarea apelor uzate, au condus la creșterea volumului de apă uzată și a nămol produs (Yan și colab., 2015; Gherghel și colab., 2019).

În funcție de etapa de epurare a apelor uzate din MWWTP, sunt generate mai multe tipuri de nămol, după cum urmează:

**1. Nămolul primar** este produs în timpul epurării primare a apelor uzate (flotație, precipitare și sedimentare), când sunt separate solide grele, grăsimile și uleiurile (Gherghel et al., 2019). De obicei, nămolul primar conține 2% până la 9% solide, dintre care aproximativ 60% până la 80% sunt de natură organică; restul de 90%, uneori chiar mai mult (99,5%) fiind apă (Tyagi și Lo, 2013). Acest tip de nămol este greu de deshidratat fără tratament, fiind necesară digestia de către bacteriile aerobe sau anaerobe.

**2. Nămolul secundar** (cunoscut sub numele de nămol activat sau nămol biologic) este produs în timpul tratamentului biologic, când microorganismele descompun conținutul

organic biodegradabil din apele uzate (Devi și Saroha, 2017). Concentrația totală a solidelor poate varia între 0,8 și 3,3%, în funcție de tipul procesului de epurare biologică utilizat (Suárez-Iglesias et al., 2017), restul fiind apă. Partea solidă a nămolului este formată din microorganisme care conțin fracțiuni organică (între 59% și 88%) și materiale inerte. Frația organică din nămolurile secundare conține: 50–55% carbon, 25-30% oxigen, 10–15% azot, 6–10% hidrogen, 1–3% fosfor și 0,5–1,5% sulf (Tyagi și Lo, 2016)

**3. Nămolul terțiar** se obține în etapele avansate de epurare a apelor uzate, când este necesară eliminarea nutrienților, cum ar fi azotul și fosforul (Manara și Zabaniotou, 2012). În general, procesul de eliminare a nutrienților se realizează simultan cu eliminarea materiei organice (Gherghel și colab., 2019).

**4. Nămolul chimic** este produs prin orice proces chimic, implementat în stația de epurare (cum ar fi procesul de sedimentare primară asistată chimic - CAPSP). Acest proces implică dozarea unui coagulant, înainte de treapta de sedimentare primară, pentru a reduce sarcina organică înainte de următorul tratament biologic. Caracteristicile acestui tip de nămol depind de reactivul utilizat (de exemplu, var hidratat, clorură ferică, sulfat de aluminiu și chitosan) și de dozele utilizate (în general de 10-50 mg / l) (Gherghel și colab., 2019). Nămolul chimic poate fi produs și prin coagularea-flocularea supernatantului din procesul de îngroșare (Wei și colab., 2018), precum și prin spălarea apei, după sedimentare / tratament chimico-fizic.

## 1.2. Tratarea nămolurilor și practicile de eliminare

Tratarea nămolurilor este una dintre cele mai semnificative probleme ale stației de epurare a apelor uzate municipale, datorită caracteristicilor sale, cererii mari de energie și costului de tratare. Din costurile totale de exploatare ale stației de epurare, procesele de eliminare a nămolurilor reprezintă 50 - 60% (Anjum și colab., 2016; Zhen și colab., 2017). Din cauza acestor aspecte, de-a lungul anilor, un număr mare de tehnici (fizice, chimice și biologice) au fost dezvoltate pentru tratarea sau minimizarea producției de nămol (Anjum și colab., 2016).

**Îngroșarea** este de obicei prima etapă într-un proces de tratare a nămolului. Îngroșarea nămolului este importantă, deoarece poate influența fiabilitatea și performanțele întregului sistem de tratare a nămolului (Kim și Chung, 2013). După îngroșare, nămolul este stabilizat. Dintre toate metodele de stabilizare, **digestia anaerobă** este cea mai frecvent utilizată deoarece permite îndepărtarea agenților patogeni, conversia substanțelor volatile în biogaz (și apoi energie), precum și obținerea de biosolide stabile pentru deshidratarea mecanică (Semblante et al., 2015; Nazari și colab., 2017).

Mai mult, datorită posibilității de co-digestie cu deșeuri organice, digestia anaerobă este considerată o tehnologie extrem de rentabilă (Zhang și colab., 2017). Această metodă aduce beneficii economice (venituri provenite din taxarea diferențiată a deșeurilor organice trimise la co-digestie și producția de energie), beneficii sociale și de mediu (devierea deșeurilor de la depozitul de deșeuri și abilitatea de valorificare materială) (Nghiem et al., 2017).

**Digestia aerobă** este o altă metodă de stabilizare a nămolului ce are loc într-un reactor complet aerat și este influențată de temperatura sistemului și de timpul de retenție (Semblante și colab., 2015). În categoria metodelor de stabilizare a nămolului intră și **procesul de compostare**. Procesele de compostare implică tratarea și transformarea nămolului într-un produs stabilizat, care poate fi utilizat ca îngrășământ organic sau produs cu valoare adăugată (Anjum și colab., 2016). Dacă destinația finală a nămolului nu este utilizarea în agricultură (compost), după digestie nămolul este uscat. Un pas important înainte de uscarea nămolurilor este **procesul de condiționare**. Condiționarea poate fi realizată (în diferite faze ale procesului de epurare) prin: metode chimice, utilizând diferiți reactivi (cum ar fi: var, polimeri, sulfat de aluminiu, clorură de fier (III), sulfat de fier (II)); metode termice (temperatură scăzută/medie/înaltă); metode mecanice (presiune și forfecare) și metode neconvenționale, cum ar fi: spălare, sonificare, microunde etc., (Kamizela și Kowalczyk, 2019).

Prin procesul de îngroșare gravitațională, apa liberă este eliminată din nămol, (nu este legată de solidele nămolurilor de epurare) iar prin deshidratarea mecanică (sau în condiții naturale) apa capilară (legată de forțele capilare) este îndepărtată. În cele din urmă, apa legată este îndepărtată prin **procesele de uscare**. Reducerea volumului nămolurilor este o sarcină de bază în WWTP. Ea constă în scăderea conținutului de apă din nămol (prin utilizarea proceselor de îngroșare, deshidratare și uscare) și creșterea conținutului de materie uscată.

În ceea ce privește metodele de eliminare a nămolului în exces, cele mai utilizate sunt: **depozitarea deșeurilor, incinerarea, evacuarea în oceane** (Anjum și colab., 2016), **refolosirea în agricultură** (direct sau după compostare) și **reutilizarea pentru producția de ciment, cărămizi și asfalt** (Zhen et al., 2017; De Carvalho Gomes et al., 2019). Potrivit Eurostat (2015), aproximativ 40% din nămolul total, produs în Uniunea Europeană, este utilizat în agricultură. Cu toate acestea, având în vedere riscurile de mediu ale utilizării nămolului în agricultură, unele țări au adoptat pentru poluanții din nămol, concentrații limită mai mici decât cele raportate în Directiva privind nămolul de epurare (SSD), unele țări au

adăugat noi contaminanți pe lista directivei, alte țări au abandonat această metodă de eliminare a nămolului (Kacprzak et al., 2017).

O altă metodă de eliminare a nămolului, care a fost și cea mai utilizată timp de mai mulți ani este depozitarea. Recent, datorită impactului legat de producția de levigat și de emisiile echivalente de CO<sub>2</sub>, legislația a devenit mai strictă și metoda de depozitare a nămolului a început să fie mai puțin folosită în multe țări europene (Manara și Zabaniotou, 2012; Kacprzak et al., 2017). Pe de altă parte, în ultimii ani, incinerarea nămolului a fost utilizată din ce în ce mai mult în țările europene, datorită îmbunătățirilor semnificative ale acestui proces, cum ar fi: nivel tehnologic ridicat, reducerea costurilor și scăderea emisiilor (Kelessidis și Stasinakis, 2012).

Deși, există numeroase metode de tratare și eliminare a nămolurilor, gestionarea acestuia rămâne o provocare pentru proiectarea și funcționarea stațiilor de epurare. De asemenea, utilizarea necorespunzătoare și / sau eliminarea nămolului, poate provoca mai multe impacturi negative asupra mediului și sănătății umane (Zhen și colab., 2017).

### **1.3. Cadrul legislativ privind gestionarea nămolurilor de epurare**

#### **1.3.1. Legislația și standarde internaționale și europene**

Nămolul este reglementat în legislația Uniunii Europene ca deșeu rezultat al epurării apelor uzate menajere și industriale, care trebuie tratat, valorificat sau eliminat. În ceea ce privește cadrul legal stabilit de Comisia Europeană care reglementează diferitele rute de gestionare a nămolului de epurare, acesta este format în principal din directive care trebuie transpuse în legislația națională de către statele membre.

Principalele directive europene care au un rol semnificativ în gestionarea nămolurilor de epurare sunt următoarele:

- Directiva 86/278 / CEE privind nămolul de epurare;
- Directiva 91/271/CEE privind epurarea apelor uzate urbane;
- Directiva Consiliului European 91/676/CEE (directiva referitoare la nitrați);
- Directiva-cadru privind deșeurile 1975/442 /CEE cu modificările sale: 1991/156 / CEE, 2006/12/CE și 2008/98/CE.

#### **1.3.2. Particularități în legislația românească și italiană privind nămolul de epurare**

Legislația românească și cea italiană se concentrează pe două componente cheie: conservarea și protecția mediului și de asemenea, pe menținerea și îmbunătățirea sănătății publice. Toată legislația europeană relevantă în epurarea apelor uzate și tratarea nămolului a fost transpusă în legislația națională a celor două țări.

## 1.4. Tendințe în gestionarea sustenabilă a nămolurilor de epurare

### 1.4.1. Tehnologii utilizate pentru recuperarea resurselor/energiei din nămolurile de epurare

În zilele noastre, apele uzate municipale sunt considerate o resursă importantă din care pot fi recuperate apă, materiale și energie (Puchongkawarin et al., 2015). De asemenea, recunoșterea nămolului ca resursă, a dus la găsirea unor multitudini de modalități/căi de recuperare a componentelor valoroase din nămol, cum ar fi carbonul și nutrienții. Prin urmare, mai multe opțiuni/tehnici sunt disponibile, pentru a recupera aceste componente din nămol. Cele mai aplicate tehnologii de recuperare a acestor materiale și forme de energie sunt prezentate în Tabelul 1.7.

Tabelul 1.7. Tehnologii de recuperare a resurselor / energiei din nămol

| Process             | Treatment technologies         | Products                                          |                    |
|---------------------|--------------------------------|---------------------------------------------------|--------------------|
|                     |                                | Material                                          | Energy             |
| Bio- chemical       | Anaerobic digestion            | Fuel gas                                          | Biogas             |
|                     | Anoxic/Aerobic                 | Bioplastics                                       | -                  |
|                     | Microbial Full Cell            | -                                                 | Energy             |
| Thermo-chemical     | Incineration/ Co-incineration  | Ash for building material                         | Heat/ Energy       |
|                     | Gasification                   | Fuel gas                                          | Syngas             |
|                     | Pyrolysis                      | Bio-oil<br>Bio-sorbents<br>Fuel gas<br>Ash        | -                  |
|                     | Supercritical water processing | Phosphorous                                       | Energy             |
|                     | Wet air oxidation              | -                                                 | Heat               |
| Mechanical-chemical | Ultrasonication                | Bio-diesel<br>Proteins<br>Enzymes<br>Heavy metals | H <sub>2</sub> gas |

### 1.4.2. Materiale recuperate din nămolul de epurare

#### 1.4.2.1. Nutrienți

În nămol se găsesc cantități considerabile de nutrienți (aproximativ 0,5–0,7% fosfor și 2,4–5,0% azot), sub formă de material proteic, care ar putea fi utilizat pentru producerea îngrășămintelor vegetale (Gherghel și colab., 2019). Fosforul din apele uzate este recuperat sub formă de struvită ( $\text{MgNH}_4\text{PO}_4 \times 6\text{H}_2\text{O}$ ) printr-un proces de cristalizare și se poate utiliza în agricultură ca îngrășământ.

#### **1.4.2.2. Adsorbanți**

Transformarea nămolurilor de epurare în adsorbanți (SBA) poate fi considerată o soluție eficientă, promițătoare pentru o bună gestionare a nămolului, toți agenții patogeni activi fiind distruși în timpul procesului de conversie termică (Xu și colab., 2015). Mai mult, SBA obținuți din nămol au dovedit o capacitate excelentă de a elimina poluanții din apele uzate (exemplu: metale grele, coloranți, compuși fenolici, etc.).

#### **1.4.2.3. Materiale de construcție**

Folosirea nămolurilor de epurare în mortar sau materiale de construcție ajută la eliminarea unor etape scumpe, mari consumatoare de energie, utilizate pentru depozitarea/ eliminarea lor. Astfel deșeurile dăunătoare pentru mediu sunt transformate în produse sigure și stabile (Świerczek et al., 2018). Mai mult, Paris și colab. (2016) a raportat că adăugarea nămolului la producția de ciment și mortar poate fi o alternativă pentru metodele existente în gestionarea acestuia.

#### **1.4.2.4. Metale grele**

Concentrația metalelor grele din nămol este în jur de 0,5 și 2%, dar în unele cazuri poate crește până la 6% (Vyrides și colab., 2017). De-a lungul anilor, mulți cercetători au studiat diferite procese de recuperare a acestor metale grele din nămol. Procentele cele mai mari de recuperare (> 90%) au fost obținute prin utilizarea ultrasunetelor (Li și colab., 2010).

#### **1.4.2.5. Proteine**

Nămolul de epurare conține aproximativ 61% proteine, 11% carbohidrați, 1% lipide și 27% alte componente, fiind considerat o sursă de proteine (Gherghel et al., 2019). Metalele grele, care sunt recuperate împreună cu proteinele, sunt un inconvenient al proceselor de recuperare, mai ales dacă scopul este utilizarea proteinelor ca suplimente nutritive pentru animale (Tyagi și Lo, 2016; Gherghel et al., 2019). Cu toate acestea, recuperarea proteinelor din nămolul de epurare rămâne o opțiune care poate arăta rezultate viitoare promițătoare.

#### **1.4.2.6. Enzime**

Enzimele recuperate din nămolurile de epurare nu sunt încă utilizate pe scară largă. Trebuie efectuate studii suplimentare pentru a explora extragerea enzimelor din nămol,



luând în considerare atât problemele tehnico-economice cât și abordările ecologice, de mediu.

#### **1.4.2.7. Materiale bio-plastice**

Utilizarea nămolurilor de epurare, ca materie primă, pentru producția de materiale bio-plastice ar putea fi o soluție alternativă sustenabilă, însă sunt necesare mai multe studii care să clarifice fezabilitatea tehnică și economică.

