

Universitatea „Dunărea de Jos” din Galați
Școala doctorală de Științe Fundamentale și Inginerești



TEZĂ DE DOCTORAT

REZUMAT

STRATEGII DE CONTROL AVANSAT

AL PROCESELOR DE EPURARE

BIOLOGICĂ A APELOR REZIDUALE

Conducător științific,
Prof. Dr. Ing. Sergiu CARAMAN

Doctorand,
Ing. Laurențiu LUCA

Seria I8: Ingineria sistemelor Nr. 6

GALAȚI

2018

Universitatea „Dunărea de Jos” din Galați
Școala doctorală de Științe Fundamentale și Inginerești



TEZĂ DE DOCTORAT

- Rezumatul tezei de doctorat -

STRATEGII DE CONTROL AVANSAT AL PROCESELOR DE EPURARE BIOLOGICĂ A APELOR REZIDUALE

**Doctorand,
Ing. Laurențiu LUCA**

Președinte:	Prof. dr. ing. Eugen RUSU
Conducător științific,	Prof. dr. ing. Sergiu CARAMAN
Membri:	Prof. dr. ing. Radu Emil PRECUP Prof. dr. ing. Dan SELIȘTEANU Prof. dr. ing. Marian BARBU

Seria I8: Ingineria sistemelor Nr. 6

GALAȚI

2018

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

Domeniul ȘTIINȚE INGINEREȘTI

Seria I1: Biotehnologii

Seria I2: Calculatoare și tehnologia informației

Seria I3: Inginerie electrică

Seria I4: Inginerie industrială

Seria I5: Ingineria materialelor

Seria I6: Inginerie mecanică

Seria I7: Ingineria produselor alimentare

Seria I8: Ingineria sistemelor

Domeniul ȘTIINȚE ECONOMICE

Seria E1: Economie

Seria E2: Management

Domeniul ȘTIINȚE UMANISTE

Seria U1: Filologie - Engleză

Seria U2: Filologie - Română

Seria U3: Istorie

Seria U4: Filologie - Franceză

Domeniul MATEMATICĂ ȘI ȘTIINȚE ALE NATURII

Seria C: Chimie

Cuprins teză

INTRODUCERE	V
INTRODUCTION	IX
ABREVIERI	1
LISTĂ FIGURI	3
LISTĂ TABELE	8
CAPITOLUL 1	9
1.1 INTRODUCERE	9
1.2 STADIUL ACTUAL ÎN MODELAREA SISTEMELOR DE TRATARE	11
1.3 STADIUL ACTUAL ÎN CONTROLUL SISTEMELOR DE TRATARE	17
CAPITOLUL 2	27
2.1 INTRODUCERE	27
2.2 STRUCTURA GENERALĂ A STAȚIEI DE TRATARE A APELOR UZATE	27
2.2.1 <i>Treapta de tratare mecanică</i>	28
2.2.2 <i>Treapta de tratare biologică</i>	29
2.2.3 <i>Treapta de tratare a nămolului</i>	30
2.3 ASPECTE TEHNOLOGICE PRIVIND STAȚIILE DE TRATARE A APELOR UZATE	32
2.3.1 <i>Linia apei în cadrul tratării biologice</i>	32
2.3.2 <i>Linia nămolului în cadrul etapei biologice</i>	35
2.4 PROCESUL DE ELIMINARE A FOSFORULUI	36
2.5 ECHIPAMENTELE DE MONITORIZARE ȘI CONTROL FOLOSITE ÎN CADRUL STAȚIEI DE EPURARE	36
2.6 CONCLUZII	41
CAPITOLUL 3	42
3.1 INTRODUCERE	42
3.2 MODELE MATEMATICE UTILIZATE PENTRU MODELAREA STAȚIEI DE TRATARE A APELOR REZIDUALE DIN MUNICIPIUL GALAȚI	44
3.2.1 <i>Modelul ASM1</i>	44
3.2.2 <i>Ecuatiile modelului ASM1</i>	47
3.2.3 <i>Modelul ADM1</i>	49
3.2.4 <i>Modelele ASM2 și ASM2d</i>	50
3.3 ALEGEREA INFLUENTULUI PENTRU STAȚIA DE TRATARE (CAZUL MODELELOR ASM1 ȘI ADM1)	54
3.3.1 <i>Regimul “vreme secetoasă”</i>	56
3.3.2 <i>Regimul “vreme ploioasă”</i>	56
3.3.3 <i>Regimul “vreme cu furtună”</i>	57
3.4 ALEGEREA INFLUENTULUI PENTRU MODELUL ASM2D	60
3.5 EVALUAREA PERFORMANȚELOR PROCESELOR DE TRATARE	65
3.6 MODELAREA MATEMATICĂ A STAȚIEI DE TRATARE UTILIZÂND MODELUL ASM1 (REDUCEREA SUBSTANȚELOR ORGANICE ȘI A AZOTULUI)	69
3.6.1 <i>Implementarea modelului matematic în mediul de simulare SIMBA</i>	70
3.6.2 <i>Analiza parametrilor de intrare, ieșire și a mărimilor măsurabile ale procesului</i>	73
3.6.3 <i>Rezultate obținute prin simulare</i>	73
3.7 MODELAREA STAȚIEI DE TRATARE CONSIDERÂND ȘI PARTEA DE DIGESTIE ANAEROBĂ (MODELELE ASM1 ȘI ADM1)	77
3.8 MODELAREA STAȚIEI DE TRATARE INCLUZÂND ȘI ELIMINAREA FOSFORULUI (MODELUL ASM2d)	87
3.8.1 <i>Implementarea modelului matematic în SIMBA</i>	88
3.8.2 <i>Analiza parametrilor de intrare, ieșire și a mărimilor măsurabile ale procesului</i>	90
3.8.3 <i>Rezultate obținute prin simulare</i>	91
3.9 CONCLUZII	97
CAPITOLUL 4	98
4.1 INTRODUCERE	98
4.2 PREZENTAREA INFLUENTULUI REAL AL STAȚIEI DE TRATARE PENTRU MODELELE ASM1 ȘI ADM1	98
4.2.1 <i>Regimul “vreme secetoasă”- influentul real pentru modelele ASM1 + ADM1</i>	101

4.2.2	<i>Regimul “vreme ploioasă”- influențul real pentru modelele ASM1 + ADM1</i>	101
4.2.3	<i>Regimul “vreme cu furtună” - influențul real pentru modelele ASM1 + ADM1</i>	102
4.3	INFLUENȚUL REAL AL STAȚIEI DE EPURARE PENTRU MODELUL ASM2D	104
4.3.1	<i>Regimul “vreme secetoasă” – model ASM2d</i>	104
4.3.2	<i>Regimul “vreme ploioasă” – model ASM2d</i>	105
4.3.3	<i>Regimul “vreme cu furtună” – model ASM2d</i>	106
4.4	STRATEGII PENTRU CONTROLUL STAȚIEI DE TRATARE ÎN VEDEREA ELIMINĂRII SUBSTANȚELOR ORGANICE ȘI A AZOTULUI	107
4.5	STRATEGII PENTRU CONTROLUL STAȚIEI DE TRATARE ÎN VEDEREA ELIMINĂRII FOSFORULUI	123
4.6	CONDUCEREA PROCESULUI DE TRATARE A APELOR UZATE LA REFERINȚE OPTIMALE	135
4.7	CONCLUZII	143
CAPITOLUL 5		144
5.1	CONTRIBUȚII ORIGINALE	146
5.2	DIRECȚII VIITOARE DE CERCETARE	147
LISTĂ DE LUCRĂRI		148
-	LUCRĂRI ȘTIINȚIFICE PUBLICATE ÎN DOMENIUL TEZEI DE DOCTORAT:	148
-	LUCRĂRI ȘTIINȚIFICE PUBLICATE ÎN DOMENIUL AUTOMATIZĂRIILOR INDUSTRIALE:	148
-	PATENT:	149
-	PARTICIPĂRI LA PROIECTE DE CERCETARE ALE UNIVERSITĂȚII “DUNĂREA DE JOS” DIN GALAȚI:	149
-	PARTICIPĂRI LA LUCRĂRI DE AUTOMATIZARE (ASISTENȚA TEHNICĂ, PROIECTARE SISTEME DE AUTOMATIZARE, DEZVOLTARE APLICAȚII, PUNERE ÎN FUNCȚIUNE, COORDONARE) ÎN DOMENIUL PROCESELOR DE TRATARE A APELOR UZATE:	150
BIBLIOGRAFIE		153
ANEXA 1		158
ANEXA 2		173
ANEXA 3		176

Cuprins rezumat

INTRODUCERE	IV
CAPITOLUL 1	1
1.1 INTRODUCERE	1
1.2 STADIUL ACTUAL ÎN MODELAREA SISTEMELOR DE TRATARE	2
1.3 STADIUL ACTUAL ÎN CONTROLUL SISTEMELOR DE TRATARE	4
CAPITOLUL 2	5
2.1 INTRODUCERE	5
2.2 STRUCTURA GENERALĂ A STAȚIEI DE TRATARE A APELOR UZATE.....	5
CAPITOLUL 3	6
3.1 INTRODUCERE	6
3.2 ALEGEREA INFLUENTULUI PENTRU STAȚIA DE TRATARE (CAZUL MODELELOR ASM1 ȘI ADM1)	6
3.2.1 <i>Regimul “vreme secetoasă”</i>	6
3.2.2 <i>Regimul “vreme ploioasă”</i>	6
3.2.3 <i>Regimul “vreme cu furtună”</i>	7
3.3 EVALUAREA PERFORMANȚELOR PROCESELOR DE TRATARE	7
3.4 MODELAREA STAȚIEI DE TRATARE CONSIDERÂND ȘI PARTEA DE DIGESTIE ANAEROBĂ (MODELELE ASM1 ȘI ADM1)	8
3.4.1 <i>Implementarea modelului matematic în mediul de simulare SIMBA</i>	8
3.4.2 <i>Analiza parametrilor de intrare, ieșire și a mărimilor măsurabile ale procesului</i>	8
3.4.3 <i>Rezultate obținute prin simulare</i>	8
3.5 MODELAREA STAȚIEI DE TRATARE INCLUZÂND ȘI ELIMINAREA FOSFORULUI (MODELUL ASM2d)	13
3.5.1 <i>Analiza parametrilor de intrare, ieșire și a mărimilor măsurabile ale procesului</i>	13
3.5.2 <i>Rezultate obținute prin simulare</i>	13
CAPITOLUL 4	18
4.1 INTRODUCERE	18
4.2 PREZENTAREA INFLUENTULUI REAL AL STAȚIEI DE TRATARE PENTRU MODELELE ASM1 ȘI ADM1	18
4.3 STRATEGII PENTRU CONTROLUL STAȚIEI DE TRATARE ÎN VEDEREA ELIMINĂRII SUBSTANȚELOR ORGANICE ȘI A AZOTULUI.....	19
4.4 STRATEGII PENTRU CONTROLUL STAȚIEI DE TRATARE ÎN VEDEREA ELIMINĂRII FOSFORULUI.....	27
4.5 CONDUCEREA PROCESULUI DE TRATARE A APELOR UZATE LA REFERINȚE OPTIMALE	28
CAPITOLUL 5	33
5.1 CONTRIBUȚII ORIGINALE	35
5.2 DIRECȚII VIITOARE DE CERCETARE	36
LISTĂ DE LUCRĂRI	37
- LUCRĂRI ȘTIINȚIFICE PUBLICATE ÎN DOMENIUL TEZEI DE DOCTORAT:.....	37
- LUCRĂRI ȘTIINȚIFICE PUBLICATE ÎN DOMENIUL AUTOMATIZĂRIILOR INDUSTRIALE:	37
BIBLIOGRAFIE	38

Introducere

Se poate spune fără a greși că "apa înseamnă viață". Este o condiție prealabilă pentru viața omului, a animalelor și a plantelor, precum și o resursă indispensabilă pentru economie. De asemenea, apa joacă un rol fundamental în ciclul de reglementare a climei. Toți depindem de natură pentru alimentele, aerul, apa, energia și materiile prime. Natura și biodiversitatea fac posibilă viața, oferă beneficii sociale și de sănătate și, nu în ultimul rând, sunt baza economiei noastre. Ecosistemele sănătoase ne pot ajuta să facem față impactului schimbărilor climatice. Cu toate acestea, ecosistemele naturale și serviciile lor vitale sunt supuse presiunii exercitate de extinderea urbană, agricultura intensivă, poluarea, speciile invazive și schimbările climatice.

