

**Universitatea „Dunărea de Jos” din Galați – Școala Doctorală de Științe
Fundamentale și Inginerești**

**Universitatea Autonomă din Barcelona – Programul Doctoral de Inginerie
Electronică și Telecomunicații**



Teză de doctorat
Rezumatul tezei de doctorat

**Controlul optimal al unui sistem integrat
format din rețea de canalizare și stație de
tratare a apelor uzate**

Doctorand,
Iulian VASILIEV

Conducători științifici,
Prof. dr. ing. Sergiu CARAMAN
Prof. dr. ing. Ramon VILANOVA ARBOS

Seria: I8: Ingineria Sistemelor Nr. 12

GALAȚI

2024



Teză de doctorat

Rezumatul tezei de doctorat

CONTROLUL OPTIMAL AL UNUI SISTEM INTEGRAT FORMAT DIN REȚEA DE
CANALIZARE ȘI STAȚIE DE TRATARE A APELOR UZATE

Doctornad,

Iulian VASILIEV

Președinte,

Prof. dr. ing. Marian BARBU

Universitatea „Dunărea de Jos” din Galați, România

Conducători științifici,

Prof. dr. ing. Sergiu CARAMAN

Universitatea „Dunărea de Jos” din Galați, România

Prof. dr. ing. Ramon VILANOVA ARBOS

Universitat Autònoma de Barcelona, Spania

Referenți științifici,

Prof. dr. ing. Harsha RATNAWEERA

Norwegian University of Life Sciences, Norvegia

Prof. dr. ing. Manuel BESCHI

Università degli Studi di Brescia, Italia

Prof. dr. ing. Radu-Emil PRECUP

Universitatea Politehnica Timișoara, România

Prof. dr. ing. Dan SELIȘTEANU

Universitatea din Craiova, România

Seria: I8: Ingineria Sistemelor Nr. 12

GALAȚI

2024

Seriile tezelor de doctorat susținute public în UDJG începând cu 1 octombrie 2013 sunt:

Domeniul fundamental ȘTIINȚE INGINEREȘTI

- Seria I 1: **Biotehnologii**
- Seria I 2: **Calculatoare și tehnologia informației**
- Seria I 3: **Inginerie electrică**
- Seria I 4: **Inginerie industrială**
- Seria I 5: **Ingineria materialelor**
- Seria I 6: **Inginerie mecanică**
- Seria I 7: **Ingineria produselor alimentare**
- Seria I 8: **Ingineria sistemelor**
- Seria I 9: **Inginerie și management în agricultură și dezvoltare rurală**

Domeniul fundamental ȘTIINȚE SOCIALE

- Seria E 1: **Economie**
- Seria E 2: **Management**
- Seria E 3: **Marketing**
- Seria SSEF: **Știința sportului și educației fizice**
- Seria SJ: **Drept**

Domeniul fundamental ȘTIINȚE UMANISTE

- Seria U 1: **Filologie- Engleză**
- Seria U 2: **Filologie- Română**
- Seria U 3: **Istorie**
- Seria U 4: **Filologie - Franceză**

Domeniul fundamental MATEMATICĂ ȘI ȘTIINȚE ALE NATURII

- Seria C: **Chimie**

Domeniul fundamental ȘTIINȚE BIOMEDICALE

- Seria M: **Medicină**
- Seria F: **Farmacie**

Cuprins

Introducere	III
Capitolul 1. Context.....	1
1.1. Introducere.....	1
1.2. Stadiul actual în modelarea și controlul rețelelor de canalizare	2
1.2.1. Modelarea rețelelor de canalizare	2
1.2.2. Strategii de control a rețelelor de canalizare.....	3
1.3. Stadiul actual în modelarea și controlul stațiilor de tratare a apelor uzate.....	4
1.3.1. Modelarea stațiilor de tratare a apelor uzate	4
1.3.2. Strategii de control a stațiilor de tratare a apelor uzate.....	5
1.4. Stadiul actual în modelarea și controlul sistemelor integrate de ape uzate urbane	6
1.5. Concluziile capitolului	7
Capitolul 2. Modelarea sistemelor de colectare si tratare a apelor uzate.....	9
2.1. Introducere.....	9
2.2. Modelarea unei rețele de canalizare.....	9
2.3. Modelarea stațiilor de tratare a apelor uzate	11
2.3.1. Modelarea utilizând rețele neuronale.....	11
2.3.2. Estimarea valorilor din proces utilizând rețele neuronale.....	12
2.3.3. Estimarea calității efluentului utilizând rețele neuronale.....	13
2.4. Modelarea sistemelor integrate de ape uzate urbane	13
2.5. Concluziile capitolului	16
Capitolul 3. Controlul optimal al sistemelor de colectare si tratare a apelor uzate	17
3.1. Introducere.....	17
3.2. Controlul optimal al rețelelor de canalizare.....	17
3.2.1. Control optimal offline.....	18
3.2.2. Control optimal online.....	21
3.3. Controlul optimal al stațiilor de tratare a apelor uzate	23
3.3.1. Model Predictive Control utilizând model neuronal	23
3.3.2. Strategie de control optimal bazată pe tehnici fuzzy.....	25
3.3.3. Strategie de control la referințe optimale	27
3.4. Controlul optimal al sistemelor integrate de ape uzate urbane	27
3.4.1. Controlul valvei de ieșire a rețelei de canalizare.....	28
3.4.2. Model Predictive Control aplicat rețelei de canalizare.....	29
3.5. Concluziile capitolului	33
Capitolul 4. Concluzii finale și direcții viitoare	35
4.1. Contribuții originale	36
4.2. Direcții viitoare de cercetare	36
4.3. Diseminarea rezultatelor	37
Bibliografie	39

Introducere

De la Revoluția Industrială, omenirea s-a confruntat cu o dezvoltare fără precedent, care a permis populației umane să crească de la sute de milioane la miliarde. În 2022, populația totală a lumii a ajuns la 8 miliarde, iar previziunile Națiunilor Unite [1] spun că, până la sfârșitul secolului, aceasta va ajunge la 10 miliarde. Creșterea rapidă a populației, combinată cu dezvoltarea tehnologică accelerată și urbanizarea intensă a dus la o serie de crize la scară globală: poluare, schimbări climatice și pierderea biodiversității [2]. O parte semnificativă a crizei poluării, pe lângă poluarea aerului și a solului, este reprezentată de cantitatea tot mai mare de poluanți din sursele noastre de apă. Întrucât viața pe Pământ nu ar fi posibilă fără apă, calitatea acesteia are un impact major asupra mediului, dar și asupra sănătății publice, făcând acest subiect unul de mare importanță. Activitățile umane sunt principalul motor al poluării apei, deoarece în timpul acestor activități se produc cantități mari de ape uzate. Cunoscând potențialul acestei ape puternic poluate de a compromite sursele noastre de apă, se poate afirma că gestionarea apelor uzate este un subiect foarte important. Din acest motiv, este inclusă în agenda celor mai importante organizații globale. Un exemplu este Agenda 2030 a Națiunilor Unite pentru Dezvoltare Durabilă [3] care include gestionarea apelor uzate ca parte importantă a Obiectivului său de Dezvoltare Durabilă 6 (SDG6). Chiar dacă SDG6 a fost stabilit în 2015, astăzi, la jumătatea perioadei alocate acestui obiectiv, raportul de sinteză al SDG6 2023 privind apa și canalizarea [4] arată că omenirea nu este pe cale să-l atingă, calitatea apei suferă, iar schimbările climatice pun un stres suplimentar. Raportul de sinteză concluzionează că, dacă dorim să atingem SDG6 înainte de 2030, trebuie să ne accelerăm eforturile.

Datorită conștientizării tot mai mari a importanței calității apei, guvernele naționale și internaționale impun reglementări care limitează cantitatea de poluanți prezenți în apele uzate care sunt evacuate în receptorii naturali. Pentru că legislația este din ce în ce mai strictă în ceea ce privește aceste limite, guvernele au creat cadre în care aceste limite ar trebui respectate. De exemplu, în Uniunea Europeană, Directiva-cadru privind apa [5] stabilește o abordare comună care să fie utilizată în legislația statelor membre pentru a proteja mediul înconjurător, dar și pentru a restabili calitatea apei din toate sursele de apă din Europa. Respectarea acestor reglementări în civilizația în continuă evoluție este o provocare și necesită cercetare pentru noi tehnologii de management al apelor uzate, dar și îmbunătățirea infrastructurii deja existente prin creșterea eficienței operaționale a acesteia.

Mai mult, întrucât lumea este de o complexitate crescută, tema managementului apelor uzate își extinde influența în diverse provocări ale lumii actuale, fie ele de natură ecologică, socială sau politică. De exemplu, sistemele de transport și tratare a apelor uzate, ca orice alte instalații industriale, sunt o sursă de gaze cu efect de seră [6], care contribuie la o altă criză la scară planetară: schimbările climatice. În acest context, întrucât organizațiile internaționale afirmă că este imperativă reducerea acestor emisii [7], [8], managementul apelor uzate ar trebui să le ia în considerare.

Pe lângă aspectele de mediu legate de managementul apelor uzate, acest subiect are o importanță politică ridicată, mai ales în contextul tensiunilor din zilele noastre. Raportul din 2024 al Națiunilor Unite privind dezvoltarea apelor [9] subliniază că menținerea unei bune calități a sursei noastre de apă și a unui acces echitabil la serviciile de apă, inclusiv gestionarea apelor uzate, este un factor important în menținerea păcii și asigurarea prosperității pentru toate ființele umane.

Din acest motiv, această teză aprofundează subiecte avansate legate de managementul apelor uzate. Mai specific, controlul optimal al Rețelelor de Canalizare (SN) și al Stațiilor de Tratare a Apelor Uzate (WWTP). Scopul principal este aplicarea unor acțiuni de control asupra ambelor sisteme (SN și WWTP) pentru a reduce impactul acestora asupra mediului prin deversarea unei cantități cât mai mici de poluanți în receptorii naturali, în timp ce, se utilizează cât mai puțină energie, fără a elibera prea multe gaze cu efect de seră în atmosferă. Literatura de specialitate abundă de strategii de control optimal care sunt dezvoltate pentru fiecare sistem și care sunt utilizate pentru a reduce impactul asupra mediului al sistemului în ceea ce privește unul sau mai multe dintre obiectivele menționate mai sus. Cu toate acestea, este important să fim conștienți de interconectivitatea acestor două sisteme. Aplicarea strategiilor de control unuia dintre cele două sisteme poate produce efecte nedorite asupra celuilalt, de aceea este imperios să se ia în considerare ambele sisteme atunci când se dezvoltă strategii de control optimal. În consecință, modul în care această teză abordează controlul optimal al SN și al WWTP este într-o manieră integrată, pregătind calea spre o reducere adițională a impactului unor astfel de sisteme asupra mediului, prin studierea controlului optimal al sistemelor integrate de ape uzate urbane.

Primul obiectiv al acestei teze este dezvoltarea și aplicarea unor algoritmi de control optimal offline și online asupra rețelei de canalizare pentru a reduce impactul acesteia asupra mediului în ceea ce privește cantitatea de apă uzată care nu este dirijată corespunzător către instalația de tratare, dar și în ceea ce privește cantitatea de poluanți din această apă. Cu toate acestea, pentru ca un astfel de control să poată fi aplicat, este nevoie de instrumente digitale pentru simularea unor astfel de sisteme. Astfel, dezvoltarea unui model de rețea de canalizare se impune ca prim pas al acestui obiectiv. Al doilea obiectiv este dezvoltarea și aplicarea a diverși algoritmi de control optimal asupra stațiilor de tratare pentru a reduce impactul acestora asupra mediului în ceea ce privește cantitatea de poluanți din efluentul instalației. Desigur, și atingerea acestui obiectiv necesită instrumente de simulare pentru stațiile de tratare. Din acest motiv, ca prim pas, vor fi dezvoltate o serie de modele WWTP prin implicarea tehnicilor de Machine Learning. Al treilea și ultimul obiectiv al acestei lucrări reprezintă studiul interconectivității celor două sisteme. Astfel, sunt create modele pentru sistemul integrat. Acestea sunt apoi utilizate pentru a studia modul în care aplicarea acțiunilor de control asupra rețelelor de canalizare afectează performanțele ambelor subsisteme și cum poate fi îmbunătățită eficiența generală a sistemului integrat.

Această teză de doctorat este structurată în patru capitole, după cum este prezentată în cele ce urmează.

Capitolul 1, denumit „Context” prezintă o serie de aspecte introductive legate de colectarea și tratarea apelor uzate, cum ar fi o scurtă istorie a managementului apelor uzate, impactul pe care calitatea apei îl are atât asupra mediului, cât și asupra sănătății publice, modul în care este măsurată calitatea apei, felul în care diverși factori influențează apele uzate și modul în care guvernele încearcă să abordeze acest subiect cu ajutorul legislației. Acestea sunt urmate de partea principală a acestui capitol, dedicată unui studiu al stadiului actual al cercetării în ceea ce privește modelarea și controlul SN, WWTP și a sistemelor integrate.

Capitolul 2, denumit „Modelarea sistemelor de colectare și tratare a apelor uzate” prezintă dezvoltarea de modele pentru ambele subsisteme (SN și WWTP), dar și pentru sistemul integrat.

Capitolul 3, intitulat „Controlul optimal al sistemelor de colectare și tratare a apelor uzate” prezintă dezvoltarea strategiilor de control optimal atât pentru fiecare subsistem (SN și WWTP), cât și pentru sistemul integrat.

Capitolul 4, intitulat „Concluzii finale și direcții viitoare” prezintă concluziile desprinse din această teză, alături de contribuțiile științifice originale ale autorului și direcțiile de cercetare viitoare.

Capitolul 1. Context

1.1. Introducere

Apa este una dintre nevoile de bază a organismelor vii de pe Pământ, inclusiv a oamenilor. 70% din suprafața planetei este acoperită cu apă, cu toate acestea, doar 0,007 este disponibilă consumului uman [10]. Pentru oameni, apa nu este importantă doar pentru băut, ci este necesară pentru multe alte activități zilnice. Aceste activități produc o cantitate mare de ape uzate care ar putea compromite sănătatea publică și mediul. Prin urmare, colectarea, transportul și tratarea acesteia este foarte importantă. În acest scop, omul a intervenit cu ciclul natural al apei, așa cum este prezentat în Figura 1.1, prin crearea unor sisteme de colectare (rețele de canalizare – SN) și tratare (stații de tratare a apelor uzate – WWTP) a apelor uzate.

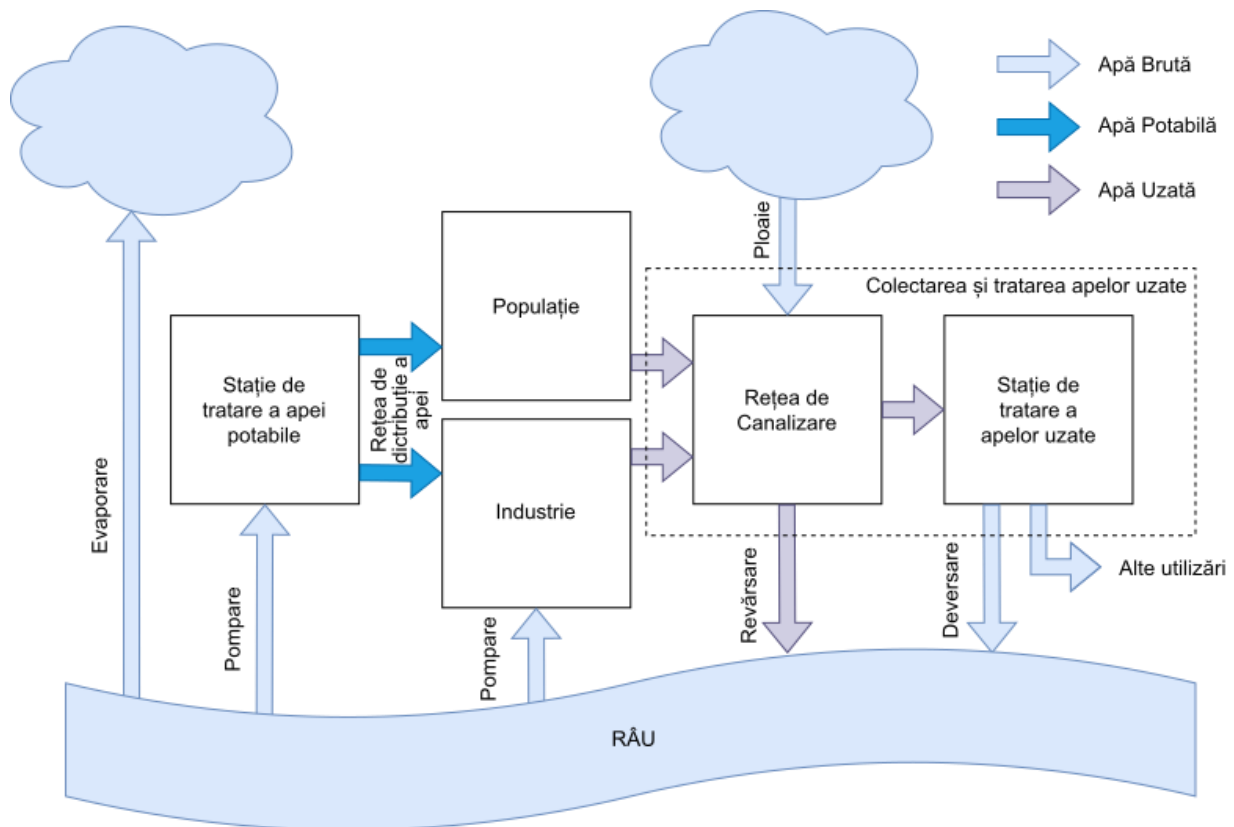


Figura 1.1 – Ciclul apei

Prin urmare, dacă se dorește să nu compromită resursele de apă, este important să avem cele mai eficiente SN și WWTP. Cu toate acestea, trăim într-o lume dinamică, afectată de o mulțime de fenomene precum urbanizarea, migrația, încălzirea globală etc. care ar putea afecta eficiența operațională a sistemelor de apă uzată și, prin urmare, strategiile de control optimal ale acestor sisteme ar trebui luate în considerare. Având în vedere acest scop, dezvoltarea unor noi strategii complexe de control necesită cunoașterea sistemelor de control deja existente pentru a identifica lacunele direcțiile viitoare de cercetare care ar putea duce la îmbunătățiri suplimentare ale eficienței sistemelor de colectare și tratare a apelor uzate. În consecință, obiectivul principal al acestui capitol este de a prezenta stadiul actual al cercetării în modelarea și controlul SN și WWTP pentru a identifica direcțiile de cercetare care ar trebui urmate pentru a crește eficacitatea

sistemelor de colectare și tratare a apelor uzate, astfel încât impactul activităților umane asupra apelor să fie diminuat.

1.2. Stadiul actual în modelarea și controlul rețelelor de canalizare

O rețea de canalizare este un sistem utilizat pentru colectarea și transportul apelor pluviale și/sau uzate de la populație sau din instalațiile industriale la un loc desemnat (de exemplu, la o stație de tratare). Majoritatea comunităților se bazează pe sisteme artificiale de drenare a apei constând dintr-o rețea de rezervoare de stocare conectate prin conducte. Dezvoltarea rapidă a orașelor și cererea mare de apă, care ajunge în cele din urmă în SN, au condus la necesitatea unui control complex al SN. Dar pentru ca un astfel de control să fie implementat, este nevoie de unelte de simulare digitală și analiză a SN [11].

1.2.1. Modelarea rețelelor de canalizare

Începutul dezvoltării modelelor de SN a avut loc la începutul anilor 1970 [12] odată cu lansarea Modelului de management al apelor pluviale (SWMM) de către Agenția pentru Protecția Mediului din SUA. Acest model a fost îmbunătățit de-a lungul anilor ajungând la versiunea actuală, SWMM 5.2, care include diverse procese hidrologice, cum ar fi precipitații variabile în timp, evaporare, acumulare de zăpadă, topire a zăpezii, infiltrare în diferite tipuri de sol, apă subterană, acumularea de poluanți pe vreme uscată, reducerea concentrațiilor de poluanți prin procese naturale în sistemul de canalizare etc.. [13].

Literatura de specialitate distinge două tipuri de modele matematice pentru SN [14] așa cum sunt prezentate în Figura 1.2.

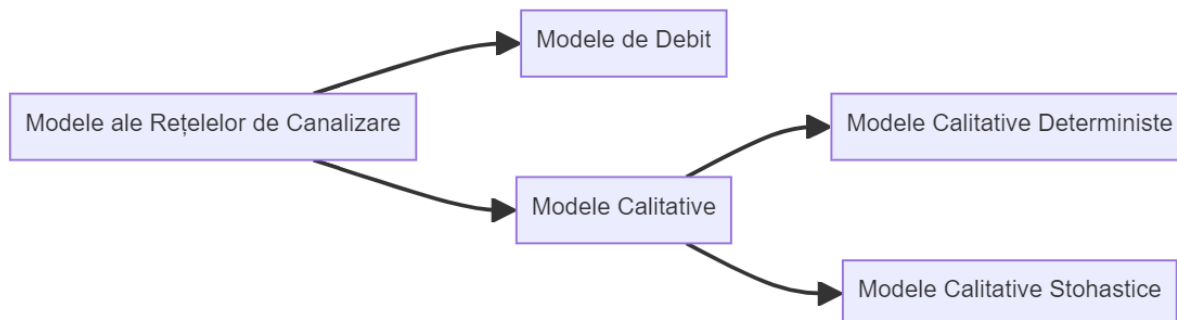


Figura 1.2 – Clasificarea modelelor de SN

Modelele de debit SN folosesc cunoștințele științifice despre scurgerea apei, debitul conductelor, rezervoare de depozitare etc. pentru a modela matematic procesele hidrologice care au loc în rețea. Acestea se bazează pe un set de ecuații diferențiale parțiale ce descriu debitul de apă (ecuații Saint-Venant) [15]. Modelarea componentei de stocare într-un model de debit se bazează pe principiul conservării masei, acumularea (dV/dt – derivata volumului) putând fi exprimată ca diferența dintre debitele de intrare ($Q_{in}(t)$), ieșire ($Q_{out}(t)$) și revărsare ($Q_{over}(t)$).

$$\frac{dV}{dt} = Q_{in}(t) - Q_{out}(t) - Q_{over}(t) \quad (1.1)$$

În scopuri de control, deoarece modelele complexe de debit ale SN necesită mult efort de calcul, au fost propuse modele discrete simplificate atât liniare [16], cât și neliniare [17].

Modelele calitative ale SN sunt necesare atunci când sunt necesare informații despre poluanții care intră, se deplasează prin sau ies din SN. Se pot distinge două abordări: modele calitative stohastice care sunt bazate pe date și modele calitative deterministe [18]. Au fost utilizate diferite metode pentru dezvoltarea modelelor de calitate stohastică, cum ar fi programarea genetică multigene [19] sau regresie polinomială evolutivă [20] pentru modelarea transportului de

sedimente, simulare Monte Carlo pentru modelarea transformărilor chimice ale cererii de oxigen [21] și Rețele Neuronale Artificiale (ANN) pentru a prognoza concentrațiile bacteriilor fecale [22].

În paralel cu modelele stocastice bazate pe date, au fost dezvoltate modele deterministe, în care variația calității apei a fost exprimată matematic pe baza concentrațiilor și a coeficienților de degradare. În [23] este propus un model de referință (BSM) pentru captare apelor uzate și SN, având ca scop evaluarea strategiilor de control aplicate canalizărilor urbane și facilitarea integrării cu modele standard de WWTP. Acest model de referință, BSMSewer, modelează debitul de apă uzată cu încărcările sale: consumul chimic de oxigen (particule și solubil), amoniac și fosfor. Deoarece acest model își propune să fie utilizat pentru a evalua strategiile de control ale SN, un set de 10 indicatori de performanță au fost definiți în [23] și prezentați în Tabelul 1.1.

Tabelul 1.1 – Indicatorii de performanță ai BSMSewer

Indicator	Unitatea de măsură	Descrierea
N_{ovf}	<i>evenimente/an</i>	Numărul total de evenimente de revărsare
T_{ovf}	<i>zile/an</i>	Durata totală a evenimentelor de revărsare
V_{ovf}	m^3/an	Volumul total de apă revărsată
OQI	<i>kg – unități poluante/zi</i>	Indicele de calitate al deversării calculat în mod similar cu indicele de calitate a WWTP BSM [24] după convertirea deversării în variabilele Modelului cu Nămol Activat utilizând [25]
$C_{max,TSS}$	$g\ COD/m^3$	Concentrațiile maxime de poluanți s-au revărsat continuu timp de o oră (total solide în suspensie, azot și fosfor)
$C_{max,TKN}$	$g\ N/m^3$	
$C_{max,PO4}$	$g\ P/m^3$	
$T_{exc,TSS}$	<i>zile/an</i>	Durata totală de timp în care poluanții depășesc limitele legale pe parcursul unui an
$T_{exc,TKN}$	<i>zile/an</i>	
$T_{exc,PO4}$	<i>zile/an</i>	

1.2.2. Strategii de control a rețelelor de canalizare

Strategiile de control ale rețelelor de canalizare sunt importante deoarece asigură operarea sigură și cu costuri reduse a acestora. Scopul principal al sistemelor de control SN este reducerea efectelor revărsărilor, prin reducerea volumului revărsării sau a cantității de poluanți evacuați în timpul evenimentelor de revărsare. Alte obiective includ, dar nu se limitează la atenuarea sulfurilor [26], dozarea și distribuția optimă a substanțelor chimice în SN pentru a reduce coroziunea și mirosurile [27] sau prevenirea blocajelor [28].