#### **1.4.3. Recuperarea energiei din nămolurile de epurare**

##### **1.4.3.1. Biogaz**

Valorificarea biogazului din nămol este considerată una dintre cele mai stabile și eficiente tehnologiile de conversie a deșeurilor în energie (Moya et al., 2017). Deoarece biogazul poate fi utilizat pentru producerea de energie electrică, căldură, abur și altele, recuperarea și conversia sa este într-adevăr esențială (Scarlat și colab., 2018).

##### **1.4.3.2. Energie din biocombustibili**

Unul dintre biocombustibilii gazoși care pot fi recuperați din nămolurile de epurare este *hidrogenul*, considerat o alternativă sustenabilă datorită randamentului ridicat de energie și rezultatului de combustie curat (apă). Hidrogenul în combinație cu CO<sub>2</sub> formează *syngas*, care poate fi o alternativă "curată" pentru combustibilii fosili, în generarea de energie electrică sau în producerea de combustibili lichizi, cum ar fi motorina sintetică, dimetil eter și metanol (Basu, 2018).

##### **1.4.3.3. Celulă microbiană de combustie (MFC)**

Utilizarea MFC pentru producția de energie electrică este considerată o soluție sustenabilă pentru diferitele probleme, cum ar fi: nămolul în exces și criza energetică a apei (Nikhil și colab., 2018). Un alt beneficiu al acestei tehnologii este faptul că poate fi utilizată pentru a genera energie atât pe linia de apă uzată cât și pe linia de nămol.

## **CAPITOLUL 2. METODOLOGII PENTRU EVALUAREA PERFORMANȚEI SISTEMULUI DE MANAGEMENT AL APELOR UZATE ȘI A NĂMOLULUI DE EPURARE**

Pentru a evalua performanța MWWTP și, în special, a opțiunilor de gestionare a nămolurilor de epurare, au fost luate în considerare două categorii de metodologii. Prima categorie (abordarea mono-criterială) se bazează pe utilizarea unui singur criteriu precum

costurile, consumul de energie și emisiile de gaze cu efecte de seră. A doua categorie (abordarea multi-criterială) ia în considerare mai multe criterii simultan, îmbinând astfel informațiile.

## 2.1. Metodologia bazată pe o abordare mono-criterială

### 2.1.1. Evaluarea și Monitorizarea Performanței Energetice și a Emisiilor de Carbon (ECAM)

Scopul principal al instrumentului ECAM este acela de a veni în sprijinul profesioniștilor din stațiile de epurare, în analizarea propriilor date, și de a oferi informații valoroase în ceea ce privește performanțele energetice și ratele de generare a emisiilor de gaze cu efect de seră. Instrumentul ECAM a fost dezvoltat pentru a facilita evaluarea sistemelor (WWTP) printr-o abordare holistică, având în vedere toate etapele ciclului urban (antropic) al apei.

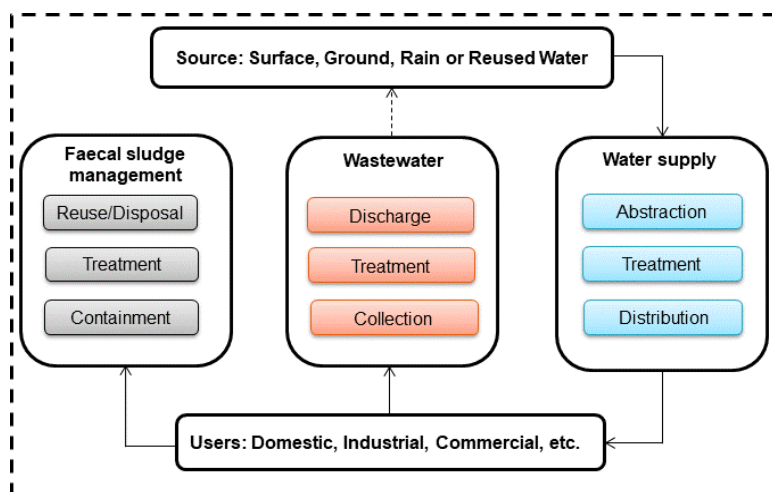


Figura 2.1. Limita sistemului (ECAM)

Elementele principale și opțiunile de evaluare ale instrumentului sunt prezentate în Figura 2.2. ECAM urmărește o abordare pe niveluri, cu un nivel crescut de detalii de la Nivelul A (Tier A) la Nivelul B (Tier B).

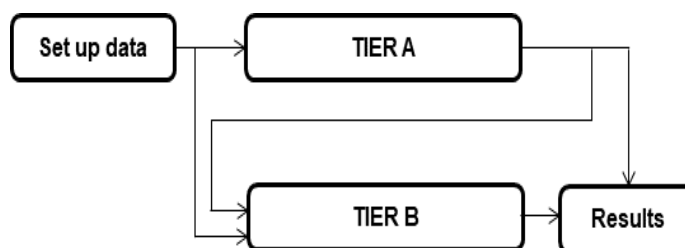


Figura 2.2. Opțiuni de evaluare (ECAM)

### **2.1.2. Evaluarea emisiilor de gaze cu efect de seră (GHG)**

ECAM evaluează două categorii de emisii GHG: emisiile GHG asociate consumului de energie (emisiile indirecte) și emisiile GHG care nu sunt legate de consumul de energie electrică (emisii directe și alte emisii indirecte). Cea de-a doua categorie (care nu sunt legate de consumul de energie electrică) de emisii GHG este asociată cu activitățile aflate la limita/granița sistemului analizat (stația de epurare) sau care sunt o consecință a serviciilor furnizate în afara limitelor stației.

#### **2.1.2.1. Evaluarea emisiilor GHG directe**

Principalele surse de emisii GHG directe evaluate sunt:

- Emisiile de CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> și N<sub>2</sub>O de la combustia staționară la fața locului;
- Emisiile de CH<sub>4</sub> și N<sub>2</sub>O din sistemul de canalizare și de la epurarea biologică a apelor uzate;
- Emisiile de CO<sub>2</sub> provenite din epurarea biologică a apelor uzate.

#### **2.1.2.2. Evaluarea emisiilor GHG indirecte**

Sunt estimate emisiile de GHG provenite de la:

- Utilizarea energiei electrice de la rețeaua publică;
- Apele uzate colectate, dar neepurate;
- Apele uzate neepurate care nu sunt colectate de rețeaua de canalizare;
- Apele uzate epurate în stațiile de epurare proprii.

Alte emisii indirecte estimate de software sunt cele provenite de la transportul nămolului în afara amplasamentului și de la deversarea efluenților neepurați.

### **2.1.3. Indicatori de performanță**

Un indicator de performanță (PI) propus de ECAM, este o măsură a eficienței și a eficacității legate de problemele specifice ale furnizării serviciilor. PI poate fi fără dimensiuni (-, %) sau intensiv (de exemplu, kWh/m<sup>3</sup>). Indicatorii sunt grupați în: indicatori de nivel de serviciu sau context, indicatori de performanță și indicatori de performanță complementari.

## **2.2. Metodologie bazată pe o abordare multi- criterială**

### **2.2.1. Istoricul Metodelor de Analiză Decizională Multi-Criterială (MCDA)**

MCDA reprezintă un set de instrumente și abordări care încorporează valorile factorilor de decizie și a părților interesate și informațiile tehnice, pentru a selecta cea mai bună soluție

sau pentru a oferi o clasificare a alternativelor pentru o problemă specifică (Zanghelini et al., 2017).

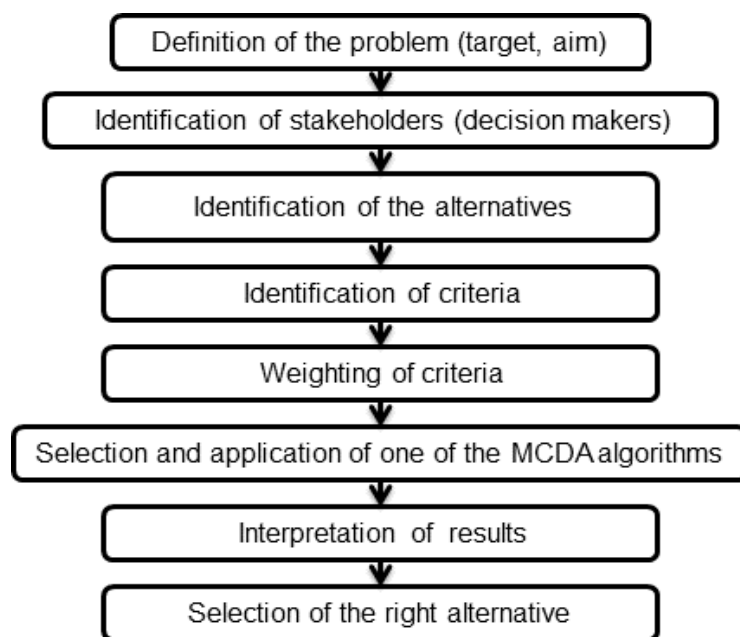


Figura 2.3. Schema generală a metodele MCDA

### 2.2.2. Procesul de Ierarhizare Analitică (AHP)

Această analiză multi-criterială implică diferiți pași (etape). În primul rând, necesită formularea și structurarea problemei de analizat, reprezentată ca o ierarhie, cu obiectivul în vârf, criteriile și subcriteriile în următoarele două niveluri și alternative la partea de jos a ierarhiei (Srdjevic și colab., 2012).

### 2.2.3. Construcția indicatorului compozit

Indicatorul compozit sau indicele de preferințe, notat cu CI, este un parametru care îmbină informațiile criteriilor de evaluare, fiind definit de următoarea ecuație (Sabia și colab., 2016; De Gisi și colab., 2018a):

$$CI_i = \sum_{j=1}^m x_{ij} \cdot w_j \quad (\text{Eq. 2.25})$$

în care:  $x_{ij}$  = performanța alternativei  $i$ -th;  $w_j$  = ponderile fiecărui criteriu;  $m$  = numărul de criterii și  $i$  = numărul de alternative.

Calcularea indicatorului compozit ajută la stabilirea clasamentului final.

### CAPITOLUL 3. PROIECTAREA SUSTENABILĂ A UNEI STAȚII DE EPURARE MUNICIPALĂ BAZATĂ PE O ANALIZĂ DECIZIONALĂ MULTI-CRITERIALĂ

Scopul acestui capitol a fost să identifice cea mai sustenabilă schemă de epurare pentru gestionarea apelor uzate și a nămolului din cadrul unei MWWTP de capacitate mare, aflate în faza de proiectare situată în Regiunea Apulia, Italia, prin evaluarea performanțelor de mediu, economice, energetice și de utilizare a terenului. Pentru aceasta, a fost considerată, ca studiu de caz, o stație de epurare de dimensiuni mari (720.000 locuitori echivalenți, PE) care deversează apele uzate epurate într-un emisar natural, de tip apă curgătoare. Metodologia MCDA a fost utilizată ca referință pentru rezolvarea problemelor complexe în conformitate cu OCDE-JRC (2008). Specificitatea teritoriului, în care se dorește a fi amplasată MWWTP de capacitate mare, a fost luată în considerare prin consultarea diferitelor părți interesate (SH) implicate în procesul de luare a deciziilor.

#### 3.1. Definirea cadrului MCDA

Structura adoptată este formată din 7 etape principale, bazată pe pilonii tipici ai unei evaluări multi-criteriale (Figura 3.1).

#### 3.2. Scheme alternative de epurare a apelor uzate municipale

Tabelul 3.2. Unități elementare din linia de epurare a apei și tratare a nămolului care compun schemele alternative de epurare supuse analizei

| Unit of process                         | Treatment scheme |   |   |   |   |   |
|-----------------------------------------|------------------|---|---|---|---|---|
|                                         | 1                | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| <b>Water line</b>                       |                  |   |   |   |   |   |
| Screening                               | ✓                | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| Sand and oils removal                   | ✓                | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| Primary sedimentation                   | -                | - | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| Denitrification                         | ✓                | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| Oxidation /nitrification                | ✓                | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| Secondary sedimentation                 | ✓                | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| Sand filtration                         | ✓                | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| Disinfection                            | ✓                | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| <b>Sludge line</b>                      |                  |   |   |   |   |   |
| Gravity pre-thickening                  | ✓                | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| Aerobic stabilization                   | ✓                | ✓ | - | - | - | - |
| AD                                      | -                | - | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| AD biogas valorisation by co-generation | -                | - | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| Gravity post-thickening                 | ✓                | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| Sludge chemical conditioning            | ✓                | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| Mechanical dewatering with centrifuge   | -                | ✓ | - | - | ✓ | ✓ |
| Mechanical dewatering with filter press | ✓                | - | ✓ | ✓ | - | - |
| Evaporation                             | -                | ✓ | - | - | ✓ | ✓ |
| Incineration                            | -                | ✓ | - | - | ✓ | ✓ |