Problematika protecției mediului și a gestionării resurselor de apă este stringentă și în atenția permanentă a Uniunii Europene (UE). Astfel, pe site-ul Comisiei Europene, http://ec.europa.eu/environment/water/index_en.htm, se găsesc numeroase acte normative (directive) care arată preocuparea acestui for european pentru a preveni degradarea mediului înconjurător și a calității resurselor de apă [1].

Obiectivul fundamental al strategiei UE privind biodiversitatea este acela de a îmbunătăți calitatea mediului, de a proteja sănătatea oamenilor, de a utiliza prudent și rațional resursele naturale, precum și de a promova măsuri la nivel internațional care privesc problemele globale sau regionale legate de mediu. În acest sens, este nevoie ca alte domenii, precum agricultura, energia, transporturile, pescuitul, dezvoltarea regională, cercetarea, inovarea și ajutorul extern să ia în considerare consecințele asupra mediului ale politicilor și deciziilor de finanțare aferente. În concluzie, aspectele economice și cele de mediu sunt complementare. Ecologizarea economiei reduce costurile de mediu prin utilizarea mai eficientă a resurselor, în timp ce noile tehnologii și tehnici ecologice creează locuri de muncă, dau un nou impuls economiei și întăresc competitivitatea industriei europene.

Comisia Europeană impune anumite direcții, prin strategia Europa 2020, strategie de creștere a UE pentru deceniul următor. Aceasta pune accent pe utilizarea eficientă a resurselor naturale epuizabile. Politica de mediu contribuie, astfel, la îndeplinirea obiectivelor generale ale strategiei de a transforma economia Europei într-o economie sustenabilă și care se bazează pe creșterea gradului de cunoaștere și pe o utilizare eficientă a resurselor naturale existente.

Necesitatea de a utiliza în mod eficient resursele limitate este un obiectiv care figurează în toate politicile UE. În ultimele decenii, UE a pus în aplicare o politică vastă pentru a asigura calitatea apei în Europa. Inițial, aceasta a abordat preocupările privind sănătatea. Au urmat măsuri menite să abordeze impactul asupra mediului al principalelor sectoare consumatoare de apă, cum ar fi agricultura, industria și gospodăriile.

Protecția resurselor de apă, a ecosistemelor de apă proaspătă și de apă sărată, precum și a apei menajere și a celei pe care o bem a devenit, prin urmare, baza sistemului de protecție a mediului în Europa.

Ca o consecință, protejarea calității resurselor de apă ale Europei a devenit o prioritate principală a UE de la începutul existenței acesteia, prin adoptarea de normative și legi în domeniul protecției mediului. Directivele adoptate înaintea anilor '80 au impus o serie de standarde de calitate cu obiective clare privind protejarea sănătății oamenilor și a mediului, inclusiv a apelor de suprafață, a apelor menajere, piscicole, conchilicole (ape pentru creșterea diverselor specii de moluște), apelor subterane și a celor destinate consumului casnic. Una din directivele legislative din aceeași perioadă a impus anumite standarde care se referă la deversarea substanțelor în apele de suprafață. Totuși, această abordare centrată pe standardele de calitate a fost insuficientă pentru protejarea apelor deja poluate ale Europei la acea vreme. Acest fapt a fost demonstrat la sfârșitul anilor 1980 când eutrofizarea a devenit o problemă importantă în anumite zone din Marea Nordului, Marea Baltică, precum și în Marea Mediterană.

Pentru a depăși problemele constatate, directiva care se referă la tratarea apelor uzate urbane (*UWWT – Urban waste water treatment*) impune țărilor membre să investească în direcția modernizării infrastructurii de colectare și tratare a apelor uzate în zonele urbane, iar directiva referitoare la nitrați cere asociațiilor agricole să facă un control mult mai riguros al cantităților de îngrășăminte care conțin azot și, în același timp, sunt utilizate pentru fertilizarea terenurilor agricole.

În domeniul industrial, pentru reducerea cantităților de poluanți deversați de coloșii industriali, a fost adoptată, câțiva ani mai târziu, o directivă privind sistemul integrat pentru prevenirea poluării și control (*IPPC - integrated pollution prevention and control*) [2].

Toate aceste politici și acte legislative au fost reunite în anul 2000 într-un document cadru, numit „Directiva Cadru privind Apa” (*DCA*), prin care Uniunea Europeană a promovat crearea unei abordări globale și unificate a legislației privind apa.

Această directivă, care în mod oficial poartă titlul „Directiva 2000/60/CE a Parlamentului European și a Consiliului Europei din 23 octombrie 2000, de stabilire a unui cadru de politică comunitară în domeniul apei”, a stabilit un cadru juridic pentru acțiunile de protejare și restabilire a purității apei în întreaga Europă și pentru garantarea utilizării apei în mod sustenabil pe termen lung. Directiva stabilește o abordare nouă a gestionării apei aflate în bazinele hidrografice naturale și impune termene de realizare a obiectivelor pentru ecosistemele acvatice. Directiva se referă la apele interioare de suprafață, la apele curgătoare, la apele de coastă și la apele subterane [3].

În acest context general se încadrează și lucrarea de doctorat „Strategii de control avansat al proceselor de epurare biologică a apelor reziduale”, care își propune analiza performanțelor stației de tratare biologică a apelor deversate și colectate în municipiul Galați, oraș de mărime medie, cu o populație de aproximativ 300000 locuitori.

Lucrarea este structurată pe cinci capitole prezentate în continuare.

Capitolul 1, intitulat „Stadiul actual în modelarea și conducerea automată a proceselor de tratare a apelor reziduale” prezintă o trecere în revistă a principalelor probleme actuale de modelare și control întâlnite în literatura de specialitate. În funcționarea unei stații de tratare a apelor uzate, principalul obiectiv este de a elimina în mod eficient poluanții din apa uzată sau transformarea lor în compuși mai puțin dăunători, astfel încât efluentul să îndeplinească cerințele de deversare utilizând tehnologii de tratare adecvate și la cele mai scăzute costuri posibile. În ultimul timp, stațiile de tratare a apelor uzate tind să se transforme în stații de recuperare a resurselor. Astfel, apele uzate sunt considerate o resursă de unde pot fi recuperate substanțe nutritive, energie și apă. Modelele matematice sunt foarte importante în cel puțin trei direcții actuale, care sunt de mare interes, și anume: instruirea, proiectarea sistemelor de tratare și optimizarea proceselor. De-a lungul anilor au fost dezvoltate diferite metode de tratare a apelor uzate. Complexitatea, neliniaritatea și incertitudinile proceselor de tratare a apelor uzate cu nămol activ au impus modele complexe care să caracterizeze cât mai exact procesele de epurare biologică a apelor uzate.

În problema controlului automat al stațiilor de tratare se disting două direcții de abordare importante, una fiind cea a controlului descentralizat, care este orientată către controlul principalelor mărimi de interes din proces, și o alta care privește controlul bazat pe model matematic al procesului de tratare în scop de optimizare a funcționării întregii instalații.

Capitolul 2, intitulat „Prezentarea stației de tratare a apelor uzate din municipiul Galați”, descrie stația de epurare. Aceasta conține o treaptă de tratare mecanică, formată din grătare dese, grătare fine și un sistem de deznisipare și separare de grăsimi. Fluxul de apă uzată este direcționat către decantoarele primare. La ieșirea din decantoarele primare se află o stație de pompare intermediară de unde influentul este direcționat către reactoarele biologice. Sistemul de tratare biologică realizează îndepărtarea componentelor organice, a azotului și a fosforului prin intermediul insuflării de oxigen, a adității de clorură ferică și a strategiilor de control alese care favorizează creșterea biomasei și precipitarea nămolurilor.

Este prezentată arhitectura SCADA a stației de epurare care este dezvoltată la nivel de dispecerat într-o configurație redundantă de tip client – server. Comunicația între PLC-urile stației se realizează la nivel fizic prin intermediul unui inel de fibră optică redundant. Pentru preluarea de informații de la echipamentele de instrumentație, pentru fiecare PLC sunt dezvoltate rețele de tip bus – Profibus.

Elementele de execuție sunt controlate de către PLC-uri prin intermediul cartelelor de ieșiri numerice și prin comunicație pe rețele Profinet și Profibus. Sunt prezentate principalele bucle de reglare precum și câteva ecrane din aplicația SCADA de la nivel de dispecerat.

Capitolul 3, intitulat „Contribuții privind modelarea matematică a unei stații de tratare a apelor uzate”, prezintă modelele matematice pentru procesele de tratare a apelor uzate cu nămol activat care au fost folosite în continuare pentru a modela stația de tratare. Modelarea matematică a fost realizată în mediul de simulare SIMBA, compatibil cu Matlab-Simulink.

Au fost utilizate modelele matematice consacrate în literatura de specialitate, ASM1 (Activated Sludge Model no. 1), ASM2d (Activated Sludge Model no. 2d) și ADM1 (Anaerobic Digestion Model), după cum urmează: modele din familia ASM pentru modelarea efectivă a procesului de tratare biologică, la care s-a adăugat modelul ADM pentru modelarea procesului de digestie anaerobă pentru nămolul rezultat în urma tratării; pentru definirea influentului s-a folosit, din modelele de tip BSM, influentul caracterizat de variații ale variabilelor în diverse regimuri, dar adaptat la cazul încărcărilor apelor reziduale aferente datelor de proiectare a stației municipiului Galați.

Modelul matematic al stației de tratare a fost determinat gradual, începând cu partea de tratare a reziduurilor organice, azot, nitrați, nitriți (prin modele de tip ASM1) și continuând cu tratarea nămolului (modelul ADM1) după care, în pasul al treilea, s-a realizat reducerea fosforului (prin modele de tip ASM2d). A fost realizată o analiză detaliată a performanțelor tehnologice ale stației de tratare pe baza unor indicatori specifici acestor procese, similari cu indicatorii utilizați în modelele de tip benchmark, precum BSM1 și BSM2.

Capitolul 4, intitulat „Contribuții privind controlul unei stații de tratare a apelor uzate”, analizează strategii de control ale stației de epurare în două cazuri, primul fiind cazul în care sistemul este dezvoltat utilizând modele consacrate de tip ASM1 și ADM1 care sunt orientate către eliminarea substanțelor organice și a azotului, iar al doilea, cazul în care se consideră schema stației modelată cu ASM2d pentru îndepărtarea încărcărilor cu fosfor.

Au fost urmărite obiectivele de control principale pentru obținerea unei calități corespunzătoare a efluentului, precum controlul oxigenului dizolvat în bazinele aerate, reglarea debitelor pentru recirculări (internă, respectiv externă) și aditia de clorură ferică pentru eliminarea fosforului. Scopul strategiilor de control a fost realizarea unei funcționări corespunzătoare a stației de tratare, cu costuri minime și o calitate a efluentului care să nu depășească limitările legale impuse.