În [29], autorii propun o metodologie generică pentru controlul optim al SN. Metodologia se aplică atunci când este disponibil un model în spațiul stărilor al sistemului și constă din șase pași: Metodologia a fost implementată într-un studiu de caz real (o suprafață de colectare din Copenhaga deservind 135.000 de locuitori) arătând rezultate bune.

Alte abordări se bazează pe modele simplificate și iau în considerare doar comenzi binare date valvelor de ieșire ale rezervoarelor de stocare. De exemplu, [30] abordează utilizarea roiurilor de particule binare cu topologie hibridă ca algoritm de optimizare pentru a rezolva problema de optimizare a revărsărilor rețelelor de canalizare formulată ca o problemă de optimizare binară. Algoritm de optimizare a fost implementat în două versiuni: cu și fără algoritm de coborâre deterministă locală (LDDA). Adăugarea LDDA conduce la rezultate mai bune, așa cum se observă din secțiunea de analiză statistică a acestei lucrări. În [31] este definită o structură de control predictivă pentru a minimiza acțiunea perturbațiilor asupra sistemului prin minimizarea revărsărilor SN. Structura este propusă ca o alternativă la structura sistemului de control optimal descrisă anterior și este mai potrivită pentru SN-uri de dimensiune mai mare.

Alți cercetători au folosit structuri de control bazate pe logica fuzzy [32], [33] sau Model Predictive Control (MPC) [34], [35], [36] pentru a reduce impactul asupra mediului al SN prin reducerea volumului de apă uzată care se revarsă din aceste sisteme.

În ultimii ani, o nouă abordare bazată pe tehnici de deep learning poate fi găsită în literatura de specialitate. De exemplu, [37] prezintă o strategie de control ierarhică care asigură distribuția optimă a apei uzate în conducte și rezervoarele de stocare. Pei et al. [38] propune utilizarea neuro-evoluției pentru Controlul în Timp Real (RTC) al SN prin antrenarea unei politici de control. În 2018, un grup de cercetători de la Universitatea Norvegiană de Științe ale Vieții a publicat o serie de lucrări care utilizează ANN-uri în strategiile de control definite pentru SN [39], [40], [41].

1.3. Stadiul actual în modelarea și controlul stațiilor de tratare a apelor uzate

O stație de epurare a apelor uzate este un sistem care preia efluentul furnizat de SN și care, prin diverse procese, îndepărtează poluanții făcându-i apt efluentul pentru a fi returnat în ciclul apei sau pentru a fi utilizat în diverse scopuri. Tratarea convențională a apelor uzate implică de obicei trei etape de tratare [42]:

1. Tratamentul primar are ca scop îndepărtarea particulelor, uleiului și grăsimilor.
2. Epurarea secundară urmărește degradarea compușilor organici biodegradabili prin utilizarea unor tipuri specifice de microorganisme care își măresc populația prin consumarea masei organice din apele uzate.
3. Tratamentul terțiar are ca scop eliminarea fosforului, azotului, metalelor grele, virușilor și bacteriilor patogene.

1.3.1. Modelarea stațiilor de tratare a apelor uzate

Procesele biologice de tratare a apelor uzate necesită bacterii pentru a oxida compușii organici, denumiți de obicei substrat, în compuși simpli și, prin urmare, modelele matematice ale WWTP trebuie să descrie aceste procese biologice. Primele încercări de modelare a acestor procese au fost făcute de Jaques Monod (1910 – 1976) la jumătatea secolului trecut. El a stabilit rata de creștere a microorganismelor într-un bioreactor [43]. Procesul de tratare biologică este unul complex și neliniar și este compus din diverse etape, astfel apare nevoia unor modele complexe care să descrie procesul cât mai precis posibil.

La începutul anilor 1980, Asociația Internațională a Apelor (IWA) a creat un grup care urmărea să combine cele mai relevante modele de tratare biologică pentru a crea un model comun unificat care să descrie cât mai precis posibil procesul de tratare cu nămol activat [44]. Munca grupului de lucru a condus la dezvoltarea Activated Sludge Model 1 – ASM1 [45], un model care este în prezent unul dintre cele mai acceptate și utilizate modele pentru a descrie procesele de tratare a apelor uzate. Necesitatea ca efluentul să respecte standardele de calitate cerute în ceea ce privește azotul și fosforul a condus la necesitatea modelării eliminării biologice a fosforului. Prin urmare, grupul de lucru IWA a dezvoltat și lansat Activated Sludge Model 2 (ASM2) [46] care modelează, pe lângă procesele ASM1, procesele biologice de îndepărtare a fosforului. Modelul ASM2 a fost extins și mai mult, rezultând ASM2d [47] care include încă două procese legate de îndepărtarea fosforului. Același grup a venit în 1999 cu un alt model, ASM3 [48] care urmărea rezolvarea unora dintre limitările ASM1.

Dezvoltarea strategiilor de control pentru WWTP a condus la necesitatea unor modele care să includă întregul sistem de tratare a apelor uzate și care să fie adecvate pentru compararea diferitelor strategii de control. În consecință, a fost lansat Benchmark Simulation Model 1 (BSM1) [24]. Instalația BSM1 este una dintre cele mai utilizate configurații pentru îndepărtarea biologică

a azotului și a compușilor organici din apele uzate municipale. BSM1 a fost extins în continuare în BSM1-LT [49] care a permis evaluarea strategiilor de control pe perioade de 609 zile și a introdus posibilitatea de a avea defecțiuni și temperatura ca variabilă în influența stației, parametrii procesului modificându-se odată cu temperatura. Dezvoltarea semnificativă a modelului BSM1 a condus la Benchmark Simulation Model 2 (BSM2) [50]. Acest model ia în considerare atât tratarea apelor uzate, cât și tratarea nămolului.

Stațiile de tratare sunt o sursă de gaze cu efect de seră (GHG), care contribuie la poluarea aerului și la schimbările climatice. Prin urmare, pentru a aplica tehnici de reducere a emisiilor de GHG, apare necesitatea de a integra aceste emisii în modelele de stații de tratare. Literatura de specialitate prezintă câteva lucrări care încearcă să modeleze aceste emisii [51], [52], [53]. Flores-Alsina et al. [6] propun un model de simulare de referință denumit BSM2G, o extensie a modelului BSM2 [50], având aceeași structură, dar incluzând, în plus, dinamica emisiilor de GHG atât din tratarea biologică, cât și din alte surse.

1.3.2. Strategii de control a stațiilor de tratare a apelor uzate

Strategiile de control a stațiilor de tratare a apelor uzate sunt importante deoarece asigură că apele uzate rezultate din activitățile umane nu poluează mediul și nu afectează în niciun fel sănătatea umană. Prin urmare, scopul principal al sistemelor de control a WWTP este de a se asigura că efluentul acestora respectă standardele legale în ceea ce privește diferitele încărcături de poluanți în apa care urmează să fie deversată în receptorii naturali. Alte obiective includ, dar nu se limitează la, costuri operaționale mai mici sau emisii de GHG mai mici. Aceste obiective pot fi atinse prin manipularea diferitelor variabile de control din sistem, cum ar fi coeficienții de transfer de oxigen din rezervoarele aerate, debitele de recirculare interne și externe sau prin manipularea, în structurile de control de nivel superior, a referințelor structurii de nivel inferior, cum ar fi concentrațiile de oxigen dizolvat (DO) sau de azot.

[54] propune, pentru controlul concentrației de DO, un control adaptiv direct folosind rețele neuronale (NN) prin utilizarea unei NN Feed-Forward pentru aproximarea unei legi de control ideale. O alta abordare, mai exact control bazat pe date, poate fi găsită în [55]. Autorii propun un sistem de control bazat pe „Growing and Pruning Recurrent Fuzzy NN” pentru a controla concentrația de DO. Sistemul de control conține un „Recurrent Fuzzy NN (RFNN)” care este utilizat pentru a modela controlerele WWTP și RFNN conceput pentru a seta variabilele de control astfel încât să se asigure performanța WWTP. Alte abordări utilizează regulatoare Feed-Forward [56], control multivariabil utilizând NN Fuzzy cu auto-organizare [57], regulator secvențial supervisor [58] etc. O abordare interesantă poate fi găsită în [59]. Aici, autorii propun două structuri de control pentru a manipula ratele de aerare aerării pe baza concentrației de amoniac, ambele optimizate utilizând un algoritm genetic (GA) pentru a găsi cei mai buni parametri ai structurilor de control. Multe lucrări de cercetare tratează controlul WWTP ca pe o problemă de optimizare. Atât algoritmi de optimizare cu un singur obiectiv (SOO) [60], [61], [62], [63], cât și cei cu mai multe obiective (MOO) [64], [65], [66] sunt utilizați în diferite structuri de control pentru a minimiza diverse funcții de cost, cum ar fi calitatea efluentului, consumul de energie sau emisiile de GHG.

Chiar dacă încălzirea globală este o preocupare importantă în zilele noastre și cunoscând efectul emisiilor de GHG asupra încălzirii globale, doar câțiva cercetători iau în considerare aceste emisii atunci când elaborează strategii de control pentru stațiile de tratare. [67] folosește metoda Nelder–Mead Simplex pentru a efectua MOO al unei stații de tratare în termeni de calitate a efluentului, consum de energie, dar și emisii de GHG, demonstrând compromisurile aparente între cele trei funcții obiective conflictuale. În [68] emisiile de GHG au fost monitorizate pentru o stație de tratare industrială. Prin utilizarea unei simulări Monte Carlo, a fost definită o corelație

între emisiile de GHG și parametrii operaționali ai stației. Utilizând această corelație s-a putut demonstra că este posibilă o reducere cu 30% a emisiilor.

1.4. Stadiul actual în modelarea și controlul sistemelor integrate de ape uzate urbane

Cele două sisteme sunt interconectate și, deoarece efluentul SN reprezintă influentul WWTP, este important să se cunoască efectele strategiilor de control ale SN asupra performanțelor de funcționare ale WWTP. Un debit mai mare din SN, din cauza strategiilor de control ce evită revărsările, ar putea duce la supraîncărcare WWTP, cu efecte considerabile asupra mediului. Prin urmare, strategiile de control ale SN ar trebui să ia în considerare efectele lor asupra eficienței exploataării stației de tratare. Pe de altă parte, strategiile de control ale stațiilor de tratare ar trebui să aibă în vedere contribuția la performanța SN atunci când acestea sunt afectate de evenimente pluviometrice considerabile.

Una dintre principalele probleme ale exploataării WWTP este incertitudinea cu privire la influentul stației. Controlul și operarea SN ar putea ajuta la obținerea controlului asupra influentului WWTP. Un influent previzibil și controlat pentru WWTP ar trebui să conducă la creșterea performanțelor instalației. Ținând cont de cele două motive prezentate mai sus, este important, la elaborarea strategiilor de control și a metodelor de optimizare a transportului și tratării apelor uzate, să se aibă în vedere sistemul integrat format din SN și WWTP. În literatura științifică, subiectul sistemelor integrate de apă uzată se regăsește în câteva lucrări, majoritatea concentrându-se doar pe modelarea sistemului integrat.

În 2005, Butler și Schütze [69] au propus un model integrat, SINOPSIS, constând atât din SN, cât și din WWTP, dar și din corpul de apă care primește efluentul WWTP. Pe modelul propus au fost implementate și testate trei strategii RTC: o strategie de bază, cu referințe implicite fixe, o strategie cu referințe optime și un control ierarhic integrat, toate vizând asigurarea celei mai bune calități a apei în colectorul natural, cu RTC integrat oferind cele mai bune rezultate.

În [70] se propune un model integrat SN-WWTP, folosind SeweX pentru SN și ASM2d [47] pentru WWTP, cu obiectivul de a fi utilizat pentru a investiga efectele dozării de chimicale în SN (pentru a controla hidrogenul sulfurat din SN) asupra eficienței WWTP. În [71] două modele de referință pentru SN (BSMSewer [23]) și WWTP (BSM2 [50]) sunt conectate într-un sistem integrat de ape uzate urbane (IUWS), având ca scop dezvoltarea cunoștințelor despre interacțiunea dintre cele două sisteme și studierea influenței strategiilor de control ale SN asupra performanțelor WWTP. [72] prezintă un model biochimic SN eficient din punct de vedere computațional care poate surprinde cu acuratețe atât dinamica debitului, cât și a calității efluentului sistemului, pentru a fi utilizat într-un model integrat SN-WWTP pentru evaluarea strategiilor de optimizare.

O abordare distinctă este făcută de o echipă internațională de cercetare, care propune un model de benchmarking IUWS [73]. Modelul integrat constă din următoarele componente, toate descriind debitele și dinamica principalilor poluanți (COD, TSS, azot și fosfor):

1. Zona de colectare – bazat pe generatorul de scenarii de influent BSM2 [25].
2. SN – modelul BSMSewer [23] descris anterior în secțiunea 1.2.1;
3. WWTP – descris folosind ASM2d [47];
4. River Water System – o versiune simplificată a River Water Quality Model no.1 [74].

Unele lucrări științifice abordează și controlul sistemului integrat SN-WWTP:

1. În [75] este prezentată o strategie RTC bazată pe fuzzy pentru sistemul integrat de colectare și tratare a apelor uzate din Wilhelmshaven, Germania. Principalele două obiective ale acestei strategii sunt reducerea revărsărilor SN și evitarea situațiilor nedorite

(deversare hidraulică și spălarea nămolului) la WWTP în timpul evenimentelor pluviale. Sistemul RTC a fost funcțional timp de un an și și-a dovedit eficiența..

2. [76] utilizează un control în timp real al SN bazat pe reguli pentru a minimiza volumul de apă revărsată din SN, în timp ce debitul de apă către stația de tratare este limitat la Q_{max} , capacitatea maximă a stației, pentru a preveni spălarea nămolului din decantorul secundar.
3. [77] propune, utilizând un model integrat compus dintr-o stație de tratare modelată cu ASM2d [47] și un SN modelat cu Infoworks, o tehnică de control intermitent al influentului (o extensie a algoritmului de egalizare a gradului de umplere) pentru optimizarea sistemului integrat prin scăderea revărsărilor și a potențialului de sedimentare a SN, a consumului de energie al WWTP și îmbunătățirea calității efluentului.
4. În [78] este utilizată o metodă RTC multi-punct integrată pentru a stabiliza debitul de intrare în WWTP și pentru a reduce revărsările SN, în condiții de perturbări a debitului apei în SN. Metoda se bazează pe variații discrete dinamice ale nivelului apei, care nu necesită nici un model al sistemului integrat.
5. În [79], problema reducerii impactului revărsărilor SN asupra mediului este abordată prin utilizarea unui RTC pe sistemul integrat SN-WWTP.

1.5. Concluziile capitolului

Acest capitol prezintă stadiul actual al cercetărilor în domeniul modelării și controlului SN și WWTP, pentru a identifica lacunele și direcțiile viitoare de cercetare care ar putea reduce efectele apelor uzate asupra sănătății publice și a mediului, prin îmbunătățirea eficienței instalațiilor de colectare și tratare a apelor uzate.

Literatura de specialitate raportează pentru modelarea SN, un număr variat de modele de debit și modele calitative, de la versiuni simplificate discrete la versiuni complexe care pot modela majoritatea proceselor care au loc în SN, dar care necesită mai mult efort de calcul. Cercetările recente evită complexitatea modelelor matematice și utilizează modele bazate pe date. Acest tip de model bazat pe date prezintă rezultate bune. Ținând cont de urbanizarea accelerată și fenomenele meteorologice extreme produse de încălzirea globală, apare nevoia unor metode eficiente și performante de transport a apelor uzate. Acest lucru ar putea fi realizat cu ușurință în faza de proiectare a rețelelor de canalizare, dar pentru rețelele de canalizare existente, modernizarea este de cele mai multe ori imposibilă, de aceea este necesară elaborarea și implementarea unor strategii eficiente de control pentru reducerea impactului asupra mediului și asupra sănătății publice. Literatura de specialitate prezintă diverse strategii, structuri și metode de reducere a efectelor revărsării SN prin reducerea fie a volumului de apă revărsată, fie a cantității de poluanți apa revărsată. Cu toate acestea, această abordare poate avea ca rezultat mici revărsări puternic poluate sau cantități mici de poluanți, dar debite masive ce pot provoca inundații. Astfel, apare necesitatea de a găsi un echilibru între cantitatea și calitatea revărsărilor prin dezvoltarea strategiilor de control optimal multi-obiectiv pentru SN.

Pentru modelarea WWTP, diverse modele, majoritatea bazate pe ecuațiile Monod, pot fi găsite în literatura de specialitate, ele modelând digestia biologică aerobă, anaerobă și anoxică. Chiar dacă WWTP-urile sunt considerate instalații care emit GHG, doar câteva lucrări abordează aceste emisii, încercând să implementeze fie modele deterministe, fie modele bazate pe date. Strategiile de control pentru stațiile de tratare sunt importante pentru a se asigura că apele uzate rezultate din activitățile umane nu au un impact negativ asupra sănătății publice sau mediului. Astfel, literatura de specialitate raportează multe strategii de control care, prin manipularea diferitelor variabile de control ale sistemului, cum ar fi coeficienții de transfer de oxigen din rezervoarele aerate, debitele de recirculare interne și externe, sau prin manipularea, în structurile de control de nivel superior, a referințelor structurilor de nivel inferior, cum ar fi concentrațiile de

DO sau de azot, au scopul principal de a asigura că efluentul stației de tratare este în conformitate cu reglementările legale în ceea ce privește încărcările cu diverși poluanți în apa care urmează să fie deversată în receptorii naturali. O parte din aceste lucrări are în vedere, pe lângă menținerea efluentului stației în limita legală, și minimizarea consumului energetic. Chiar dacă încălzirea globală este o preocupare importantă în zilele noastre și emisiile de GHG au un efect important asupra încălzirii globale, doar câteva lucrări iau în considerare aceste emisii atunci când elaborează strategii de control pentru stațiile de tratare a apelor uzate.

Una dintre cele mai importante probleme legate de funcționarea WWTP este incertitudinea în ceea ce privește influența stațiilor. Cu toate acestea, influența stației de tratare este de obicei efluentul SN și, prin urmare, implementarea strategiilor de control ale SN va ajuta la preluarea controlului asupra efluentului WWTP. Pe lângă aceasta, la implementarea strategiilor de control ale SN, trebuie luată în considerare capacitatea de tratare a WWTP deoarece o reducere a revărsărilor SN poate duce la supraîncărcarea WWTP, situație în care poluarea generată de supraîncărcarea stației poate depăși scăderea poluării SN. Acest lucru conduce la concluzia că controlul celor două sisteme ar trebui abordat împreună într-un mod integrat. În literatura de specialitate, subiectul sistemelor integrate de apă uzată (SN + WWTP) se regăsește doar în câteva lucrări, majoritatea concentrându-se doar pe modelarea sistemului integrat.

În concluzie, managementul apelor uzate este un domeniu important și există loc pentru o mulțime de îmbunătățiri care ar putea contribui la reducerea efectelor asupra sănătății publice și asupra mediului. La implementarea modelelor și strategiilor de control pentru SN și WWTP trebuie luate în considerare problemele lumii moderne: calitatea apei, costurile, încălzirea globală, fenomene pluviale extreme, inundații, emisiile de GHG ale WWTP etc. Recunoscând acest lucru, scopul principal al capitolelor următoare este să dezvolte strategii de control optimal pentru sistemul integrat compus dintr-o SN și o WWTP care să urmărească reducerea poluării generale generate de sistemul integrat având în vedere, în același timp, minimizarea costului operațional și a emisiilor de GHG ale WWTP.

Capitolul 2. Modelarea sistemelor de colectare și tratare a apelor uzate

2.1. Introducere

Dezvoltarea rapidă a comunităților umane, alături de stresul creat de provocările mondiale actuale (cum ar fi încălzirea globală, schimbările climatice, deficitul de apă etc.) impun dezvoltarea unor strategii complexe de control pentru sistemele de colectare și tratare a apelor uzate. Pentru ca astfel de strategii de control să fie implementate, este nevoie de instrumente pentru simularea digitală și analiza acestor sisteme. În acest context, acest capitol prezintă dezvoltarea unor modele pentru ambele subsisteme, SN și WWTP, dar și pentru întregul IUWS.

2.2. Modelarea unei rețele de canalizare

Pentru a avea un model care să fie utilizat la dezvoltarea, testarea și evaluarea strategiilor de control optimal, un model de SN a fost implementat în BSMSewer [23]. Este alcătuită din 7 rezervoare de stocare aferente a 5 zone de colectare, care deservește un oraș cu aproximativ 250.000 de locuitori [80], având structura și caracteristicile prezentate în Figura 2.1.

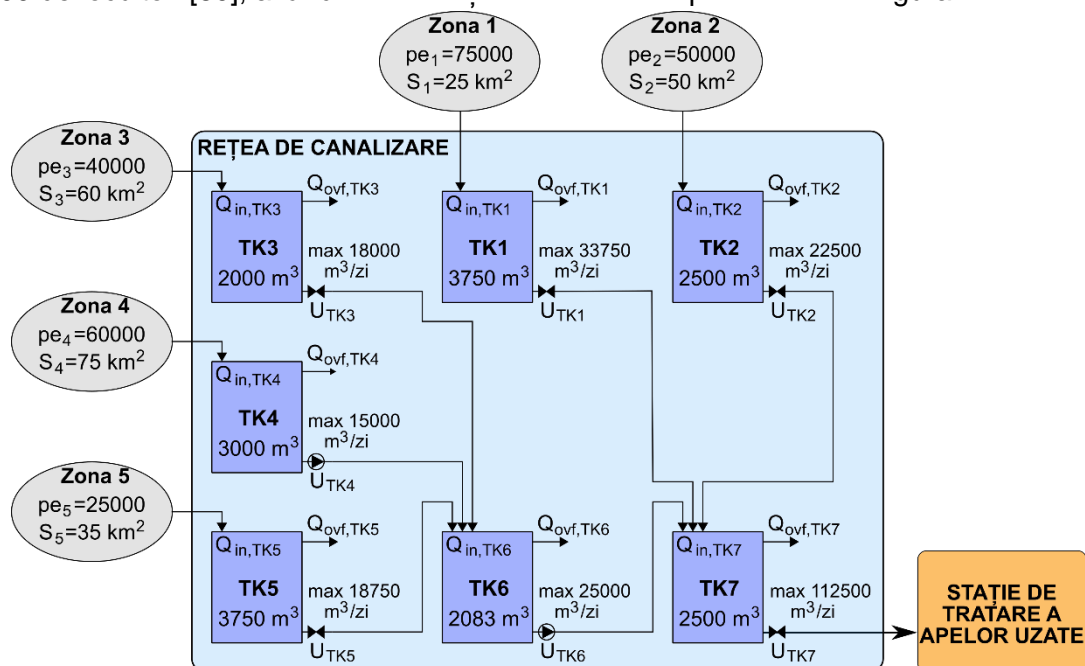


Figura 2.1 – Structura SN

Debitul de ieșire din TK4 și TK6 este controlat cu ajutorul pompelor ce evacuează apa uzată din aceste rezervoare. Fiecare dintre pompe este supusă unei acțiuni de control $U_{TK4} \in [0, 1]$ și $U_{TK6} \in [0, 1]$, ce reprezintă procente din capacitate maximă de pompare. Pentru celelalte 5 rezervoare, apa uzată este evacuată gravitațional utilizând valve, a căror deschidere poate fi controlată de $U_{TKi} \in [0, 1]$, reprezentând deschiderea procentuală. Întrucât SN deservește 5 zone de colectare, influența SN este compusă din 5 influențe aferente celor 5 zone. Fiecare dintre ei este compusă din două componente: o componentă domestică și una pluviometrică. În plus, a 5-a zonă de colectare include o componentă industrială. Fiecare dintre componente este descrisă de debitul de apă uzată (m^3/zi) și încărcările cu poluanți (kg/zi): Consumul Chimic de Oxigen –

Capitolul 2. Modelarea sistemelor de colectare și tratare a apelor uzate

Particule (COD_{part}), Consumul Chimic de Oxigen – Solubile (COD_{sol}), Amoniac (NH_4^+) și Fosfor (PO_4^{3-}).

Deoarece dezvoltarea strategiilor de control optimal necesită disponibilitatea unei prognoze de influent, o astfel de prognoză a fost generată pe un interval de timp de 28 de zile. Componenta domestică este calculată utilizând debitul/încărcările medii pe fiecare locuitor înmulțit cu populația echivalentă din zona de colectare, așa cum este descris în [23]. Valorile obținute sunt ajustate în continuare cu profiluri zilnice, săptămânale și anuale. Componenta pluviometrică ține cont doar de debit și se calculează folosind o prognoză meteo ajustată cu suprafața zonei de colectare. Au fost luate în considerare două evenimente pluviometrice: un eveniment de ploaie și unul de furtună. Componenta industrială are încărcări specifice unei fabrici de bere de dimensiuni medii [81] și un debit mediu zilnic $Q_{ind} = 2500 m^3/zi$. Aceste valori sunt ajustate cu profiluri săptămânale și anuale. Următorul tabel prezintă încărcările și debitele medii ale fiecărei zone.