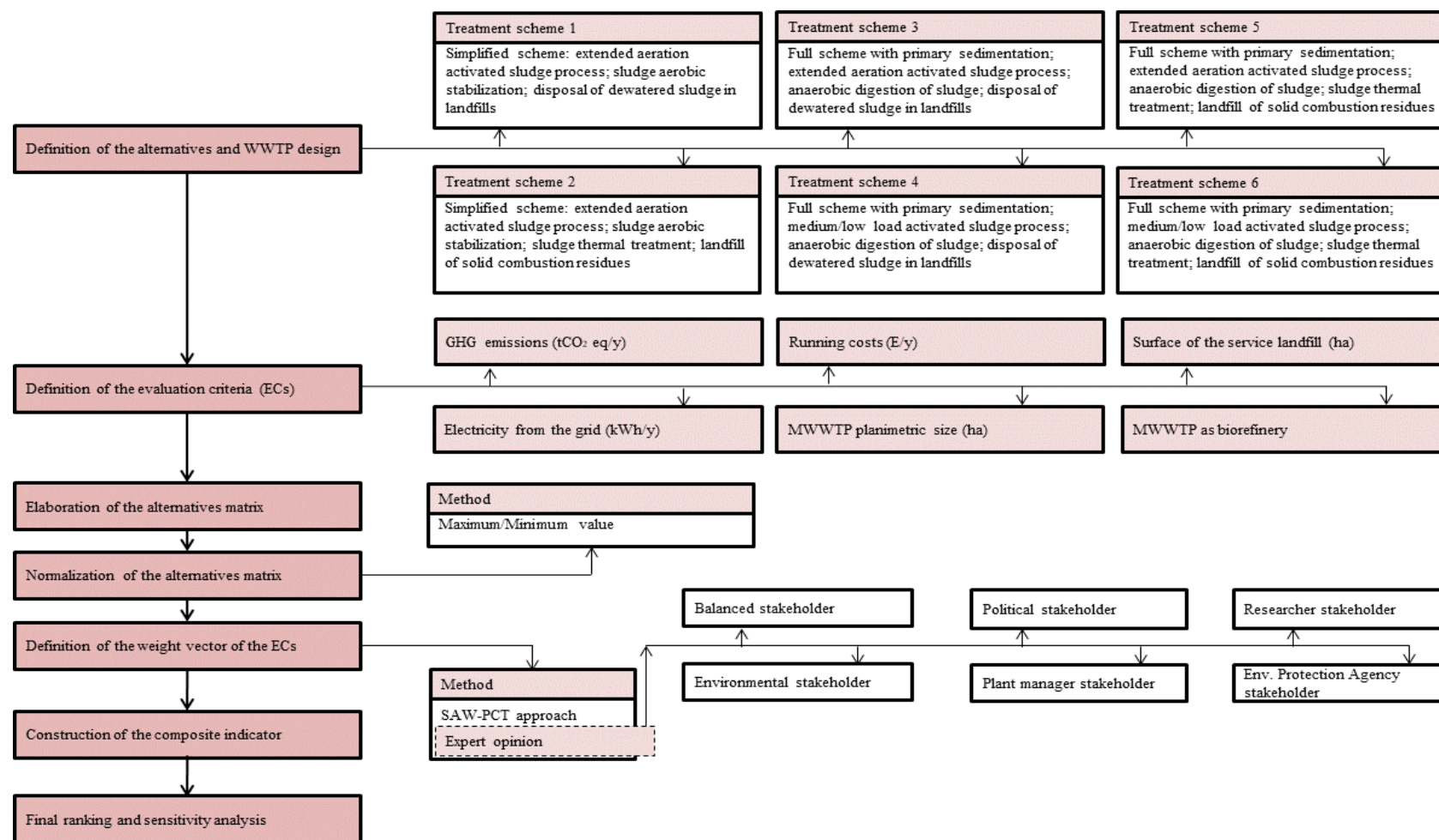


Figura 3.1. Cadrul metodologiei de analiză multi-criterială pe baza indicatorului compozit

### 3.3. Criterii de evaluare și dezvoltarea indicatorului compozit

Criteriile de evaluare care au fost alese în acest studiu vizează principalele aspecte ale unei MWWTP de capacitate mare. Primele criterii luate în considerare au fost *emisiile de GHG* generate de procesele de epurare. Al doilea criteriu a cuantificat *energia electrică* utilizată de la rețeaua națională. *Costurile de funcționare* au fost al treilea criteriu utilizat pentru estimarea costurilor de exploatare și întreținere. Al patrulea și al cincilea criteriu au luat în considerație *suprafața necesară a terenurilor utilizate pentru construcția MWWTP* în curs de investigare și *suprafața necesară a terenurilor necesare pentru eliminarea deșeurilor* generate de procesele de epurare (nisipuri, uleiuri, grăsimi, nămoluri deshidratate mecanic sau respectiv reziduuri solide de ardere). Al șaselea criteriu a avut în vedere *potențialul de modernizare al MWWTP într-o biorafinărie*, pentru a asigura recuperarea simultană a materialelor (nutrienți și bio-plastice) și a energiei (biogaz).

În ceea ce privește părțile interesate (SH) implicate în procesul de luare a deciziilor, au fost identificate șase categorii care în general iau parte la acest tip de decizie. Odată identificate aceste categorii, li s-a explicat sarcina/rolul lor în cercetare, adică acela de a determina prin acțiunea lor, vectorul de ponderi care trebuie atribuit criteriilor de evaluare; pe baza criteriilor de evaluare și a metodologiei adoptate, ceea ce permite transformarea priorităților lor în ponderi. Ordinea de prioritate a criteriilor de evaluare, exprimată de cele șase SH, este prezentă în Tabelul 3.6.

Tabelul 3.6. Ordinea priorității criteriilor de evaluare în funcție de părțile interesate intervievate

| No.  | Stakeholder denomination        | Order of priority of the evaluation criteria                                                                                                |
|------|---------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| SH 1 | Balanced                        | GHG emissions = Electricity from the grid = Running costs = MWWTP planimetric size = Surface of the service landfill = MWWTP as biorefinery |
| SH 2 | Environmentalism                | GHG emissions > Electricity from the grid > Surface of the service landfill > MWWTP planimetric size > MWWTP as biorefinery > Running costs |
| SH 3 | Political                       | MWWTP planimetric size = Surface of the service landfill > GHG emissions > Running costs > Electricity from the grid > MWWTP as biorefinery |
| SH 4 | Plant manager                   | Electricity from the grid = Running costs = Surface of the service landfill > GHG emissions > MWWTP planimetric size = MWWTP as biorefinery |
| SH 5 | Researcher                      | MWWTP as biorefinery > GHG emissions = Electricity from the grid > MWWTP planimetric size = Surface of the service landfill > Running costs |
| SH 6 | Environmental Protection Agency | GHG emissions = Electricity from the grid = Surface of the service landfill > MWWTP planimetric size > Running costs = MWWTP as biorefinery |

### 3.4. Rezultate și discuții

#### 3.4.1. Punctele de vedere ale părților interesate

Vectorul ponderilor criteriilor de evaluare a permis cuantificarea numerică a priorităților exprimate de fiecare SH implicată în procesul decizional.

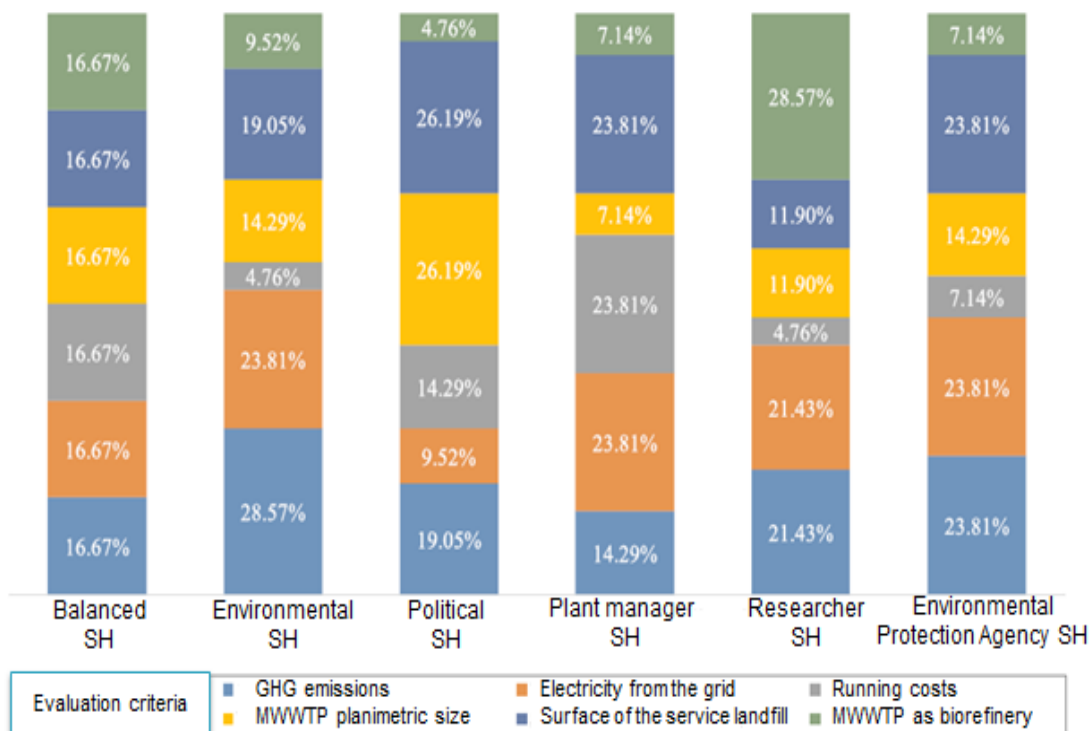


Figura 3.2. Vectorul ponderilor criteriilor de evaluare

Ca o perspectivă generală, în afară de SH de mediu și politică, ale căror profiluri sunt mai complexe, dar în conformitate cu literatura, în cazul celorlalte profiluri s-au obținut rezultatele așteptate.

#### 3.4.2. Imparțialitatea matricei alternativelor

Analiza rezultatelor emisiilor de GHG a arătat valori mari la schemele de epurare bazate pe utilizarea tratamentului termic (schemele 2, 5 și 6). Emisiile de GHG s-au datorat în principal gazului metan utilizat drept combustibil în tratamentul termic, deoarece arderea nămolului nu poate acoperi necesarul de întreținere a temperaturilor necesare în procesul de incinerare a nămolurilor. În cazul schemelor fără tratament termic a nămolului (1, 3 și 4), valorile sunt semnificativ mai mici, după cum se poate observa în Figura 3.3. Pentru schema 1, cele mai mari emisii de GHG provin de la consumul de energie electrică în MWWTP (76,6%), urmată de deversarea apei uzate epurate (15%). Pentru schemele 3 și 4, consumul de energie electrică necesară în MWWTP a avut și cele mai mari emisii de GHG.



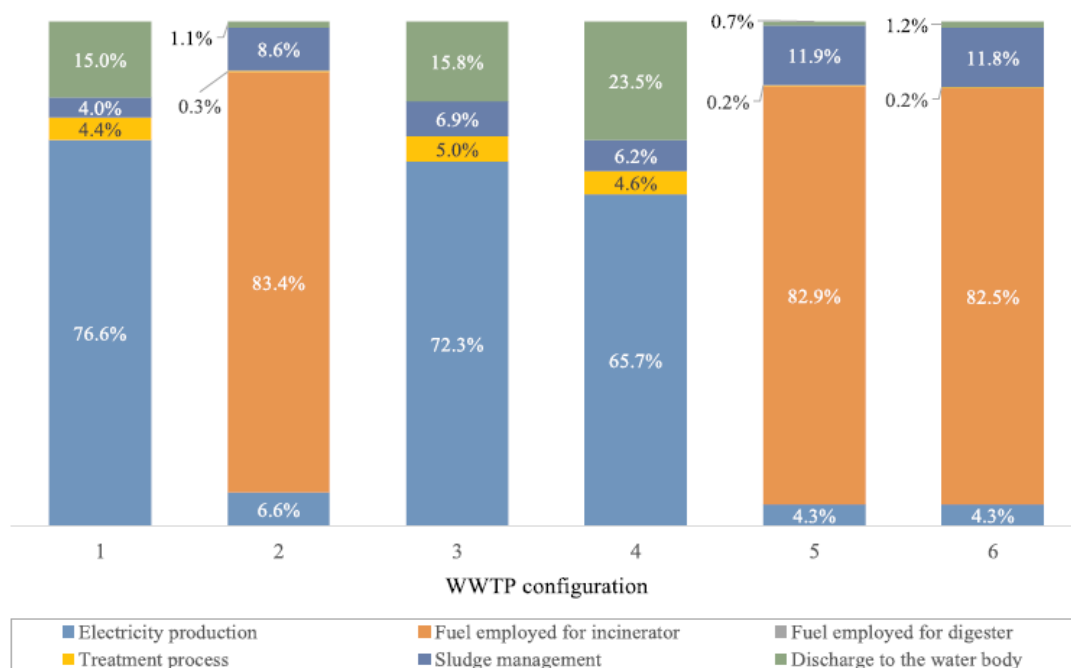


Figura 3.3. Distribuția procentuală a emisiilor de GHG

Valorile anuale pentru consumul de energie în MWWTP sunt cuprinse între 41,75 - 57,75 kWh/PE, fiind în conformitate cu literatura de specialitate. Consumul de energie electrică este legat în principal de procesul de oxidare/nitrificare pentru toate schemele luate în considerare; valorile obținute în domeniul 45,6 -55,8%, fiind în conformitate cu cele raportate de Panepinto și colab. (2016) și WERF (2010) respectiv 55-70% și 54%.

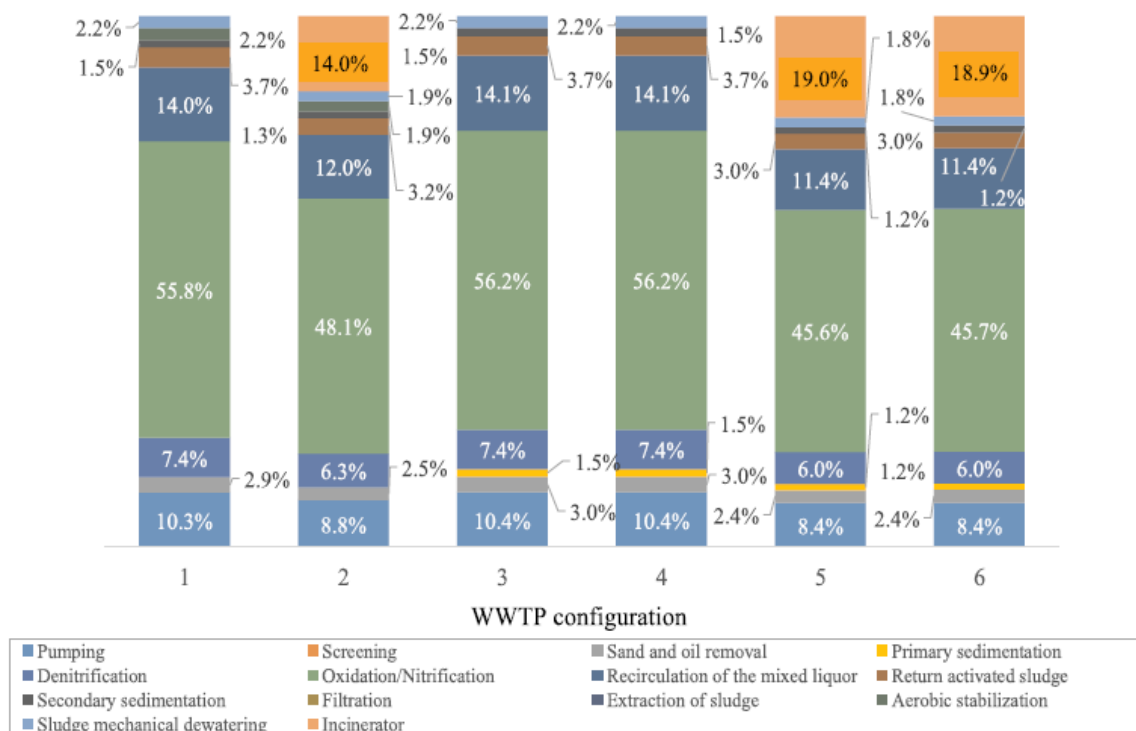


Figura 3.4. Distribuția procentuală a consumului de energie electrică din rețeaua națională

Analiza costurilor de funcționare a stației de epurare, a arătat valori anuale în intervalul 23.85-38.67 €/PE, fiind în concordanță cu datele din literatura de specialitate. Costuri mai mici sunt înregistrate în cazul schemelor cu tratament termic. În cazul schemelor fără tratament termic a nămolului (1, 3 și 4), costurile s-au datorat altor opțiuni de eliminare a nămolului (28,2-45,2%), iar pentru cele cu tratament termic, (2, 5 și 6), costul asociat consumului de energie electrică are cea mai semnificativă contribuție, urmat de costul cu personalul și de cel asociat opțiunilor de eliminare a produselor secundare.