Pentru controlul mărimilor menționate au fost folosite regulatoare clasice de tip PI care pot fi implementate cu ușurință în echipamente specifice de control cum sunt automatele programabile, acestea fiind echipamente care oferă performanțe foarte bune în practica curentă pentru automatizarea instalațiilor de tratare a apelor uzate. S-a considerat mai utilă o abordare comparativă a mai multor strategii de control care utilizează același tip de lege de reglare, decât folosirea diferitelor tehnici de control. Aceasta deoarece, la nivelul întregului sistem, parametrii și indicatorii de calitate sunt influențați, în cea mai mare măsură, de alegerea referințelor și a punctelor de operare în care se desfășoară procesele de tratare.

A fost analizată, pe una dintre strategiile aplicabile stației de tratare, o procedură de optimizare a referințelor buclelor de control, utilizând metode: una de relaxare într-o versiune simplificată și una stohastică.

Capitolul 5, intitulat „Concluzii finale”, prezintă concluziile acestei teze, contribuțiile științifice originale, precum și direcțiile viitoare de cercetare care se desprind din cercetarea realizată în această teză.

Capitolul 1

Stadiul actual în modelarea și conducerea automată a proceselor de tratare a apelor reziduale

1.1 Introducere

Apa reprezintă o resursă vitală pentru om, cu o mare importanță pentru societate. Este utilizată în toate sectoarele industriale, în agricultură, transporturi, producția de energie, infrastructură etc.

Legislația României, aflată în vigoare la acest moment, transpune Directivele Consiliului European cu privire la epurarea apelor uzate, inclusiv Directiva Europeană nr. 2000/60/CE care stabilește “un cadru legislativ de politică comunitară în domeniul apei” [3].

Problemele de tratare a apelor uzate și a deversării acestora în receptorii naturali se supun în România hotărârii de guvern HG. nr. 188 din 28 februarie 2002 [5], completată cu hotărârea nr. 552/2005 și cu hotărârea nr. 210/2007, care „aprobă normele tehnice privind colectarea, epurarea și evacuarea apelor uzate urbane conținute în normativul *NTPA-011*, condițiile de evacuare a apelor uzate în rețelele de canalizare ale localităților și direct în stațiile de epurare conținute în normativul *NTPA-002/2002* și stabilirea limitelor de încărcare cu poluanți a apelor uzate industriale și urbane la evacuarea în receptorii naturali conținute în normativul *NTPA-001/2002*”.

Apa uzată sau apa reziduală conține cantități semnificative de poluanți, care duc la epuizarea oxigenului din apă atunci când este deversată direct în apele de suprafață. Compoziția apelor reziduale variază în mare măsură în funcție de zonele de unde sunt colectate. Substanțele poluante care contaminatează apa sunt, în general, solide sau compuși biodegradabili sau lent biodegradabili, nutrienți, substanțe toxice, organisme patogene etc. Astfel, o instalație de tratare a apelor reziduale uzuale, așa cum se arată și în Fig. 1.1, include mai multe procese de tratare în mai multe etape. Fiecare etapă de tratare este proiectată pentru a elimina un anumit tip de substanță poluantă.

Obiectivul principal al tratării apelor uzate este de a permite deversarea apelor uzate urbane în apele de suprafață, asigurând, astfel, protecția mediului și a comunităților umane [6].

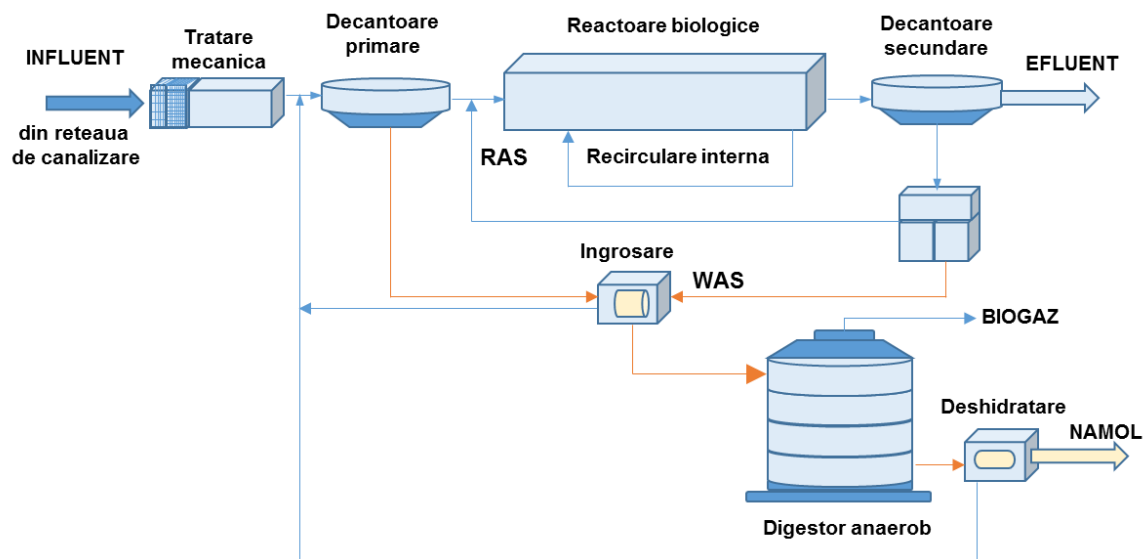


Fig. 1.1 - Schema generală a unei stații de epurare

Schema de tratare se alege pe baza unor calcule tehnice și economice comparative între mai multe variante realizate prin considerarea mai multor factori, cum sunt: existența de terenuri disponibile pentru stația de tratare care nu pot avea alte utilizări din punct de vedere economic, existența unui spațiu suficient pentru realizarea unei zone de protecție sanitară în jurul stației de epurare, obligativitatea încadrării între limitele legale ale valorilor de concentrații cu încărcări ale efluentului în urma procesului de epurare, existența unui receptor (emisar) la o distanță acceptabilă în care se deversează apele tratate, posibilități de depozitare, transport sau distrugere a cantităților de nămol rezultate în procesele de tratare și, nu în ultimul rând, posibilitatea asigurării stației de tratare cu personal calificat.

În funcționarea unei stații de tratare a apelor uzate, principala funcție este de a elimina în mod eficient poluanții din apa uzată sau transformarea lor în compuși mai puțin dăunători, astfel încât efluentul să îndeplinească cerințele de deversare utilizând tehnologii de tratare adecvate și la cele mai scăzute costuri posibile. Reducerea costului se poate realiza și prin recuperarea unor resurse din proces, cum sunt substanțele nutritive, biogazul și apa pentru reutilizare [7]. Datorită interacțiunilor complexe ale diferitelor variabile legate de funcționarea sistemului de tratare, este necesar să se adopte strategii de control avansate care să mențină concentrațiile efluentului sub limita legală cu un cost minim. În acest sens, modelele matematice și instrumentele de simulare pentru procesele de tratare își găsesc utilitate în predicția comportării acestora [8], [9] și în explorarea diferitelor abordări pentru îmbunătățirea performanțelor stațiilor [10].

Modelele matematice sunt foarte importante, fapt menționat în [11] și [12] care precizează cele trei domenii principale de aplicare: învățare (instruire), proiectarea sistemelor de tratare și optimizarea proceselor.

Așa cum s-a afirmat mai sus, în ultimul timp, stațiile de tratare a apelor uzate tind să se transforme în stații de recuperare a resurselor. Actualmente, apele uzate sunt considerate o resursă de unde pot fi recuperate substanțele nutritive, energia și apa. În concordanță cu aceasta, modelarea proceselor de tratare a apelor reziduale se dezvoltă în sensul de a adăuga noi procese și variabile de stare modelelor matematice existente. De ex., apele uzate conțin cantități semnificative de fosfor, a cărui concentrație trebuie redusă până la limitele legale pentru a fi deversate în apele de suprafață datorită faptului că favorizează procesul de eutrofizare (proces prin care apa se îmbogățește cu nutrienți – azot și fosfor), ducând la sărăcirea în oxigen a apelor și distrugând, astfel, echilibrul biologic al acestora. Pe de altă parte, fosforul este considerat o resursă limitată care se estimează că va fi epuizată într-o perioadă mai scurtă de 50-100 de ani [13], [14], sau de până la 300 de ani [15]. Astfel, recuperarea fosforului din apele uzate devine un obiectiv important al procesului de tratare biologică [16].

1.2 Stadiul actual în modelarea sistemelor de tratare

De-a lungul anilor, au fost dezvoltate diferite metode de tratare a apelor uzate. O prezentare a evoluției proceselor cu nămol activ poate fi găsită în [9]. Complexitatea, neliniaritatea și incertitudinile proceselor de tratare a apelor uzate cu nămol activ au impus modele complexe care să caracterizeze cât mai exact procesele de epurare biologică a apelor uzate. În 1983, International Association on Water Quality (*IAWQ*), devenită ulterior International Water Association (*IWA*), a format un grup de lucru care avea drept scop dezvoltarea și aplicarea modelelor matematice ale sistemelor de epurare biologică în activitatea de proiectare și exploatare a stațiilor de tratare. Cele două obiective principale ale grupului au fost de revizuire a modelelor existente și de dezvoltare a unui model matematic mai simplu care să aproximeze cât mai exact comportamentul procesului de tratare cu nămol activ, acesta conținând procese de eliminare a carbonului, nitrificare și denitrificare.

Primul model dezvoltat, prezentat în 1987 în [22] a fost numit Activated Sludge Model No. 1 (*ASM1*) și este cel mai utilizat și acceptat model pentru descrierea proceselor aferente tratării biologice a apelor uzate, reprezentând fundamentul dezvoltării ulterioare a modelelor de tip *ASM* și a extinderii acestora. Acestea au fost acceptate de practicienii și cercetătorii din domeniul tratării apelor reziduale în ultimele două decenii. Modelele *ASM* sunt prezentate într-

o formă tabelară care conține o matrice stoichiometrică și un vector cinetic [23], [24] utilizând notațiile recomandate în [25].

Primul model de tratare biologică cu nămol activat, ASM1, descrie oxidarea biologică a carbonului, nitrificarea și denitrificarea și, prin urmare, este utilizat pentru a modela îndepărtarea carbonului și azotului în sistemele de tratare cu nămol activ. Compușii carbonați și azotați sunt subdivizați în fracțiuni bazate pe biodegradabilitate și solubilitate [12]. Modelul ia în considerare patru procese: (1) creșterea bacteriilor autotrofe și heterotrofe, (2) degradarea acestora, (3) hidroliza particulelor organice și (4) amonificarea azotului organic solubil. Viteza de reacție a fiecărui proces este exprimată ca o serie de funcții de comutare netedă de tip Monod, corespunzătoare anumitor condiții (de exemplu, proces aerobic, anoxic, anaerob) [26].

Datorită necesității de a respecta standardele de calitate ale efluentului în ceea ce privește atât azotul cât și fosforul, modelarea îndepărtării pe cale biologică a fosforului a devenit esențială. Aceasta este un deficit al modelului ASM1, care a dus la dezvoltarea unui al doilea model (ASM2) [27]. Modelul ASM2 este o extensie a modelului ASM1 și include eliminarea biologică și chimică a fosforului, în plus față de eliminarea carbonului și a azotului din cadrul modelului ASM1. În modelul ASM2 se remarcă trei procese de hidroliză a particulelor organice pe baza acceptorilor de electroni. Procesul de fermentație din modelul ASM2 transformă substratul ușor biodegradabil în produse de fermentație în mediul anaerob. În ceea ce privește procesele legate de eliminarea fosforului, următoarele variabile: fosforul anorganic, organismele care acumulează fosfor (*PAO*), polihidroxiclcanoatii (*PHA*) și polifosfații (*PP*) sunt incluse ca variabile de stare suplimentare în model. Alte procese importante incluse în modelul ASM2 sunt precipitarea fosfatului cu hidroxid feric, $Fe(OH)_3$ și redizolvarea fosfatului feric format, $FePO_4$.