Tabelul 2.1 – Încărcările și debitele medii din influentul prognozat

Zona	COD_{part} [kg/zi]	COD_{so} [kg/zi]	NH_4^+ [kg/zi]	PO_4^{3-} [kg/zi]	Debit [m ³ /zi]
1	5789.84	1031.10	312.72	80.10	9696.84
2	3859.89	687.40	208.48	53.40	6589.61
3	3087.91	549.92	166.78	42.72	5346.71
4	4631.87	824.88	250.18	64.08	7963.80
5	2233.68	2839.40	154.15	66.63	5282.22

Deoarece un influent prognozat nu poate fi 100% precis, un influent perturbat trebuie luat în considerare atunci când se testează strategiile de control optimal. Din acest motiv, a fost generat un scenariu de influent perturbat pe baza influentului prognozat prin adăugarea de numere aleatorii dintr-o distribuție gaussiană cu medie 0 la componentele domestice și industriale.

Modelul a fost simulat utilizând influentul perturbat, fără a se lua în considerare nicio acțiune de control pentru pompele / valvele de la ieșirea rezervoarelor de stocare (toate pompele funcționează la 100% și toate valvele complet deschise – cazul de bază). S-a observat că rezervoarele 1, 5 și 7 nu se revarsă, în timp ce rezervoarele 2, 3, 4 și 6 se revarsă în timpul evenimentelor pluviometrice. În plus, cei 10 indicatori de performanță prezentați în Tabelul 1.1 au fost calculați pentru fiecare rezervor, dar și global pentru întregul SN. Global, s-a obținut un $V_{ovf} = 315137 m^3/an$ și $OQI = 5273 kg - unități poluante/zi$. Deoarece revărsarea rezervorului nr. 6 are cea mai mare contribuție la performanța globală a SN în ceea ce privește cantitatea de apă uzată revărsată și cantitatea de poluanți din apa respectivă, trebuie verificat dacă păstrarea apei mai mult timp în rezervoarele din amonte are vreun efect asupra performanței SN. O nouă simulare a fost efectuată considerând că valva lui TK3 este doar 70% deschisă ($U_{TK3} = 0.7$).

De data aceasta valorile globale ale lui V_{ovf} și OQI au scăzut cu aproximativ 5-6 %. Mai mult, simularea a fost repetată considerând că valva de la ieșirea lui TK3 este doar 70% deschisă ($U_{TK3} = 0.7$) și pompa utilizată pentru evacuarea apelor uzate din TK4 funcționează la 70% ($U_{TK4} = 0.7$). V_{ovf} global a scăzut cu 13%, iar OQI global a scăzut cu 12%. În consecință, s-a dovedit că există combinații de comenzi la ieșirile rezervoarelor de stocare care ar putea oferi o performanță mai bună a SN decât în cazul în care totul funcționează la 100%, rezultând necesitatea controlului optimal al SN pentru a găsi combinația optimală de comenzi.

Pe de altă parte, implementarea controlului optimal în timp real al SN va necesita integrarea numerică a modelului de mai multe ori într-un interval de timp scurt. S-a observat că integrarea modelului implementat pe orizontul de 28 de zile durează în jur de 30 de secunde atunci când se folosește un computer de gamă medie (CPU Intel® Core™ i5-6200U @ 2.30GHz cu 8GB RAM).

Acest lucru ar putea reprezenta o problemă atunci când numărul de integrări numerice ale modelului este mare în timpul procedurii de optimizare, rezultând necesitatea unui model simplificat. Din acest motiv, s-a implementat un model simplificat prin păstrarea doar a părții de debit a modelului, consecința fiind o scădere a timpului de integrare numerică la 3 secunde.

2.3. Modelarea stațiilor de tratare a apelor uzate

Întrucât una dintre provocările legate de controlul bazat pe modele WWTP este timpul de integrare numerică a modelelor complexe ce sunt disponibile în literatură, acest subcapitol își propune să utilizeze NN pentru a modela diverse dinamici ale unor astfel de stații în trei abordări: 1. utilizarea unui NN pentru a estima variabilele de stare ale unei stații de epurare simple, 2. Utilizarea rețelelor Long Short-Term Memory (LSTM) pentru a estima o variabilă de proces pe baza unor valori ușor de măsurat și 3. utilizarea rețelelor LSTM pentru a estima variabilele efluentului stației de tratare pe baza influentului și a ratelor de aerare.

2.3.1. Modelarea utilizând rețele neuronale

Secțiunea actuală este dedicată dezvoltării a două modele NN pe baza datelor obținute cu un model matematic simplificat de ordinul 4 [82] a cărui structură este prezentată în Figura 2.2 [83]. Modelul considerat este compus din două unități: un bioreactor aerat folosit pentru îndepărtarea carbonului organic și un decantor folosit pentru a separa nămolul de efluent.

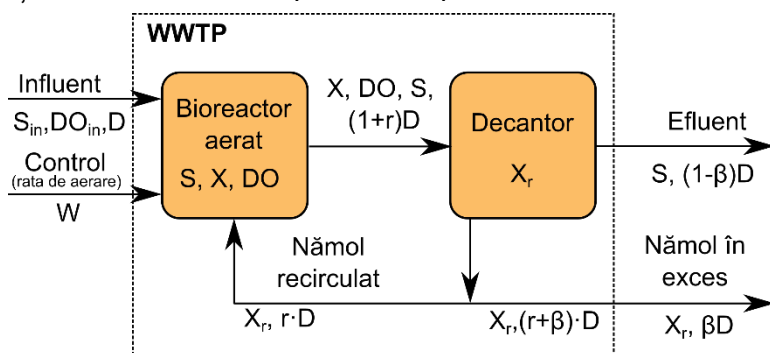


Figura 2.2 – Structura modelului simplificat de ordinul 4 al WWTP

Modelul este descris de patru variabile de stare (concentrațiile de biomasă – $X(t)$, substrat – $S(t)$, oxigen dizolvat – $DO(t)$ și biomasă recirculată – $X_r(t)$), trei variabile de influent ($D(t)$ – rata de diluție, $S_{in}(t)$ – concentrația de influent și $DO_{in}(t) = 2 \text{ mg/l}$ – concentrația de DO), o variabilă de control ($W(t)$ – rata de aerare) și o serie de constante (cum ar fi $r = 1$ – rata de recirculare și $\beta = 0.2$ – rata de extragere de nămol în exces).

Modelul NN a fost implementat în două variante. În primul s-a considerat că toate variabilele de stare sunt măsurabile (X, S, DO și X_r), astfel NN va estima dinamica tuturor stărilor ($\hat{X}, \hat{S}, \hat{DO}$ și \hat{X}_r) la ieșirea sa. În cea de-a doua versiune s-a considerat că numai S este măsurabil, astfel NN-ul va estima dinamica numai acestei stări (\hat{S}) la ieșire. Figura 2.3 prezintă structura utilizată la antrenarea celor două modele NN.

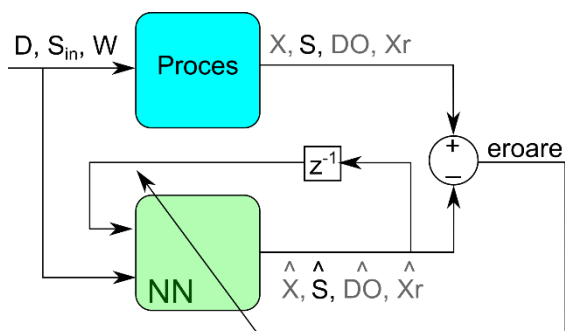


Figura 2.3 – Structura utilizată la antrenarea modelelor NN

Antrenamentul a fost efectuat folosind, ca date de intrare, semnale generate aleatoriu scalate la valori fezabile. NN este de tip Perceptron Multi-Strat ce conține un strat ascuns cu 10 neuroni (prima versiune) sau 4 neuroni (a doua versiune). Algoritmul Levenberg-Marquardt a fost luat în considerare pentru antrenarea NN. Modelele NN au fost validate folosind ca date de intrare un alt semnal generat aleatoriu scalat la valori fezabile. Figura 2.4 prezintă erorile de predicție în prima versiune, în timp ce Figura 2.5 arată eroarea de predicție în cea de-a doua versiune a modelului NN. Ele dovedesc acuratețea modelelor obținute.

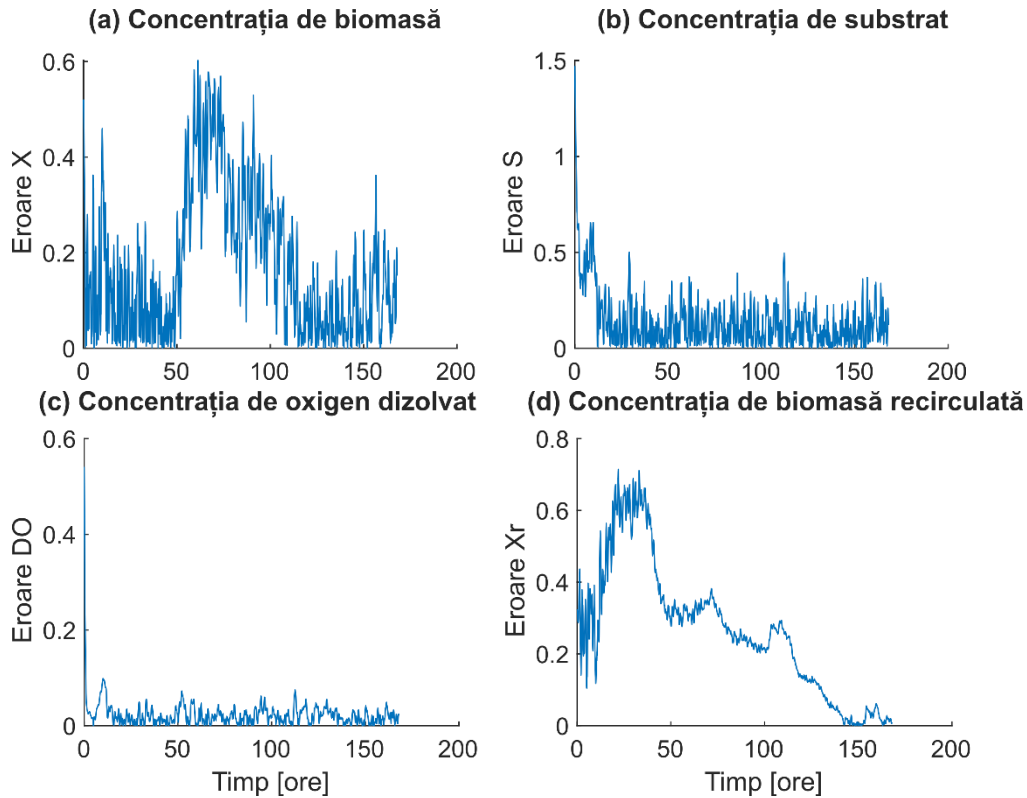


Figura 2.4 – Validarea NN – eroarea de predicție (prima versiune)

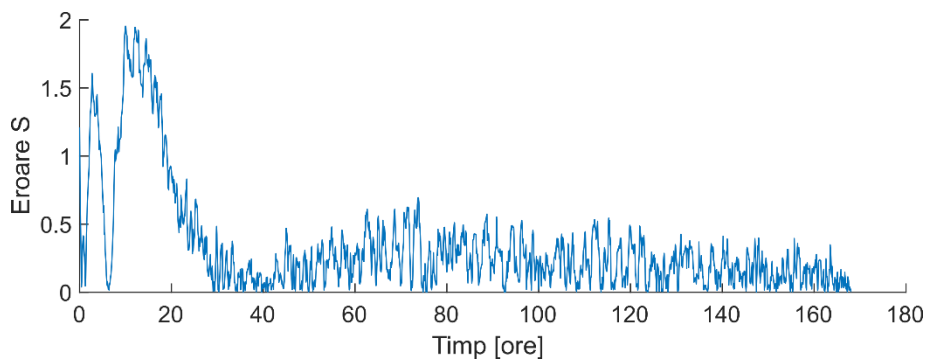


Figura 2.5 – Validarea NN – eroarea de predicție (a doua versiune)

2.3.2. Estimarea valorilor din proces utilizând rețele neuronale

O altă problemă legată de modelarea și controlul WWTP este că multe dintre variabilele procesului nu sunt ușor de măsurat, mai ales din cauza senzorilor scumpi. Această secțiune investighează utilizarea NN ca senzori software: estimarea concentrațiilor de amoniu în efluentul stației de tratare ($S_{NH,e}$) pe baza unor valori ușor măsurabile (Q_{po} – debitul de ieșire al decantorului primar, $S_{NH,5}$ – concentrația de amoniu în al 5-lea bioreactor, TSS – Total Suspended Solids în efluent și T_{as} – temperatura mediului) [84].

Datele de antrenament și de testare au fost obținute prin utilizarea modelului BSM2, constând din diverse măsurători ale influentului, efluentului și altor variabile pe o perioadă de doi ani cu o

rată de prelevare de 15 minute. Din acest set de date, primul an a fost folosit pentru instruire, în timp ce celălalt an a fost folosit pentru validarea senzorului software rezultat. Preprocesarea datelor este importantă deoarece asigură performanța și complexitatea optimă a NN [85] și constă din două etape: normalizarea datelor și a tehnică de fereastră alunecătoare cu o dimensiune a ferestrei de 10 ore și un orizont de predicție de 4 ore.

NN se bazează pe arhitectura LSTM [86]. NN este compus din două straturi LSTM, 3 straturi dense cu un număr descrescător de neuroni și un strat de ieșire. Fiecare dintre straturile LSTM conține 75 de celule LSTM. Când avem de-a face cu serii de timp, se pot întâlni date dezechilibrate, valorile efluentului WWTP fiind un astfel de exemplu. Pentru a rectifica efectele dezechilibrului datelor, tehnica K-Fold [87] a fost utilizată în timpul procesului de învățare [88].

Valorile metricilor considerate ($RMSE = 0.048$, $MAPE = 3.54\%$ și $R^2 = 0.97$) dovedesc fiabilitatea și precizia predicțiilor lui $S_{NH,e}$ folosind senzorul software implementat.

2.3.3. Estimarea calității efluentului utilizând rețele neuronale

Implementarea algoritmilor de control optimal bazați pe model pentru WWTP necesită integrarea numerică multiplă a modelelor, ceea ce poate ridica probleme legate de timp, în special atunci este vorba de aplicații în timp real. Această secțiune explorează utilizarea NN pentru predicția variabilelor din efluent pe baza variabilelor de influent, dar și a acțiunilor de control. [89].

$$EQI = \frac{1}{T \cdot 1000} \cdot \int_{t=245}^{t=609} \left(\begin{matrix} B_{TSS} \cdot TSS_e(t) + B_{COD} \cdot COD_e(t) + \\ B_{NKj} \cdot S_{NKj,e}(t) + B_{NO} \cdot S_{NO,e}(t) + \\ B_{BOD5} \cdot BOD_e(t) \end{matrix} \right) \cdot Q_e(t) \cdot dt \quad (2.1)$$

Ecuția (2.3) [50] arată că EQI este definit pe baza unor variabile specifice din efluent scalate cu factori B_x pe întreaga perioadă de observație T . Aceste variabile de calitate sunt: TSS_e – Total Solide în Suspensie, COD_e – Consumul chimic de oxigen, $S_{NKj,e}$ – Azot Kjeldahl total, $S_{NO,e}$ – concentrația de azot nitric și BOD_e – Consumul biochimic de oxigen. Această secțiune își propune să estimeze aceste variabile de calitate pe baza aceluiași variabile măsurate în influent și pe baza unei acțiuni de control: $K_L a_3$ – coeficientul de transfer de oxigen în bioreactorul 3 al WWTP.

Datele de antrenament și testare au fost obținute prin integrarea modelului BSM2 și constă în măsurători ale variabilelor de calitate a influentului și efluentului colectate sub influența diferitelor valori ale $K_L a_3$ pentru toate cele 609 zile ale influentului BSM2, luând în considerare următoarele valori pentru transferul de oxigen coeficienții bioreactoarelor 4 și 5:

$$K_L a_4 = K_L a_3; \quad K_L a_5 = 0.5 \cdot K_L a_3 \quad (2.2)$$

În timpul simulării, $K_L a_3$ a fost variat folosind o abordare deterministă: valoarea a fost crescută de la 0 la 250, în pași care au fost menținuți constanți pe perioade de câte o săptămână înainte de a fi incrementați la următoarea valoare. Folosirea acestei metode asigură că NN-ul este expus la toate scenariile posibile în ceea ce privește valoarea lui $K_L a_3$.

Înainte de a fi alimentate către NN, datele parcurg o etapă de preprocesare similară cu cea implicată în secțiunea 2.3.2. A fost folosită aceeași structură NN și a fost implicată aceeași tehnică K-Fold. Valorile metricilor considerate ($RMSE = 0.048$ și $R^2 = 0.99$) dovedesc fiabilitatea și precizia modelului NN rezultat.

2.4. Modelarea sistemelor integrate de ape uzate urbane

SN și WWTP sunt sisteme interconectate, efluentul primului fiind influentul celuilalt. În consecință, efluentul SN joacă un rol important în performanța WWTP, ceea ce înseamnă că, la controlul SN, este important să se ia în considerare și WWTP. Pe de altă parte, strategiile de control implicate pentru exploatarea WWTP ar trebui să țină cont dacă SN este sau nu afectat de

Capitolul 2. Modelarea sistemelor de colectare și tratare a apelor uzate

evenimente pluviometrice considerabile. Ținând cont de motivele prezentate, este important, la elaborarea strategiilor de control și a metodelor de optimizare a transportului și tratării apelor uzate, să se aibă în vedere sistemul integrat format din SN și WWTP. Din acest motiv, sunt necesare modele IUWS.

În consecință, acest subcapitol se concentrează pe dezvoltarea unui model IUWS prin conectarea modelului SN (modelul dezvoltat în subcapitolul 2.2) cu un model WWTP (modelul BSM2G [6]). IUWS deservește un oraș cu aproximativ 250.000 de locuitori și are structura prezentată în Figura 2.6.

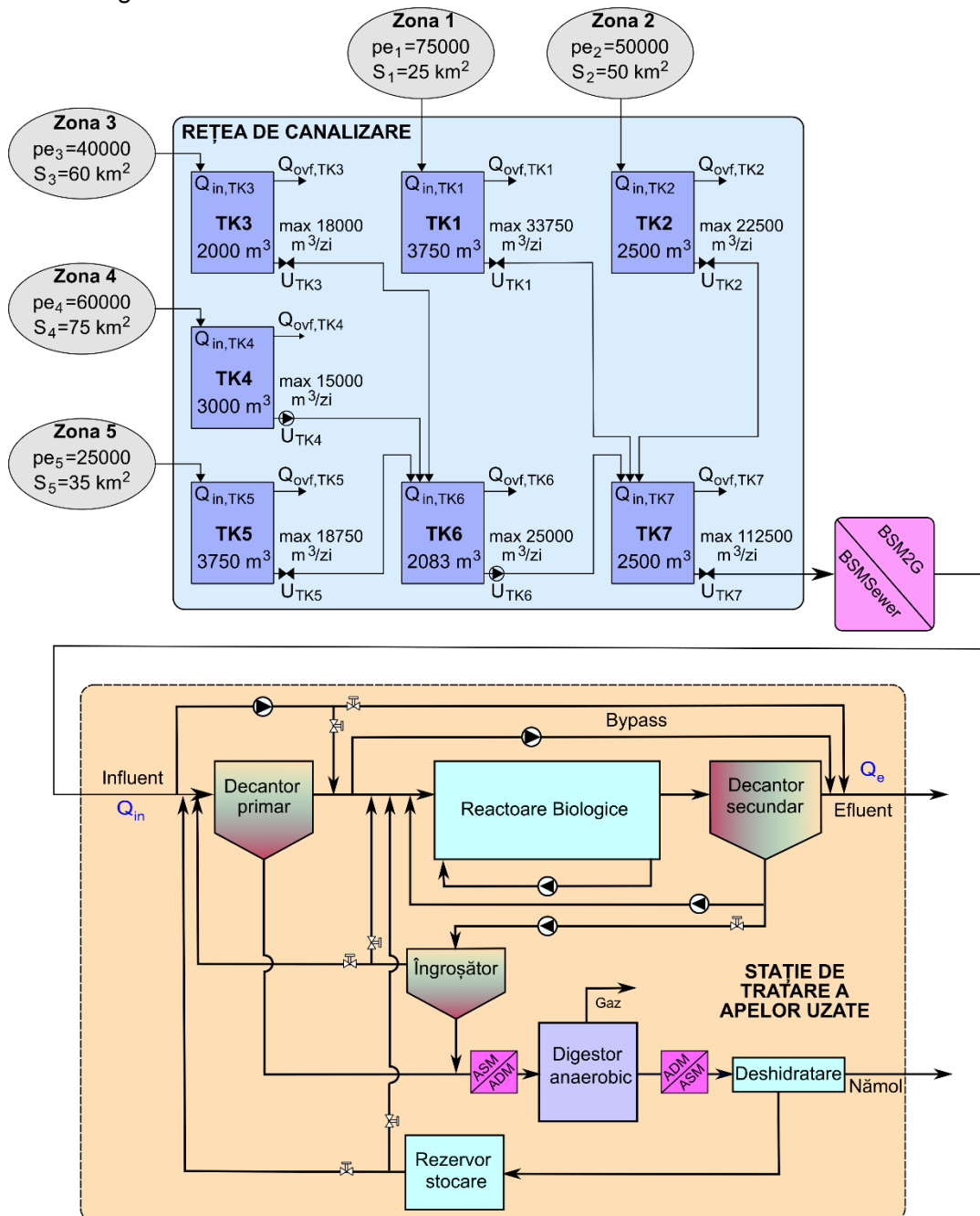


Figura 2.6 – Arhitectura IUWS

Deoarece SN este dezvoltat în BSMSEwer, efluentul său are 5 variabile (COD_{sol} , COD_{part} , NH_4 , PO_4 and Q). Pe de altă parte, influentul BSM2G conține 21 de variabile [6]. Din acest motiv, este necesară o unitate de cuplare între cele două modele de subsistem pentru a face conversia de variabile. Această conversie este o versiune modificată a metodologiei propuse de [25] (de la variabilele BSMSEwer la ASM2d) și este prezentată în Figura 2.7.

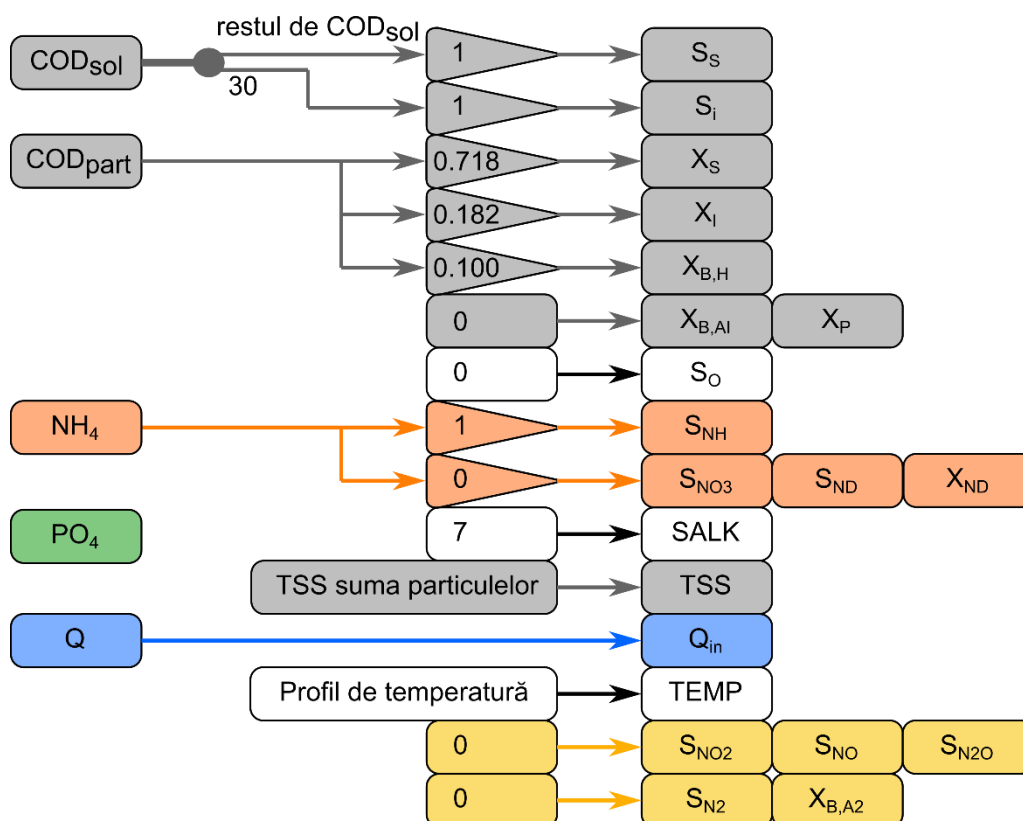


Figura 2.7 – Conversia de la variabile BSM Sewer la variabile BSM2G

Deoarece acest model a fost dezvoltat pentru studierea interdependenței performanțelor SN și WWTP sub diferite scheme de control, este important să existe indicatori pentru măsurarea performanței fiecărui subsistem, dar și a sistemului integrat. Pentru SN, vor fi analizați doar doi dintre indicatorii de performanță BSM Sewer descriși în Tabelul 1.1 (V_{ovf} și OQI). Pentru stația de tratare au fost luați în considerare următorii indicatori de performanță: indicele de calitate a efluentului – EQI , indicele de cost operațional – OCI , emisiile totale de GHG din tratarea biologică – GHG_{bio} [$kg CO_{2e}/day$] și totalul de emisii GHG al stației – GHG_{total} [$kg CO_{2e}/day$].