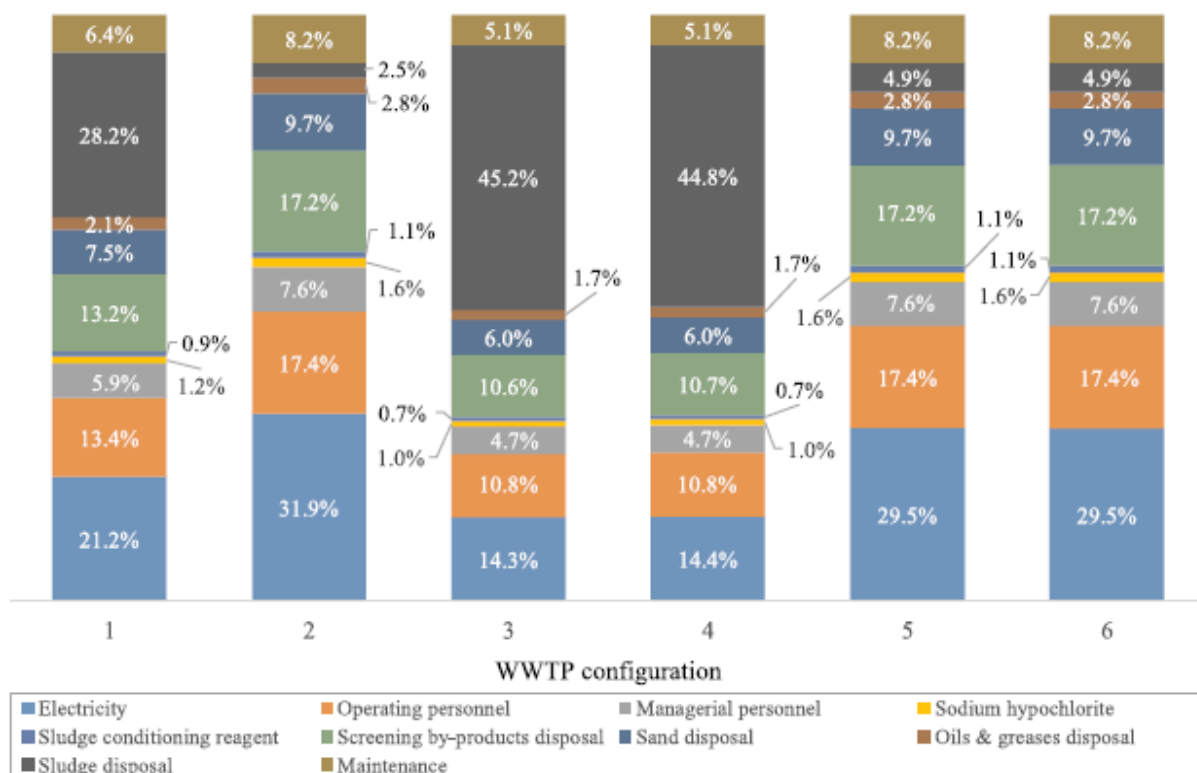


Figura 3.5. Distribuția procentuală a costurilor de funcționare

Analiza suprafeței planimetrice a MWWTP (Figura 3.6) a condus la obținerea unor valori într-un domeniu restrâns (0,069–0,076 m<sup>2</sup>/PE). Schema simplificată cu oxidare totală, fără tratament termic a nămolului (schema 1) ocupă o suprafață mai mare decât schema completă (schema 3) care funcționează întotdeauna cu oxidare totală (0,074 m<sup>2</sup>/PE față de 0,070 m<sup>2</sup>/PE). Analiza suprafeței care urmează să fie utilizată pentru un depozit de deșuri a arătat valori în intervalul 1.522-3.693 m<sup>2</sup>/PE. Valorile cele mai ridicate corespund schemelor de epurare fără tratament termic (1, 3 și 4), care generează cantități semnificative de nămol, ce urmează a fi depozitate. Schema 2 reduce la minim producția de nămol care trebuie trimis în depozit, necesitând suprafața cea mai mică (1.522 m<sup>2</sup>/PE), (Gherghel și colab., 2020).

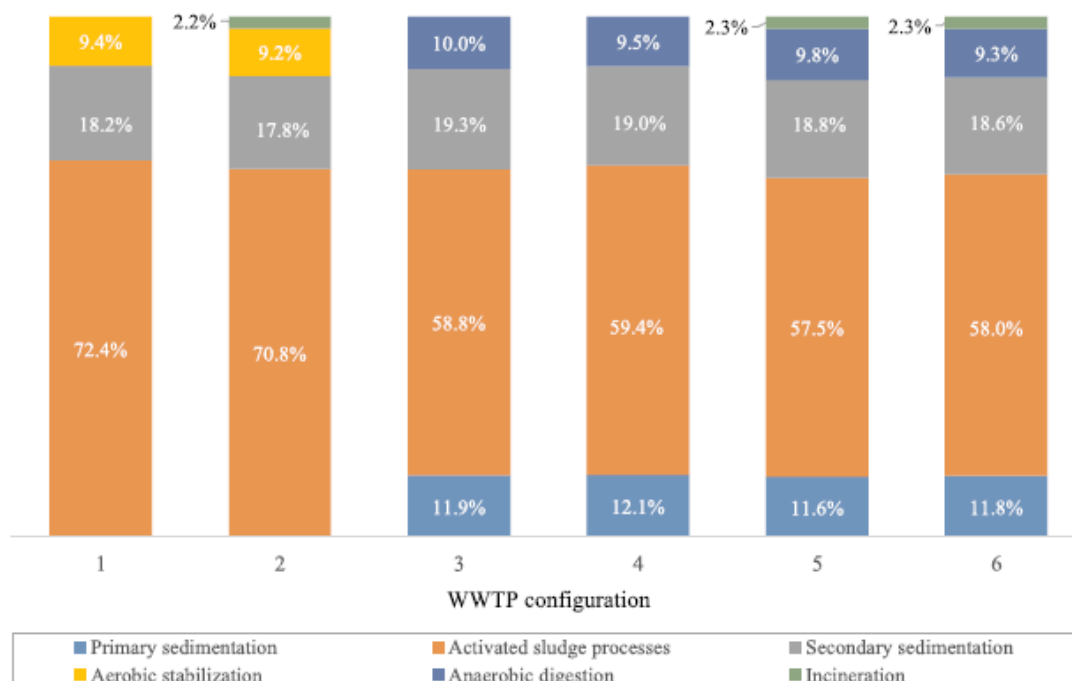


Figura 3.6. Distribuția procentuală a suprafeței WWTP necesară pe unitatea de proces

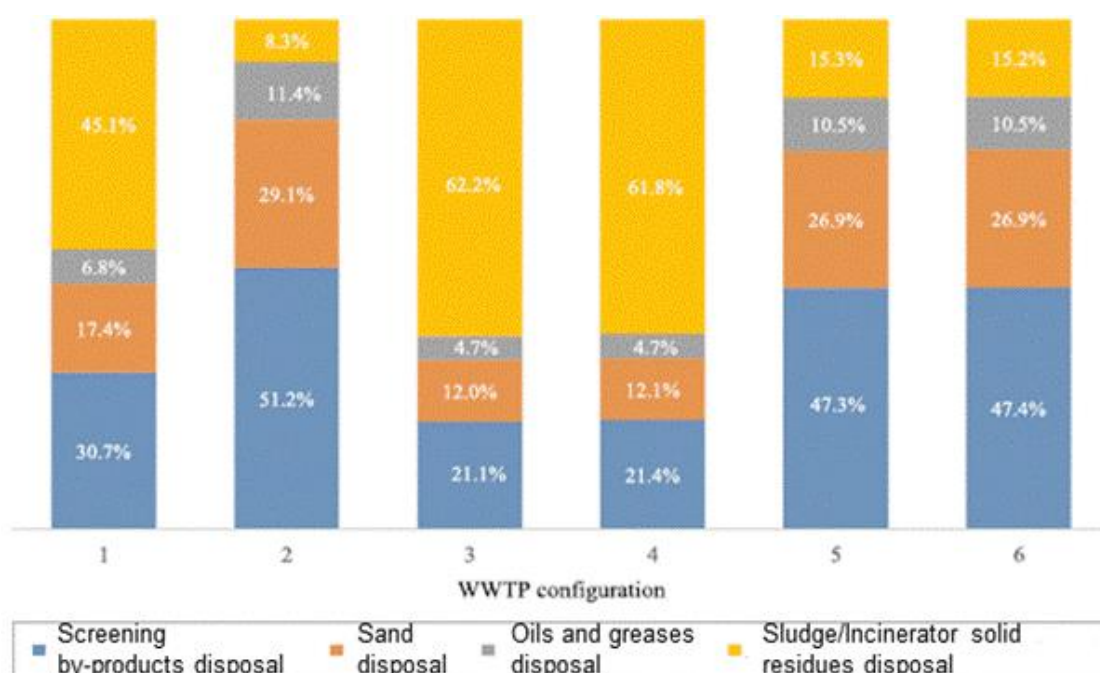


Figura 3.7. Distribuția procentuală a suprafeței necesară pentru eliminarea deșeurilor

În ceea ce privește posibilitatea de a implementa procesul SCENA, (un proces de eliminare a N și P din amestecuri apoase, printr-un proces biologic scurtat folosind ca substrat doar azotitul și acizii grași volatili produși în faza de acidogeneză de degradare a nămolului de epurare, fără adădire de substrat extern de carbon), pentru recuperarea

materialelor, doar schemele fără digestia anaerobă a nămolului au demonstrat performanțe mai mici.

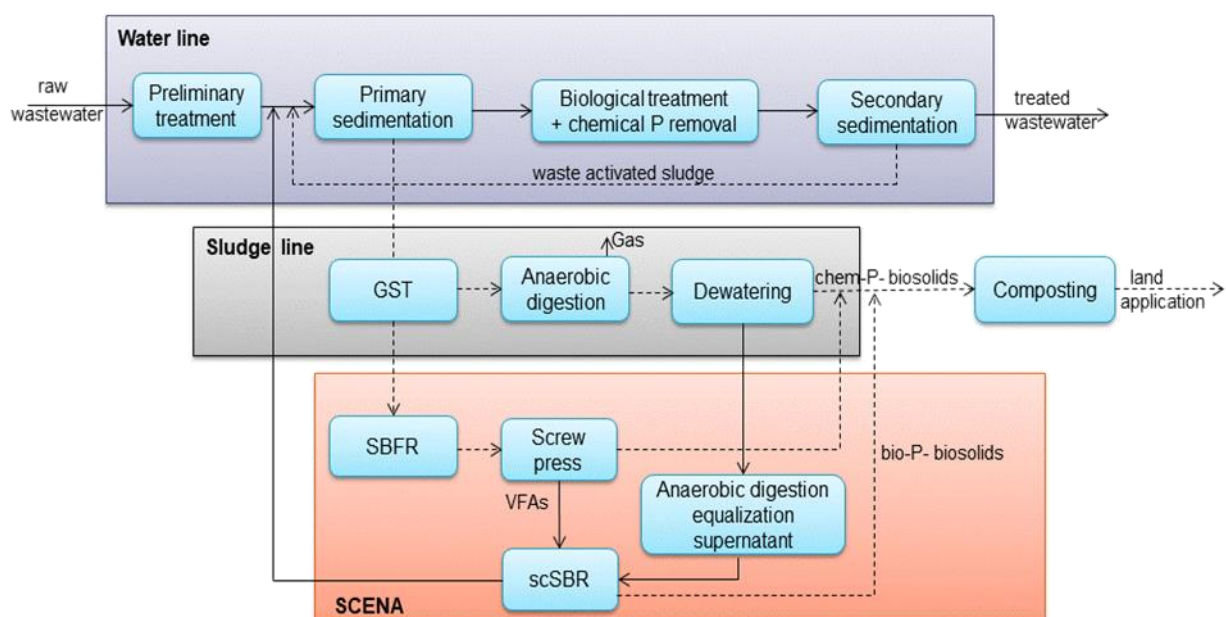


Figura 3.8. Diagrama de flux a sistemului SCENA

### 3.4.3. Rezultatele analizei multi-criteriale

Rezultatele analizei multi-criteriale au permis identificarea schemei de epurare cu cea mai mare valoare a indicatorului CI, după cum se poate observa în Tabelul 3.9.