În continuare, modelul ASM2 a fost extins la modelul ASM2d [28], prin adăugarea a două noi procese: (1) stocarea fosforului anorganic ca *PP* folosind energia obținută prin respirația anoxică a *PHA* și (2) creșterea anoxică a *PAO*. În ambele procese, constanta vitezei de stocare a *PP* și viteza maximă de creștere a *PAO* se presupune că au valori scăzute în condiții anoxice, fenomen explicabil prin faptul că doar o parte din *PAO* au capacități denitrificatoare sau că denitrificarea are loc într-un ritm mai lent [28]. Acest model este utilizat pe scară largă atunci când se analizează procese îmbunătățite de eliminare biologică a fosforului - *EBPR* (Enhanced Biological Phosphorus Removal) [29].

Modelul ASM3 [30] abordează unele dintre limitările modelului ASM1. În modelul ASM3 se consideră că substratul este depozitat mai întâi în compușii de stocare internă a celulelor înainte de a fi preluați de biomasa heterotrofă. Stocarea substratului, creșterea biomasei heterotrofe, respirația compușilor de stocare internă a celulelor și respirația endogenă se presupune că au loc în condiții aerobe și anoxice.

Alte extensii semnificative ale modelelor ASM sunt ASM3-bioP și TUDP. ASM3-bioP include organismele care acumulează fosfor - *PAO* – din procesele ASM2d în ASM3 [31]. Metabolismul fosforului, care este inclus în ASM2 [32] și ASM2d [33], [34], a fost inclus și în modelul *TUDP* (*Technical University Delft Phosphorus*). Modelele au fost aplicate pe scară largă instalațiilor de tratare.

A fost necesară dezvoltarea unor modele alternative ale proceselor de tratare a apelor uzate (simplificate) deoarece modelele de tip ASM erau destul de complexe și destul de dificil de utilizat în problemele de control automat. Un astfel de model este propus în [39] și realizează o descriere globală a procesului de tratare a apelor uzate. Are numai patru variabile de stare (biomasa, substratul, concentrația de oxigen dizolvat și cea a nămolului recirculat) lucru care facilitează testarea diverselor structuri de control clasice sau moderne.

Un altfel de model simplificat este reprezentat de modele de tip „black box” care pot include, spre exemplu, rețele neuronale. Aceste modele sunt, însă, limitate în descrierea tuturor dinamicilor procesului, dar pot fi utilizate pentru controlul on-line a anumitor părți (subsisteme) ale instalației de tratare. Aceste tipuri de modele au fost folosite în [40], [41].

O altă direcție de cercetare a IWA este și realizarea de modele de tip benchmark care includ practic tot sistemul de tratare a apelor uzate. La nivelul asociației există un grup de lucru având drept temă „*Benchmarking of control strategies for Waste Water treatment plant*” care, împreună cu grupul de cercetare „*European Cooperation in the field of Scientific and Technical Research (COST) 624*”, a propus modelul Benchmark simulation model no. 1 (BSM1) [42]. O descriere mai detaliată a BSM1 este furnizată în [43] și [44].

Modelul Benchmark No. 2 (BSM2) reprezintă o dezvoltare semnificativă a modelului BSM1 la nivelul stației de tratare, luând în considerare atât linia apei, cât și linia nămolului.. Astfel, pe lângă elementele componente ale BSM1 există: un decantor primar, un agent de îngroșare, un digester anaerob, o unitate de deshidratare și un rezervor de stocare a apei de evacuare. Fișierul de influent pentru BSM2 este generat folosind un model generator de influent prezentat în [48]. O descriere mai detaliată a BSM2 este prezentată în [47] și în [44].

Dezvoltarea modelului BSM2 pentru a include și modele de eliminare a fosforului a fost realizată în [53] și [54].

1.3 Stadiul actual în controlul sistemelor de tratare

În problema controlului automat al stațiilor de tratare există două direcții de abordare. O abordare de control descentralizat care este orientată către controlul principalelor mărimi de interes din proces – controlul oxigenului dizolvat, al azotului sau al fosforului. O altă abordare este una de control bazat pe model matematic al procesului de tratare prin care se urmărește optimizarea funcționării întregii instalații.

Controlul descentralizat, separat, al principalelor mărimi de interes utilizează, în mod uzual, regulatoare clasice de tip *PI* sau *PID*, pentru bucele de reglare a mărimilor de interes cum sunt: oxigenul dizolvat, concentrația de nitrați dintr-un anumit bazin sau, la ieșire, concentrația de amoniu și/sau fosfor din efluent.

Controlul bazat pe modelul matematic al procesului de tratare rezidă în structuri ierarhice de control, pe mai multe niveluri. La nivelul de jos se pot folosi tehnici clasice precum structurile clasice *PI*, *PID* în care, pentru proiectare, se liniarizează modelul neliniar în jurul unui punct de operare, sau tehnici moderne precum controlul liniarizant multivariabil sau în varianta adaptivă, împreună cu un estimator de stare și parametri [39], [55], [56]. Folosind același model au fost implementate tehnici de control robust [57], de tip Quantitative Feedback Theory [58], Gain Scheduling [59], sau H^∞ [60], predictiv [61] sau inteligent [62]. Utilizând modelul ASM1, în [63] se propune o structură ierarhică pe trei niveluri. O altă abordare care se pretează foarte bine conducerii procesului de tratare este dată de controlul bazat pe tehnici de inteligență artificială. Se utilizează cunoștințele dobândite de operatorii umani sub forma unor structuri de reglare de tip sisteme expert, fuzzy, neurofuzzy [64], [65]. De asemenea, tehnici bazate pe date, de tip Virtual Reference Feedback Tuning, au fost propuse în [66].

Capitolul 2

Prezentarea stației de tratare a apelor uzate din municipiul Galați

2.1 Introducere

Principalul obiectiv abordat în cadrul lucrării de doctorat a constat în modelarea matematică și controlul unei stații de tratare a apelor uzate orășenești (aceea a municipiului Galați), stație modernizată recent și care conține toate treptele de tratare, împreună cu echipamentele specifice. Stația de tratare este dimensionată pentru o populație de aproximativ 300000 de locuitori și tratează ape menajere care conțin deșeuri organice, nitriți, nitrați, fosfor etc.

2.2 Structura generală a stației de tratare a apelor uzate

Stația de epurare a apelor uzate din municipiul Galați cuprinde trei trepte de tratare, după cum urmează (Fig. 2.1):

1. treapta de tratare mecanică;
2. treapta de tratare biologică;
3. treapta de tratare a nămolului.



Fig. 2.1 – Imagine de ansamblu a stației de epurare Galați [75]

Problema utilizării nămolului rezultat din stațiile de epurare este una importantă în momentul de față, care generează costuri din ce în ce mai mari pentru comunitatea locală. Acest lucru se întâmplă deoarece există neconcordanțe în legislație care fac imposibilă valorificarea nămolului.

Capitolul 3

Contribuții privind modelarea matematică a unei stații de tratare a apelor uzate

3.1 Introducere

Modelarea matematică a stației de tratare a apelor reziduale din municipiul Galați s-a făcut prin modele consacrate în literatura de specialitate, de tip ASM (*Activated Sludge Model*), ADM (*Anaerobic Digestion Model*) și BSM (*Benchmark Simulation Model*), în mediul de simulare numerică SIMBA, după cum urmează: au fost utilizate modele din familia ASM pentru modelarea efectivă a procesului de tratare biologică, la care s-a adăugat modelul ADM pentru modelarea procesului de digestie anaerobă pentru nămolul rezultat în urma tratării, și modelele de tip BSM pentru definirea influentului, adaptat la cazul încărcărilor apelor reziduale aferente municipiului Galați.

Modelul matematic al stației a fost determinat gradual, începând cu partea de tratare a reziduurilor organice, azot, nitrați, nitriți (prin modele de tip ASM1) și continuând cu tratarea nămolului (modelul ADM1) după care, în pasul al treilea, s-a realizat reducerea fosforului (prin modele de tip ASM2d). De asemenea, capitolul 3 conține o analiză detaliată a performanțelor tehnologice ale stației de tratare pe baza unor indicatori specifici acestor procese pentru un oraș cu o populație cuprinsă între 250000 și 300000 de locuitori, așa cum este aceea a orașului Galați.

3.2 Alegerea influentului pentru stația de tratare (cazul modelelor ASM1 și ADM1)

Proiectarea influentului în stația de tratare are o importanță majoră deoarece el reprezintă principala perturbație a procesului de tratare biologică prin încărcarea sa cu reziduuri. În mod evident, aceste perturbații trebuie rejectate prin legi de control adecvate, astfel încât, la ieșirea din stația de epurare să se obțină un efluent care să respecte legislația referitoare la calitatea apelor uzate și protecția mediului. Pentru stația de tratare a apelor reziduale din municipiul Galați s-a ales un influent pornind de la cel definit în benchmark-ul BSM1, care a fost dimensionat la încărcările specifice apelor reziduale din Galați. În acest scop, au fost definite trei tipuri de influent, corespunzătoare următoarelor situații meteorologice (trei regimuri pluviometrice): “vreme secetoasă”, “vreme ploioasă”, “vreme cu furtună”. Aceste regimuri sunt concretizate în trei seturi de date definite în trei fișiere care conțin valori ale concentrațiilor variabilelor influentului pe o perioadă de 14 zile, achiziționate la un interval de 15 minute. Aceste date sunt reprezentative pentru utilizarea lor în schemele de control ale unei stații de tratare. Cele trei fișiere prezintă variațiile zilnice, diurne și nocturne ale debitului de intrare și ale componentelor organice. De asemenea, au fost incluse tendințele de variație specifice săptămânale ale datelor. Astfel, în perioada de sfârșit de săptămână, vârfurile de debit sunt mai mici decât în celelalte zile ale săptămânii, acestea reprezentând, de fapt, o încărcare normală pentru o stație de tratare biologică.

3.2.1 Regimul “vreme secetoasă”

Primul fișier conține un set de date caracteristic pentru regimul “vreme secetoasă” și descrie variații normale diurne de debit și de încărcare cu substanțe organice (*COD*). Astfel, creșterea maximă a debitului este de 1.74 ori mai mare decât media debitului pe perioada de 14 zile considerată.

3.2.2 Regimul “vreme ploioasă”

Al doilea fișier conține un set de date caracteristice pentru o vreme cu perioade de ploaie. Debitul de influent, în timpul acestui eveniment de ploaie, atinge un nivel de aproape două ori mai mare decât în perioada de vreme secetoasă, acesta fiind crescut o perioadă mai lungă de timp, de peste două zile.

3.2.3 Regimul “vreme cu furtună”

Cel de-al treilea fișier conține un set de date caracteristic pentru o perioadă de vreme secetoasă, cu includerea a două evenimente de furtună. Primul eveniment de furtună are o intensitate ridicată și o durată scurtă, cel de-al doilea are aceeași intensitate, însă o durată ceva mai lungă.

În cadrul primului eveniment al acestei perioade, rețeaua de canalizare este “spălată”, ceea ce duce la o creștere semnificativă a materiilor sub formă de particule care sunt direcționate către stația de tratare. Acest lucru se regăsește în fișierele de date printr-o creștere semnificativă a valorilor concentrației de materie organică inertă în suspensie.

Pentru regimul cu vreme secetoasă, creșterea încărcării cu materie organică este de 2.34 ori mai mare decât media pe aceeași perioadă. Pentru regimul cu vreme ploioasă nu există o variație semnificativă a încărcării cu substanțe organice față de regimul cu vreme secetoasă. Încărcarea cu substanțe organice scade cu 7.6% pentru COD și cu 6.89% pentru BOD5

În timpul primului eveniment de furtună, se elimină particulele din rețelele de transport și are loc o creștere a concentrației de substanțe organice și de solide în suspensie, însă de foarte Pe parcursul celui ce-al doilea eveniment se observă o scădere moderată a încărcării de substanțe organice – COD (în ziua a-11-a). Acest rezultat este vizibil și pentru azot și componentele lui (o scădere moderată a azotului total din componența influentului).