Cu toate acestea, pentru IUWS, nu există un indicator de performanță definit în literatură. Ambele subsisteme pot descărca poluanți în receptorii naturali, care sunt evaluați prin OQI și EQI . Cu toate acestea, cei doi indicatori nu sunt calculați în același mod, deci nu sunt comparabili. Se propune un nou indicator de performanță pentru evaluarea poluanților revărsați de SN: OQI_1 calculat în același mod ca EQI , după conversia variabilelor BSM Sewer ale apei uzate revărsate în variabile ASM1. Acum că ambele subsisteme au indici de calitate definiți, care sunt calculați în același mod și care au aceeași unitate, se poate defini un indice de calitate integrat (DQI) pentru a evalua cantitatea totală de poluanți evacuați de IUWS.

$$DQI = w_{EQI} \cdot EQI + w_{OQI} \cdot OQI_1 \quad (2.3)$$

Cele două ponderi (w_{EQI} și w_{OQI}) trebuie alese astfel încât să țină seama de severitatea descărcării din subsistemele corespunzătoare. Cu noul DQI definit, indicatorul de performanță agregat definit de [90] ar putea fi modificat astfel încât să includă și informații despre cantitatea de poluanți evacuați de SN, rezultând un indicator de performanță integrat pentru IUWS:

$$I(\lambda) = \lambda \cdot \overline{DQI} + \frac{1-\lambda}{2} \cdot \overline{OCI} + \frac{1-\lambda}{2} \cdot \overline{GHG_{total}} \quad (2.4)$$

cu următoarea notație:

$$\bar{X} = \frac{X}{X_{BC}} \quad (2.5)$$

unde X_{BC} este valoarea care a fost obținută pentru indicatorul X într-un caz de bază. Cazul de bază va fi definit ca cazul în care SN nu este controlat (toate valvele și pompele sunt complet deschise sau funcționează la 100%), în timp ce pentru WWTP se folosește strategia de control implicită din BSM2. Tabelul 2.2 prezintă valorile indicatorilor de performanță în cazul de bază.

Tabelul 2.2 – Valorile indicatorilor de performanță ai IUWS în cazul de bază

Indicator de performanță	Valoare	Unitate
$V_{ovf,BC}$	313942.26	m^3/an
$OQI_{1,BC}$	4007.44	$kg - unități poluante/zi$
EQI_{BC}	11958.81	$kg - unități poluante/zi$
OCI_{BC}	14436.05	-
$GHG_{total,BC}$	27159.32	$kg CO_{2e}/zi$
DQI_{BC}	15966.25	$kg - unități poluante/zi$

Este important de menționat că pentru calcularea DQI în Tabelul 2.2 cu ecuația (2.3), cele două ponderi implicate au fost considerate egale: $w_{EQI} = w_{OQI} = 0.5$ însemnând că s-a considerat că revărsarea SN este direcționată către același receptor natural ca și efluentul WWTP.

2.5. Concluziile capitolului

Acest capitol abordează modelarea sistemelor de colectare și tratare a apelor uzate într-o manieră separată, dar și integrată, prezentând dezvoltarea unei serii de instrumente digitale care vor fi utile în timpul etapei de implementare a strategiilor de control.

În primul rând, un model matematic SN a fost implementat în BSMSewer în versiune completă și simplificată. Mai mult, scenariu de influent cu o durată de 28 de zile a fost generat pentru a fi utilizat la testarea strategiilor de control a SN. Scenariul este generat în două versiuni: scenariu prognozat și scenariu perturbat, ultima conținând o componentă aleatorie. Modelul SN rezultat este simulat în diverse condiții, rezultând că există combinații de comenzi la ieșirea rezervoarelor de stocare care ar putea oferi o performanță mai bună a SN decât în cazul în care totul funcționează la 100%, rezultând necesitatea unui control optimal al SN. În ceea ce privește modelele WWTP, una dintre principalele provocări ale controlului bazat pe model este reprezentată de complexitatea ridicată a modelelor disponibile în literatura de specialitate, conducând la un timp mare de integrare numerică. Din acest motiv, au fost dezvoltate o serie de modele NN care vizează estimarea diverselor dinamici WWTP. În ceea ce privește modelele IUWS, acest capitol propune un model integrat obținut prin combinarea modelului SN descris în capitolul curent cu modelul BSM2G pentru WWTP. Deoarece subsistemele sunt implementate cu instrumente diferite, este necesară o unitate de cuplare între cele două subsisteme pentru a face conversia de variabile. Întrucât modelul integrat se dorește a fi utilizat în capitolul următor pentru explorarea posibilității de îmbunătățire a performanțelor sistemelor integrate, se propune o metodologie de evaluare a performanței strategiilor de control.

În concluzie, acest capitol prezintă o serie de instrumente care vor fi utilizate în elaborarea strategiilor de control optimal pentru sistemele de colectare și tratare a apelor uzate, demonstrează necesitatea controlului optimal al SN, propune modele SN și WWTP cu timp de integrare redus, care ar putea fi utilizate pentru dezvoltarea strategii de control bazate pe modele online și definește un model IUWS alături de o metodologie de evaluare a performanțelor strategiilor de control ale sistemului integrat.

Capitolul 3. Controlul optimal al sistemelor de colectare și tratare a apelor uzate

3.1. Introducere

Strategiile de control optimal a sistemelor de colectare și tratare a apelor uzate sunt importante, deoarece acestea asigură că apele uzate rezultate din activitățile umane nu poluează mediul și nici nu afectează în niciun fel sănătatea umană. În consecință, scopul principal al controlului optimal al SN este de a asigura eficiența operațională a rețelei în condiții de debit de intrare ridicat, prin direcționarea a cât mai multă apă uzată și poluanți către WWTP. Pe de altă parte, sistemele de control implicate pentru WWTP trebuie să asigure că efluentul acestuia respectă standardele legale în ceea ce privește diferitele încărcări cu poluanți a apei care urmează să fie deversată în receptorii naturali, menținând, în același timp, un cost de exploatare scăzut. În plus, trebuie luate în considerare emisiile de GHG rezultate din tratarea apelor uzate. Toate aceste obiective pot fi atinse prin manipularea diferitelor variabile de control din sisteme, cum ar fi valvele/pompele SN, sau coeficienții de transfer de oxigen din rezervoarele aerate WWTP, sau prin manipularea, în structuri de control de nivel superior, a referințelor structurilor de nivel inferior, cum ar fi concentrațiile de DO din rezervoarele aerate.

În consecință, restul acestui capitol este subdivizat în patru subcapitole. Subcapitolul 3.2 se ocupă de dezvoltarea strategiilor de control optimal pentru SN, prezentând două abordări: controlul optimal offline și online. Subcapitolul 3.3 prezintă 3 strategii de control optimal pentru WWTP, în timp ce subcapitolul 3.4 analizează luarea în considerare a întregului IUWS la elaborarea strategiilor de control ale fiecărui subsistem (SN și WWTP). Întrucât efluentul SN reprezintă influența WWTP, este important să se cunoască și efectele strategiilor de control SN asupra performanțelor de funcționare a WWTP. Este de așteptat ca un debit mai mare din SN, datorită strategiilor de control care să evite revărsările, să ducă la supraîncărcare WWTP, cu efecte considerabile asupra mediului. Prin urmare, strategiile de control ale SN ar trebui să ia în considerare efectele lor asupra eficienței stației de tratare. În consecință, IUWS descris în subcapitolul 2.4 este studiat în continuare, urmând două direcții de evaluare a impactului pe care SN îl are asupra performanțelor stației de epurare. În prima direcție, singurul control luat în considerare pentru SN este în ceea ce privește valva de la ieșirea SN, în timp ce toate celelalte valve/pompe sunt deschise/funcționează la 100%. A doua direcție consideră utilizarea unui algoritm de control MPC descris în secțiunea 3.2.2 pentru minimizarea impactului SN asupra mediului. Această strategie este modificată în continuare prin integrarea unei constrângeri privind deschiderea valvei de la ieșirea SN. Ultimul subcapitol este dedicat concluziilor acestui capitol.

3.2. Controlul optimal al rețelelor de canalizare

Scopul principal al dezvoltării strategiilor de control optimal pentru SN este reducerea impactului asupra mediului prin scăderea cantității de ape uzate care se revărsă din rețea, alături de cantitatea de poluanți din apa revărsată, în timpul evenimentelor pluviometrice abundente. Acest lucru poate fi realizat prin manipularea comenzilor de la ieșirea rezervoarelor de stocare SN (U_{TKi}). Pot fi luate în considerare două abordări: controlul optimal offline și online, ambele având avantaje și dezavantaje. Pe de o parte, controlul optimal offline nu depinde de timpul de integrare numerică al modelului, dar este mai puțin robust atunci când sunt prezente incertitudini

legate de influent. Pe de altă parte, controlul optimal online necesită un model care să poată fi integrat rapid și care să poată ține cont de diferențele dintre influentul prognozat și cel real.

Ieșirea *TK7* este efluentul SN (vezi Figura 2.1), deci menținerea valvei acestui rezervor deschisă 100% este cea mai bună soluție în ceea ce privește performanțele SN. Mai mult, analizând rezultatele obținute în simulare când nu s-a considerat nici un control (toate comenzile menținute la 100%) s-a observat că rezervorul *TK7* nu revărsă. Prin urmare, pentru rezervoarele a căror debit ieșire reprezintă debitul de intrare în *TK7* (*TK1*, *TK2* și *TK6*), menținerea comenzii la 100% este cea mai bună soluție. În consecință, manipularea comenzilor de ieșire ale *TK3*, *TK4* și *TK5* este singura soluție ce duce la îmbunătățirea performanțelor rețelei. Prin urmare, doar aceste 3 rezervoare vor fi supuse optimizării. Pentru toate abordările, doi dintre indicatorii de performanță SN vor fi calculați și analizați: V_{ovf} și OQI . Toate rezultatele vor fi prezentate raportate la valorile aceluiași indicatori în cazul „fără control”. Scalarea se face conform ecuațiilor:

$$\overline{V_{ovf}} = \frac{V_{ovf}}{V_{ovf,NC}} \quad (3.1)$$

$$\overline{OQI} = \frac{OQI}{OQI_{NC}} \quad (3.2)$$

unde $V_{ovf,NC}$ și OQI_{NC} reprezintă valorile celor doi indicatori de performanță în cazul „fără control”.

3.2.1. Control optimal offline

Dezvoltarea controlului optimal offline al SN necesită o serie de pași ce vor fi prezentați în continuare.

3.2.1.1. Strategii de control optimal

O serie de 5 strategii de control optimal [91] au fost implementate, testate pentru a minimiza separat V_{ovf} și OQI și comparate din punct de vedere la îmbunătățiri performanțelor SN. Pentru optimizare, utilizarea GA [92] a fost aleasă, având următoarele caracteristici:

- numărul de gene din cromozom – în conformitate cu fiecare strategie de control.
- populația – 20 indivizi.
- populația inițială – generată în mod aleatoriu.
- operatorii de selecție / încrucișare / mutație – cei prestabiliți în MATLAB 2018a.
- condiții de oprire – numărul maxim de generații atins sau nicio îmbunătățire a celei mai bune valori a funcției de cost în ultimele 30 de generații.

Cele cinci strategii consideră că comanda dată ieșirii rezervoarelor de stocare a SN depinde de nivelul lichidului din rezervor, așa cum se vede în Figura 3.1. Pentru fiecare strategie de control, algoritmul de optimizare va căuta valorile optime ale parametrilor strategiei pentru fiecare rezervor care este supus optimizării.

Pentru fiecare dintre cele 5 strategii, algoritmul de optimizare a fost rulat de două ori, prima dată considerând că funcția de cost este V_{ovf} și a doua oară considerând că este OQI . Toate strategiile implementate conduc la îmbunătățiri semnificative ale celor doi indicatori de performanță. Cea mai eficientă în raport cu V_{ovf} este Strategia #3 cu o reducere de 33,89% a volumului de revărsare față de cazul „fără control” ($\overline{V_{ovf}} = 0.6611$). Cea mai eficientă în raport cu OQI este Strategia #4 cu o reducere de 31,94% a OQI în comparație cu cazul „fără control” ($\overline{OQI} = 0.6806$). Cu toate acestea, reducerea OQI atunci când se utilizează Strategia #3 pentru a minimiza OQI este similară cu cea obținută cu Strategia #4, sugerând că Strategia #3 ar putea fi aleasă ca fiind cea mai bună.

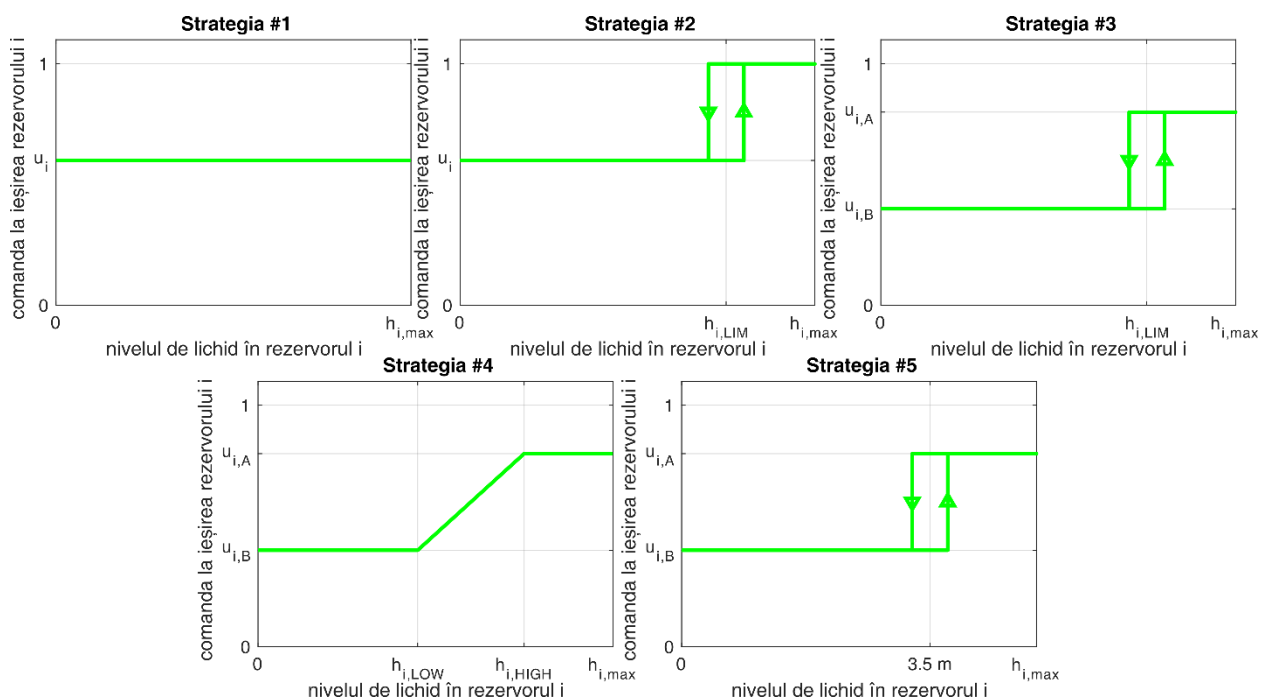


Figura 3.1 – Cele 5 strategii de control

Pentru a demonstra fiabilitatea și robustețea Strategiei #3, procedura de optimizare a fost rulată de 18 ori pentru a minimiza V_{ovf} rezultând parametrii statistici descriși în Tabelul 3.1. Valorile scăzute ale deviației standard demonstrează că strategia este robustă și fiabilă.

Tabelul 3.1 – Parametrii statistici ai rezultatelor Strategiei #3 când se minimizează V_{ovf}

	Valoarea maximă	Valoarea minimă	Valoarea medie	Deviația standard
$\overline{V_{ovf}}$	0.7890	0.6542	0.7015	0.0370
\overline{OQI}	0.8161	0.6939	0.7419	0.0386

3.2.1.2. Cantitate vs. calitate

Minimizarea V_{ovf} duce la scăderea valorilor OQI și invers. Astfel, este important să înțelegem corelațiile dintre cei doi indicatori pentru a avea cea mai potrivită funcție de cost pentru controlul optimal al SN. Această subsecțiune urmărește optimizarea eficienței SN având în vedere, de această dată, ambii indicatorii de performanță în funcția de fitness (MOO) și compararea rezultatelor cu cazul „fără control”, dar și cu rezultatele obținute în subsecțiunea anterioară când SOO a fost efectuat fie în raport cu V_{ovf} , fie în raport cu OQI . Au fost abordate două metode de optimizare, ambele fiind bazate pe un GA elitist controlat [93]:

- a) **algoritmul MOO** a furnizat valorile scalate ale V_{ovf} între 0.8023 – 0.8048 și valori scalate ale OQI în intervalul 0.7498 – 0.7588. Folosind *Nash Bargaining Solution* [94], soluția optimală obținută arată o scădere de 19.74% a V_{ovf} și de 24.71% a OQI , comparativ cu cazul „fără control”. Rezultatele sunt semnificativ mai proaste decât soluțiile găsite atunci când doar unul dintre indicatorii de performanță a fost minimizat.
- b) **algoritmul MOO în doi pași** urmează procedura [95]:
 1. Se efectuează SOO individual pentru fiecare indicator de performanță.
 2. Se efectuează MOO, incluzând soluțiile SOO în populația inițială.

În primul rând, OQI și V_{ovf} au fost minimizate separat timp de 25 de generații, fiecare obținând soluțiile ce furnizează $\overline{OQI}^* = 0.7438$ și $\overline{V_{ovf}} = 0.7037$. După obținerea soluțiilor SOO, acestea au

fost incluse în populația inițială MOO, iar algoritmul MOO a fost rulat timp de 50 de generații. Ceilalți 18 indivizi din populația inițială MOO au fost generați aleatoriu. Soluția optimă obținută este similară cu cea obținută de SOO la minimizarea V_{ovf} ($\overline{OQI}^* = 0.728$ și $\overline{V_{ovf}}^* = 0.702$). Mai mult, MOO în doi pași oferă doar o mică parte din Frontul Pareto, punctele suprapunându-se. Acest lucru s-ar putea explica prin faptul că există o corelație puternică între cei doi indicatori de performanță, ceea ce înseamnă că minimizarea unuia dintre ei duce la minimizarea celuilalt. Cu toate acestea, minimizarea SOO a V_{ovf} are performanțe substanțial mai bune în ceea ce privește ambii indicatori de performanță decât minimizarea SOO a OQI . Acest lucru se datorează geometriei spațiului funcției de cost. Astfel minimizarea V_{ovf} într-o abordare SOO este cea mai simplă soluție pentru a minimiza impactul asupra mediului al revărsărilor SN.

3.2.1.3. Algoritmi de optimizare

Fiind dovedit că cea mai bună strategie este Strategia #3 prezentată în subsecțiunea 3.2.1.1 și că cea mai potrivită funcție de cost pentru a minimiza impactul asupra mediului al revărsărilor SN este V_{ovf} , următorul pas este de a decide ce metodă de optimizare ar duce la rezultate mai bune. Din acest motiv, au fost implementate alte trei metode de optimizare [96]: 1. Particle Swarm Optimization (PSO), 2. Generarea aleatorie a soluției și 3. Algoritmul *FminSearch*.

Algoritmul PSO implementat [97] are următoarele caracteristici:

- dimensiunea roiului: 20 particule.
- numărul maxim de iterații: 100.
- populația inițială generată aleatoriu.
- condiții de oprire: numărul maxim de iterații atins sau nicio îmbunătățire a celei mai bune valori a funcției de cost în ultimele 30 de iterații.

Algoritmii evolutivi (GA și PSO) au oferit cele mai bune rezultate (reducerea semnificativă ai ambilor indicatori de performanță față de cazul „fără control”), cele furnizate de PSO fiind puțin mai bune (valori medii ale $\overline{V_{ovf}} = 0.6757$ și $\overline{OQI} = 0.7220$). *FminSearch* a oferit rezultatele cele mai proaste, chiar mai proaste decât generarea aleatorie a soluției. Din acest motiv, în cele ce urmează, PSO va fi considerat ca metodă de optimizare.

3.2.1.4. Optimizarea utilizând tehnica ferestrei alunecătoare

Influentul prognozat nu este 100% exact pentru perioade lungi de timp, diferențe fiind posibile în toate cele 3 componente ale influentului: domestic, pluviometric și industrial. Astfel, efectuarea optimizării pentru întregul orizont de timp de 28 de zile (găsirea unui set de comenzi optimale care să fie utilizate pentru întreaga perioadă) este susceptibilă la perturbații induse de incertitudinile influentului. Astfel, algoritmul de control optimal descris anterior va fi modificat prin includerea lui într-un algoritm de tip fereastră alunecătoare [98]. În acest fel, în loc să se caute controalele optimale pentru întreaga perioadă de 28 de zile, algoritmul le va căuta doar pentru o zi. Algoritmul de optimizare va fi rulat luând în considerare influentul prognozat și va fi validat pe influentul perturbat. Algoritmul de optimizare bazat pe fereastră alunecătoare a fost rulat de 20 de ori. S-au obținut parametrii statistici prezentați în Tabelul 3.2.

Tabelul 3.2 – Parametrii statistici ai soluțiilor obținute cu PSO în fereastră alunecătoare la minimizarea V_{ovf}

Scenariu		Valoarea maximă	Valoarea minimă	Valoarea medie	Deviația standard
Influent	$\overline{V_{ovf}}$	0.4416	0.4137	0.4159	0.0064
Prognozat	\overline{OQI}	0.4271	0.4042	0.4062	0.0054
Influent	$\overline{V_{ovf}}$	0.4055	0.3480	0.3606	0.0160
Perturbat	\overline{OQI}	0.4940	0.3755	0.3903	0.0270

Valorile indicatorilor de performanță, alături de valorile scăzute ale deviațiilor standard, demonstrează că tehnica ferestrei alunecătoare oferă rezultate mai bune decât rularea algoritmului de optimizare pentru întregul orizont de timp. Îmbunătățiri ale rezultatelor pot fi făcute luând în considerare că la fiecare fereastră de timp de 1 zi, pe lângă minimizarea V_{ovf} , se va lăsa SN într-o stare care ar putea fi benefică ferestrelor de timp viitoare. Acest lucru se putea realiza prin menținerea nivelului apei uzate din rezervoarele de stocare la un nivel cât mai scăzut la sfârșitul ferestrei de optimizare prin adăugarea unui termen de penalizare în funcția de cost ce ține cont de nivelurile de apă uzată din rezervoare:

$$fitness_2 = V_{ovf} + w_p \cdot \sum_{i=1}^7 h_i \quad (3.3)$$

unde w_p este ponderea penalizării.

Algoritmul a fost rulat de 20 de ori pentru $w_p = 1$ și de încă 20 de ori pentru $w_p = 10$. S-au obținut parametrii statistici prezentați în Tabelul 3.3. Rezultatele arată că algoritmul a funcționat mai bine pentru influențul prognozat atunci când a fost utilizată o pondere de $w_p = 10$, în timp ce pentru influențul perturbat, cele mai bune rezultate au fost obținute cu $w_p = 1$.

Tabelul 3.3 – Parametrii statistici ai soluțiilor obținute cu PSO în fereastră alunecătoare și penalizare

w_p	Scenariu		Valoarea maximă	Valoarea minimă	Valoarea medie	Deviația standard
1	Influent	$\overline{V_{ovf}}$	0.4271	0.4137	0.4151	0.0031
	Prognozat	\overline{OQI}	0.4186	0.4042	0.4051	0.0032
	Influent	$\overline{V_{ovf}}$	0.3542	0.3478	0.3489	0.0018
	Perturbat	\overline{OQI}	0.3805	0.3755	0.3765	0.0018
10	Influent	$\overline{V_{ovf}}$	0.4176	0.4133	0.4144	0.0014
	Prognozat	\overline{OQI}	0.4046	0.4036	0.4044	0.0004
	Influent	$\overline{V_{ovf}}$	0.4624	0.3478	0.3586	0.0311
	Perturbat	\overline{OQI}	0.5455	0.3755	0.3872	0.0397

3.2.2. Control optimal online

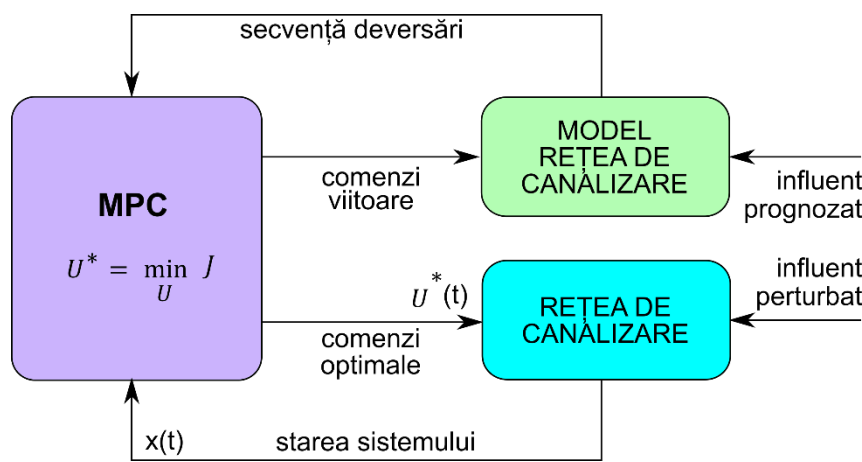


Figura 3.2 – Structura MPC

Mai departe, algoritmul offline dezvoltat anterior va fi modificat într-un algoritm de control optimal online [99] prin includerea acestuia într-o structură MPC [100]. Algoritmul necesită aplicarea unei proceduri de optimizare iterativă pe un model de sistem pe un orizont de timp finit (T_H – orizont de predicție) care este deplasat continuu înainte cu un anumit pas (T_S ales astfel încât $T_H = n_T \cdot T_S$ și $n_T \in \mathbb{N}$ – numărul de pași din orizontul de). Figura 3.2 prezintă arhitectura MPC.