Tabelul 3.9. Schemă de epurare sustenabilă <sup>(a)</sup>

| Methodology categories                      | Treatment scheme |       |       |       |       |       |
|---------------------------------------------|------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                                             | 1                | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     |
| <b>One-dimensional evaluation</b>           |                  |       |       |       |       |       |
| GHG emissions                               | 0.879            | 0.066 | 1.000 | 0.909 | 0.046 | 0.047 |
| Electricity from the grid                   | 0.841            | 0.723 | 1.000 | 0.998 | 0.782 | 0.784 |
| Running costs                               | 0.771            | 0.999 | 0.617 | 0.622 | 0.998 | 1.000 |
| WWTP planimetric size                       | 0.932            | 0.912 | 0.986 | 1.000 | 0.963 | 0.977 |
| Surface of the service landfill             | 0.599            | 1.000 | 0.412 | 0.438 | 0.923 | 0.926 |
| WWTP as biorefinery                         | 0.333            | 0.333 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 |
| <b>Multi-criteria evaluation</b>            |                  |       |       |       |       |       |
| Balanced SH                                 | 0.726            | 0.672 | 0.836 | 0.824 | 0.786 | 0.789 |
| Environmentalist SH                         | 0.767            | 0.591 | 0.868 | 0.844 | 0.656 | 0.659 |
| Political SH                                | 0.774            | 0.741 | 0.788 | 0.776 | 0.768 | 0.772 |
| Plant manager SH                            | 0.742            | 0.746 | 0.768 | 0.758 | 0.791 | 0.793 |
| Researcher SH                               | 0.683            | 0.540 | 0.910 | 0.893 | 0.735 | 0.738 |
| Environmental Protection Agency SH          | 0.764            | 0.651 | 0.831 | 0.812 | 0.697 | 0.701 |
| <b>Number of times first in the ranking</b> |                  |       |       |       |       |       |
| Mono-criteria approach                      | 0                | 1     | 3     | 2     | 1     | 2     |
| Multi-criteria approach                     | 0                | 0     | 5     | 0     | 0     | 1     |

<sup>(a)</sup> - Valorile numerice din tabel sunt normalizate [0-1]

### 3.5. Concluzii parțiale

În urma aplicării analizei multi-criteriale, schema de epurare cea mai sustenabilă este cea bazată pe sedimentare primară, procese biologice cu nămol activat (sarcină organică mică) și digestia anaerobă a nămolului cu valorificarea biogazului. Această schemă de epurare este diferită de cea adoptată în practica actuală de proiectare, care include și utilizarea tratamentului termic ca soluție de tratare a nămolului de epurare.

**Contribuția originală** a acestui studiu este reprezentată de propunerea unei metodologii de analiză bazate pe mai multe criterii de evaluare și de considerare a părților interesate, în procesul de evaluare a oportunităților de proiectare a unei stații de epurare a apelor uzate municipale de capacitate mare, cu scopul de a sprijini selecția celei mai bune/sustenabile alternative de epurare a apelor uzate și de tratare/valorificare a nămolurilor. De asemenea, acest studiu a evidențiat faptul că este oportună adoptarea unei abordări multi-criteriale care să integreze criteriile orientate spre sustenabilitate.

## **CAPITOLUL 4. EVALUAREA SUSTENABILITĂȚII SISTEMULUI ROMÂNESC DE MANAGEMENT AL APELOR UZATE ȘI NĂMOLULUI. STUDIU DE CAZ: S.C. APAVITAL S.A, IAȘI**

### 4.1. Evaluarea de mediu a sistemului de management al apelor uzate și nămolului

Scopul acestui capitol este de a evalua sustenabilitatea unei stații de epurare a apelor uzate municipale, aflate în operare, din punct de vedere al eficienței energetice și al emisiilor de GHG, prin utilizarea instrumentului ECAM (versiunea 2.2). Pentru îndeplinirea acestui scop au fost stabilite mai multe obiective:

- Colectarea datelor de intrare pentru o perioadă de evaluare de un an;
- Transformarea datelor de intrare în indicatori de performanță;
- Dezvoltarea diferitelor scenarii.

### 4.2. Gestionarea nămolurilor de epurare în România

În 2017, un număr de 9.978.886 de locuitori au fost conectați la sistemele de canalizare, reprezentând 50,8% din populația rezidentă din România. După cum se poate observa în Figura 4.1, populația urbană conectată reprezintă 87,7% iar cea rurală reprezintă 8,2%. Populația conectată la sistemul de canalizare prevăzut cu stație de epurare este de 9.710.077 persoane, reprezentând 49,4% din populația rezidentă a țării.

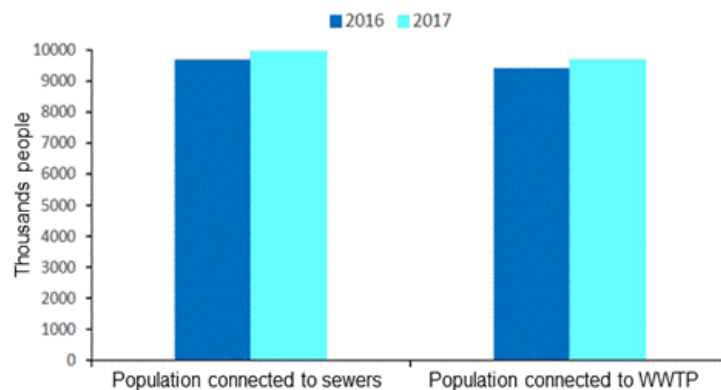


Figura 4.1. Populația conectată la rețeaua de canalizare și la stația de epurare

Cantitățile de nămol rezultate în 2007 (172.529 tone de materie uscată/an) sunt mai mici comparativ cu cele din 2018 (520.850 tone substanță uscată/an).

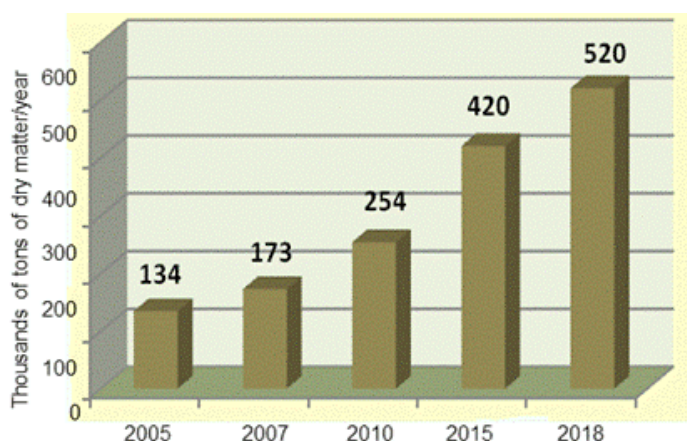


Figura 4.2. Evoluția cantităților de nămol generate de WWTPs în România

### 4.3. Abordarea metodologică

#### 4.3.1. Cadrul metodologiei ECAM

Evaluarea sustenabilității stației de epurare S.C APAVITAL S.A, Iași, aleasă drept studiu de caz s-a realizat pe baza metodologiei prezentată în Figura 4.3

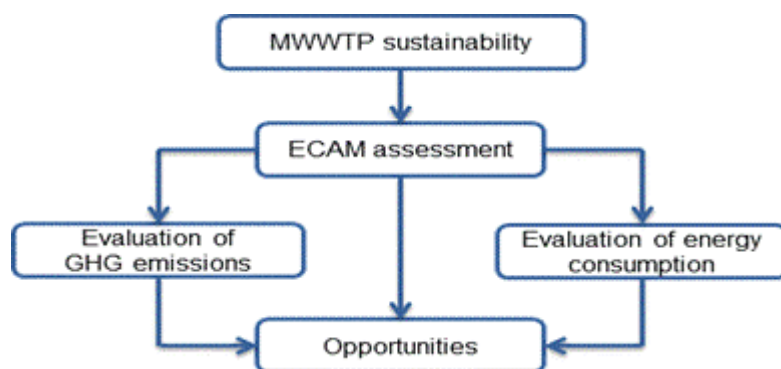


Figura 4.3. Cadrul metodologiei utilizate



#### 4.3.2. Caracteristicile influentului și efluentului stației de epurare din Iași

SC APAVITAL S.A Iași asigură colectarea și epurarea apelor uzate pentru (Figura 4.4):

- județul Iași și municipiul Pașcani;
- 3 orașe (Târgu Frumos, Hârlău, Podu Iloaiei);
- 41 de sate din județul Iași și 3 sate (Gherăești, Doljești și Sagna) din județul Neamț.



Figura 4.4. Zona de operare a S.C APAVITAL S.A.

#### Descrierea procesului tehnologic

Stația de epurare S.C APAVITAL S.A are o capacitate maximă de 4,2 m<sup>3</sup>/s. Apa uzată ajunsă în stația de epurare trece printr-o serie de gratare și site, unde sunt îndepărtate corpurile de mari dimensiuni, iar de aici ajunge în deznisipator, unde sunt eliminate nisipul și petrișul. După această treaptă preliminară de epurare urmează sedimentarea primară, unde sunt îndepărtate o parte din substanțele organice. Următoarea fază este epurarea biologică care include procesul de nitrificare-denitrificare și tratamentul chimic pentru îndepărtarea fosforului. Bazinul este împărțit în patru secțiuni. Fiecare secțiune asigură nitrificarea și denitrificarea și este prevăzută cu recirculare externă și internă. Eliminarea fosforului se realizează prin tratarea chimică, utilizând sulfatului feros în trei puncte diferite ale fluxului. În cele din urmă, după sedimentarea secundară, rezultă un influent, care este gata să fie evacuat printr-un canal direct în râul Bahlui și o cantitate de nămol care este recirculată parțial în reactorul biologic.

În ceea ce privește linia nămolului, nămolul primar este pompat în îngroșătorul gravitațional. Nămolul activ și surplusul de nămol activ sunt pompați în îngroșătorul

mecanic, unde pentru optimizarea procesului se adaugă o doză de polielectrolit iar procesul este automat. După îngroșare, în conformitate cu Figura 4.5, urmează digestia anaerobă, cu producere de biogaz, care va fi utilizat pentru co-generarea energiei termice și electrice (CHP).

După digestia anaerobă, nămolul rămas este deshidratat în agregate și se depozitează pe paturile de uscare (cu suprafețe de ~ 65.000 m<sup>2</sup> și un timp de depozitare în jur de 760 de zile) după care este trimis la depozitul de deșeuri.

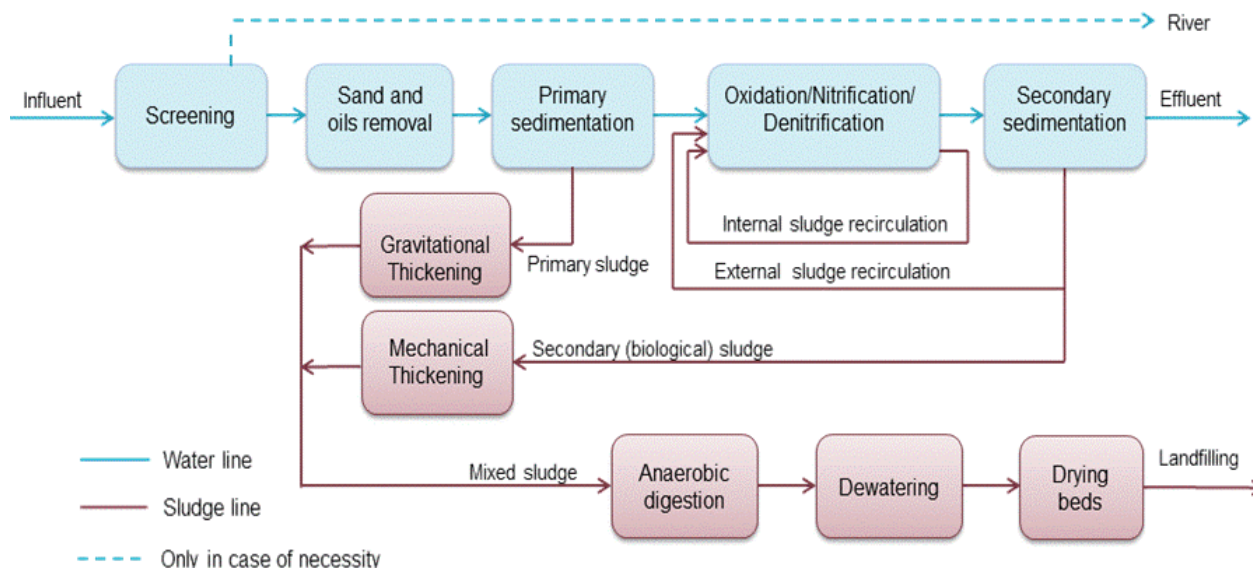


Figura 4.5. Schema tehnologică utilizată de S.C APAVITAL S.A

#### 4.3.3. Evaluarea stației de epurare S.C APAVITAL S.A folosind ECAM

Perioada de evaluare luată în considerare în acest studiu este de un an (365 de zile). Este cunoscut faptul că, pentru astfel de instrumente de modelare, acuratețea studiului depinde de calitatea datelor de intrare; cu alte cuvinte, colectarea datelor este un pas important în acest context. Datele de intrare referitoare la S.C APAVITAL S.A MWWTP au fost obținute prin chestionare completate de reprezentantul companiei (Tabelul 4.4). Este important de menționat faptul că unele dintre date sunt reale iar unele sunt estimate.

După stabilirea perioadei de evaluare, etapele care formează sistemul au fost activat (apele uzate - colectarea, epurarea, evacuarea /reutilizarea). Întrucât România nu se află pe lista de „țări selectate” din configurația instrumentului, valorile: „Factorul de emisie pentru energia electrică de la rețea” și „Consumul anual de proteine pe cap de locuitor” au fost considerate din literatura de specialitate: 1,069422796 (~1,07) kgCO<sub>2</sub>/kWh (IEA, 2010) respectiv 37,7 kg/persoană/an.



Tabelul 4.4. Baza de date pentru S.C APAVITAL S.A

| Input data                                          | Unit           | Value      | Data quality |
|-----------------------------------------------------|----------------|------------|--------------|
| BOD <sub>5</sub> generation                         | g/person/day   | 60         | Actual       |
| Volume of collected wastewater                      | m <sup>3</sup> | 40,730,780 | Actual       |
| Volume of discharged effluent to water body         | m <sup>3</sup> | 40,708,430 | Actual       |
| Volume of reused effluent                           | m <sup>3</sup> | 0          | Actual       |
| Energy consumed from the grid                       | kWh            | 8,683,300  | Actual       |
| Running costs                                       | Euro           | 2,860,398  | Estimated    |
| Energy costs                                        | Euro           | 462,940    | Actual       |
| Average total nitrogen at discharge                 | mg/L           | 8.28       | Actual       |
| Sludge produced in WWTPs (total weight)             | tone           | 575.074    | Actual       |
| Dry weight in sludge produced                       | Kg             | 28.753     | Actual       |
| Biogas produced                                     | m <sup>3</sup> | 1,129,094  | Actual       |
| Biogas flared                                       | m <sup>3</sup> | 169,364    | Actual       |
| Percentage of methane in biogas                     | %              | 59         | Actual       |
| Biogas valorised as heat and/or electricity         | m <sup>3</sup> | 959,730    | Actual       |
| Electrical energy produced from biogas vaporization | kWh            | 428,829    | Actual       |
| Distance to sludge disposal site                    | Km             | 0.5        | Actual       |
| Volume of fuel consumed (trucks)                    | L              | 7000       | Estimated    |
| Number of trips to sludge disposal site             | Number         | 3,285      | Estimated    |

În ceea ce privește „sursa potențialului de încălzire globală”, a fost selectată CCF5AR (2014/2013) CCPC, cu valoarea relativă a CO<sub>2</sub> pentru un orizont de timp de 100 de ani (CO<sub>2</sub>=1 echivalenți CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>=34 echivalenți CO<sub>2</sub> și N<sub>2</sub>O= 298 echivalenți CO<sub>2</sub>).