3.3 Evaluarea performanțelor proceselor de tratare

Limitele încărcărilor cu poluanți pentru apele evacuate din stațiile de tratare orășenești sunt stabilite prin lege. În România se utilizează normativul *NTPA – 011* [5]. Se precizează în legislație faptul că, înainte de evacuare în receptorii naturali, apele uzate orășenești trebuie să fie supuse unor procese de tratare biologică în vederea limitării concentrațiilor de substanțe biologice, materiilor în suspensie, concentrațiilor de azot și fosfor total din efluentul deversat. Un alt act normativ, aprobat prin ordinul nr. 163 din 14 aprilie 2005, partea IV, indicativ, *NP 107- 04*, cuprinde prescripții și date necesare proiectării construcțiilor și instalațiilor de pe linia apei unde se realizează procese de tratare avansată a apelor uzate. Tot aici sunt precizate metodele de calcul pentru azot și fosfor din componentele apelor uzate din care se obțin azotul total și fosforul total din efluentul stației de epurare. Azotul total reprezintă azotul din compușii cu azot din apele uzate și este format din azot organic la care se adaugă azotul anorganic. Azotul organic este azotul cuprins în biomasă. Azotul anorganic este format din azotul din amoniu, NH_4-N , azotul din nitrați, NO_3-N , și azotul din nitriți, NO_2-N . Atunci când se cunosc valorile componentelor de mai sus, adică NH_4^+ , NO_3^- , NO_2^- , acestea fiind măsurate sau estimate cu relațiile aferente modelelor matematice, se va calcula cantitatea de azot din fiecare componentă astfel:

$$N_{tot} = NH_4^+ - N + N_{organic} + NO_3^- - N + NO_2^- - N \quad (3.28)$$

$$NH_4^+ - N = 0.777 \cdot NH_4^+ \text{ [mg/l]} \quad (3.29)$$

$$NO_3^- - N = 0.226 \cdot NO_3^- \text{ [mg/l]} \quad (3.30)$$

$$NO_2^- - N = 0.304 \cdot NO_2^- \text{ [mg/l]} \quad (3.31)$$

În calculele parametrilor N_{tot} , $NH_4^+ - N$, $NO_3^- - N$ ai efluentului pentru analiza depășirilor au fost folosite valorile coeficienților din ecuațiile (3.28) – (3.31).

Fosforul total este format din fosfor organic și fosfor mineral sau anorganic. Fosforul mineral este format din fosfat și polifosfați. Având valorile de fosfat și/sau polifosfat din analize de laborator sau din ecuațiile modelelor matematice, valoarea de fosfor total se va calcula astfel:

$$P_{tot} = PO_4^- - P + Polifostat - P + P_{organic} \quad (3.32)$$

$$PO_4^- - P = 0.326 \cdot PO_4^- \text{ [mg/l]} \quad (3.33)$$

La fel ca și în situația anterioară, în calcule parametrilor P_{tot} , $PO_4^- - P$ ai efluentului pentru analiza depășirilor, au fost folosiți coeficienții din ecuațiile (3.32) – (3.33).

Evaluarea performanței strategiei de control aplicate asupra performanțelor stației de epurare și constă în evaluarea unor indicatori de calitate și de cost pe baza parametrilor influentului, efluentului și ai nămolului. Acești indicatori sunt: 1. calitatea efluentului, 2. calitatea influentului, 3. costul de operare și 4. indicele de cost total [43], [47].

3.4 Modelarea stației de tratare considerând și partea de digestie anaerobă (modelele ASM1 și ADM1)

Stația de epurare a municipiului Galați cuprinde patru decantoare secundare și două digestoare anaerobe. În această secțiune se analizează una dintre cele 4 linii de tratare biologică, prevăzută cu un decantor primar la intrare și un digester pentru fermentarea anaerobă a nămolului.

3.4.1 Implementarea modelului matematic în mediul de simulare SIMBA

Decantoarele primare produc o cantitate de nămol care este transferată direct în digesterul anaerob. Cantitatea extrasă zilnic este de aproximativ 200 m³ pentru toate cele patru unități. Astfel, pentru o singură linie de tratare, s-a considerat că debitul de nămol extras este în funcție de debitul de influent care intră în stația de tratare, însă limitat la valoarea de 50 m³/zi.

3.4.2 Analiza parametrilor de intrare, ieșire și a mărimilor măsurabile ale procesului

Privind instalația din punct de vedere sistemic, procesul biologic de tratare a apei și fermentarea a nămolului poate fi reprezentat astfel (Fig. 3.55):

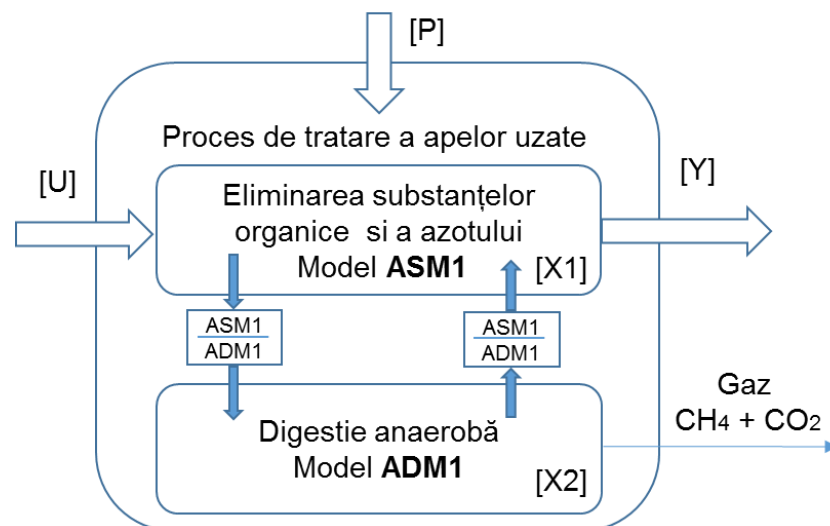


Fig. 3.55 - Modelul procesului de tratare a apelor uzate care conține și digesterul anaerob (modelul ASM1 cuplat cu ADM1)

3.4.3 Rezultate obținute prin simulare

Modelul stației de epurare, care include și digesterul anaerob, a fost simulat în toate cele trei regimuri considerate, regimul de vreme secetoasă, regimul de vreme ploioasă și regimul de vreme cu furtună. Influentul este cel descris în secțiunea 3.2, folosit și în simulările anterioare, urmărind limitele impuse pentru concentrațiile efluentului (trasate cu culoare roșie în figurile următoare). Simulările au fost realizate în buclă deschisă, având valori constante pentru oxigenul insuflat în bazinele aerate, pentru debitele de recirculare – externă și internă – și pentru debitul de nămol în exces. Au fost considerate două puncte de operare. Simularea a fost realizată pentru o perioadă de 180 de zile, iar concentrațiile pentru încărcările organice, solidele în suspensie și azot sunt calculate pe perioada ultimelor 14 zile ale perioadei de simulare.

- Punctul A de operare - Cazul regimului vreme secetoasă (Fig. 3.56 – 3.58)

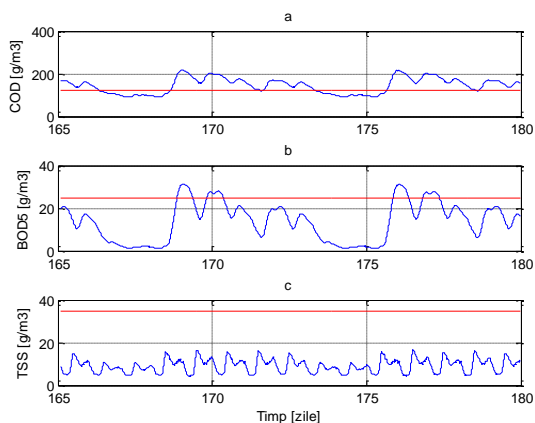


Fig. 3.56 - Încărcări biologice ale efluentului în punctul A de operare, „vreme secetoasă”

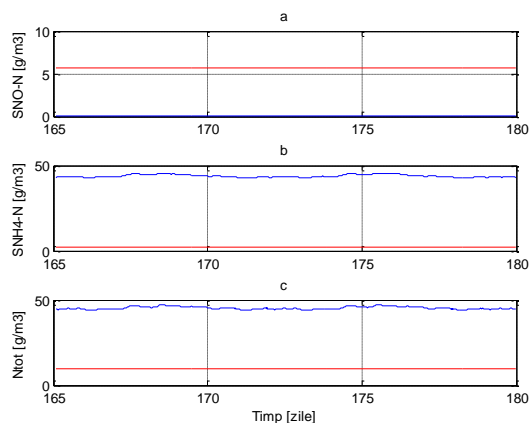


Fig. 3.57 - Încărcări cu azot ale efluentului în punctul A de operare, „vreme secetoasă”

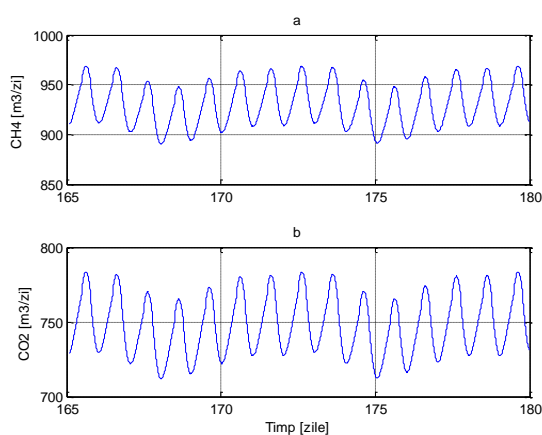


Fig. 3.58 - Producția de gaz în punctul A de operare, „vreme secetoasă”

- Punctul A de operare - Cazul regimului vreme ploioasă (Fig. 3.59 – 3.61)

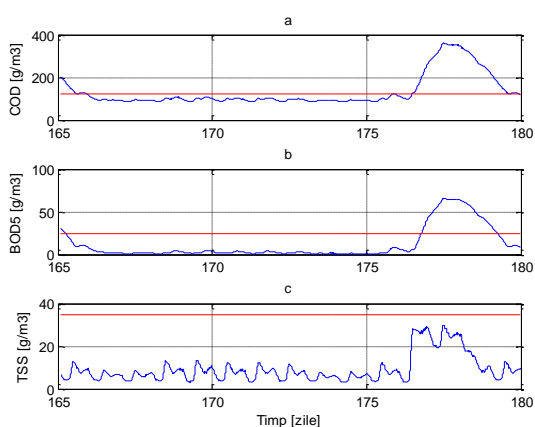


Fig. 3.59 - Încărcări biologice ale efluentului în punctul A de operare, „vreme ploioasă”

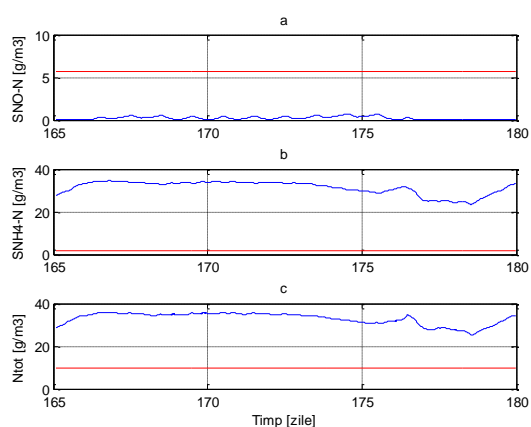


Fig. 3.60 - Încărcări cu azot ale efluentului în punctul A de operare, „vreme ploioasă”