MPC necesită de obicei trei componente esențiale:

1. un model dinamic al sistemului – modelul simplificat descris în subcapitolul 2.2.
2. o funcție de cost – volumul anual global de apă uzată revărsată.
3. un algoritm de optimizare care să fie utilizat pentru minimizarea funcției de cost – PSO.

Rezultatele au fost obținute în simulare utilizând modelul simplificat ca model dinamic cerut de MPC și modelul implementat în BSMSewer ca proces care trebuie optimizat – a se vedea subcapitolul 2.2 pentru o descriere a celor două modele. Modelul simplificat folosește influența prognozată, în timp ce procesul îl folosește pe cel perturbat.

Cazul 1

În primul caz, au fost luate în considerare două seturi de teste: unul cu $T_S = 1 h$ și unul cu $T_S = 2 h$. Pentru ambele seturi, n_T a fost variat prin valorile $\{3, 4, 6, 7, 12, 24\}$. Fiecare dintre cele 12 teste a fost efectuat de 20 de ori. Cea mai mare reducere medie a V_{ovf} (50.63 %) a fost obținută pentru $T_S = 1 h$ cu $T_H = 6 h$ ($n_T = 6$), însă diferențele dintre acesta și celelalte teste nu sunt semnificative. Pe de altă parte, cea mai mare reducere medie a OQI (44.12%) a fost obținută pentru $T_S = 1 h$ cu $T_H = 12 h$ ($n_T = 12$).

Cazul 2

La analiza din punct de vedere statistic a rezultatelor obținute în primul caz, s-a putut observa că, pentru OQI , în toate cazurile, deviația standard este mare (interval de reducere de la 12 % la 52 %), datorită faptului că spațiul soluțiilor are multe minime locale care asigură o reducere similară a V_{ovf} , dar o reducere diferită a OQI . Din acest motiv, este necesar să se facă diferența între minimele locale cu o reducere similară a V_{ovf} , ar o reducere diferită a OQI . Integrarea OQI în modelul simplificat va duce la o creștere a complexității modelului și a timpului de integrare a acestuia. Mai mult, aplicarea acestei soluții în controlul în timp real al SN va necesita senzori scumpi pentru a măsura diferite încărcări în mai multe puncte ale SN, ceea ce duce la costuri suplimentare. Pentru a evita acest lucru, se propune o altă soluție: măsurarea offline a concentrațiilor de poluanți din când în când și utilizarea acestor măsurători pentru a calcula un set de ponderi w_{TKi} , una per rezervor de stocare, care să fie utilizate în funcția de cost pentru a pondera volumul de apă revărsată de fiecare rezervor în parte:

$$J = \sum_{i=1}^N w_{TKi} \cdot V_{ovf,TKi} \quad (3.4)$$

În scopuri de simulare și testare, ponderile w_{TKi} au fost determinate folosind încărcările medii din rezervoarele de stocare pe o perioadă de 28 de zile. Pentru fiecare dintre rezervoare, încărcările medii (fără componenta meteorologică) au fost calculate și convertite în variabile ASM2d [25]. Mai departe, aceste variabile au fost utilizate pentru a calcula un indice de calitate QI_{TKi} pentru fiecare rezervor de stocare în același mod în care EQI este calculat în BSM [24]. Acești indici de calitate măsuși în $kg - unități poluante/zi$ sunt împărțiți în continuare la debitul mediu, rezultând indici de calitate măsuși în $kg - unități poluante/m^3$. Indicii de calitate rezultați au fost scalați în intervalul $[1 w_{max}]$, rezultând ponderile w_{TKi} .

Considerând $T_S = 1 h$ și $n_T = 6$ ($T_H = 6 h$), 3 teste au fost efectuate pentru 3 valori distincte ale lui w_{max} , fiecare din ele fiind rulat de 20 de ori. Rezultatele au arătat că ponderarea deversărilor rezervoarelor duce la mici îmbunătățiri ale reducerii medii a V_{ovf} și la îmbunătățirea substanțială (10 %) a reducerii medii a OQI comparativ cu primul caz. Cea mai bună reducere a V_{ovf} are loc pentru $w_{max} = 2$, în timp ce cea mai bună reducere a OQI are loc pentru $w_{max} = 3$.

Cazul 3

Al treilea caz are în vedere un termen de penalizare legat de nivelul apelor uzate din rezervoarele de stocare la sfârșitul orizontului de prognoză, implementat în două variante, așa cum este prezentat în subsecțiunea 3.2.1.4. De data aceasta, termenul de penalizare nu a condus la nicio îmbunătățire suplimentară a reducerii nici a V_{ovf} , nici a OQI . Mai mult, termenul de penalizare doar a crescut efortul de calcul al algoritmului PSO deoarece funcția de cost nu va fi niciodată 0, această condiție de oprire a algoritmului de optimizare nefiind îndeplinită niciodată).

Efortul Computațional

Un aspect esențial în implementarea algoritmilor MPC este timpul de integrare a modelului. Rezolvarea problemei de optimizare într-un singur pas MPC este crucială. Mai mult, o integrare mai rapidă sporește adaptabilitatea parametrizării algoritmului MPC, ceea ce ar putea duce la performanțe îmbunătățite.

Astfel, există trei modalități potențiale de reducere a efortului de calcul:

1. Utilizarea unui model simplificat – un subiect care a fost explorat în subcapitolul 2.2.
2. Utilizarea calculului paralel pentru a integra modelul.
3. Utilizarea unei mașini de calcul mai puternice pentru a integra modelul.

Pentru a analiza scăderea timpului de integrare atunci la utilizarea unei mașini mai puternice, au fost efectuate experimente pe patru mașini cu specificații diferite. Algoritmul de optimizare a fost executat pentru un singur orizont de predicție ($T_S = 1 h$ și $T_H = 6$) în două scenarii – cu și fără calcul paralel – pe fiecare mașină. Au fost înregistrați timpii de optimizare.

Niciuna dintre mașinile de calcul nu a arătat o reducere a timpului de optimizare atunci când a folosit calculul paralel, din cauza întârzierilor asociate cu încărcarea și curățarea firelor de execuție. În orice caz, în scenariile fără calcul paralel, timpul de optimizare depinde de capacitățile mașinii, obținându-se valori între 6 și 32 de minute, fiind suficiente pentru un pas MPC. Optarea pentru un computer mai puternic duce la o reducere substanțială a timpului de optimizare. De exemplu, cel mai performant PC a atins un timp total de optimizare de 6 minute, însemnând 3,479242 secunde per iterație a algoritmului PSO și doar 173 de milisecunde pentru fiecare evaluare a funcției de cost.

În mod clar, utilizarea unui computer performant pentru MPC furnizează un potențial de reducere semnificativă a timpului de optimizare, permițând perspective de îmbunătățire a performanței MPC. Aceste îmbunătățiri pot deschide calea pentru îmbunătățiri suplimentare ale performanței structurii de control, valorificând avantajele unei configurații de calcul puternice.

3.3. Controlul optimal al stațiilor de tratare a apelor uzate

Scopul principal al dezvoltării unor strategii de control optimal pentru WWTP este reducerea impactului asupra mediului prin optimizarea eficienței de tratare, păstrând în același timp un cost scăzut. Acest lucru se poate realiza prin manipularea unor valori de control din procesul de tratare. Acest capitol va prezenta trei abordări cu privire la controlul optimal al WWTP: o strategie MPC care utilizează cele două modele NN prezentate în capitolul anterior (vezi secțiunea 2.3.1), o strategie de control optimal bazată pe tehnici fuzzy și o strategie de control la referințe optimale.

3.3.1. Model Predictive Control utilizând model neuronal

Deoarece scopul principal al dezvoltării strategiilor de control optimal pentru WWTP este reducerea impactului asupra mediului prin optimizarea eficienței de tratare păstrând în același timp un cost de exploatare scăzut, pentru sistemul de tratare prezentat în Figura 2.2 optimizarea eficienței acestuia poate fi realizată prin controlarea ratei de aerare (W) pentru a minimiza concentrația substratului (S) în efluent. Acest lucru se va realiza prin utilizarea unei strategii MPC, luând în considerare următoarele componente:

1. modelul dinamic al sistemului – cele două modele NN descrise în secțiunea 2.3.1, rezultând două variante de MPC.
2. o funcție de cost definită pe orizontul de predicție, ținând cont atât de eficiența, cât și de costul tratamentului:

$$J = \int_t^{t+T_H} (\alpha \cdot W(\tau)^2 + (1 - \alpha) \cdot \hat{S}(\tau)^2) d\tau \quad (3.5)$$

unde α este o pondere care stabilește importanța fiecărei componente..

3. un algoritm de optimizare – *fmincon* [101].

Figura 3.3 prezintă structura strategiei MPC implicată în obținerea următoarelor rezultate [83]. Unele stări sunt scrise în culoarea gri, ceea ce înseamnă că sunt disponibile numai pentru prima versiune a modelului NN. Modelul matematic al stației descris în [82] a fost folosit ca proces care trebuie controlat.

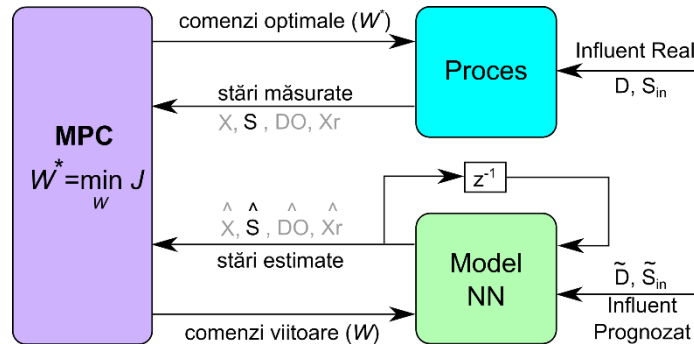


Figura 3.3 – Strategia MPC

Rezultatele obținute au fost comparate cu un caz de bază ($J_{base}^* = 5549862$).

3.3.1.1. Influentul generat

D și S_{in} au fost generate pentru un orizont de timp de 609 zile pornind de la variabilele din influentul BSM2 [50] scalate pentru a îndeplini specificațiile instalației. Mai specific, D este invers proporțional cu debitul influentului BSM2, în timp ce S_{in} este direct proporțional cu substratul ușor biodegradabil (S_S) al influentului BSM2.

3.3.1.2. Parametrii algoritmului Model Predictive Control

Cei doi parametri ai algoritmului, și anume pasul (T_S) și orizontul de predicție ($T_H = n_T \cdot T_S$), ar trebui selectați cu atenție pentru a asigura performanța optimă. Astfel, înainte de a obține rezultate pe întregul orizont de timp de 609 zile, este necesar să se găsească cele mai bune valori pentru cei doi parametri MPC. În acest scop, se propune următoarea procedură [83]:

1. MPC este rulat de mai multe ori pentru primele 30 de zile ale influentului luând în considerare toate combinațiile posibile de T_S și n_T cu $T_S \in \{0.5, \overline{1 \dots 6}\}$ și $n_T \in \{\overline{1 \dots 24}\}$.
2. Pentru fiecare dintre rezultatele simulării vor fi salvați următorii doi indicatori:
 - J_{30} – valoarea funcției de cost calculată pentru întregul orizont de 30 de zile.
 - C_c – costul computațional, fiind egal cu numărul total de inferențe ale modelului NN.
3. Luând în considerare un factor $w_j \in [0, 1]$ cele mai bune valori ale celor doi parametri MPC (T_S^* și n_T^*) pot fi determinate ca:

$$(T_S^*, n_T^*) = \min_{(T_S, n_T)} w_j \cdot J_{30} + (1 - w_j) \cdot C_c \quad (3.6)$$

Pentru obținerea următoarelor rezultate s-a luat în considerare un factor $w_j = 0.99$.

3.3.1.3. Rezultate obținute utilizând prima versiune de NN

Acest set de rezultate a fost obținut utilizând prima versiune a modelului NN descris în secțiunea 2.3.1 ca model de proces în structura de control MPC descrisă în Figura 3.3. Cele mai bune valori ale parametrilor MPC au fost determinate a fi $T_S^* = 3 h$ și $n_T^* = 3$. Algoritmul a fost rulat luând în considerare întregul orizont de timp de 609 zile. Calculând valoarea funcției de cost pe întreaga perioadă, s-a obținut $J_{v1}^* = 7106459$. Având în vedere că această valoare este cu 28% mai mare decât valoarea obținută în cazul de bază $J_{base}^* = 5549862$, structura de control implementată nu își dovedește fiabilitatea la utilizarea primei versiuni a modelului NN. O explicație pentru obținerea de rezultate mai proaste în acest caz decât în cazul de bază ar putea fi aceea că spațiul funcției de cost are mai multe minime locale și algoritmul de optimizare implicat în structura de control MPC tinde să se blocheze într-un astfel de minim.

3.3.1.4. Rezultate obținute utilizând a doua versiune de NN

Acest set de rezultate a fost obținut utilizând cea de-a doua versiune a modelului NN descris în secțiunea 2.3.1 ca model de proces în structura de control MPC descrisă în Figura 3.3. Cele mai bune valori ale parametrilor MPC au fost determinate a fi $T_S^* = 6 h$ și $n_T^* = 2$. Algoritmul a fost rulat luând în considerare întregul orizont de timp de 609 zile. Calculând valoarea funcției de cost pe întreaga perioadă, a fost obținut $J_{v2}^* = 3735581$. Având în vedere că această valoare este cu 32% mai mică decât valoarea obținută în cazul de bază $J_{base}^* = 5549862$, structura de control implementată își dovedește fiabilitatea la utilizarea celei de-a doua versiuni a modelului NN.

3.3.2. Strategie de control optimal bazată pe tehnici fuzzy

Această secțiune descrie o extensie a strategiei de control existente a WWTP din Galați, oraș din România, având aproximativ 250.000 de locuitori, strategie de control care este prezentată în [102]. Extensia acestei strategii are în vedere, pe lângă punctul optim de funcționare referitor la referințele concentrației de oxigen dizolvat în bioreactoarele aerate, aplicarea unei metodologii simple de calcul a valorilor optime pentru debitul de recirculare externă pe baza regimului pluviometric utilizând tehnici fuzzy [103]. Rezultatele au fost obținute în simulare, utilizând un model al WWTP dezvoltat în SIMBA, care este similar cu modelul BSM2 [102]. Figura 3.4 prezintă, cu culoare roșie, schema de control propusă, blocul fuzzy fiind proiectat pentru a determina debitul de recirculare externă prin recunoașterea regimului pluviometric.

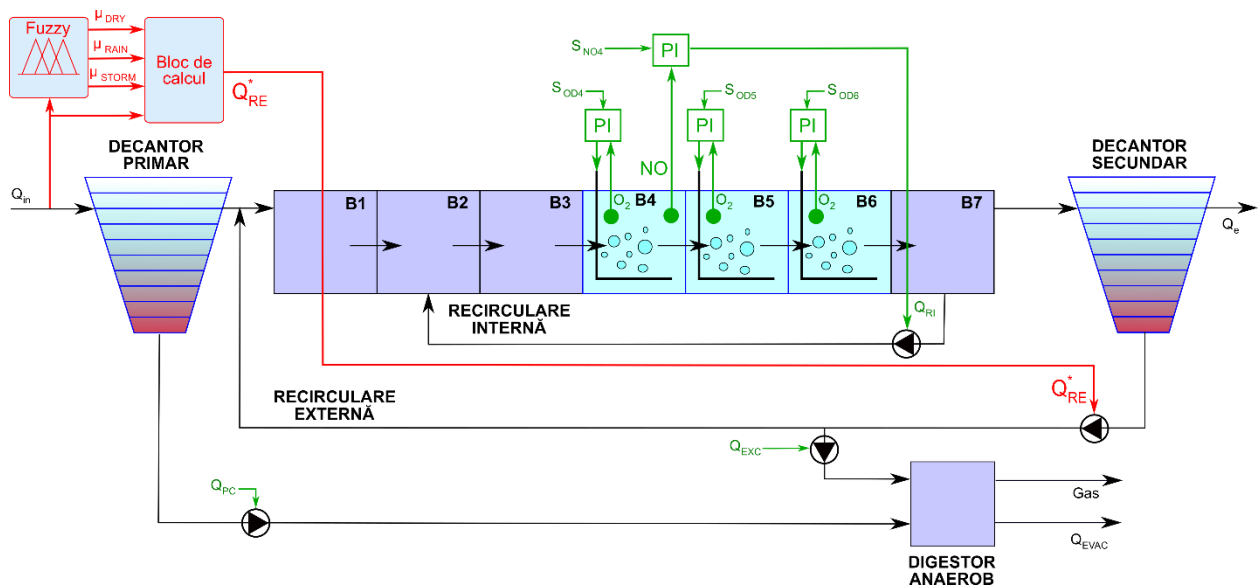


Figura 3.4 – Schema simplificată a WWTP și strategia de control
liniile verzi indică strategia de control existentă, în timp ce liniile roșii indică extinderea propusă

Eficiența WWTP este definită printr-un indicator de performanță agregat:

$$J = 0.5 \cdot EQI + OCI + 100 \cdot J_3 \quad (3.7)$$

cu J_3 fiind un indice de depășiri calculat ca:

$$J_3 = Ex [N_{tot} + NH_4 + TSS + COD + BOD_5] \quad (3.8)$$

unde Ex reprezintă timpul procentual în care efluentul stației de tratare depășește limitele legale pentru: N_{tot} – azot total, NH_4 – amoniu, TSS , COD and BOD_5 .

În scopuri de simulare, a fost generat influent pentru WWTP pe un interval de timp de 210 de zile pe baza scenariului de influent BSM2 [50] scalat pentru a îndeplini specificațiile instalației și combinând trei regimuri de funcționare ale stației de tratare: *SECETĂ*, *PLOAIE* și *FURTUNĂ*.

Având în vedere dependența debitului de recirculare externă de debitul influentului sub forma $Q_{RE,i} = k_i \cdot Q_{in}$, pentru fiecare dintre regimurile pluviometrice $i \in \{SECETĂ, PLOAIE, FURTUNĂ\}$, calcularea valorii optime a debitului de recirculare externă se realizează prin găsirea valorii optime a lui k_i .

Pentru obținerea rezultatelor în fiecare regim i , k_i a fost variat între 0,6 și 1,4 și s-au calculat indicatorii EQI , OCI , J_3 (ecuația (3.8)) și J (ecuația (3.7)). Valoarea lui k_i care a furnizat valoarea minimă a lui J_i^* a fost selectată pentru calcularea debitului extern de recirculare în timpul regimului.

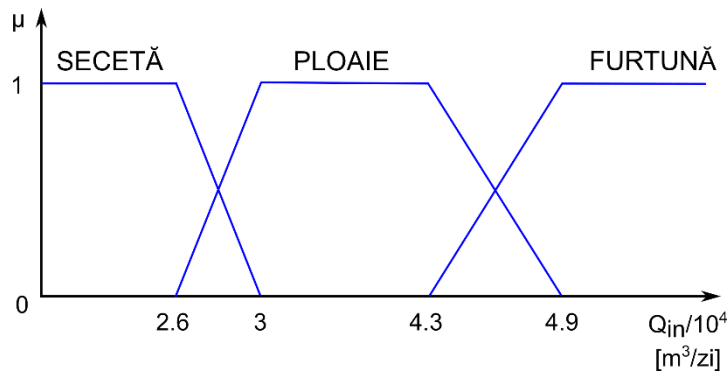


Figura 3.5 – Funcțiile de apartenență ale lui Q_{in} la regimurile pluviometrice

Cu toate acestea, în realitate, trecerile între regimurile pluviometrice nu sunt bruște, ci treptate. Astfel, este important, într-o tranziție între două regimuri, să se ia în considerare valorile optime ale ambelor regimuri ponderate cu unele grade de apartenență la regimuri. Determinarea unui grad de apartenență la regimuri se poate face folosind tehnici fuzzy. Astfel, a fost implementat un bloc fuzzy descris de funcțiile de apartenență prezentate în Figura 3.5. Considerând μ_i cu $i \in \{SECETĂ, PLOAIE, FURTUNĂ\}$ gradul de apartenență al lui Q_{in} la regimul pluviometric i , valoarea optimală a debitului de recirculare externă poate fi calculată ca:

$$Q_{RE}^* = Q_{in} \cdot \sum_i \mu_i \cdot k_i^* \quad (3.9)$$

Tabelul 3.4 prezintă the valorile indicatorului de performanță obținute pentru toate cele trei regimuri (cu valoarea optimală corespunzătoare a lui k), împreună cu valoarea obținută în regimul agregat. După cum se observă, cele mai bune valori ale indicatorului de performanță se obțin în regimul SECETĂ.

Tabelul 3.4 – Rezultate obținute în fiecare regim și în regimul agregat

Regim	SECETĂ	PLOAIE	FURTUNĂ	Regim Agregat
k	0.8	1	1.2	$\sum_i \mu_i \cdot k_i^*$
J	5618	7390	7384	6886

3.3.3. Strategie de control la referințe optimale

Această subsecțiune prezintă o strategie de control la referințe optimale [104], o extensie a strategiei de control optimal bazat pe tehnici fuzzy prezentată în secțiunea anterioară. Mai specific, în această strategie, pentru fiecare regim pluviometric $i \in \{SECETĂ, PLOAIE, FURTUNĂ\}$, algoritmul de optimizare va căuta valorile optime ale următoarelor referințe:

- $S_{ODj,i}^*$ – oxigen dizolvat în bioreactorul j , $j \in \{4, 5, 6\}$
- $S_{NO4,i}^*$ – concentrația de nitrați
- $Q_{RE,i}^*$ – debit de recirculare extern
- $Q_{PC,i}^*$ – rata de extragere de nămol din decantorul primar
- $Q_{EXC,i}^*$ – debitul nămolului în exces din decantorul secundar

Valorile optimale obținute vor fi utilizate pentru regimul de funcționare curent al WWTP, sau, în cazul tranziției de regim, se va utiliza un bloc fuzzy (prezentat în Figura 3.5) pentru a ține cont de gradul de apartenență la regimurile de funcționare. Pentru fiecare regim pluviometric $i \in \{SECETĂ, PLOAIE, FURTUNĂ\}$, se va calcula următorul vector de referințe optimale:

$$V_i^* = [S_{OD4,i}^* \quad S_{OD5,i}^* \quad S_{OD6,i}^* \quad S_{NO4,i}^* \quad k_{RE,i}^* \quad Q_{PC,i}^* \quad Q_{EXT,i}^*] \quad (3.10)$$

Astfel încât să se minimizeze indicatorul de performanță agregat (a se vedea ecuația (3.7)). Pentru aceasta este implicat un algoritm GA. Algoritmul de optimizare a fost rulat pentru fiecare dintre regimurile pluviometrice, utilizând de fiecare dată scenariul de influent corespunzător. Pentru trecerea între regimurile pluviometrice s-a folosit blocul fuzzy prezentat în secțiunea anterioară. Considerând μ_i cu $i \in \{SECETĂ, PLOAIE, FURTUNĂ\}$ gradul de apartenență al lui Q_{in} la regimul pluviometric i , vectorul de referințe optimale va fi dat de:

$$V^*[j] = \sum_i \mu_i \cdot V_i^*[j] \quad j \in \{1 \dots 7\}, \quad i \in \{SECETĂ, PLOAIE, FURTUNĂ\} \quad (3.11)$$

Tabel 3.5 prezintă valorile indicatorului agregat de performanță obținute pentru toate cele trei regimuri pluviometrice, împreună cu valoarea obținută în regimul agregat..

Tabel 3.5 – Rezultate obținute în fiecare regim și în regimul agregat

Regim	SECETĂ	PLOAIE	FURTUNĂ	Regim Agregat
<i>J</i>	5591	6958	5989	6151

După cum se observă, în comparație cu rezultatele obținute cu strategia de control propusă anterior (a se vedea Tabelul 3.4), se poate concluziona că strategia de control actuală oferă rezultate mai bune în regimul agregat.

3.4. Controlul optimal al sistemelor integrate de ape uzate urbane

Cele două sisteme, SN și WWTP sunt interconectate, iar întrucât efluentul SN reprezintă influentul WWTP, este important să se cunoască efectele strategiilor de control a SN asupra performanțelor de funcționare a WWTP. Un debit mai mare din SN, din cauza strategiilor de control ce evită revărsările, ar putea duce la supraîncărcare WWTP, cu efecte considerabile asupra mediului. Prin urmare, strategiile de control a SN ar trebui să ia în considerare efectele lor asupra eficienței stației de tratare. Astfel, acest subcapitol studiază IUWS descris în subcapitolul 2.4, urmând două direcții de evaluare a impactului pe care exploatarea SN îl are asupra performanțelor WWTP:

- controlul valvei de la ieșirea SN – toate celelalte valve/pompe fiind la 100% [105].
- utilizarea algoritmului de control MPC descris în secțiunea 3.2.2 pentru a minimiza impactul SN asupra mediului [99] și integrarea unei constrângeri privind deschiderea valvei de la ieșirea SN în această strategie.