Important de menționat este faptul că numai 78,82% din populația rezidentă provenită din spațiul geografic a județului Iași și localitățile limitrofe din Neamț, este deservită de S.C APAVITAL S.A.

În secțiunea inițială de evaluare (Tier A) a emisiilor de GHG, ECAM permite definirea tipologiei nămolului și a modului de funcționare a etapei biologice implementată în etapa de epurare. Procentul de nămol produs și factorul emisiei de metan sunt diferite pentru fiecare tip de epurare. Dintre toate metodele de eliminare a nămolului (compostarea, incinerarea, aplicarea pe terenuri și depozitarea) a fost selectată depozitarea. În România, depozitarea este una dintre cele mai utilizate metode de eliminare a nămolului, 50% din nămolul uscat produs fiind trimis la depozitele de deșeuri (Prasad și colab., 2019).

Costurile totale anuale de operare ale stației de epurare a apelor uzate municipale sunt de 2.860.398 Euro (Figura 4.6) din care doar 16.2% sunt asociate cu energia consumată, procentul rămas (83,8%) se datorează costurilor cu reactivii chimici, salariile lucrătorilor, întreținerea instalației, costul evacuării apei uzate epurate în râul Bahlui, costul transportului și eliminării nămolului și a reziduurilor solide.



Figura 4.6. Costurile totale ale stației de epurare a apelor uzate municipale

## 4.4. Rezultate și discuții

### 4.4.1. Evaluarea emisiilor de GHG

Principala sursă de emisii de GHG din stația de epurare a apelor uzate municipale este energia electrică (59%), calculată ca energie electrică consumată în toate etapele procesului, urmată de emisiile de N<sub>2</sub>O (40,6%) și emisiile de CH<sub>4</sub> (0,3%), așa cum este indicat în Figura 4.7, emisiile de CO<sub>2</sub> având o contribuție mai mică (0,1%). Procentul mare de emisii de N<sub>2</sub>O se datorează procesului de epurare a apelor uzate și evacuării efluenților care contribuie cu 434.305 KgCO<sub>2</sub>eq/an respectiv, 789.215 KgCO<sub>2</sub>eq/an la totalul emisiilor.

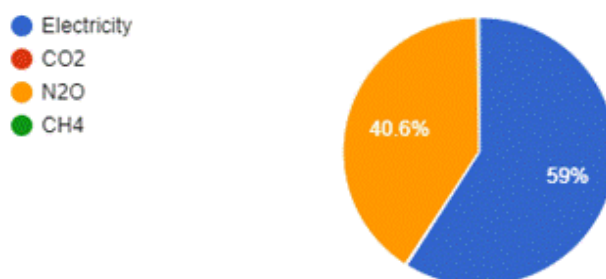


Figura 4.7. Sursa emisiilor de GHG

De asemenea, ECAM oferă distribuția emisiilor de GHG, luând în considerare etapele principale ale epurării apelor uzate și a tratării nămolului. Cea mai mare contribuție la emisiile de GHG o are utilizarea energiei electrice pentru epurarea apelor uzate (59%), urmată de gestionarea nămolurilor (în special faza de eliminare a nămolurilor- 31%), evacuarea efluentului (5%) și apoi de procesul de epurare a apelor uzate (2,8%) (Figura 4.8). Apele uzate neepurate contribuie cu 1,9% la emisiile de GHG. Producția și valorificarea biogazului în interiorul stației de epurare a apelor uzate municipale are o contribuție mai mică (0,23%) la emisiile de GHG, precum și combustibilul consumat (0,07%).

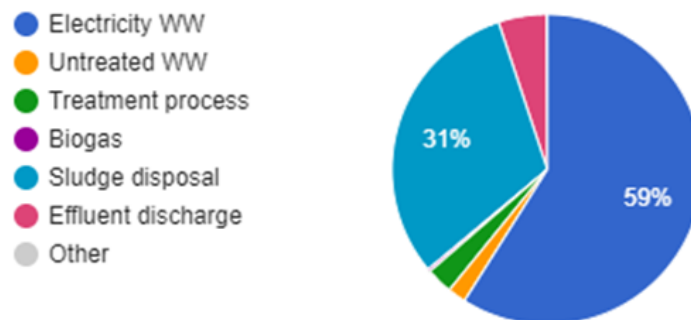


Figura 4.8. Emisiile de GHG pe etape (sursa detaliată)

Instrumentul ECAM identifică și categoriile UNFCCC care sunt atribuite emisiilor (Figura 4.9). Categoria energie (electricitate și căldură) este pe primul loc (59%), urmată de categoria deșeuri exprimată prin: eliminarea deșeurilor solide (30,9%), epurarea și evacuarea apelor uzate (9,7%) și nu în ultimul rând prin tratarea biologică a deșeurilor solide (0,28%).

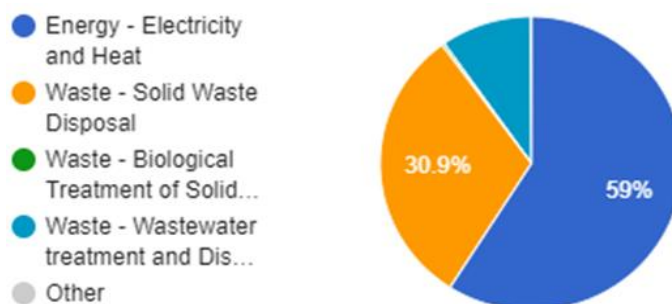


Figura 4.9. Categoriile de GHG după criteriile UNFCCC

După cum se poate observa în Figura 4.10, epurarea apelor uzate este responsabilă de 82,4% din emisiile de GHG, în timp ce colectarea apelor uzate și evacuarea apelor epurate contribuie cu 10,6% respectiv 9%. Apele uzate neepurate au un procent mai mic (1,9%).

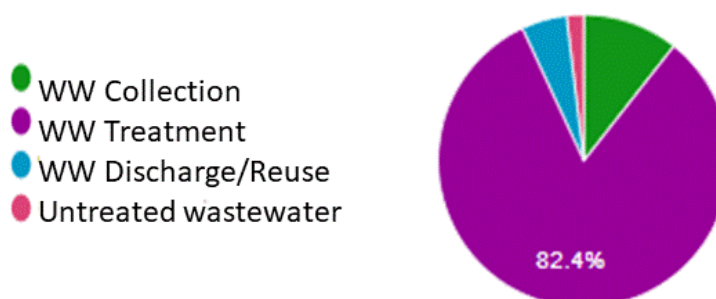


Figura 4.10. Totalul emisiilor de GHG

Pentru o mai bună înțelegere, sursa de generare a acestor gaze (în fiecare etapă) este prezentată detaliat în Tabelul 4.8.

Tabelul 4.8. Originea emisiilor de GHG din stația de epurare

| Origin                                                                 | Kg CO <sub>2</sub> eq<br>assessment period | Kg CO <sub>2</sub> eq/year/<br>serviced population | Kg CO <sub>2</sub> eq/m <sup>3</sup> |
|------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------|----------------------------------------------------|--------------------------------------|
| <b>Collection</b>                                                      |                                            |                                                    |                                      |
| Electricity                                                            | 1,671,385                                  | 4.59                                               | 0.041                                |
| Fuel engines<br>(CO <sub>2</sub> , N <sub>2</sub> O, CH <sub>4</sub> ) | 4,180                                      | 0.011                                              | n.a                                  |
| <b>Treatment</b>                                                       |                                            |                                                    |                                      |
| Electricity                                                            | 7,614,734                                  | 20.9                                               | 0.19                                 |
| Treatment process<br>(N <sub>2</sub> O+ CH <sub>4</sub> )              | 434,305                                    | 1.19                                               | 0.011                                |
| Biogas                                                                 | 44,846                                     | 0.12                                               | 0.0011                               |
| Sludge management                                                      | 4,883,899                                  | 13.4                                               | 0.12                                 |
| <b>Discharge/Reuse</b>                                                 |                                            |                                                    |                                      |
| Electricity                                                            | 0                                          | 0                                                  | 0                                    |
| Effluent discharge                                                     | 789,215                                    | 2.17                                               | 0.019                                |

Utilizarea energiei electrice în etapele de colectare și epurare a apelor uzate reprezintă principala sursă de emisii GHG. Etapa de epurare include, pe lângă epurarea apelor uzate, și opțiunile de gestionare a nămolurilor. Dacă depozitarea temporară și transportul nămolului sunt responsabile de 995,1 KgCO<sub>2</sub>eq/an, respectiv 19,063 KgCO<sub>2</sub>eq/an, emisiile de la depozitul de deșeuri unde ajunge în final nămolul sunt de 4.863.841 KgCO<sub>2</sub>eq/an. Gestionarea nămolului este o provocare pentru MWWTP, nu numai din punct de vedere al cantității generate (575,1 tone/an), ci și din punct de vedere al contribuției semnificative la emisiile de GHG (4.883.899 KgCO<sub>2</sub>eq/an).

#### 4.4.2. Evaluarea consumului de energie

După cum se poate observa în Tabelul 4.9 și în Figura 4.11, energia este utilizată numai în etapa de colectare a apelor uzate (0.038 kWh/m<sup>3</sup>) și în etapa de epurare (0.17 kWh/m<sup>3</sup>), nu și pentru evacuarea apelor uzate epurate în râu (0 kWh /m<sup>3</sup>). Acest lucru se datorează modului de construcție a MWWTP, care favorizează descărcarea gravitațională a apelor uzate epurate în râu. În plus, în faza de epurare se consumă cantități considerabile de energie, datorită procesului de oxidare/nitrificare și deshidratării nămolului, deși biogazul este recuperat și o parte din acesta este utilizat pentru a genera energie. Consumul de energie electrică pentru epurarea apelor uzate este strâns legat de dimensiunea MWWTP. De obicei, consumul de energie electrică scade asimptotic o dată cu creșterea dimensiunii stației de epurare și crește pe măsură ce cerințele pentru efluenți devin mai stricte.

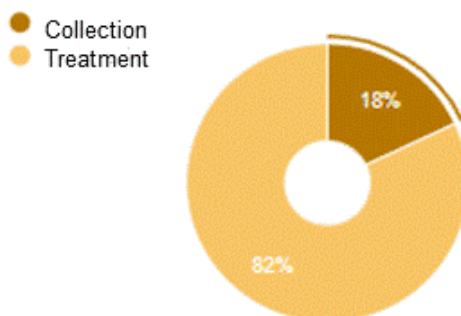


Figura 4.11. Proveniența consumului de energie

Tabelul 4.9. Performanța energetică a stației de epurare a apelor uzate municipale

| Description                                             | Current value | Unit               |
|---------------------------------------------------------|---------------|--------------------|
| <b>Collection</b>                                       |               |                    |
| Wastewater collection (population connected to sewers)  | 82.15         | %                  |
| Energy consumption per wastewater conveyed to treatment | 0.038         | kWh/m <sup>3</sup> |
| <b>Treatment</b>                                        |               |                    |
| Energy consumption per treated wastewater               | 0.17          | kWh/m <sup>3</sup> |
| Energy consumption per BOD <sub>5</sub> mass removed    | 0.99          | kWh/Kg             |
| Energy production per treated wastewater                | 0.011         | kWh/m <sup>3</sup> |
| <b>Discharge/Reuse</b>                                  |               |                    |
| Energy consumption per discharged/reused wastewater     | 0             | kWh/m <sup>3</sup> |

#### 4.4.3. Dezvoltarea scenariilor pentru îmbunătățirea performanțelor stației de epurare din Iași

##### a) Creșterea gradului populației deservită de stația de epurare a apelor uzate municipale

Deși procentul populației deservită de MWWTP este ridicat, este esențială continuarea îmbunătățirii serviciilor oferite de stație pentru a reduce procentul de ape uzate neepurate și emisiile de GHG corelate cu acestea.

Tabelul 4.10. Îmbunătățirea procentului populației deservite

|                                   | Population connected to sewers (people) | Serviced population (people) | Total GHG emissions (KgCO <sub>2</sub> eq/year) | GHG emissions from untreated wastewater (KgCO <sub>2</sub> eq/year) |
|-----------------------------------|-----------------------------------------|------------------------------|-------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|
| <b>MWWTP</b>                      | 379,779                                 | 364,350                      | 15,750,552                                      | 299,628                                                             |
| <b>Serviced population (100%)</b> | 379,779                                 | 379,779                      | 15,469,315                                      | 0                                                                   |

##### b) Reducerea depozitării nămolurilor

Acest scenariu este în concordanță cu Strategia națională de gestionare a nămolului (2012), care urmărește ca până în 2040, 50% din nămol să fie utilizat în agricultură și 50% să fie incinerat. Prin schimbarea destinației finale a nămolului, emisiile de GHG vor fi reduse cu 18,082 KgCO<sub>2</sub>eq/an (0,11%).

### c) Scăderea consumului de energie din stația de epurare municipală

Consumul de energie electrică este principala sursă de emisii de GHG. O soluție ar fi reducerea consumului de energie în toate etapele (în special în faza de epurare); această soluție duce la reducerea cantităților de emisii de GHG și a impacturilor asociate.

Tabelul 4.11. Scenariile analizate

| Scenario   | Initial GHG Emissions (kgCO <sub>2</sub> eq) | Energy consumption reduction (%) | GHG Emission Reduction (kg CO <sub>2</sub> eq) | Total GHG Emission (kgCO <sub>2</sub> eq) | GHG Reduction (%) |
|------------|----------------------------------------------|----------------------------------|------------------------------------------------|-------------------------------------------|-------------------|
| Scenario 1 | 15,750,552                                   | 5                                | 464,306                                        | 15,286,246                                | 2.95              |
| Scenario 2 |                                              | 10                               | 928,612                                        | 14,812,940                                | 5.9               |
| Scenario 3 |                                              | 15                               | 1,392,918                                      | 14,357,634                                | 8.84              |
| Scenario 4 |                                              | 20                               | 1,857,224                                      | 13,893,328                                | 11.79             |

## 4.5. Concluzii parțiale

- Principala sursă de emisii de GHG de la stația de epurare a apelor uzate municipale din Iași este reprezentată de utilizarea energiei electrice (59%), urmată de emisiile de gaze din etapa de epurare (emisiile de N<sub>2</sub>O, CH<sub>4</sub> și CO<sub>2</sub>). Emisiile N<sub>2</sub>O se datorează procesului de epurare al apelor uzate și de evacuare a efluenților. Energia electrică este principala sursă de emisii de GHG, datorită sistemului de suflante și pompe utilizat, precum și datorită etapei de deshidratare a nămolului. Chiar dacă stația de epurare produce și valorifică biogazul, aceasta este utilizat prea puțin, numai pentru digestoare (sub formă de căldură) și în zona birourilor (sub formă de electricitate). MWWTP utilizează cea mai mare cantitate de energie electrică pentru a epura apele uzate și pentru a trata nămolurile, din rețeaua publică de distribuție a energiei electrice.