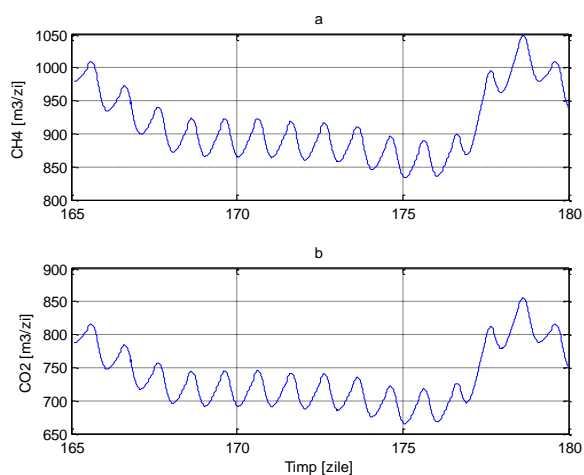


Fig. 3.61 - Producția de gaz în punctul A de operare, „vreme ploioasă”

- Punctul A de operare - Cazul regimului vreme cu furtună (Fig. 3.62 – 3.64)

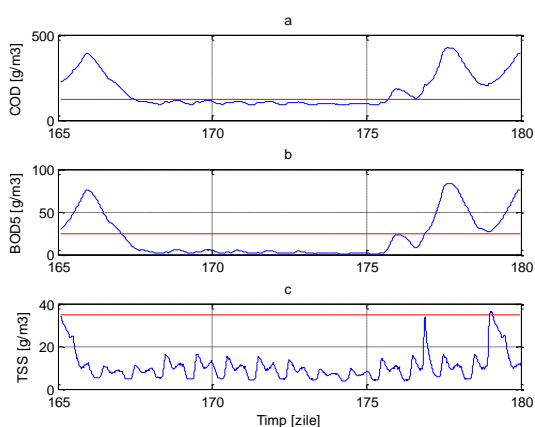


Fig. 3.62 - Încărcări biologice ale efluentului în punctul A de operare, „vreme cu furtună”

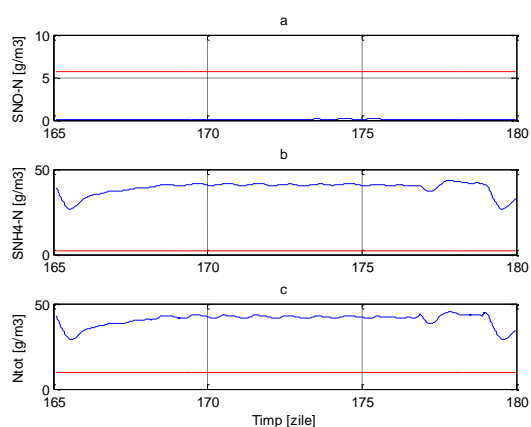


Fig. 3.63 - Încărcări cu azot ale efluentului în punctul A de operare, „vreme cu furtună”

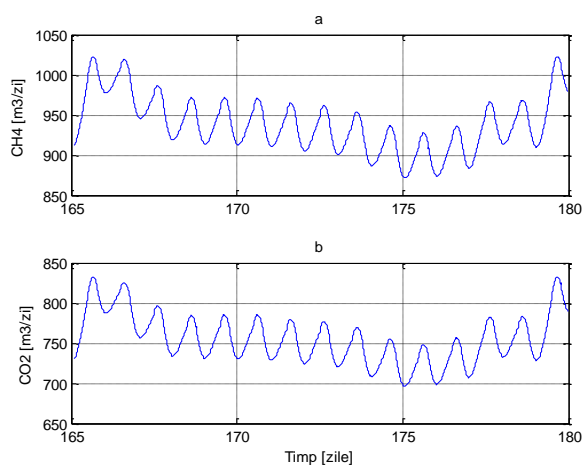


Fig. 3.64 - Producția de gaz în punctul A de operare, „vreme cu furtună”

- Punctul B de operare - Cazul regimului vreme secetoasă (Fig. 3.65 – 3.67)

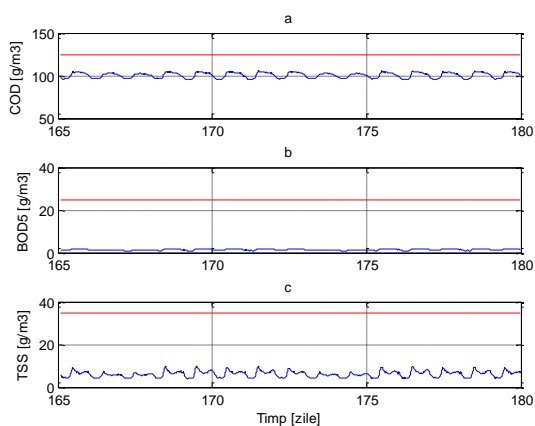


Fig. 3.65 - Încărcări biologice ale efluentului în punctul B de operare, “vreme secetoasă”

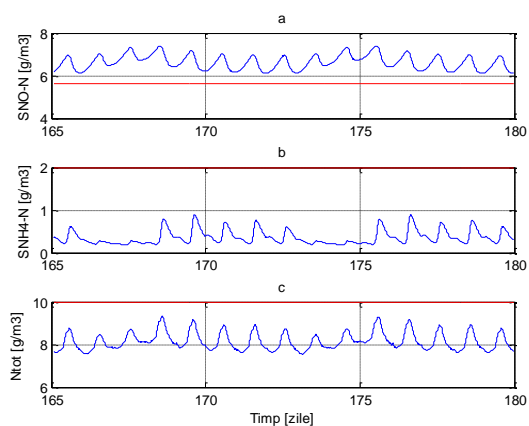


Fig. 3.66 - Încărcări cu azot ale efluentului în punctul B de operare, “vreme secetoasă”

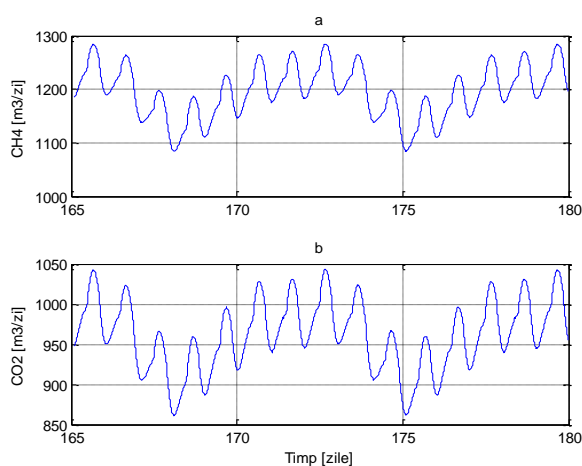


Fig. 3.67 - Producția de gaz în punctul B de operare, “vreme secetoasă”

- Punctul B de operare - Cazul regimului vreme ploioasă (Fig. 3.68 – 3.70)

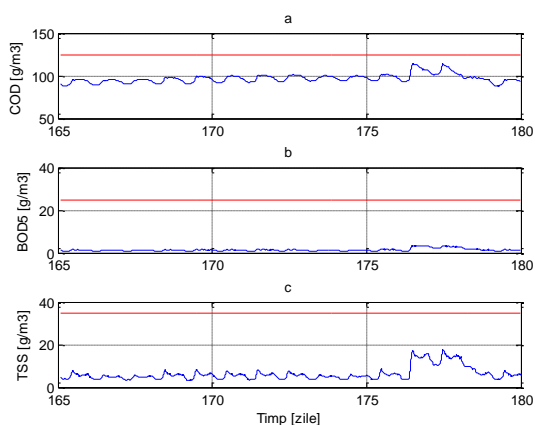


Fig. 3.1 - Încărcări biologice ale efluentului în punctul B de operare, “vreme ploioasă”

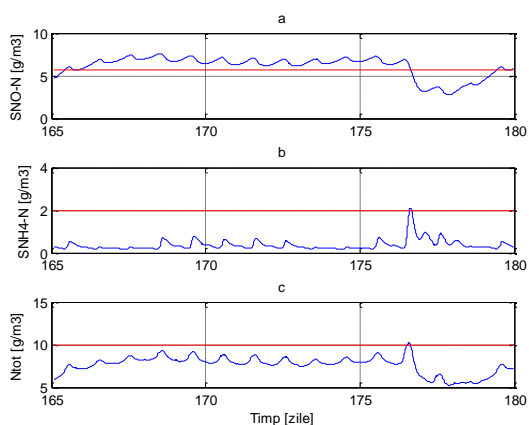


Fig. 3.69 - Încărcări cu azot ale efluentului în punctul B de operare, “vreme ploioasă”

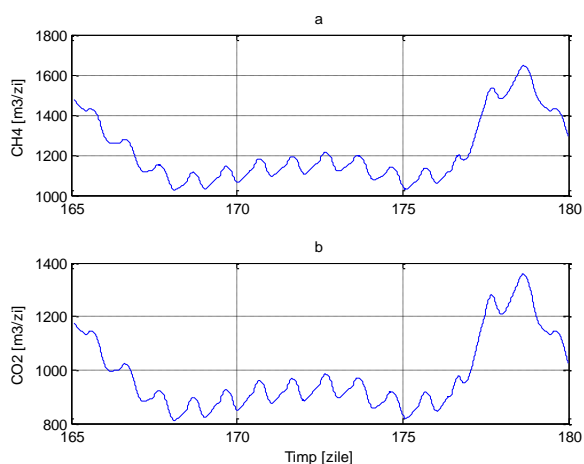


Fig. 3.70 - Producția de gaz în punctul *B* de operare, "vreme ploioasă"

- Punctul *B* de operare - Cazul regimului vreme cu furtună (Fig. 3.71 – 3.73)

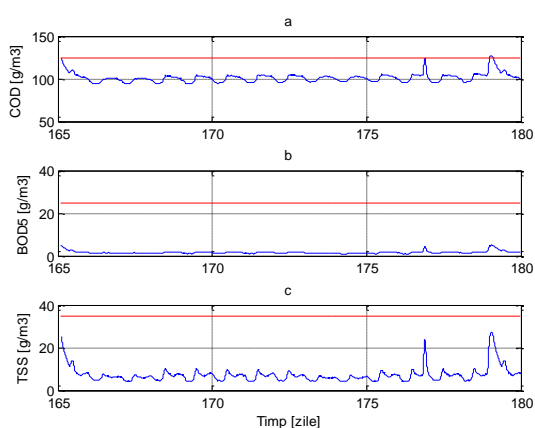


Fig. 3.2 - Încărcări biologice ale efluentului în punctul *B* de operare, "vreme cu furtună"

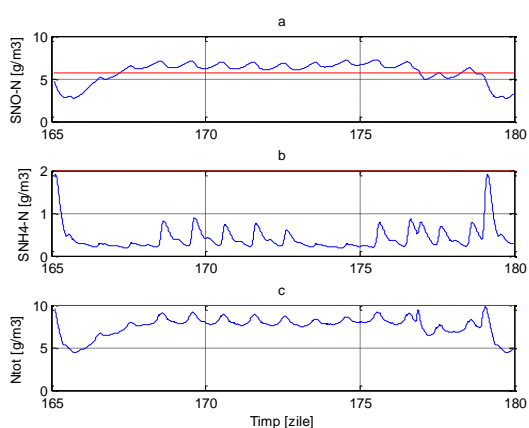


Fig. 3.72 - Încărcări cu azot ale efluentului în punctul *B* de operare, "vreme cu furtună"

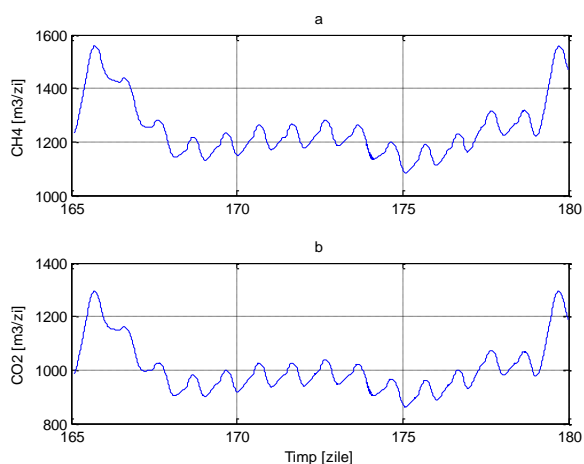


Fig. 3.73 - Producția de gaz în punctul *B* de operare, "vreme cu furtună"

Analizând rezultatele obținute prin simularea funcționării stației de epurare în punctele *A* și *B* pentru cazul când se urmărește eliminarea substanțelor organice, a azotului și a componentelor sale, la care s-a adăugat și partea de digester anaerob, precum și din

calculul indicatorilor în cele două puncte de operare, rezultă ca: în punctul *B* de operare calitatea efluentului este semnificativ mai bună comparativ cu punctul *A* de operare (*EQ* are valoare mai mică în *B*), însă cu un cost aproximativ de 2.5 ori mai mare, acest lucru datorându-se unor consumuri energetice mai mari.