În ambele cazuri s-a considerat un regulator PI simplu pentru WWTP (strategia A1 definită de BSM [50]). Pentru calcularea DQI cu ecuația (2.3), cele două ponderi implicate au fost considerate egale: $w_{EQI} = w_{OQI} = 0.5$ ceea ce înseamnă că s-a considerat că revărsarea SN este direcționată corespunzător către același receptor natural ca efluentul WWTP.

3.4.1. Controlul valvei de ieșire a rețelei de canalizare

Prima abordare consideră controlul deschiderii valvei de la ieșirea SN ($U_{TK7} \in [0, 1]$), în timp ce toate celelalte valve ale SN sunt deschise 100% și toate pompele SN funcționează la capacitate maximă. Având în vedere influența descrisă în subcapitolul 2.2, au fost efectuate o serie de simulări pentru diferite acțiuni de control al ieșirii SN. Pentru fiecare dintre acestea, indicatorii de performanță descriși la sfârșitul subcapitolului 2.4 au fost calculați și scalați folosind ecuația (2.5) în raport cu valorile obținute în cazul de bază (a se vedea Tabelul 2.2). Au fost făcute mai multe simulări pentru diferite valori constante ale deschiderii valvei de la ieșirea SN. Aceste valori variau de la 5% (0,05) la 100% (1). Rezultatele obținute sunt reprezentate grafic în Figura 3.6.

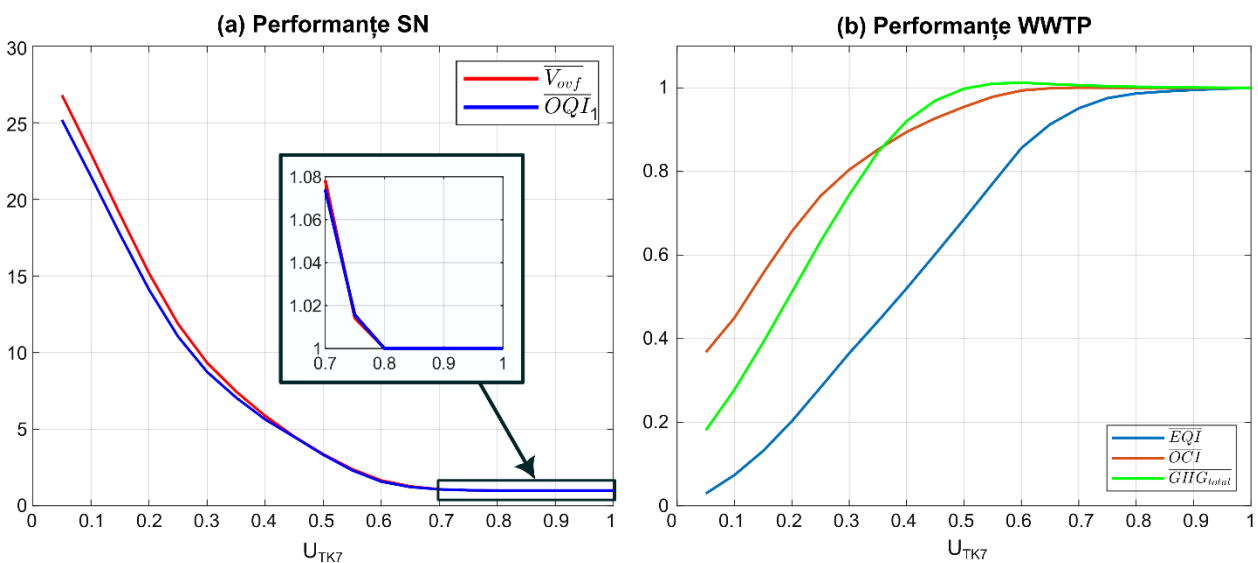


Figura 3.6 – Rezultate obținute cu deschidere constantă a valvei de la ieșirea SN

Deoarece efectele asupra celor două subsisteme sunt opuse, este important să vedem efectele asupra IUWS pentru a verifica dacă există valori ale U_{TK7} pentru care sistemul integrat prezintă îmbunătățiri. Figura 3.7 prezintă valorile indicatorilor de performanță IUWS (DQI – vezi ecuația (2.3), și $I(\lambda)$ – vezi ecuația (2.4)) pentru fiecare valoare constantă a lui U_{TK7} .

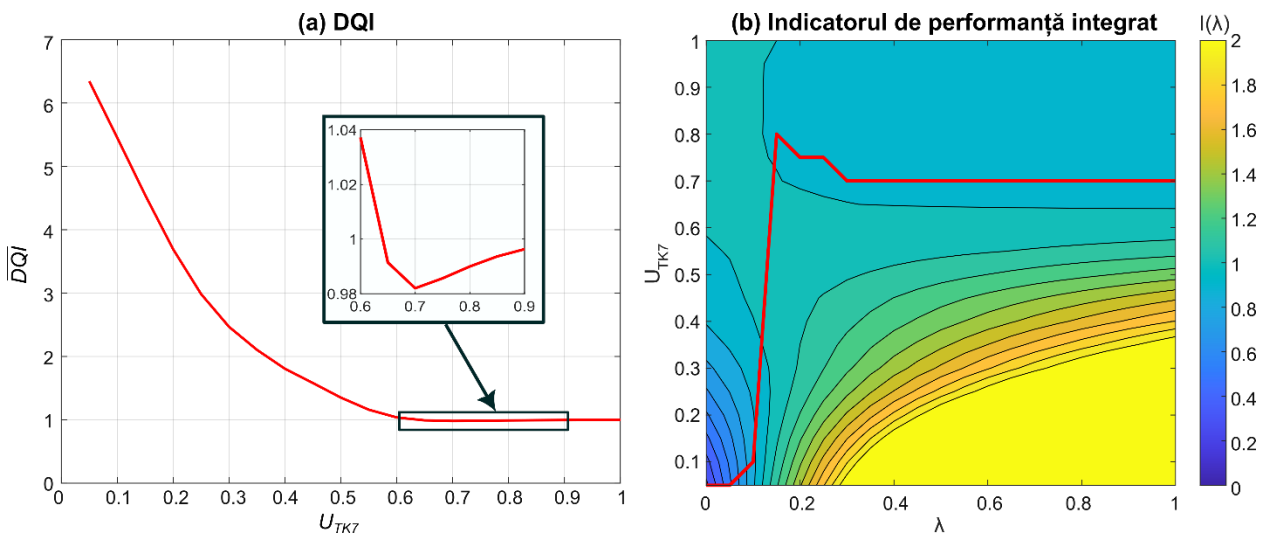


Figura 3.7 – Rezultate obținute cu deschidere constantă a valvei de la ieșirea SN (IUWS)

După cum se observă în Figura 3.7 (a), cea mai mică cantitate de poluanți (DQI – o măsură a totalului poluanților care sunt evacuați în mediu de către IUWS) se obține atunci când $U_{TK7} = 0.7$. Totuși, sunt cu doar 2% mai puțini poluanți decât în cazul de bază. Figura 3.7 (b) prezintă indicatorul de performanță integrat $I(\lambda)$ pentru diferite valori ale U_{TK7} și λ . Linia roșie arată valoarea lui U_{TK7} care asigură minimumul $I(\lambda)$ pentru fiecare λ . În timp ce $\lambda > 0.3$ cea mai bună valoare a lui U_{TK7} rămâne constantă la 0,7, totuși îmbunătățirea generală este sub 2% în comparație cu cazul de bază. Pentru $\lambda < 0.3$, pe măsură ce importanța poluanților evacuați scade și importanța celorlalți doi indicatori crește, cea mai bună valoare a lui U_{TK7} începe să scadă.

În consecință, s-a dovedit că deschiderea valvei de la ieșirea SN are un efect important asupra ambelor subsisteme, totuși efectele sunt în antiteză, ceea ce înseamnă că utilizarea unei valori a lui U_{TK7} care îmbunătățește performanțele unuia dintre subsisteme duce la scăderea performanțelor celălalt. Combinând efectele, cea mai bună îmbunătățire generală a performanței este marginală (sub 2%), prin urmare, este nevoie de mai mult control la nivelul SN.

3.4.2. Model Predictive Control aplicat rețelei de canalizare

Această secțiune consideră că SN este controlat de algoritmul MPC descris în secțiunea 3.2.2 și analizează efectele asupra IUWS. Au fost făcute două abordări: utilizarea algoritmului MPC așa cum este (cazul fără constrângere) și constrângerea algoritmului MPC în ceea ce privește deschiderea valvei de la ieșirea SN (cazul cu constrângere). MPC utilizat în această secțiune ia în considerare o dimensiune a pasului $T_s = 1 h$, o dimensiune a orizontului de predicție de $T_H = 6 h$ și funcția de cost descrisă de ecuația (3.4).

3.4.2.1. Cazul fără constrângere

Tabelul 3.6 prezintă valorile indicatorilor de performanță în cazul fără constrângere.

Tabelul 3.6 – Indicatori de performanță ai IUWS atunci când SN este controlat de MPC fără constrângeri

Indicatorul de performanță	Valoarea scalată
$\overline{V_{ovf}}$	0.4773
$\overline{OQI_1}$	0.4961
\overline{EQI}	0.9643
\overline{OCI}	0.9976
$\overline{GHG_{total}}$	1.0024
\overline{DQI}	0.8457

După cum era de așteptat, controlul SN are efecte pozitive doar asupra performanțelor SN, fără a avea un impact negativ asupra performanțelor WWTP. Aceasta conduce la îmbunătățiri ale IUWS în ceea ce privește scăderea cantității totale de poluanți evacuați de sistemul integrat cu 15,43 % ($\overline{DQI} = 0.8457$).

3.4.2.2. Cazul cu constrângere

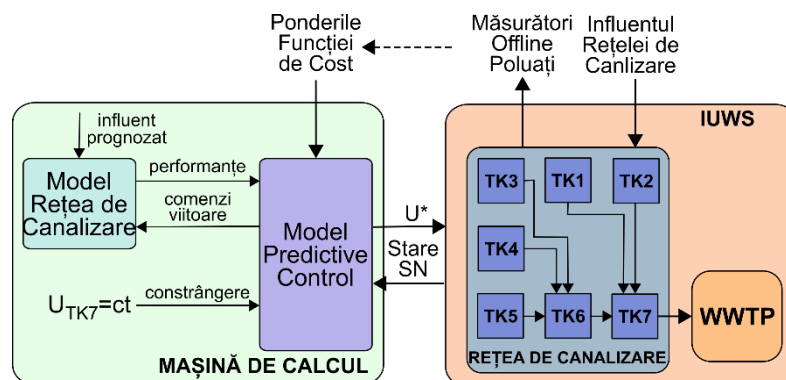


Figura 3.8 – Reprezentarea schematică a structurii de control cu MPC cu constrângeri

Apare următoarea ipoteză: operarea SN utilizând algoritmul MPC, dar constrâns în ceea ce privește deschiderea valvei de la ieșirea SN, ar trebui să conducă la îmbunătățiri suplimentare ale performanțelor IUWS. Algoritmul MPC [99] are în vedere căutarea doar a comenzilor optime ale rezervoarelor care sunt relevante pentru îmbunătățirea performanței SN: U_{TK3} , U_{TK4} și U_{TK5} . Totuși, adăugarea constrângerii duce la necesitatea de a găsi comenzile optime pentru toate ieșirile rezervoarelor. Următoarele rezultate sunt obținute în simulare folosind structura de control prezentată în Figura 3.8. Modelul simplificat al SN (prezentat în subcapitolul 2.2) este utilizat ca model pentru MPC, iar modelul integrat este utilizat ca proces. Rezultatele au fost obținute luând în considerare diferite valori constante pentru U_{TK7} cuprinse între 0,25 și 1,00. Pentru fiecare valoare constantă a lui U_{TK7} , au fost realizate 10 simulări, iar pentru fiecare dintre ele au fost calculați și scalați în raport cu valorile obținute în cazul de bază indicatorii de performanță descriși la finalul subcapitolului 2.4. Statisticile rezultatelor pot fi văzute în Figura 3.9.

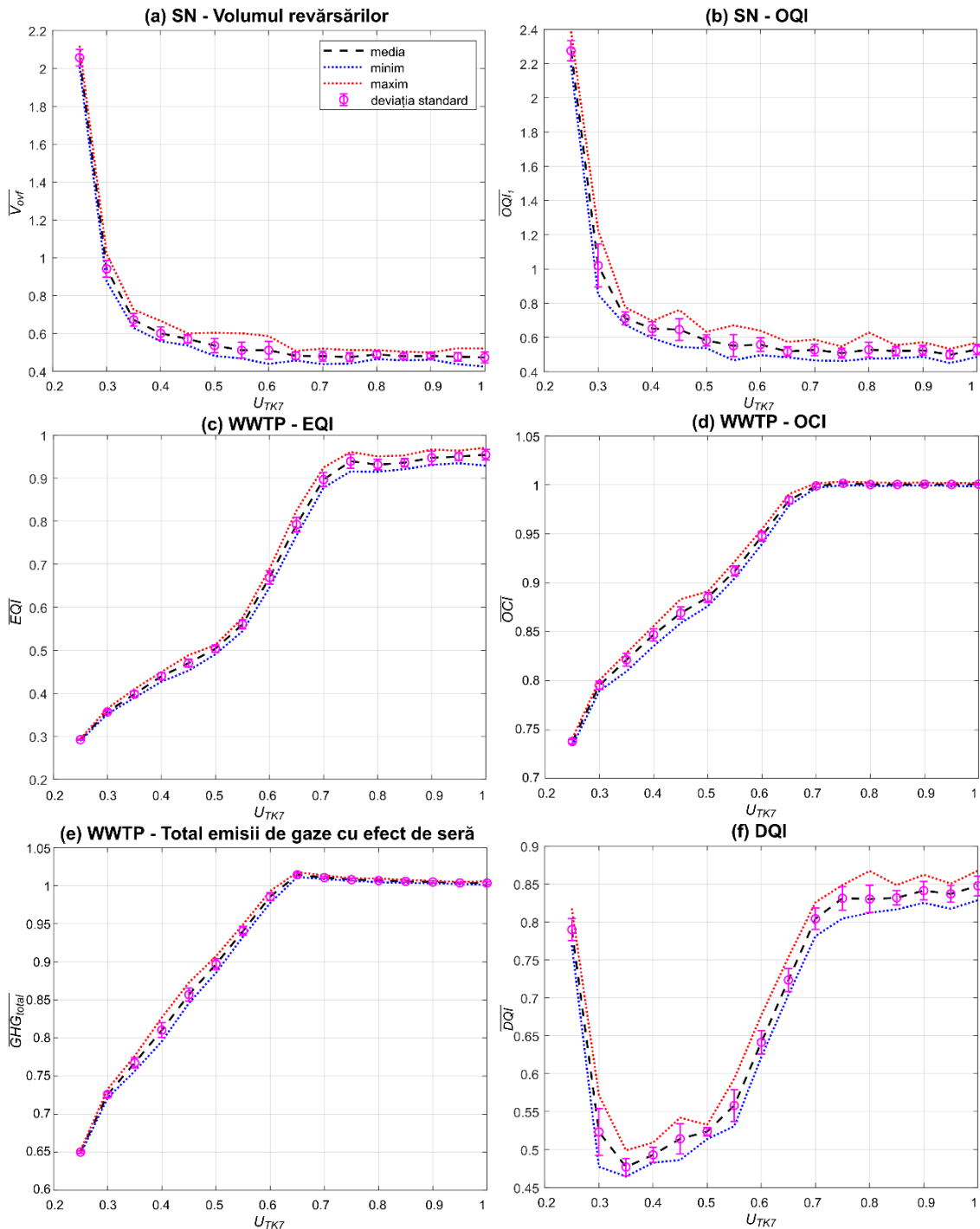


Figura 3.9 – Statisticile valorilor scalate ale indicatorilor de performanță

Se poate observa că o valoare scăzută pentru U_{TK7} duce la îmbunătățiri ale eficienței de funcționare a WWTP, dar la deteriorarea performanțelor SN. Cu toate acestea, U_{TK7} poate fi redus până la 0.65 fără niciun impact negativ asupra SN și până la 0.35 cu doar o mică pierdere a performanțelor SN. Pe de altă parte, pentru $U_{TK7} > 0.7$ nu există modificări ale performanțelor WWTP comparativ cu cazul de bază, în timp ce scăderea constrângerii sub această valoare asigură o scădere consistentă a tuturor indicatorilor de performanță ai WWTP. În consecință, $U_{TK7} \in [0.3, 0.7]$ arată ca un interval care ar putea oferi îmbunătățiri ale performanțelor sistemului integrat. Acest lucru ar putea fi întărit în continuare prin analiza indicatorului de performanță DQI . Performanțe îmbunătățite ale IUWS pot fi observate pentru $U_{TK7} \in [0.3, 0.7]$ cu o valoare minimă de platou de aproximativ 0.5 (reducere de 50% a totalului poluanților evacuați) pentru $U_{TK7} \in [0.3, 0.55]$. Figura 3.10 prezintă valorile medii ale indicatorului integrat $I(\lambda)$ în raport cu U_{TK7} și λ .

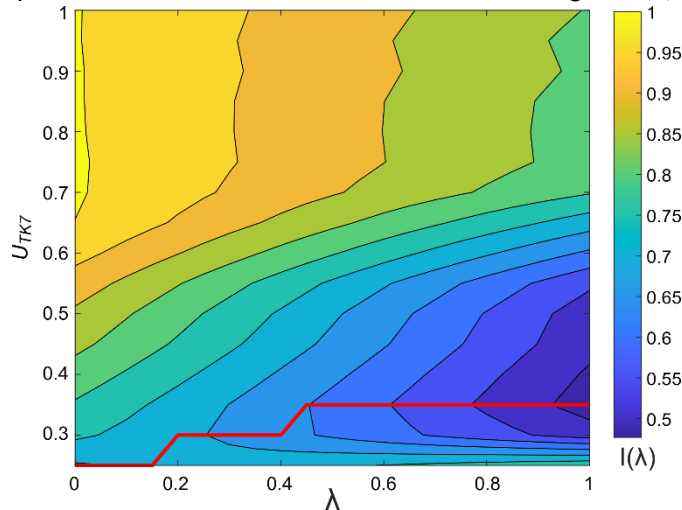


Figura 3.10 – Valorile medii ale indicatorului de performanță integrat în raport cu U_{TK7} și λ

Cea mai bună valoare a lui U_{TK7} rămâne la 0.35 atâta timp cât λ este mai mare sau egal cu 0.4. Dimpotrivă, pe măsură ce λ scade sub 0.4, cea mai bună valoare a lui U_{TK7} scade și ea, deoarece importanța DQI este diminuată față de importanța OCI și GHG_{total} . O modalitate de a obține îmbunătățiri suplimentare este luarea în considerare a unei valori dinamice pentru U_{TK7} care depinde de spațiul liber din rezervorul de la ieșirea SN. Acest lucru se realizează prin utilizarea blocului fuzzy descris în Figura 3.11 pentru a calcula constrângerea MPC legată de U_{TK7} .

Rezultatele obținute prezentate comparativ cu cele obținute cu cazul constrângerii constante (cele mai bune) sunt prezentate în Tabelul 3.7.

Tabelul 3.7 – Indicatori de performanță IUWS atunci când SN este controlat de MPC cu constrângere calculată dinamic

Indicator de performanță	Valori scalate obținute cu constrângere constantă $U_{TK7} = 0.35$				Valori scalate obținute cu constrângere dinamică			
	MIN	MEAN	MAX	STD	MIN	MEAN	MAX	STD
$\overline{V_{ovf}}$	0.65	0.67	0.73	0.0312	0.54	0.59	0.69	0.0408
$\overline{OQI_1}$	0.67	0.71	0.78	0.0357	0.62	0.67	0.80	0.0638
\overline{EQI}	0.39	0.40	0.41	0.0067	0.37	0.38	0.39	0.0050
\overline{OCI}	0.81	0.81	0.83	0.0063	0.80	0.80	0.81	0.0050
$\overline{GHG_{total}}$	0.76	0.77	0.78	0.0066	0.74	0.75	0.76	0.0062
\overline{DQI}	0.46	0.48	0.50	0.0108	0.44	0.45	0.49	0.0173

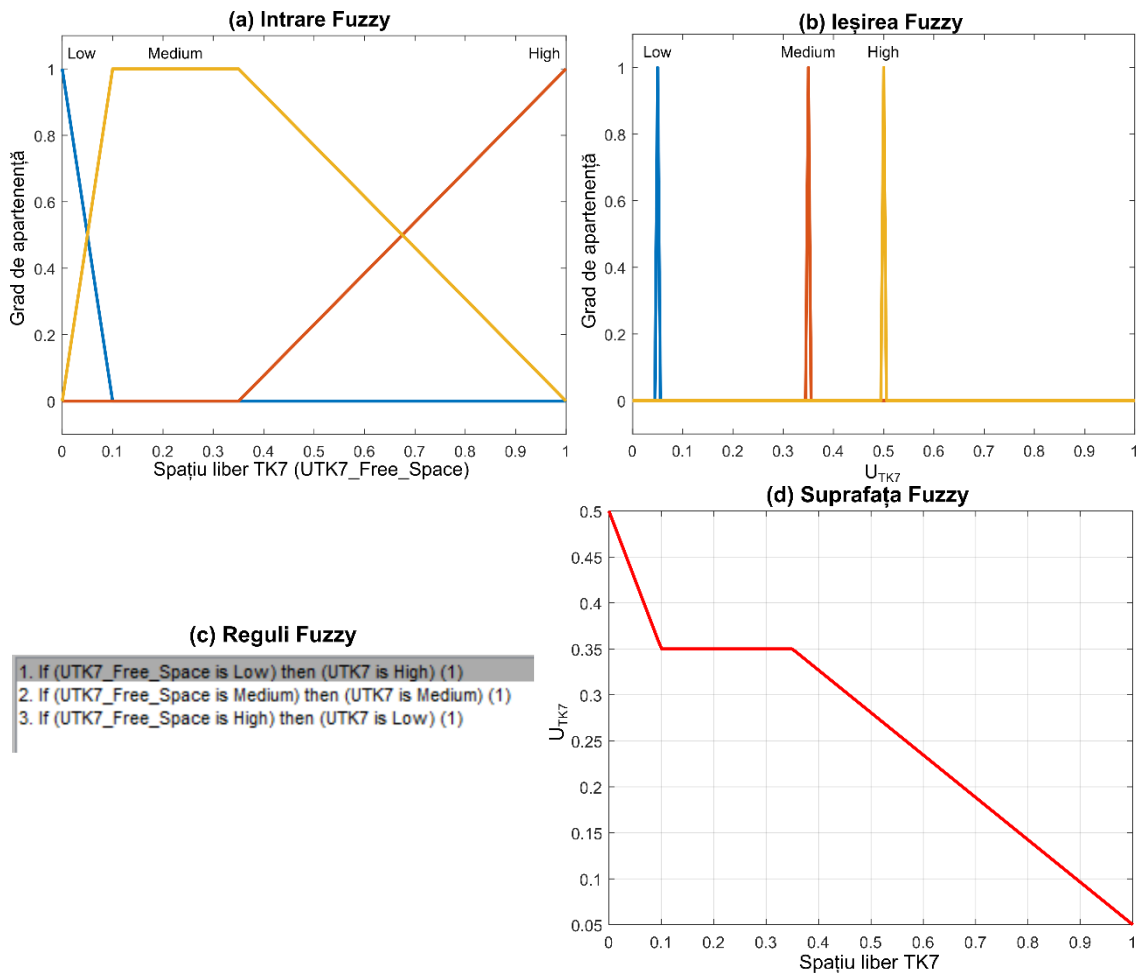


Figura 3.11 – Blocul Fuzzy utilizat pentru calculul constrângerii MPC

Calcularea dinamică a constrângerii conduce la o reducere suplimentară de 8% a apelor uzate revărsate de SN și la o reducere suplimentară de 4% a cantității de poluanți din apele uzate revărsate. Mai mult decât atât, performanța WWTP este în scădere cu 1-2%. Cantitatea totală de poluanți evacuați de IUWS (DQI) se reduce cu încă 3%. Figura următoare arată diferența dintre cele două abordări în ceea ce privește indicatorul de performanță integrat $I(\lambda)$.

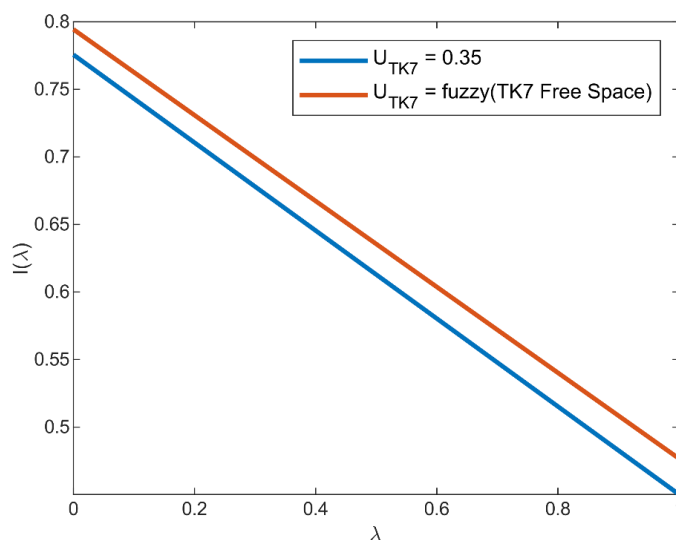


Figura 3.12 – Valoarea medie a lui $I(\lambda)$ pentru diverse valori ale lui λ cu ambele tipuri de constrângeri

Se poate concluziona că noua abordare oferă o îmbunătățire consistentă cu 2-3% pentru toate valorile lui λ .