- În evaluarea performanței energetice a stației de epurare a apelor uzate municipale au fost luate în considerare 3 etape: colectarea, epurarea și evacuarea. Etapa de epurare are cel mai mare consum de energie (82%), în timp ce colectarea apelor uzate are un procent mai mic (18%). În ceea ce privește evacuarea apelor uzate epurate, consumul de energie este zero.

- Pentru reducerea emisiilor de GHG și a consumului de energie au fost propuse 3 scenarii pentru MWWTP Iași. Pentru a fi în concordanță cu principiile conceptului de sustenabilitate, primele îmbunătățiri/ intervenții trebuie făcute în etapa de epurare.

## CAPITOLUL 5. CONCLUZII GENERALE

Studiile efectuate în cadrul tezei de doctorat intitulată „**Valorificarea sustenabilă a nămolurilor din stațiile de epurare**” au ca obiectiv principal **dezvoltarea și aplicarea de metodologii noi și inovative, pentru a evalua performanțele stațiilor de epurare a apelor uzate municipale și de tratare a nămolului, și pentru a sprijini factorii de decizie în selectarea celei mai bune variante de proiectare a stațiilor de epurare, pentru îmbunătățirea sustenabilității pe considerente care țin de consumul de energie, emisiile de gaze cu efect de seră și valorificarea nămolului rezultat din epurarea apelor uzate.**

Lucrarea de doctorat subliniază importanța resurselor de apă, impactul stației de epurare a apelor uzate municipale asupra mediului și sănătății umane, precum și posibilitățile de îmbunătățire a performanțelor stației.

**În continuare sunt prezentate principalele rezultate și concluzii ale tezei:**

În **Capitolul 1** au fost discutate principalele trepte din cadrul stației de epurare utilizate pentru epurarea apelor uzate municipale și pentru tratarea nămolului. De asemenea, au fost prezentate principalele tipuri de nămol produse și caracteristicile acestora. Nămolul provenit din epurarea apelor uzate generat în cantități mari reprezintă o problemă semnificativă pentru administratorii de stații de epurare și prin urmare, o serie de operații și procese mecanice, fizice și chimice au fost aplicate pe linia de apă uzată și/ sau nămol pentru a reduce cantitatea acestuia. Deoarece aceste tehnologii reduc doar o parte din nămol, gestionarea sa reprezintă încă o problemă pentru MWWTP. Prin urmare, a fost realizată o scurtă descriere a celor mai aplicate metode de tratare și eliminare a nămolului și a legislației din domeniu, transpusă în legislația românească și cea italiană. Dintre toate metodele, digestia anaerobă rămâne una dintre cele mai utilizate și eficiente metode de stabilizare a nămolului în cadrul stației de epurare a apelor uzate municipale.

În contextul sustenabilității, o altă soluție pentru reducerea cantităților mari de nămol este recuperarea de materiale și/sau energie. La nivel global, pentru recuperarea materialelor cum ar fi: nutrienți, adsorbanți, materiale de construcții, metale grele, proteine, enzime și materiale bio-plastice din nămol sunt utilizate diferite procese și tehnologii. De exemplu, procentul de recuperare a fosforului și a proteinelor din nămolul de epurare prin ultrasonare a fost de peste 80% chiar și 90% în cazul metalelor grele. Adsorbanții obținuți din nămol (SBA) au fost aplicați cu rezultate bune pentru a elimina poluanții din apele uzate, cum ar fi: metale grele, coloranți și fenolii. De asemenea, nămolul de epurare a fost

utilizat pentru obținerea diferitelor materiale de construcție, cum ar fi: betonul, cărămizile și mortarul.

În ceea ce privește recuperarea energiei din nămolul de epurare, producerea de biogaz prin digestia anaerobă, este una dintre cele mai utilizate metode. Important de menționat este faptul că biogazul obținut poate fi utilizat/valorificat în interiorul stației de epurare, ajutând astfel la reducerea costurilor totale de exploatare ale stației. Deși există numeroase tehnologii de recuperare a materialele și a energiei din nămolul de epurare, sunt necesare în continuare studii suplimentare. Înainte de extinderea și implementarea unor astfel de tehnologii, trebuie luate în considerare aspectele tehnice, economice și mai ales cele de mediu.

**Capitolul 2** descrie metodologiile utilizate pentru evaluarea performanței sistemului de gestionare a nămolurilor de epurare. Au fost luate în considerare două categorii de metodologii bazate: pe un singur criteriu sau pe mai multe criterii simultan. Evaluarea și Monitorizarea Performanței Energetice și a Emisiilor de Carbon (ECAM) a fost utilizată pentru a evalua performanța energetică și emisiile de GHG ale MWWTP. Principalele categorii de emisii de GHG evaluate de software-ul ECAM au fost de asemenea descrise. Dintre Metodele de Analiză Decizională Multi-Criterială (MCDA) disponibile în literatura de specialitate, metoda Procesul de Ierarhizare Analitică (AHP) a fost descrisă și utilizată în cadrul acestei teze de doctorat.

**Capitolele 3 și 4 au un caracter original** prin demonstrarea eficienței evaluării performanțelor MWWTP, începând din faza de construcție/proiectare și continuând cu faza operațională și evidențierea posibilităților de îmbunătățire a managementului apelor uzate și a nămolului pe tot parcursul ciclului de viață.

Scopul principal al **Capitolului 3** intitulat **Proiectarea sustenabilă a unei stații de epurare a apelor uzate municipale bazată pe o analiză decizională multi-criterială** a fost identificarea celei mai potrivite schemei de epurare a apei uzate și de gestionare a nămolului pentru o stație de capacitate mare, situate în Regiunea Apulia, Italia. Abordarea originală constă în selectarea schemei de epurare în conformitate cu o metodologie multi-criterială care ia în considerare complexitatea implementării conceptului de sustenabilitate (prin adoptarea unor criterii cum ar fi: mediul înconjurător, performanțe economice, energetice și utilizarea terenului și prin consultarea părților interesate).

**După aplicarea metodologiei MCDA pentru a determina cea mai sustenabilă alternativă pentru epurarea apelor uzate și tratarea nămolului, pot fi formulate următoarele concluzii:**



□ Toate alternativele propuse pentru analiză (6 scheme de epurare) au fost inspirate de cele mai moderne tehnologii privind construcția stațiilor de epurare.

□ Criteriile de evaluare precum: **emisiile de GHG și utilizarea terenului pentru construcția stației sau a depozitului, considerate de obicei criterii mai puțin importante, în practica curentă de proiectare, au fost luate în considerare în acest studiu.** Toate cele șase criterii de evaluare (generarea emisiilor de GHG, consumul de energie, costurile de funcționare, dimensiunea planimetrică a stației, suprafața depozitului de deșeuri și MWWTP ca biorafinărie) au fost cele mai reprezentative, acoperind principalele aspecte ale unei MWWTP de capacitate mare.

Alegerea **consumului de energie electrică drept criteriu de evaluare este esențial în această evaluare care are în vedere o abordare sustenabilă**, multe dintre MWWTP fiind proiectate doar pentru a satisface anumite cerințe de calitate a efluenților, fără a lua în considerare consumul de energie. În plus, consumul mare de energie înregistrat de stațiile de epurare, generează emisii semnificative de GHG și, de asemenea, mărește costurile de operare. Prin intermediul ultimului criteriu, **MWWTP ca biorafinărie**, această teză de doctorat oferă un răspuns la dezideratele conceptului de economie circulară, cu privire la închiderea buclelor de materiale.

Recuperarea materialelor (substanțele nutritive și materiale bio-plastice) din apele uzate și din nămolul rezultat, prin implementarea procesului SCENA este mai ușoară în stațiile de epurare cu digestie anaerobă. Ca o remarcă, procesul SCENA poate fi implementat cu succes atât în cadrul MWWTP existente, dar mai ales în cadrul stațiilor de epurare care se află în stadiul de proiectare.

**Diversitatea factorilor de decizie** (6) implicați în evaluare este importantă în determinarea clasamentului final. Au fost luați în considerare factori de decizie/părți interesate precum: ecologistul, politicianul, managerul stației de epurare, cercetătorul, reprezentantul agenției pentru protecția mediului și evaluatorul neutru. Multitudinea părților interesate acționează ca o analiză de sensibilitate în acest studiu.

În concluzie, **schema de epurare optimă rezultată s-a dovedit a fi diferită de cea adoptată în practica curentă de proiectare**, care include utilizarea tratamentului termic pentru tratarea nămolului. Schema 3, bazată pe sedimentare primară, procesele biologice cu nămol activ la sarcină organică redusă ( $OLR = 0,210 \text{ kgBOD}_5/\text{kg VSS/d}$ ) și digestia anaerobă a nămolului cu valorificarea biogazului, a fost cea mai bună/sustenabilă.

**Una dintre cele mai importante contribuții ale acestui capitol a fost analizarea unei multitudini de criterii de evaluare și considerarea a mai multor factori decizionali interesați, în procesul de evaluare a proiectării sustenabile a unei stații**

**de epurare a apelor uzate municipale de capacitate mare.** Criteriile de evaluare, care de obicei nu sunt luate în considerare în astfel de studii, sunt menționate primele în cadrul tezei. Acest tip de evaluare bazat pe o analiză multi-criterială pentru identificarea design-ului MWWTP este în conformitate cu principiile conceptului de sustenabilitate.

În **Capitolul 4** a fost investigată sustenabilitatea unei MWWTP, aflate în operare, cu ajutorul instrumentului ECAM, pentru a obține o imagine de ansamblu a consumului de energie și a emisiilor de GHG asociate. Stația de epurare a apelor uzate municipale considerată, care aparține operatorului S.C APAVITAL S.A, provine din regiunea de Nord-Est a României și își desfășoară activitatea în județul Iași. Software-ul ECAM permite clasificarea principalelor surse de emisii de GHG și consum de energie și oferă posibilitatea de dezvoltare a diferitelor scenarii pentru îmbunătățirea consumului de energie al stației de epurare.

**În urma aplicării software-ului ECAM, pot fi formulate următoarele concluzii:**

Evaluarea pe baza software-ului ECAM a luat în considerare cele trei etape principale: colectarea apelor uzate, epurarea apelor uzate și deversarea apelor uzate municipale epurate.

□ În ceea ce privește emisiile de GHG, etapa de epurare este responsabilă de 82,4%, în timp ce etapele de colectare a apelor uzate și de evacuare a efluenților epurați reprezintă doar 10,6%, respectiv 9%.

□ **Energia electrică utilizată este principala sursă a emisiilor de GHG din cadrul stației de epurare**, urmată de emisiile de N<sub>2</sub>O (datorate proceselor de epurare și deversare a efluenților), emisiile de CH<sub>4</sub> și emisiile de CO<sub>2</sub>;

□ Etapa de epurare are un consum ridicat de energie (82%), comparativ cu colectarea apelor uzate (18%). Consumul de energie pentru evacuarea apelor uzate epurate este zero datorită modului în care a fost construită stația, care favorizează deversarea gravitațională.

Acest **studiu subliniază că etapa de epurare are cel mai mare impact** în ceea ce privește consumul de energie și cantitatea de emisii de GHG generată.

**Posibilitatea de a îmbunătăți performanțele stației de epurare a fost studiată prin propunerea unor scenarii diferite, cum ar fi următoarele:**

**a) Creșterea procentului populației deservite de stația de epurare a apelor uzate municipale.** Analiza efectuată indică faptul că adoptarea acestui scenariu contribuie la reducerea emisiilor de GHG și în special a emisiilor generate de apele uzate neepurate.

**b) Reducerea depozitării nămolului,** oferă posibilitatea reducerii emisiilor de GHG generate de eliminarea nămolului în depozitul de deșeuri, dar totodată reprezintă și primul

pas pentru implementarea Strategiei naționale de gestionare a nămolului. Utilizarea nămolului în agricultură aduce o serie de beneficii, precum: îndeplinirea unor principii de sustenabilitate (reutilizare/reducere/recuperare), înlocuirea îngrășămintelor chimice de pe piață, îmbogățirea solului cu substanțe nutritive și în special reducerea emisiilor de GHG generate de depozitele de deșeuri.

**c) Scăderea consumului de energie a stației de epurare a apelor uzate municipale.** Prin reducerea consumului de energie de la rețeaua publică, emisiile de GHG sunt de asemenea reduse. Utilizarea altor surse de energie regenerabile, cum ar fi energia solară și eoliană, poate duce la o reducere substanțială a emisiilor de GHG de până la 12%.

**Noutatea acestui capitol sunt scenariile propuse** care pot fi utile pentru autoritățile locale și guvern, care necesită implementarea unor acțiuni specifice pentru îndeplinirea Țintelor europene în ceea ce privește reducerea energiei și schimbările climatice.

Cercetările realizate în această teză de doctorat evidențiază: importanța proiectării și funcționării sustenabile a stațiilor de epurare municipale, nivelul de dezvoltare și aplicare a celor mai eficiente și mai curate tehnologii de epurare din domeniul apelor uzate, și a tratării și valorificării nămolului de epurare, recuperarea materială a resurselor, implementarea conceptului de biorafinărie, evaluarea corectă a sistemului de epurare bazat pe indicatori care să reflecte aspectele multiple din funcționarea sa și posibilitățile de îmbunătățire a performanțelor sale.

O evaluare eficientă a stației de epurare trebuie să se bazeze pe o abordare care înglobează mai multe criterii și care să fie efectuată atât în faza de proiectare /reproiectare, dar și în faza de funcționare/ operare a stației, avându-se în vedere și implementarea conceptului de îmbunătățire continuă a sistemelor.

În alegerea celui mai bun design al stației de epurare este importantă implicarea a cât mai multor factori de decizie și a criteriilor de evaluare, inclusiv a celor considerate marginale până acum. În cele din urmă, dezvoltarea diferitelor scenarii cu software-ul ECAM poate îmbunătăți funcționarea stației de epurare și reduce în același timp impactul asupra sănătății umane și a mediului. Toate aceste informații pot fi utile managerului general și operatorului stației, dar și tuturor organizațiilor și specialiștilor din domeniul managementului resurselor de apă uzată.