3.5 Modelarea stației de tratare incluzând și eliminarea fosforului (modelul ASM2d)

Schema Simulink cuprinde, în acest caz, modelul ASM2d, derivat din modelul ASM1, pentru eliminarea substanțelor organice (carbon, azot și componentele acestora) la care se adaugă partea de model corespunzătoare eliminării fosforului. Eliminarea fosforului se face prin adăugare de clorură ferică.. Structura stației este similară cu cea din [84] însă influențul este obținut pe baza valorilor de concentrații măsurate în stație.

3.5.1 Analiza parametrilor de intrare, ieșire și a mărimilor măsurabile ale procesului

Reprezentarea sistemică a procesului de tratare a apelor uzate incluzând și eliminarea fosforului este data în Fig. 3.75:

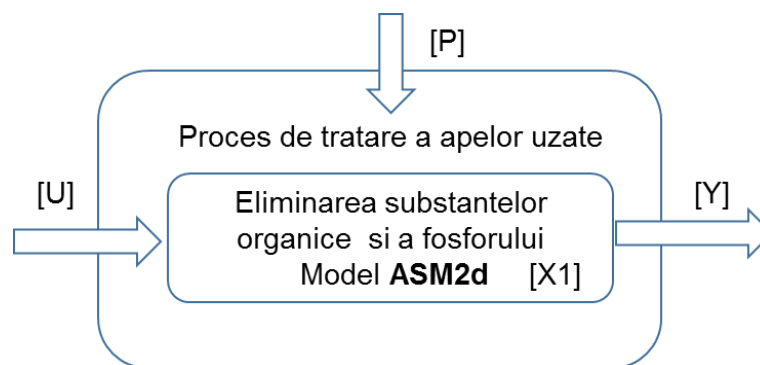


Fig. 3.75 - Schema sistemică a procesului de tratare a apelor uzate incluzând și eliminarea fosforului (ASM2d)

3.5.2 Rezultate obținute prin simulare

- Punctul A de operare, vreme secetoasă – ASM2d (Fig. 3.76 – 3.78)

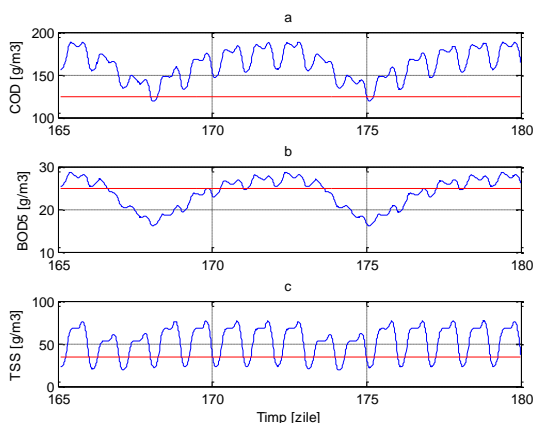


Fig. 3.76 - Încărcări biologice ale efluentului în punctul A de operare, "vreme secetoasă"

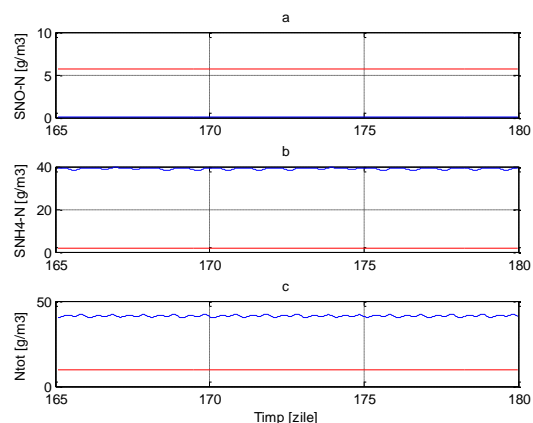


Fig. 3.77 - Încărcări cu azot ale efluentului în punctul A de operare, "vreme secetoasă"

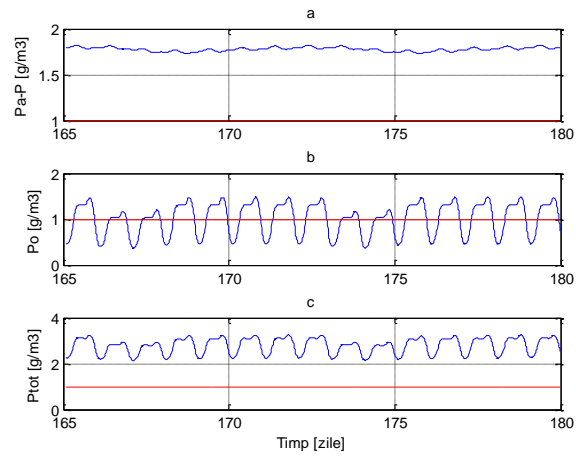


Fig. 3.78 - Încărcări cu fosfor ale efluentului în punctul A de operare, „vreme secetoasă”

- Punctul A de operare, vreme ploioasă – ASM2d (Fig. 3.79 – 3.81)

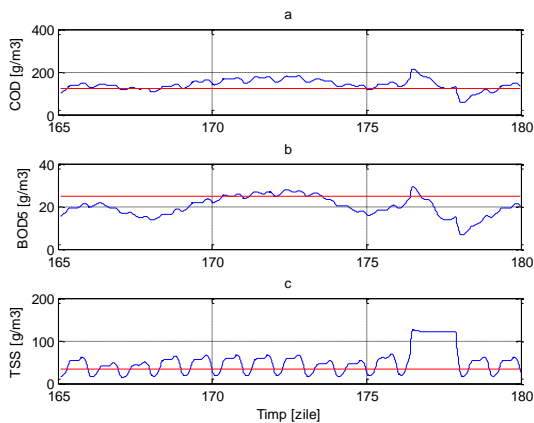


Fig. 3.79 - Încărcări biologice ale efluentului în punctul A de operare, “vreme ploioasă”

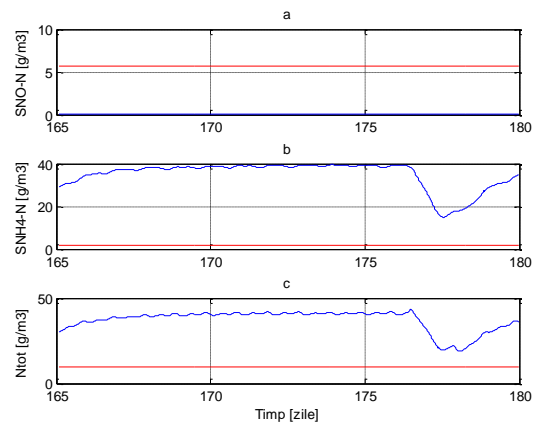


Fig. 3.80 - Încărcări cu azot ale efluentului în punctul A de operare, “vreme ploioasă”

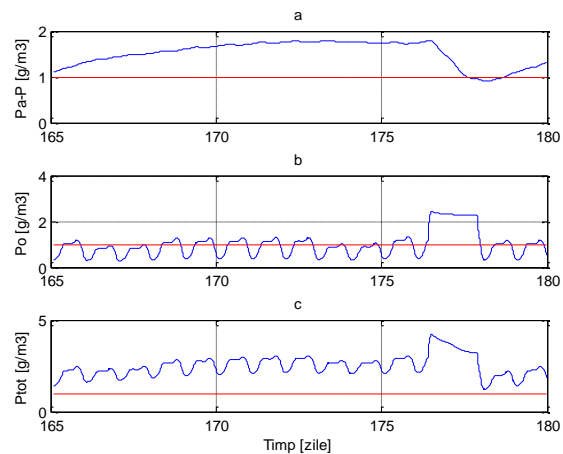


Fig. 3.81 - Încărcări cu fosfor ale efluentului în punctul A de operare, „vreme ploioasă”

- Punctul A de operare, vreme cu furtună – ASM2d (Fig. 3.82 – 3.84)

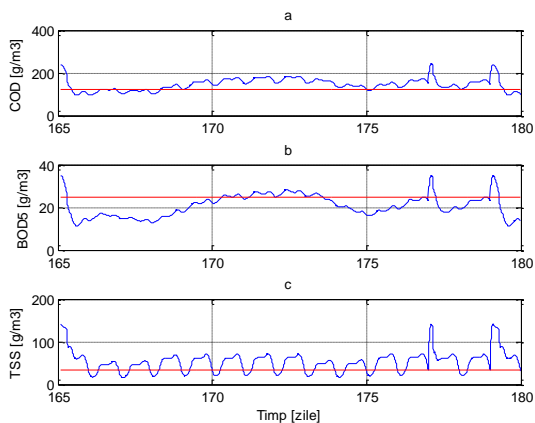


Fig. 3.82 - Încărcări biologice ale efluentului în punctul A de operare, “vreme cu furtună”

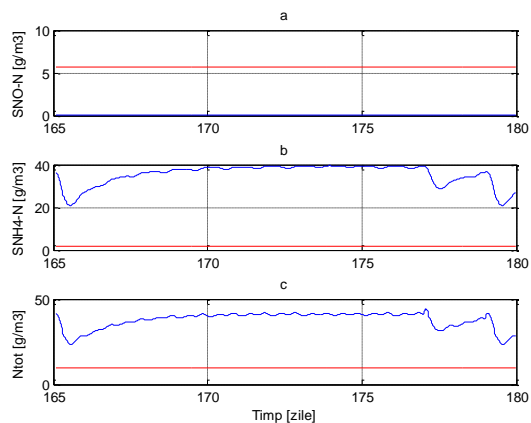


Fig. 3.83 - Încărcări cu azot ale efluentului în punctul A de operare, “vreme cu furtună”

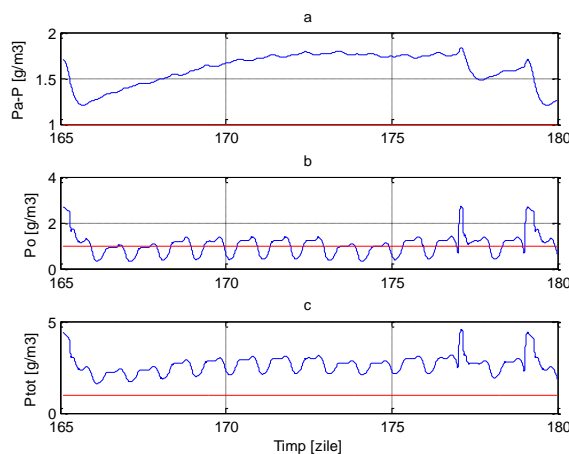


Fig. 3.84 - Încărcări cu fosfor ale efluentului în punctul A de operare, “vreme cu furtună”

- Punctul B de operare, vreme secetoasă – ASM2d (Fig. 3.85 – 3.87)