3.5. Concluziile capitolului

Acest capitol abordează controlul optimal al sistemelor de colectare și tratare a apelor uzate într-o manieră separată, dar și integrată, prezentând dezvoltarea unei serii de strategii de control care fac uz de modelele dezvoltate în capitolul anterior. În primul rând, sunt dezvoltate strategii de control optimal pentru SN descris în subcapitolul 2.2 urmând două abordări: control optimal offline și online.

Dezvoltarea controlului optimal offline SN a urmat pașii:

1. Au fost definite și testate 5 strategii control optimal pentru minimizarea cantității de apă uzată revărsată, dar și a cantității de poluanți din respectiva apă uzată folosind GA, iar rezultatele au fost comparate. Rezultatele obținute au arătat că toate strategiile de control optimal conduc la îmbunătățiri semnificative ale celor doi indicatori de performanță, Strategia #3 oferind cele mai bune rezultate.
2. Următorul pas a urmărit înțelegerea corelațiilor dintre cei doi indicatori pentru a avea cea mai potrivită funcție de cost pentru controlul optimal al SN. Astfel, procedura de optimizare a fost rulată din nou într-o abordare MOO. Au fost testate două metode de optimizare, ambele fiind bazate pe un GA elitist controlat: a) MOO și b) MOO în doi pași. În timp ce rezultatele obținute cu a doua abordare au fost similare cu cele obținute în cazul SOO, prima abordare a oferit rezultate mai proaste, sugerând că minimizarea volumului revărsărilor într-o abordare SOO este cea mai bună soluție.
3. Al treilea pas se referă la alegerea celui mai bun algoritm de optimizare. Au fost testați 4 algoritmi: GA, PSO, și generarea aleatorie a soluției. A rezultat că algoritmi evolutivi (GA și PSO) oferă cele mai bune rezultate (reducerea semnificativă a ambelor criterii de performanță față de cazul „fără control”), cei furnizați de PSO fiind puțin mai buni.
4. Ultimul pas al controlului optimal offline integrează toate constatările din pașii anteriori într-un algoritm de tip fereastră alunecătoare. Sunt realizate îmbunătățiri considerând că la fiecare fereastră de timp de 1 zi, pe lângă minimizarea V_{ovf} , este important ca SN să rămână într-o stare care ar putea fi utilă pentru ferestrele de timp viitoare. Acest lucru s-a realizat prin adăugarea unui termen de penalizare în funcția de cost. Rezultatele statistice au dovedit fiabilitatea algoritmului, arătând o reducere medie de aproximativ 60% pentru ambii indicatori de performanță..

Pentru controlul optimal online al SN, s-a considerat utilizarea unei abordări MPC. Pentru rezolvarea problemelor legate de timpul de integrare, modelul simplificat descris la sfârșitul subcapitolului 2.2 a fost utilizat ca model pentru MPC. Cu toate acestea, în această abordare, s-a observat că minimizarea V_{ovf} nu oferă întotdeauna valori minime pentru OQI . Rezolvarea acestui lucru a necesitat integrarea informațiilor despre cantitățile de poluanți în funcția de cost. Întrucât modelul simplificat conține doar informații despre debitul de apă uzată, se propune o metodă offline: ponderarea volumelor de revărsare ale rezervoarelor SN cu ponderi care sunt calculate offline pe baza măsurării periodice a concentrațiilor de poluanți. Rezultatele obținute arată o îmbunătățire de aproximativ 55% pentru ambii indicatori de performanță.

În ceea ce privește controlul optimal al WWTP s-au făcut 3 abordări. Prima abordare este o strategie de control MPC care folosește cele două modele NN dezvoltate în secțiunea 2.3.1, rezultând două versiuni de MPC. Ambele versiuni de algoritm au fost testate în simulare luând în considerare un influent bazat pe scenariul de influent BSM2. Rezultatele obținute au fost comparate cu un caz de bază (rata de aerare menținută la o valoare constantă). Prima versiune a algoritmului MPC (cea care utilizează prima versiune a modelului NN) oferă rezultate mai proaste decât cazul de bază. Pe de altă parte, versiunea a 2-a a algoritmului MPC (cea care utilizează versiunea a 2-a a modelului NN) oferă rezultate mai bune decât cazul de bază. Acest

lucru demonstrează fiabilitatea algoritmului de control propus. Cea de-a doua abordare are în vedere extinderea unei strategii de control deja existente dezvoltate pentru WWTP din Galați, România. Extinderea constă în aplicarea unei metodologii simple pentru calcularea valorilor optime pentru debitul de recirculare externă pe baza regimului pluviometric folosind tehnici fuzzy. Valorile optime ale ratei de recirculare externă se calculează separat pentru fiecare regim pluviometric, apoi sunt agregate într-o singură valoare folosind un bloc fuzzy care stabilește gradul de apartenență al influentului stației la unul din cele trei regimuri: secetă, ploaie și furtună. Rezultatele dovedesc îmbunătățirile aduse de strategia propusă. Ultima abordare extinde această strategie de control optimal astfel încât procedura să fie făcută pentru mai multe referințe din cadrul structurii de control a WWTP.

În cele din urmă, IUWS este studiat. Mai specific, s-a arătat modul în care performanțele sistemelor integrate pot fi îmbunătățite prin controlul SN. Acest lucru se realizează urmând două direcții de evaluare a impactului pe care exploatarea SN îl are asupra performanțelor stației de tratare. Prima direcție are în vedere controlul numai a valvei de la ieșirea SN, fără a lua în considerare nicio altă strategie de control pentru SN și arată că deschiderea valvei de la ieșirea SN are un efect important asupra ambelor subsisteme, însă efectele sunt opuse, ceea ce înseamnă că folosind o valoare a deschiderea valvei care îmbunătățește performanțele unuia dintre subsisteme duce la scăderea performanțelor celuilalt. Combinând efectele, cea mai bună îmbunătățire generală a performanței este marginală (sub 2%), prin urmare, este nevoie de mai mult control la nivelul SN. A doua direcție consideră utilizarea algoritmului de control MPC descris în secțiunea 3.2.2 pentru a minimiza impactul SN asupra mediului. Primul set de rezultate consideră MPC așa cum este și demonstrează că este posibil să se opereze SN fără a avea un impact negativ asupra WWTP. Al doilea set de rezultate ia în considerare o versiune modificată a MPC prin constrângerea acesteia în ceea ce privește deschiderea valvei de la ieșirea SN. S-a dovedit că pentru anumite valori ale constrângerii, pierderile de performanță ale SN nu sunt atât de dramatice, în timp ce câștigurile de performanță ale WWTP sunt majore. Combinând acest lucru, a rezultat o reducere cu 55% a totalului poluanților evacuați de sistemul integrat. Mai mult, o mică îmbunătățire suplimentară poate fi obținută prin calculul dinamic al constrângerii folosind tehnici fuzzy.

În concluzie, acest capitol a prezentat o serie de strategii de control pentru SN și WWTP, dar și o analiză privind îmbunătățirea performanțelor IUWS prin aplicarea unei strategii de control la nivelul SN.

Capitolul 4. Concluzii finale și direcții viitoare

Gestionarea apelor uzate este un subiect important în societatea noastră, deoarece apa este o resursă vitală pentru întreaga viață de pe Pământ. Poluarea apei poate avea consecințe grave asupra sănătății umane, mediului și economiei. Mai mult, în contextul geopolitic actual, apa joacă un rol crucial ca factor de stabilizare politică. Accesul la apă curată și gestionarea adecvată a resurselor de apă sunt esențiale pentru menținerea păcii și stabilității în multe regiuni ale lumii.

Astfel, această teză de doctorat a explorat domeniul modelării și controlului optimal al sistemelor de colectare și tratare a apelor uzate, prin dezvoltarea unui model pentru un SN – versiune completă și simplificată –, diverse modele WWTP folosind tehnici de inteligență artificială și două modele IUWS. Aceste modele au fost utilizate în continuare în dezvoltarea diferitelor strategii de control optimal pentru ambele subsisteme. Pentru SN, au fost dezvoltate și testate o serie de strategii de control optimal folosind diverși algoritmi de optimizare și abordări offline/online. Pentru stația de tratare, au fost implementate o serie de strategii de control optimal, de la MPC la strategii de bazate pe logica fuzzy. În final, au fost studiate efectele pe care controlul SN le are asupra WWTP și asupra IUWS în ansamblu. Din toate aceste aspecte studiate se pot evidenția o serie de concluzii importante:

- Există loc pentru o mulțime de cercetări științifice care ar putea contribui la reducerea impactului asupra mediului a apelor uzate, luând în considerare întregul IUWS și problemele mondiale actuale: calitatea apei, încălzirea globală, emisii de GHG etc.
- Testarea modelului SN implementat în subcapitolul 2.2 a arătat că există combinații de comenzi la ieșirile rezervoarelor de stocare care ar putea oferi o performanță mai bună a SN, rezultând necesitatea unui control optimal al SN.
- Una dintre principalele provocări legate de modelele WWTP este reprezentată de complexitatea lor ridicată, ceea ce duce la un timp mare de integrare numerică. Acest lucru poate fi rezolvat folosind tehnici de învățare automată..
- Deoarece modelele SN și WWTP sunt create folosind instrumente diferite, pentru implementarea modelelor IUWS, modelele trebuie cuplate folosind un bloc de conversie.
- În cazul controlului optimal al SN, algoritmul PSO se dovedește a fi cea mai bună alegere, deoarece, din punct de vedere statistic, oferă cele mai bune rezultate.
- Utilizarea unui model NN al unei WWTP într-o strategie MPC a arătat că dacă modelul este capabil să estimeze corect chiar și mici variații ale dinamicii substratului organic, aceasta crește șansa ca algoritmul de optimizare să se blocheze într-un minim local.
- Este posibilă operarea SN fără a afecta negativ WWTP. Mai mult, prin integrarea unei constrângeri privind deschiderea valvei de la ieșirea SN în algoritmul MPC, s-a obținut o reducere cu 55% a cantității totale de poluanți evacuați de sistemul integrat. O îmbunătățire suplimentară poate fi obținută prin calculul constrângerii folosind fuzzy.

Rezultatele cercetării prezentate în această teză de doctorat demonstrează importanța unei abordări integrate a acestor sisteme, dar și importanța dezvoltării unor strategii de control eficiente și flexibile. Prin strategiile elaborate, această teză contribuie la îmbunătățirea domeniului managementului apelor uzate. Utilizarea unei abordări integrate și a strategiilor avansate poate îmbunătăți performanțele unor astfel de sisteme protejând viața pe Pământ și deschizând calea pentru construirea unui viitor mai sigur și mai durabil.

4.1. Contribuții originale

Subcapitolul 2.1 – Modelarea SN:

1. Proiectarea unui model SN care să fie utilizat pentru testarea strategiilor de control optimal. A fost implementat în două variante: un model calitativ dezvoltat în BSMSewer și un model simplificat.

Subcapitolul 2.2 – Modelarea WWTP:

2. Proiectarea și dezvoltarea a două modele NN pentru estimarea dinamicii unei WWTP.
3. Proiectarea și implementarea unui senzor software bazat pe NN pentru estimarea concentrației de amoniac din efluentul unei WWTP pe baza altor variabile ușor măsurabile.
4. Proiectarea și implementarea unui model NN pentru estimarea variabilelor de calitate a efluentului unei WWTP pe baza aceluiași variabile în influent și a unei variabile de control.

Subcapitolul 2.3 – Modelarea IUWS:

5. Proiectarea și implementarea a două modele IUWS.
6. Definirea unei metodologii de evaluare a performanței controlului IUWS din punct de vedere al performanțelor ambelor subsisteme.

Subcapitolul 3.1 – Controlul optimal al SN:

7. Proiectarea și implementarea unei strategii de control optimal offline pentru SN. Au fost implementate și testate 5 strategii de control optimal. A fost efectuată o analiză privind cantitatea vs. calitatea apei revărsate prin implementarea a două versiuni ale unui algoritm MOO. În al treilea rând, au fost implementați și testați o serie de patru algoritmi de optimizare, arătând că PSO oferă cele mai bune rezultate. Toate constatările au fost compilate într-un algoritm de optimizare bazat pe tehnica ferestrei alunecătoare pentru controlul optimal offline al SN-urilor. Este propusă, implementată și demonstrată o metodă ce lasă SN într-o stare care ar putea fi avantajoasă la sfârșitul fiecărei ferestre de optimizare, ducând la îmbunătățiri suplimentare ale performanțelor SN.
8. Proiectarea și implementarea unei strategii de control optimal online pentru SN bazată pe o abordare MPC. Se propune o metodă de integrare a informațiilor despre cantitatea de poluanți în criteriile de minimizare atunci când modelul simplificat este utilizat în procedura de optimizare..

Subcapitolul 3.2 – Controlul optimal al WWTP:

9. Proiectarea și implementarea unei strategii de control MPC pentru o WWTP. Pentru setarea valorilor hiper-parametrilor algoritmului de control este definită o metodologie.
10. Proiectarea și implementarea unei strategii de control optimal bazată pe tehnici fuzzy și a unei strategii de control la referințe optimale pentru WWTP.

Subcapitolul 3.3 – Controlul optimal al IUWS:

11. Efectuarea unei analize a efectelor pe care le are controlul SN asupra performanțelor WWTP și IUWS.
12. Proiectarea unei metodologii de constrângere a MPC-ului implementat pentru SN pentru a îmbunătăți performanța IUWS. Metodologia a fost îmbunătățită în continuare prin considerare unui mod dinamic de calculare a constrângerii.

4.2. Direcții viitoare de cercetare

Munca prezentată în această teză de doctorat poate fi extinsă în cercetări ulterioare prin:

- Validarea rezultatelor obținute în simulare în medii reale IUWS.
- Extinderea modelului neuronal WWTP prezentat în secțiunea 2.3.1 pentru a capta mai bine dinamica WWTP, dar și pentru a surprinde efectele altor variabile de control decât rata de aerare (cum ar fi ratele de recirculare sau extragere de nămol în exces).

- Extinderea modelului NN care poate estima variabilele de calitate a efluentului WWTP și care a fost prezentat în secțiunea 2.3.3 pentru a capta efectele altor variabile de control.
- Utilizarea modelului NN prezentat în secțiunea 2.3.3 într-o strategie de control bazată pe model.
- Dezvoltarea unui model IUWS simplificat prin combinarea modelului SN simplificat prezentat în subcapitolul 2.2 cu un model NN al unei WWTP. Acest lucru va necesita implementarea unui estimator pentru variabilele de calitate ale efluentului SN. Modelul IUWS simplificat va fi utilizat într-o strategie de control bazată pe model, care este capabilă să minimizeze efectele IUWS asupra mediului.
- Includerea informațiilor despre emisiile de GHG în modelul SN și actualizarea indicatorului de performanță integrat definit în ecuația (2.4) prin includerea informațiilor despre costul operațional și emisiile GHG aferente SN.
- Extinderea MPC-ului utilizat în secțiunea 3.3.1 cu modele NN mai complexe ale WWTP, dar și îmbunătățirea performanței acestuia prin utilizarea unui algoritm de optimizare care are mecanisme de evitare a minimelor locale.
- Îmbunătățirea performanțelor IUWS atunci când SN este controlat de algoritmul MPC constrâns în ceea ce privește deschiderea valvei de la ieșirea SN prin calcularea dinamică a constrângerii bazate nu numai pe starea SN, ci și pe calitatea efluentului WWTP.
- Refacerea experimentele prezentate în subcapitolul 3.4 referitoare la efectele controlului SN asupra performanțelor WWTP și IUWS, luând în considerare diverse strategii de control pentru WWTP. În acest fel, ar putea fi studiate modul în care strategia de control a WWTP accentuează sau diminuează efectele controlului SN asupra performanțelor generale ale WWTP și ale IUWS.

4.3. Diseminarea rezultatelor

Munca prezentată în această teză a fost diseminată într-o serie de articole de jurnal și lucrări de conferință. Articolele de jurnal rezultate, în ordine cronologică, sunt:

1. S. Caraman, L. Luca, **I. Vasiliev**, și M. Barbu, "Optimal-Setpoint-Based Control Strategy of a Wastewater Treatment Process," *Processes*, vol. 8, no. 10, p. 1203, 2020, doi: 10.3390/pr8101203, **Indexat ISI, IF 2.8, Q2**
2. **I. Vasiliev**, L. Luca, M. Barbu, R. Vilanova, și S. Caraman, "Optimal Control Strategy of a Sewer Network," *Water*, vol. 14, no. 7, p. 1062, Mar. 2022, doi: 10.3390/w14071062, **Indexat ISI, IF 3, Q2**
3. **I. Vasiliev**, L. Luca, M. Barbu, R. Vilanova, și S. Caraman, "Sewer Network Multi-Objective Optimization using Genetic Algorithms," *System Theory, Control and Computing Journal*, Jun. 2023, doi: 0.52846/stccj.2023.3.1.49
4. **I. Vasiliev**, L. Luca, M. Barbu, R. Vilanova, și S. Caraman, "Reducing the environmental impact of sewer network overflows using Model Predictive Control strategy," *Water Resources Research*, vol. 60, no. 1, p. e2023WR035448, 2024, doi: 10.1029/2023WR035448, **Indexat ISI, IF 4.6, Q1**
5. **I. Vasiliev**, L. Luca, M. Barbu, R. Vilanova, S. Caraman, și M. Meneses Benitez, "Integrated Urban Wastewater System operation: Performance evaluation and Sewer Network's operation implications," *Water Science and Technology*, 2024, **în curs de revizuire**

Lucrările de conferință rezultate, în ordine cronologică, sunt:

1. L. Luca, A. Pricopie, **I. Vasiliev**, M. Barbu și S. Caraman, "Fuzzy-Optimal Control Strategies for a Wastewater Treatment Plant," *24th International Conference on System Theory, Control and Computing (ICSTCC)*, Sinaia, 2020, doi: 10.1109/ICSTCC50638.2020.9259792, **IEEE, ISI Proceedings**

2. **I. Vasiliev**, L. Luca, M. Barbu, A. Pricopie, și S. Caraman, "Mathematical Model of a Collecting and Wastewater Treatment Integrated System," *25th International Conference on System Theory, Control and Computing (ICSTCC)*, Iași, 2021, doi: 10.1109/ICSTCC52150.2021.9607086, **IEEE, ISI Proceedings**
3. **I. Vasiliev**, L. Luca, M. Barbu, R. Vilanova, și S. Caraman, "Sewer Network Model of a City with a Medium Sized Population," *23rd International Carpathian Control Conference*, Sinaia, 2022, doi: 10.1109/ICCC54292.2022.9805864, **IEEE, ISI Proceedings**
4. **I. Vasiliev**, L. Luca, M. Barbu, R. Vilanova, și S. Caraman, "Multi-objective Optimization of a Sewer Network," *the 10th Edition of the Scientific Conference of the Doctoral Schools from the "Dunărea de Jos" University of Galati*, Galati, Romania, Jun. 2022
5. **I. Vasiliev**, L. Luca, R. Vilanova, și S. Caraman, "Sewer Network Modelling and Control – A Literature Review," in *2022 26th IEEE International Conference on System Theory, Control and Computing (ICSTCC)*, 2022, pp. 58–63. doi: 10.1109/ICSTCC55426.2022.9931870, **IEEE, ISI Proceedings**
6. **I. Vasiliev**, L. Luca, R. Vilanova, și S. Caraman, "Optimal Control of a Sewer Network," in *2022 26th IEEE International Conference on System Theory, Control and Computing (ICSTCC)*, 2022, pp. 58–63. doi: 10.1109/ICSTCC55426.2022.9931810, **IEEE, ISI Proceedings**
7. **I. Vasiliev**, L. Luca, M. Barbu, R. Vilanova, și S. Caraman, "Sliding Window-based Particle Swarm Optimization Algorithm for a Sewer Network," in *21st IFAC European Control Conference*, Jun. 2023, doi: 10.23919/ECC57647.2023.10178171, **IFAC, ISI Proceedings**
8. **I. Vasiliev**, L. Luca, M. Barbu, R. Vilanova, și S. Caraman, "An analysis towards integrated control of wastewater collecting and treatment systems," in *2023 27th International Conference on System Theory, Control and Computing (ICSTCC)*, 2023, pp. 233–238. doi: 10.1109/ICSTCC59206.2023.10308495, **IEEE**
9. A. E. Țîru, **I. Vasiliev**, L. Diaconu, R. Vilanova, D. Voipan, și H. Ratnaweera, "Integration of ANN for Accurate Estimation and Control in Wastewater Treatment," in *2023 IEEE 28th International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)*, Sep. 2023, pp. 1–4. doi: 10.1109/ETFA54631.2023.10275569, **IEEE**
10. **I. Vasiliev**, L. Luca, L. Condrachi, L. Luca, M. Barbu, R. Vilanova, și S. Caraman, "Model Predictive Control of a wastewater treatment process using neural networks," in *2023 IEEE 28th International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)*, Sep. 2023, pp. 1–7. doi: 10.1109/ETFA54631.2023.10275488, **IEEE**
11. D. Voipan, **I. Vasiliev**, L. Condrachi, A.-E. Voipan, și M. Barbu, "Enhancing effluent quality predictions in wastewater treatment with LSTM neural network," in *2024 28th International Conference on System Theory, Control and Computing (ICSTCC)*, 2024, **acceptată**

Pe lângă articolele ce diseminează munca prezentată în această teză, au mai fost publicate două lucrări de conferință în domeniul ingineriei sistemelor::

1. **I. Vasiliev**, L. Frangu, și M. L. Cristea, "Pump Fault Detection Using Autoencoding Neural Network," *23rd International Carpathian Control Conference*, Sinaia, 2022, doi: 10.1109/ICSTCC55426.2022.9931848, **IEEE, ISI Proceedings**
2. **I. Vasiliev**, L. Frangu, M. L. Cristea, și M. Cristian Costea, "Pump Fault Classification based on Autoencoding Convolutional Neural Network Residuum," in *2023 IEEE 28th International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)*, Sep. 2023, pp. 1–7. doi: 10.1109/ETFA54631.2023.10275399, **IEEE**

Bibliografie

- [1] United Nations Department of Economic and Social Affairs, Population Division, *World Population Prospects 2022: Summary of Results*. United Nations, 2022.
- [2] United Nations, *The United Nations World Water Development Report 2023: partnerships and cooperation for water*. UNESCO, 2023.
- [3] United Nations General Assembly, *Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development*. 2015.
- [4] United Nations, *Blueprint for Acceleration: Sustainable Development Goal 6 Synthesis Report on Water and Sanitation*. 2023.
- [5] European Parliament, „Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2000 establishing a framework for Community action in the field of water policy”, *Off. J. L*, vol. 327, dec. 2000.
- [6] X. Flores-Alsina, L. Corominas, L. Snip, și P. A. Vanrolleghem, „Including greenhouse gas emissions during benchmarking of wastewater treatment plant control strategies”, *Water Res.*, vol. 45, nr. 16, pp. 4700–4710, oct. 2011, doi: 10.1016/j.watres.2011.04.040.
- [7] Intergovernmental Panel on Climate Change, *IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. Japan, 2006.
- [8] Intergovernmental Panel on Climate Change, *Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. Japan, 2019.
- [9] United Nations, *The United Nations World Water Development Report 2024: water for prosperity and peace*. UNESCO, 2024.
- [10] „Freshwater crisis”, National Geographic. Data accesării: 15 aprilie 2024. [Online]. Disponibil la: <https://www.nationalgeographic.com/environment/article/freshwater-crisis>
- [11] H. Wang, G. Han, L. Zhang, Y. Qiu, J. Li, și H. Jia, „Integrated and control-oriented simulation tool for optimizing Urban Drainage System operation”, *Water*, vol. 14, nr. 1, Art. nr. 1, ian. 2022, doi: 10.3390/w14010025.
- [12] F. Zakizadeh, A. Moghaddam Nia, A. Salajegheh, L. A. Sañudo-Fontaneda, și N. Alamdari, „Efficient urban runoff quantity and quality modelling using SWMM model and field data in an urban watershed of Tehran Metropolis”, *Sustainability*, vol. 14, nr. 3, Art. nr. 3, ian. 2022, doi: 10.3390/su14031086.
- [13] L. Rossman și M. Simon, „Storm Water Management Model User’s Manual Version 5.2”, U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC, EPA/600/R-22/030, 2022.
- [14] I. Vasiliev, L. Luca, R. Vilanova, și S. Caraman, „Sewer Network modelling and control – A literature review”, în *2022 26th International Conference on System Theory, Control and Computing (ICSTCC)*, oct. 2022, pp. 58–63. doi: 10.1109/ICSTCC55426.2022.9931870.
- [15] B. Joseph-Duran, C. Ocampo-Martinez, și G. Cembrano, „A control-oriented hybrid modelling approach for sewer networks: Barcelona case study”, 2013.
- [16] M. Marinaki și M. Papageorgiou, *Optimal real-time control of sewer networks*. în *Advances in Industrial Control*. London: Springer-Verlag, 2005. doi: 10.1007/b138719.
- [17] V. Mînză și I. Arama, „Nonlinear discrete model for the control of a sewer network”, *Ann. Dunarea Jos Univ. Galati*, vol. 38, dec. 2015.