## BIBLIOGRAFIE SELECTIVĂ

- Alvarez, J., Lopez, G., Amutio, M., Bilbao, J., Olazar, M., 2016. Preparation of adsorbents from sewage sludge pyrolytic char by carbon dioxide activation. *Process Safety and Environmental Protection*, 103, 76-86.doi:10.1016/j.psep.2016.06.035.
- Alvarez-Guerra, M., Canis, L., Voulvoulis, N., Viguri, J.R., Linkov, I., 2010. Prioritization of sediment management alternatives using stochastic multicriteria acceptability analysis. *Science of the Total Environment*, 408 (20), 4354–4367. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2010.07.016>.
- Anjum, M., Al-Makishah, N.A., Barakat, M.A., 2016. Wastewater sludge stabilization using pre-treatment methods. *Process Safety and Environmental Protection*, 102, 615–632.doi:10.1016/j.psep.2016.05.022.
- Bystrzanowska, M., Tobiszewski, M., 2018. How can analysts use multicriteria decision analysis? *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 105, 98–105. doi:10.1016/j.trac.2018.05.003.
- De Feo, G., De Gisi, S., 2010. Using an innovative criteria weighting tool for stakeholders involvement to rank MSW facility sites with the AHP. *Waste Management*, 30(11), 2370–2382. doi:10.1016/j.wasman.2010.04.010.
- De Feo, G., De Gisi, S., Galasso, M., 2012. *Wastewater. Design and Management of Treatment and Disposal Facilities*. Dario Flaccovio Editore Srl, Palermo, Italy, p. 1244 (in Italian).
- De Gisi, S., Petta, L., Farina, R., & De Feo, G., 2014. Using a new incentive mechanism to improve wastewater sector performance: The case study of Italy. *Journal of Environmental Management*, 132, 94–106. doi:10.1016/j.jenvman.2013.10.030.
- De Gisi, S., Pica, R., Casella, P., Notarnicola, M. 2018a. Dealing with a cluster of large centralized municipal wastewater treatment plants: A case study. *Process Safety and Environmental Protection*, 118, 268–278. doi:10.1016/j.psep.2018.07.002.
- De Gisi, S., Chiarelli, A., Tagliente, L., Notarnicola, M., 2018b. Energy, environmental and operation aspects of a SRF-fired fluidized bed waste-to-energy plant. *Waste Management* 73, 271–286. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.04.044>.
- Devi, P., Saroha, A.K., 2017. Utilization of sludge based adsorbents for the removal of various pollutants:A review. *Science of the Total Environment* 578, 16–33. doi:10.1016/j.scitotenv.2016.10.220.
- ECAM 2.0,2017. Manual – Draft V1 August (Available at: this link: [http://wacclim.org/ecam/help\\_pdf/ECAM-20V2-20Methodology\\_Aug2017.pdf](http://wacclim.org/ecam/help_pdf/ECAM-20V2-20Methodology_Aug2017.pdf) (Valid on 13 June 2019).

- Fighir, (Arsene) D., Musteret, C.P., **Gherghel, A.**, Morosanu, I., Gilca, A.F., Minea, M., Apopei, P., Teodosiu, C., 2016. Evaluation of landfill leachate treatment by combined Fenton oxidation and membrane separation processes. 3rd International Conference on Chemical Engineering (ICCE 2016), Iasi, Romania, 9-11 November 2016 (poster).
- Fighir (Arsene), D., Teodosiu, C., Fiore, S., 2019. Environmental and Energy Assessment of Municipal Wastewater Treatment Plants in Italy and Romania: A Comparative Study. *Water*, 11(8), 1611. doi:10.3390/w11081611.
- Gherghel, A.**, Teodosiu, C., De Gisi, S., 2019a. A review on wastewater sludge valorisation and its challenges in the context of circular economy. *Journal of cleaner production*, 228, 244-263. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.240>.
- Gherghel, A.**, Teodosiu, C., Notarnicola, M., De Gisi, S., 2020. Sustainable design of large wastewater treatment plants considering multi-criteria decision analysis and stakeholders' involvement. *Journal of Environmental Management*, 261. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110158>.
- Gu, L., Zhu, N., Zhou, P., 2013. Preparation of sludge derived magnetic porous carbon and their application in Fenton-like degradation of 1-diazo-2-naphthol-4-sulfonic acid. *Bioresource technology*, 118, 638–642. doi:10.1016/j.jclepro.2019.04.240.
- Gu, Y., Li, Y., Li, X., Luo, P., Wang, H., Robinson, Z.P., Wang, X., Wu, J., Li, F., 2017. The feasibility and challenges of energy self-sufficient wastewater treatment plants. *Applied Energy*, 204, 1463–1475. doi:10.1016/j.apenergy.2017.02.069.
- Ignatowicz, K., 2017. The impact of sewage sludge treatment on the content of selected heavy metals and their fractions. *Environmental Research*, 156, 19–22. doi:10.1016/j.envres.2017.02.035.
- Ince, O., Cetecioglu, Z., Ozbayram, E.G., Iglesias, M.M., Ince, B., Massalha, N., Robles, Á., Sabbah, I., Seco, A., 2017. Anaerobic treatment of municipal wastewater. In: Lema, J.M., Suarez, S. (Eds.), *Impacts on Energy, Economy and Environment*. IWA Publishing, pp.40-57.
- Kacprzak, M., Neczaja, E., Fijałkowska, K., Grobelaka, A., Grossera, A., Worwaga, M., Rorata, A., Brattemob, H., Almåsc, Å., Singhc, B.R., 2017. Sewage sludge disposal strategies for sustainable development. *Environmental Research*, 156, 39–46. doi:10.1016/j.envres.2017.03.010.
- Kelessidis, A., Stasinakis, A.S., 2012. Comparative study of the methods used for treatment and final disposal of sewage sludge in European countries. *Waste Management*, 32(6), 1186–1195. doi:10.1016/j.wasman.2012.01.012.

- Longo, S., D'antoni, B.M., Bongards, M., Chaparro, A., Cronrath, A., Fatone, F., Lema, J.M., Mauricio-Iglesias, M., Soares, A., Hospido, A., 2016. Monitoring and diagnosis of energy consumption in wastewater treatment plants. A state of the art and proposals for improvement. *Applied energy*, 179, 1251–1268. doi:10.1016/j.apenergy.2016.07.043.
- Longo, S., Frison, N., Renzi, D., Fatone, F., Hospido, A., 2017. Is SCENA a good approach for side-stream integrated treatment from an environmental and economic point of view? *Water Resources*, 125, 478–489. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.09.006>.
- Manara, P., Zabaniotou, A., 2012. Towards sewage sludge based biofuels via thermochemical conversion – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16 (5), 2566–2582. doi:10.1016/j.rser.2012.01.074.
- Mininni, G., Braguglia, C.M., Ramadori, R., Tomei, M.C., 2004. An innovative sludge management system based on separation of primary and secondary sludge treatment. *Water Science and Technology*, 50(9), 145–153. doi:10.2166/wst.2004.0557.
- Nazari, L., Yuan, Z., Santoro, D., Sarathy, S., Ho, D., Batstone, D., Xu, C.C., Ray, M.B., 2017. Low-temperature thermal pre-treatment of municipal wastewater sludge: Process optimization and effects on solubilization and anaerobic degradation. *Water Research*, 113, 111–123. doi:10.1016/j.watres.2016.11.055.
- Nghiem, D.L., Koch, K., Bolzonella, D., Drewes, E.J., 2017. Full scale co-digestion of wastewater sludge and food waste: bottlenecks and possibilities. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 72, 354–362. doi:10.1016/j.rser.2017.01.062.
- Nikhil, G.N., Krishna, Chaitanya, D.N.S., Srikanth, S., Swamy, Y.V., Venkata Mohan, S., 2018. Applied resistance for power generation and energy distribution in microbial fuel cells with rationale for maximum power point. *Chemical Engineering Journal*, 335, 267–274. doi:10.1016/j.cej.2017.10.139.
- Panepinto, D., Fiore, S., Zappone, M., Genon, G., Meucci, L., 2016. Evaluation of the energy efficiency of a large wastewater treatment plant in Italy. *Applied Energy*, 161, 404–411. doi:10.1016/j.apenergy.2015.10.027.
- Praspaliauskas, M., Pedišius, N., 2017. A review of sludge characteristics in Lithuania's wastewater treatment plants and perspectives of its usage in thermal processes. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 67, 899-907. doi:10.1016/j.rser.2016.09.041.

- Puchongkawarin, C., Gomez-Mont, C., Stuckey, D. C., Chachuat, B., 2015. Optimization-based methodology for the development of wastewater facilities for energy and nutrient recovery. *Chemosphere*, 140, 150–158. doi:10.1016/j.chemosphere.2014.08.061.
- Sabia, G., De Gisi, S., Farina, R., 2016. Implementing a composite indicator approach for prioritizing activated sludge-based wastewater treatment plants at large spatial scale. *Ecological Indicators*, 71, 1–18. doi:10.1016/j.ecolind.2016.06.053.
- Teodosiu, C., Bârjoveanu, G., Slușer, B. R., Popa, S. A. E., Trofin, O., 2016. Environmental assessment of municipal wastewater discharges: a comparative study of evaluation methods. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 21(3), 395–411. doi:10.1007/s11367-016-1029-5.
- Tyagi, V.K., Lo, S.L., 2013. Sludge: a waste or renewable source for energy and resources recovery? *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 25, 708–728. doi:10.1016/j.rser.2013.05.029.
- Tyagi, V.K., Lo, S.L., 2016. Energy and resource recovery from sludge: full-scale experiences. In: Prasad, M.N.V., Shih, K. (Eds.), *Environmental Materials and Water: Resource Recovery and Pollution prevention*, Elsevir, Amsterdam, the Netherlands, pp. 221–244.
- WaCCliM project. Waste and wastewater Companies for climate mitigation. Available at: this link: <http://wacclim.org/ecam-tool/>. (Accessed 3 March 2018).
- Zhang, Q., Hu, J., Lee, D.-J., Chang, Y., Lee, Y.-J., 2017. Sludge treatment: current research trends. *Bioresource Technology*, 243, 1159–1172. doi:10.1016/j.biortech.2017.07.070.
- Zhou, X., Wang, Q.L., Jiang, G.M., 2015. Enhancing methane production from waste activated sludge using a novel indigenous iron activated peroxidation pre-treatment process. *Bioresource Technology*, 182, 267–271. doi:10.1016/j.biortech.2015.01.132.

## ACTIVITATEA DE CERCETARE ȘTIINȚIFICĂ

### Articole științifice publicate în reviste cotate ISI

1. **Gherghel, A.**, Teodosiu, C., De Gisi, S., **2019**. A review on wastewater sludge valorisation and its challenges in the context of circular economy. Journal of cleaner production, 228, 244-263. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.240>, (IF=7.246).
2. **Gherghel, A.**, Teodosiu, C., Notarnicola, M., De Gisi, S., **2020**. Sustainable design of large wastewater treatment plants considering multi-criteria decision analysis and stakeholders' involvement. Journal of Environmental Management, 261. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110158> (IF=5.647).

### Lucrări științifice susținute la conferințe internaționale

1. Fighir, (Arsene) D., Musteret, C.P., **Gherghel, A.**, Morosanu, I., Gilca, A.F., Minea, M., Apopei, P., Teodosiu, C. Evaluation of landfill leachate treatment by combined Fenton oxidation and membrane separation processes. 3rd International Conference on Chemical Engineering (ICCE 2016), Iasi, România, 9-11 Noiembrie 2016 (poster).
2. De Gisi, S., **Gherghel, A.**, Iannone, G., Notarnicola M., Teodosiu C. Evaluating the greenhouse gas emissions of a municipal wastewater treatment plant with sludge incineration. 6th International Conference on Sustainable Solid Waste Management, Naxos Island, Grecia, 13–16 Iunie 2018 (comunicare orală).
3. **Gherghel, A.**, Fighir, D., Gavrilescu, D., Teodosiu, C., De Gisi, S., 2019. Greenhouse gas emissions and energy assessment of Iasi municipal wastewater treatment plant operation. 10th International Conference on Environmental Engineering and Management (ICEEM 10), Iasi, România, 18-21 Septembrie, 2019 (poster).

### Stagiu de cercetare și cursuri de specializare

1. ERASMUS+ internship la Polytechnic University of Bari, Department of Civil, Environmental, Land, Building and Chemistry Engineering (DICATECH). Coordonator științific: Conf dr. habil.ing. Sabino De Gisi. Bari (Taranto), Italia, 4 Noiembrie 2017 – 29 Iunie 2018.



2. 8th International workshop in the fields of occupational safety and health and emergency situation, organizat de Colorado State University și Universitatea Tehnică „Gheorghe Asachi,, din Iași, Romania, 7-9 Mai 2019.
3. Workshop “SITI CONTAMINATI. Esperienze negli interventidi risanamento”, organizat de University of Brescia, University of Catania and SAPIENZA University of Rome în colaborare cu ANDIS (National Association of Health and Environmental Engineering), GITISA (Italian Group of Health and Environmental Engineering) și CSISA Onlus (Center Engineering Study of Environmental Health) of Catania. Taormina, Italia, 8-10 Februarie 2018.
4. “XVI Annual Arrigo Croce Conference”, organizat de Italian Geotechnical Association. Roma, Italia, 13 Decembrie 2017.
5. Workshop “WATUSER pentru profesioniștii din cadrul operatorilor regionali de apă organizat de Universitatea Tehnică „Gheorghe Asachi,, din Iași și S.C. APAVITAL S.A. Iași, România, 23 – 30 Septembrie 2016.

#### **Membru în colectiv în proiecte naționale și de cercetare**

1. Inginer de laborator în cadrul LACMED (Laborator pentru analiza și controlul factorilor de mediu), Coordonator laborator: prof.univ.dr.ing. Carmen Teodosiu, perioada: 1 octombrie 2016 - prezent.
2. Asistent de cercetare în cadrul proiectului complex PCCDI nr. 26PCCDI/1.0.3.2018 *"Procese integrate și sustenabile de depoluare a mediului, reutilizare a apelor uzate și valorificare a deșeurilor"* (SUSTENVPRO). Director de proiect: prof.univ.dr.ing. Carmen Teodosiu, perioada 1 Octombrie 2019 – prezent.