- [18] C. C. Obropta și J. S. Kardos, „Review of urban stormwater quality models: Deterministic, stochastic, and hybrid approaches”, *JAWRA J. Am. Water Resour. Assoc.*, vol. 43, nr. 6, pp. 1508–1523, 2007, doi: 10.1111/j.1752-1688.2007.00124.x.
- [19] M. J. S. Safari și A. Danandeh Mehr, „Multigene genetic programming for sediment transport modeling in sewers for conditions of non-deposition with a bed deposit”, *Int. J. Sediment Res.*, vol. 33, nr. 3, pp. 262–270, sep. 2018, doi: 10.1016/j.ijsrc.2018.04.007.
- [20] M. Najafzadeh, D. B. Laucelli, și A. Zahiri, „Application of model tree and Evolutionary Polynomial Regression for evaluation of sediment transport in pipes”, *KSCE J. Civ. Eng.*, vol. 21, nr. 5, pp. 1956–1963, 2017, doi: <http://dx.doi.org/10.1007/s12205-016-1784-7>.
- [21] J. Vollertsen, T. Hvitved-Jacobsen, și A. H. Nielsen, „Stochastic modeling of chemical oxygen demand transformations in gravity sewers”, *Water Environ. Res.*, vol. 77, nr. 4, pp. 331–339, aug. 2005, doi: 10.2175/106143005X51914.
- [22] V. Vijayashanthar, J. Qiao, Z. Zhu, P. Entwistle, și G. Yu, „Modeling fecal indicator bacteria in urban waterways using artificial neural networks”, *J. Environ. Eng.*, vol. 144, nr. 6, p. 05018003, iun. 2018, doi: 10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0001377.
- [23] R. Saagi, X. Flores-Alsina, G. Fu, D. Butler, K. V. Gernaey, și U. Jeppsson, „Catchment & sewer network simulation model to benchmark control strategies within urban wastewater systems”, *Environ. Model. Softw.*, vol. 78, pp. 16–30, apr. 2016, doi: 10.1016/j.envsoft.2015.12.013.
- [24] J. Alex *et al.*, „Benchmark Simulation Model no. 1 (BSM1)”, *Rep. IWA Taskgroup Benchmarking Control Strateg. WWTPs*, ian. 2008.
- [25] K. V. Gernaey, X. Flores-Alsina, C. Rosen, L. Benedetti, și U. Jeppsson, „Dynamic influent pollutant disturbance scenario generation using a phenomenological modelling approach”, *Environ. Model. Softw.*, vol. 26, nr. 11, pp. 1255–1267, 2011, doi: 10.1016/j.envsoft.2011.06.001.
- [26] J. Li, K. Sharma, W. Li, și Z. Yuan, „Swift hydraulic models for real-time control applications in sewer networks”, *Water Res.*, vol. 213, p. 118141, 2022, doi: 10.1016/j.watres.2022.118141.
- [27] J. Li, W. Li, X. Chang, K. Sharma, și Z. Yuan, „Real-time predictive control for chemical distribution in sewer networks using improved elephant herding optimization”, *IEEE Trans. Ind. Inform.*, vol. 18, nr. 1, pp. 571–581, 2022, doi: 10.1109/TII.2020.3028429.
- [28] T. R. Rosin, Z. Kapelan, E. Keedwell, și M. Romano, „Near real-time detection of blockages in the proximity of combined sewer overflows using evolutionary ANNs and statistical process control”, *J. Hydroinformatics*, vol. 24, nr. 2, pp. 259–273, 2022, doi: 10.2166/hydro.2022.036.
- [29] M. Mauricio-Iglesias, I. Montero-Castro, A. L. Mollerup, și G. Sin, „A generic methodology for the optimisation of sewer systems using stochastic programming and self-optimizing control”, *J. Environ. Manage.*, vol. 155, pp. 193–203, mai 2015, doi: 10.1016/j.jenvman.2015.03.034.
- [30] V. Minzu, M. Barbu, și C. Nichita, „A Binary Hybrid Topology Particle Swarm Optimization algorithm for sewer network discharge”, în *2015 19th International Conference on System Theory, Control and Computing (ICSTCC)*, 2015, pp. 627–634. doi: 10.1109/ICSTCC.2015.7321363.
- [31] V. Minzu și A. Serbencu, „Control structure for the optimal sewer network discharge”, în *2016 20th International Conference on System Theory, Control and Computing (ICSTCC)*, oct. 2016, pp. 61–66. doi: 10.1109/ICSTCC.2016.7790641.
- [32] M. Barbu, R. Vilanova, și I. Santin, „Fuzzy control applied on a Benchmark Simulation Model for sewer networks”, în *2016 20th International Conference on System Theory, Control and Computing (ICSTCC)*, 2016, pp. 180–185.

- [33] S. R. Mounce *et al.*, „Optimisation of a fuzzy logic-based local real-time control system for mitigation of sewer flooding using genetic algorithms”, *J. Hydroinformatics*, vol. 22, nr. 2, pp. 281–295, dec. 2019, doi: 10.2166/hydro.2019.058.
- [34] M. Mahmoodian, O. Delmont, și G. Schutz, „Pollution-based model predictive control of combined sewer networks, considering uncertainty propagation”, *Int. J. Sustain. Dev. Plan.*, vol. 12, nr. 01, pp. 98–111, ian. 2017, doi: 10.2495/SDP-V12-N1-98-111.
- [35] E. B. Pedersen, H. R. Herbertsson, H. Niemann, N. K. Poulsen, și A. K. V. Falk, „Model Predictive Control of sewer networks”, *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 783, nr. 1, p. 012026, ian. 2017, doi: 10.1088/1742-6596/783/1/012026.
- [36] A. Cembellín, M. Francisco, și P. Vega, „Distributed Model Predictive Control applied to a sewer system”, *Processes*, vol. 8, nr. 12, Art. nr. 12, dec. 2020, doi: 10.3390/pr8121595.
- [37] D. Ochoa, G. Riaño-Briceño, N. Quijano, și C. Ocampo-Martinez, „Control of urban drainage systems: optimal flow control and deep learning in action”, în *2019 American Control Conference (ACC)*, iul. 2019, pp. 4826–4831. doi: 10.23919/ACC.2019.8814958.
- [38] S. Pei, L. Hoang, G. Fu, și D. Butler, „Real-time control of urban drainage systems using neuro-evolution”, *J. Environ. Manage.*, vol. 360, p. 121133, iun. 2024, doi: 10.1016/j.jenvman.2024.121133.
- [39] D. Zhang, N. Martinez, G. Lindholm, și H. Ratnaweera, „Manage sewer in-line storage control using hydraulic model and Recurrent Neural Network”, *Water Resour. Manag.*, vol. 32, nr. 6, pp. 2079–2098, apr. 2018, doi: 10.1007/s11269-018-1919-3.
- [40] D. Zhang, G. Lindholm, și H. Ratnaweera, „Use long short-term memory to enhance Internet of Things for combined sewer overflow monitoring”, *J. Hydrol.*, vol. 556, pp. 409–418, ian. 2018, doi: 10.1016/j.jhydrol.2017.11.018.
- [41] D. Zhang, E. S. Hølland, G. Lindholm, și H. Ratnaweera, „Hydraulic modeling and deep learning based flow forecasting for optimizing inter catchment wastewater transfer”, *J. Hydrol.*, vol. 567, pp. 792–802, dec. 2018, doi: 10.1016/j.jhydrol.2017.11.029.
- [42] *Advances in Wastewater Treatment I*, 1 ed, vol. 1. în Materials Research Foundations, vol. 1. Materials Research Forum LLC, 2021. doi: 10.21741/9781644901144.
- [43] J. Monod, „The growth of bacterial cultures”, *Annu. Rev. Microbiol.*, vol. 3, nr. 1, pp. 371–394, oct. 1949, doi: 10.1146/annurev.mi.03.100149.002103.
- [44] M. C. M. Van Loosdrecht, C. M. Lopez-Vazquez, S. C. F. Meijer, C. M. Hooijmans, și D. Brdjanovic, „Twenty-five years of ASM1: past, present and future of wastewater treatment modelling”, *J. Hydroinformatics*, vol. 17, nr. 5, pp. 697–718, iun. 2015, doi: 10.2166/hydro.2015.006.
- [45] M. Henze, C. Grady, W. Gujer, G. Marais, și T. Matsuo, „Activated Sludge Model 1”, *IAWQ Sci. Tech. Rep.*, vol. 1, 1987.
- [46] W. Gujer, M. Henze, T. Mino, T. Matsuo, M. C. Wentzel, și G. v. R. Marais, „The Activated Sludge Model No. 2: Biological phosphorus removal”, *Water Sci. Technol.*, vol. 31, nr. 2, pp. 1–11, ian. 1995, doi: 10.1016/0273-1223(95)00175-M.
- [47] M. Henze *et al.*, „Activated Sludge Model No.2d, ASM2D”, *Water Sci. Technol.*, vol. 39, nr. 1, pp. 165–182, ian. 1999, doi: 10.2166/wst.1999.0036.
- [48] W. Gujer, M. Henze, T. Mino, și M. van Loosdrecht, „Activated Sludge Model No. 3”, *Water Sci. Technol.*, vol. 39, nr. 1, pp. 183–193, ian. 1999, doi: 10.1016/S0273-1223(98)00785-9.
- [49] C. Rosen, U. Jeppsson, și P. Vanrolleghem, „Towards a common benchmark for long-term process control and monitoring performance evaluation”, *Water Sci. Technol. J. Int. Assoc. Water Pollut. Res.*, vol. 50, pp. 41–9, feb. 2004, doi: 10.2166/wst.2004.0669.
- [50] K. Gernaey, U. Jeppsson, P. Vanrolleghem, și J. B. Copp, *Benchmarking of control strategies for wastewater treatment plants*. în Scientific and Technical Report Series. IWA Publishing, 2014.

- [51] B.-J. Ni, M. Rusalleda, C. Pellicer-Nàcher, și B. F. Smets, „Modeling nitrous oxide production during biological nitrogen removal via nitrification and denitrification: Extensions to the general ASM models”, *Environ. Sci. Technol.*, vol. 45, nr. 18, pp. 7768–7776, sep. 2011, doi: 10.1021/es201489n.
- [52] K. E. Mampaey, B. Beuckels, M. J. Kampschreur, R. Kleerebezem, M. C. M. van Loosdrecht, și E. I. P. Volcke, „Modelling nitrous and nitric oxide emissions by autotrophic ammonia-oxidizing bacteria”, *Environ. Technol.*, vol. 34, nr. 12, pp. 1555–1566, iun. 2013, doi: 10.1080/09593330.2012.758666.
- [53] L. Guo și P. A. Vanrolleghem, „Calibration and validation of an activated sludge model for greenhouse gases no. 1 (ASMG1): prediction of temperature-dependent N₂O emission dynamics”, *Bioprocess Biosyst. Eng.*, vol. 37, nr. 2, pp. 151–163, feb. 2014, doi: 10.1007/s00449-013-0978-3.
- [54] W. Zhang, J. Zhang, și R. Bai, „Direct adaptive neural network control for dissolved oxygen concentration”, în *2018 13th World Congress on Intelligent Control and Automation (WCICA)*, Changsha, China: IEEE, iul. 2018, pp. 1494–1499. doi: 10.1109/WCICA.2018.8630484.
- [55] G. Han, H. Han, și J. Qiao, „A GPRFNN-based control system for wastewater treatment process”, în *2016 35th Chinese Control Conference (CCC)*, Chengdu: IEEE, iul. 2016, pp. 891–896. doi: 10.1109/ChiCC.2016.7553199.
- [56] A. Nair, V.-M. Cristea, P. Ș. Agachi, și M. Brehar, „Model calibration and feed-forward control of the wastewater treatment plant - case study for CLUJ-Napoca WWTP”, *Water Environ. J.*, vol. 32, nr. 2, pp. 164–172, mai 2018, doi: 10.1111/wej.12310.
- [57] W. Zhang și J. Qiao, „Multi-variable direct self-organizing fuzzy neural network control for wastewater treatment process”, *Asian J. Control*, vol. 22, nr. 2, pp. 716–728, mar. 2020, doi: 10.1002/asjc.1919.
- [58] R. Piotrowski, H. Sawicki, și K. Żuk, „Novel hierarchical nonlinear control algorithm to improve dissolved oxygen control in biological WWTP”, *J. Process Control*, vol. 105, pp. 78–87, sep. 2021, doi: 10.1016/j.jprocont.2021.07.009.
- [59] M. Simon-Várhelyi, V. M. Cristea, A. V. Luca, și M. A. Brehar, „Optimization and control of aeration distribution in the WWTP nitrification reactor”, *Rev. Roum. Chim.*, vol. 65, nr. 6, pp. 601–609, 2020, doi: 10.33224/rrch.2020.65.6.11.
- [60] B. Ying-Chun și Q. Jun-Fei, „Heuristic dynamic programming using echo state network for multivariable tracking control of wastewater treatment process: E-HDP controller for multivariable tracking control of WWTP”, *Asian J. Control*, vol. 17, nr. 5, pp. 1654–1666, sep. 2015, doi: 10.1002/asjc.994.
- [61] G. Harja, G. Vlad, și I. Nascu, „MPC advanced control of dissolved oxygen in an activated sludge wastewater treatment plant”, în *2016 IEEE International Conference on Automation, Quality and Testing, Robotics (AQTR)*, Cluj-Napoca, Romania: IEEE, mai 2016, pp. 1–6. doi: 10.1109/AQTR.2016.7501329.
- [62] J. Qiao, G. Han, H. Han, C. Yang, și W. Li, „A hybrid intelligent optimal control system design for wastewater treatment process”, *Inf. Technol. Control*, vol. 46, nr. 3, pp. 382–394, sep. 2017, doi: 10.5755/j01.itc.46.3.16061.
- [63] J. Pang, S. Yang, L. He, Y. Chen, și N. Ren, „Intelligent control/operational strategies in WWTPs through an integrated Q-Learning algorithm with ASM2d-guided reward”, *Water*, vol. 11, nr. 5, p. 927, mai 2019, doi: 10.3390/w11050927.
- [64] J.-F. Qiao, Y. Hou, L. Zhang, și H.-G. Han, „Adaptive fuzzy neural network control of wastewater treatment process with multiobjective operation”, *Neurocomputing*, vol. 275, pp. 383–393, ian. 2018, doi: 10.1016/j.neucom.2017.08.059.

- [65] H.-G. Han, L. Zhang, H.-X. Liu, și J.-F. Qiao, „Multiobjective design of fuzzy neural network controller for wastewater treatment process”, *Appl. Soft Comput.*, vol. 67, pp. 467–478, iun. 2018, doi: 10.1016/j.asoc.2018.03.020.
- [66] J. Qiao și W. Zhang, „Dynamic multi-objective optimization control for wastewater treatment process”, *Neural Comput. Appl.*, vol. 29, nr. 11, pp. 1261–1271, iun. 2018, doi: 10.1007/s00521-016-2642-8.
- [67] D. Kim, J. D. Bowen, și E. C. Ozelkan, „Optimization of wastewater treatment plant operation for greenhouse gas mitigation”, *J. Environ. Manage.*, vol. 163, pp. 39–48, nov. 2015, doi: 10.1016/j.jenvman.2015.07.005.
- [68] P. Yapıcıoğlu și Ö. Demir, „Minimizing greenhouse gas emissions of an industrial wastewater treatment plant in terms of water–energy nexus”, *Appl. Water Sci.*, vol. 11, nr. 12, p. 180, dec. 2021, doi: 10.1007/s13201-021-01484-4.
- [69] D. Butler și M. Schutze, „Integrating simulation models with a view to optimal control of urban wastewater systems”, *Environ. Model. Softw.*, vol. 20, nr. 4, pp. 415–426, apr. 2005, doi: 10.1016/j.envsoft.2004.02.003.
- [70] K. R. Sharma, S. Corrie, și Z. Yuan, „Integrated modelling of sewer system and wastewater treatment plant for investigating the impacts of chemical dosing in sewers”, *Water Sci. Technol.*, vol. 65, nr. 8, pp. 1399–1405, apr. 2012, doi: 10.2166/wst.2012.019.
- [71] M. Barbu, R. Vilanova, I. Santin, și M. Meneses, „Decentralized control strategies evaluation for an Integrated Urban Wastewater System”, în *2017 18th International Carpathian Control Conference (ICCC)*, Sinaia, Romania: IEEE, mai 2017, pp. 46–51. doi: 10.1109/CarpathianCC.2017.7970369.
- [72] L. Guo, S. Tik, J. M. Ledergerber, D. Santoro, E. Elbeshbishy, și P. A. Vanrolleghem, „Conceptualizing the sewage collection system for integrated sewer-WWTP modelling and optimization”, în *New Trends in Urban Drainage Modelling*, G. Mannina, Ed., în Green Energy and Technology. , Cham: Springer International Publishing, 2019, pp. 842–847. doi: 10.1007/978-3-319-99867-1_145.
- [73] R. Saagi, X. Flores-Alsina, S. Kroll, K. V. Gernaey, și U. Jeppsson, „A model library for simulation and benchmarking of integrated urban wastewater systems”, *Environ. Model. Softw.*, vol. 93, pp. 282–295, iul. 2017, doi: 10.1016/j.envsoft.2017.03.026.
- [74] P. Shanahan *et al.*, „River Water Quality Model no. 1 (RWQM1): I. Modelling approach”, *Water Sci. Technol.*, vol. 43, nr. 5, pp. 1–9, mar. 2001, doi: 10.2166/wst.2001.0238.
- [75] K. Seggelke, R. Löwe, T. Beeneken, și L. Fuchs, „Implementation of an integrated real-time control system of sewer system and waste water treatment plant in the city of Wilhelmshaven”, *Urban Water J.*, vol. 10, nr. 5, pp. 330–341, oct. 2013, doi: 10.1080/1573062X.2013.820331.
- [76] S. Kroll, G. Dirckx, B. M. R. Donckels, M. Van Dorpe, M. Weemaes, și P. Willems, „Modelling real-time control of WWTP influent flow under data scarcity”, *Water Sci. Technol.*, vol. 73, nr. 7, pp. 1637–1643, dec. 2015, doi: 10.2166/wst.2015.641.
- [77] S. Kroll, A. Fenu, T. Wambecq, M. Weemaes, J. Van Impe, și P. Willems, „Energy optimization of the urban drainage system by integrated real-time control during wet and dry weather conditions”, *Urban Water J.*, vol. 15, nr. 4, pp. 362–370, apr. 2018, doi: 10.1080/1573062X.2018.1480726.
- [78] Z. Lu *et al.*, „Water-level based discrete integrated dynamic control to regulate the flow for sewer-WWTP operation”, *Front. Environ. Sci. Eng.*, vol. 14, nr. 3, p. 45, iun. 2020, doi: 10.1007/s11783-020-1222-4.
- [79] C. Sun *et al.*, „Integrated pollution-based real-time control of sanitation systems”, *J. Environ. Manage.*, vol. 269, p. 110798, sep. 2020, doi: 10.1016/j.jenvman.2020.110798.

- [80] I. Vasiliev, L. Luca, M. Barbu, R. Vilanova, și S. Caraman, „Sewer network model of a city with a medium sized population”, în *23rd International Carpathian Control Conference*, Sinaia, 2022. doi: 10.1109/ICCC54292.2022.9805864.
- [81] W. J. Ng, *Industrial wastewater treatment*. Imperial College Press, 2006.
- [82] F. Nejari, B. Dahhou, A. Benhammou, și G. Roux, „Non-linear multivariable adaptive control of an activated sludge wastewater treatment process”, *Int. J. Adapt. Control Signal Process.*, vol. 13, nr. 5, pp. 347–365, 1999, doi: 10.1002/(SICI)1099-1115(199908)13:5<347::AID-ACS543>3.0.CO;2-8.
- [83] I. Vasiliev *et al.*, „Model Predictive Control of a wastewater treatment process using neural networks”, în *2023 IEEE 28th International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)*, sep. 2023, pp. 1–7. doi: 10.1109/ETFA54631.2023.10275488.
- [84] A. E. Țîru, I. Vasiliev, L. Diaconu, R. Vilanova, D. Voipan, și H. Ratnaweera, „Integration of ANN for accurate estimation and control in wastewater treatment”, în *2023 IEEE 28th International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)*, sep. 2023, pp. 1–4. doi: 10.1109/ETFA54631.2023.10275569.
- [85] S. Naduvil-Vadukootu, R. A. Angryk, și P. Riley, „Evaluating preprocessing strategies for time series prediction using deep learning architectures”, în *The Thirtieth International Flairs Conference*, 2017.
- [86] S. Hochreiter și J. Schmidhuber, „Long Short-Term Memory”, *Neural Comput.*, vol. 9, nr. 8, pp. 1735–1780, nov. 1997, doi: 10.1162/neco.1997.9.8.1735.
- [87] I. N. Da Silva, D. Hernane Spatti, R. Andrade Flauzino, L. H. B. Liboni, și S. F. Dos Reis Alves, *Artificial Neural Networks*. Cham: Springer International Publishing, 2017. doi: 10.1007/978-3-319-43162-8.
- [88] I. Pisa, „Artificial Neural Networks in the wastewater industry. From conventional to data-based industrial control”, PhD Thesis, Autonomous University of Barcelona, 2022.
- [89] D. Voipan, I. Vasiliev, L. Condrachi, A.-E. Voipan, și M. Barbu, „Enhancing effluent quality predictions in wastewater treatment with LSTM neural network”, în *2024 28th International Conference on System Theory, Control and Computing (ICSTCC)*, 2024.
- [90] M. Barbu, R. Vilanova, M. Meneses, și I. Santin, „On the evaluation of the global impact of control strategies applied to wastewater treatment plants”, *J. Clean. Prod.*, vol. 149, pp. 396–405, apr. 2017, doi: 10.1016/j.jclepro.2017.02.018.
- [91] I. Vasiliev, L. Luca, M. Barbu, R. Vilanova, și S. Caraman, „Optimal control strategy of a sewer network”, *Water*, vol. 14, nr. 7, p. 1062, mar. 2022, doi: 10.3390/w14071062.
- [92] M. Mitchell, *An introduction to genetic algorithms*. Cambridge, MA, US: MIT Press, 1996.
- [93] K. Deb și T. Goel, „Controlled elitist Non-dominated Sorting Genetic Algorithms for better convergence”, în *Evolutionary Multi-Criterion Optimization*, vol. 1993, E. Zitzler, L. Thiele, K. Deb, C. A. Coello Coello, și D. Corne, Ed., în *Lecture Notes in Computer Science*, vol. 1993. , Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2001, pp. 67–81. doi: 10.1007/3-540-44719-9_5.
- [94] H. S. Sánchez, A. Visioli, și R. Vilanova, „Optimal Nash tuning rules for robust PID controllers”, *J. Frankl. Inst.*, vol. 354, nr. 10, pp. 3945–3970, iul. 2017, doi: 10.1016/j.jfranklin.2017.03.012.
- [95] G. Guariso și M. Sangiorgio, „Improving the performance of multiobjective genetic algorithms: An elitism-based approach”, *Information*, vol. 11, nr. 12, p. 587, dec. 2020, doi: 10.3390/info11120587.
- [96] I. Vasiliev, L. Luca, R. Vilanova, și S. Caraman, „Optimal control of a sewer network”, în *2022 26th International Conference on System Theory, Control and Computing (ICSTCC)*, Sinaia, Romania: IEEE, oct. 2022, pp. 80–85. doi: 10.1109/ICSTCC55426.2022.9931810.

-
- [97] M. R. Bonyadi și Z. Michalewicz, „Particle Swarm Optimization for single objective continuous space problems: A review”, *Evol. Comput.*, vol. 25, nr. 1, pp. 1–54, mar. 2017, doi: 10.1162/EVCO_r_00180.
- [98] I. Vasiliev, L. Luca, M. Barbu, R. Vilanova, și S. Caraman, „Sliding window-based Particle Swarm Optimization algorithm for a sewer network”, în *2023 European Control Conference (ECC)*, iun. 2023, pp. 1–6. doi: 10.23919/ECC57647.2023.10178171.
- [99] I. Vasiliev, L. Luca, M. Barbu, R. Vilanova, și S. Caraman, „Reducing the environmental impact of sewer network overflows using Model Predictive Control strategy”, *Water Resour. Res.*, vol. 60, nr. 1, p. e2023WR035448, ian. 2024, doi: 10.1029/2023WR035448.
- [100] E. F. Camacho și C. Bordons, *Model Predictive Control*. în *Advanced Textbooks in Control and Signal Processing*. London: Springer, 2007. doi: 10.1007/978-0-85729-398-5.
- [101] R. H. Byrd, J. C. Gilbert, și J. Nocedal, „A trust region method based on interior point techniques for nonlinear programming”, *Math. Program.*, vol. 89, nr. 1, pp. 149–185, nov. 2000, doi: 10.1007/PL00011391.
- [102] L. Luca, „Advanced control strategies for biological waste water treatment processes”, Dunarea de Jos, Galati, Romania, 2018.
- [103] L. Luca, A. Pricopie, I. Vasiliev, M. Barbu, și S. Caraman, „Fuzzy-optimal control strategies for a wastewater treatment plant”, în *2020 24th International Conference on System Theory, Control and Computing (ICSTCC)*, IEEE, 2020, pp. 564–569.
- [104] S. Caraman, L. Luca, I. Vasiliev, și M. Barbu, „Optimal-setpoint-based control strategy of a wastewater treatment process”, *Processes*, vol. 8, nr. 10, p. 1203, sep. 2020, doi: 10.3390/pr8101203.
- [105] I. Vasiliev, L. Luca, M. Barbu, R. Vilanova, și S. Caraman, „An analysis towards integrated control of wastewater collecting and treatment systems”, prezentat la *2023 27th International Conference on System Theory, Control and Computing (ICSTCC)*, IEEE, 2023.