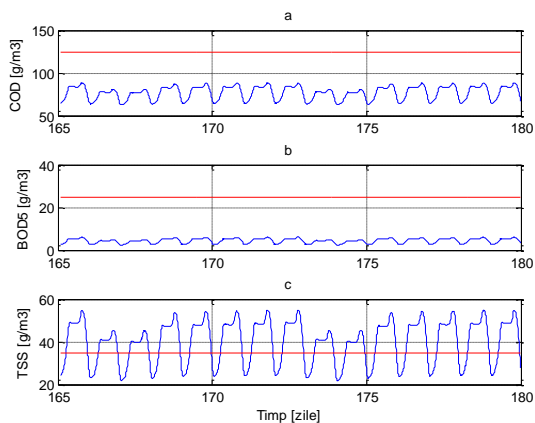


Fig. 3.85 - Încărcări biologice ale efluentului în punctul B de operare, “vreme secetoasă”

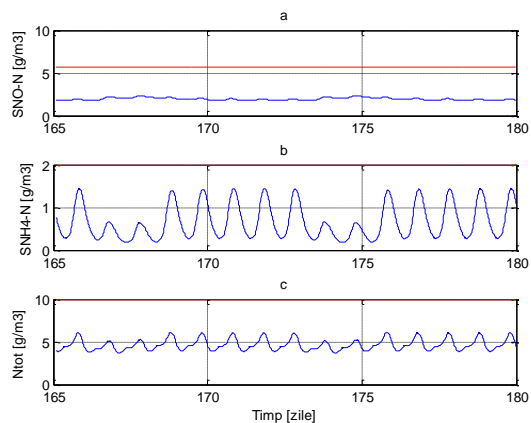


Fig. 3.86 - Încărcări cu azot ale efluentului în punctul B de operare, “vreme secetoasă”

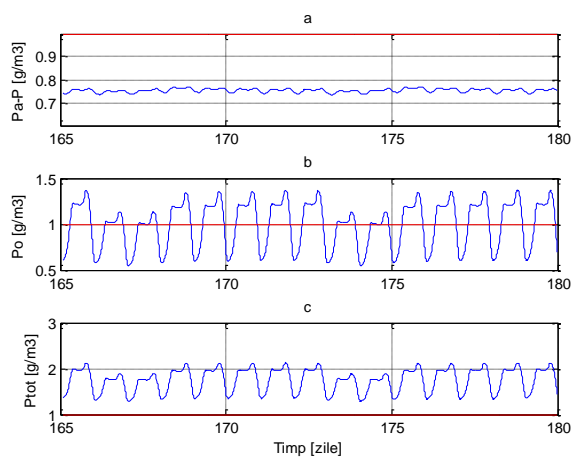


Fig. 3.87 - Încărcări cu fosfor ale efluentului în punctul *B* de operare, “vreme secetoasă”

- Punctul *B* de operare, vreme ploioasă – ASM2d (Fig. 3.88 – 3.90)

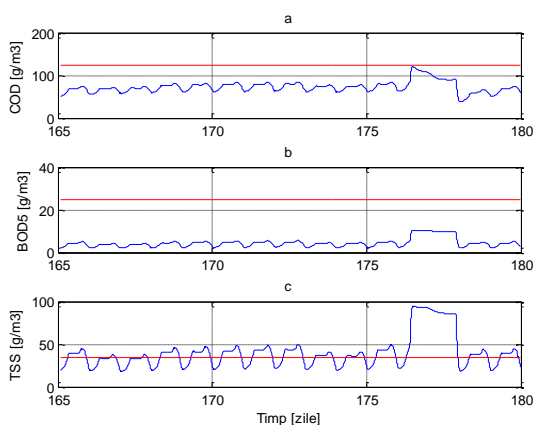


Fig. 3.88 - Încărcări biologice ale efluentului în punctul *B* de operare, “vreme ploioasă”

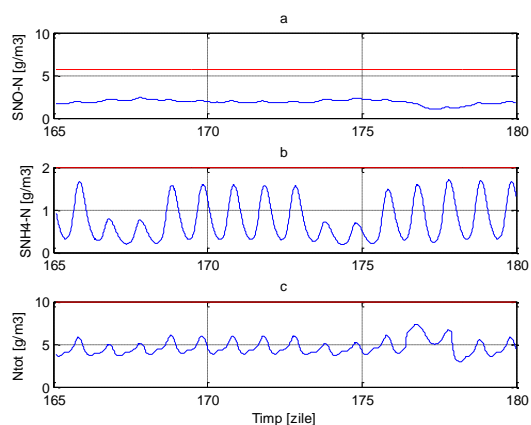


Fig. 3.89 - Încărcări cu azot ale efluentului în punctul *B* de operare, “vreme ploioasă”

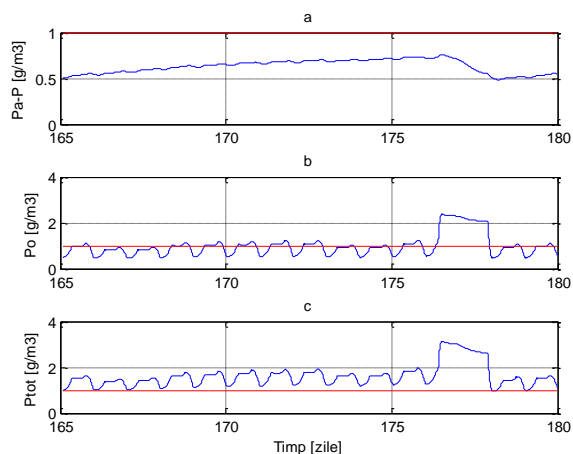


Fig. 3.90 - Încărcări cu fosfor ale efluentului în punctul *B* de operare, “vreme ploioasă”

- Punctul B de operare, vreme cu furtună – ASM2d (Fig. 3.91 – 3.93)

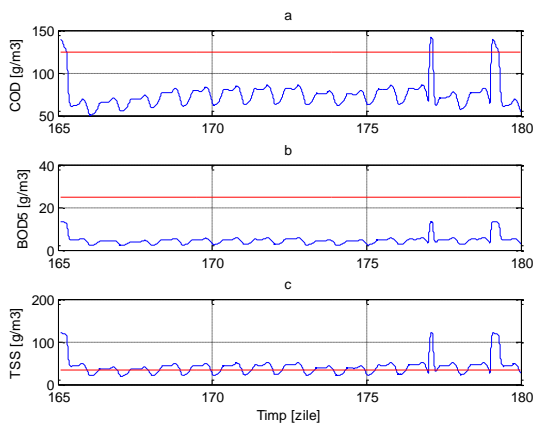


Fig. 3.91 - Încărcări biologice ale efluentului în punctul B de operare, “vreme cu furtună”

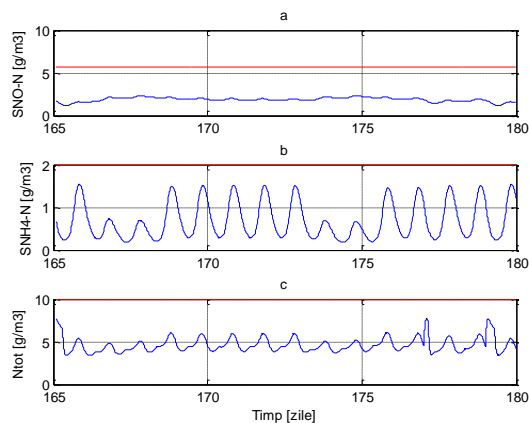


Fig. 3.92 - Încărcări cu azot ale efluentului în punctul B de operare, “vreme cu furtună”

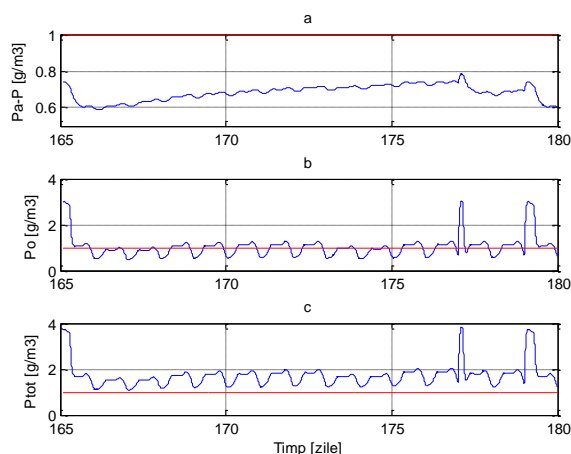


Fig. 3.93 - Încărcări cu fosfor ale efluentului în punctul B de operare, “vreme cu furtună”

Analiza rezultatelor obținute prin simularea funcționării stației de epurare în punctele de operare A și B pentru cazul când se urmărește eliminarea substanțelor organice, a azotului și a fosforului din apa uzată, instalație modelată cu modelul matematic ASM2d, precum și din calculul indicatorilor în cele două puncte de operare menționate, arată următoarele:

- Din Fig. 3.76 – 3.84 (punctul A de operare) rezultă depășiri foarte mari la toți parametrii de calitate importanți ai efluentului stației de epurare (COD , BOD_5 , TSS , T_{khj} , N_{tot} și P_{tot}).
- Din Fig. 3.85 – 3.93 (punctul B de operare) rezultă depășiri la doi dintre principalii parametri de calitate (TSS și P_{tot}) în cele trei regimuri de operare. În acest caz, P_{tot} depășește permanent limita în toate regimurile de operare.

Capitolul 4

Contribuții privind controlul unei stații de tratare a apelor uzate

4.1 Introducere

În capitolul 3 al prezentei teze de doctorat (Contribuții privind modelarea procesului de tratare a apelor uzate) au fost utilizate, ca date de intrare, concentrațiile și debitele influentului, folosite ca bază de proiectare pentru stația de epurare a apelor uzate din municipiul Galați. Concluziile simulărilor efectuate în capitolul 3 arată faptul că stația de tratare are anumite limitări în funcționare dacă încărcările reale ar fi cele maxime pentru care a fost proiectată, în special pe partea de eliminare a fosforului. Analiza realizată în [69] în care autorii folosesc referințe diferite pe intervale orare și pentru weekend a arătat că nu se obțin îmbunătățiri semnificative ale indicatorilor de performanță. S-a considerat mai utilă o abordare comparativă a mai multor strategii de control care utilizează același tip de lege de reglare cu referințe fixe pe toată perioada de simulare, decât folosirea mai multor tehnici de control. Aceasta deoarece, la nivelul întregului sistem, parametrii și indicatorii de calitate sunt influențați, în cea mai mare măsură, de alegerea referințelor și a punctelor de operare în care se desfășoară procesele de tratare.

4.2 Prezentarea influentului real al stației de tratare pentru modelele ASM1 și ADM1

Pentru o evaluare corectă a strategiilor de control aferente stației de tratare, a fost utilizat un influent cu o compoziție cât mai apropiată de cel colectat în municipiul Galați **la momentul actual** (în anul 2017) și care va fi procesat de stația de tratare. Pentru evaluarea strategiilor de control s-a generat un fișier cu date caracteristice influentului compus din toate cele trei regimuri, după cum urmează: primele două săptămâni sunt de vreme secetoasă, următoarele două săptămâni sunt aferente regimului vreme ploioasă, urmează un nou regim de vreme secetoasă, următoarele două săptămâni corespund regimului vreme cu furtună iar pentru ultimele două săptămâni din serie se alege din nou o perioadă cu vreme secetoasă. În acest fel, rezultă un fișier cu date ale componentelor influentului care durează o perioadă de 70 de zile în care apar două perturbații generate de evenimentele meteorologice considerate, un eveniment corespunzând regimului vreme ploioasă și unul celui de vreme cu furtună. Pentru obținerea unor rezultate cât mai veridice, în cadrul simulărilor au fost concatenate trei astfel de fișiere cu datele influentului, rezultând un fișier cu date pe o durată de aproximativ șapte luni (210 zile) și cu șase evenimente de vreme ploioasă și vreme cu furtună.

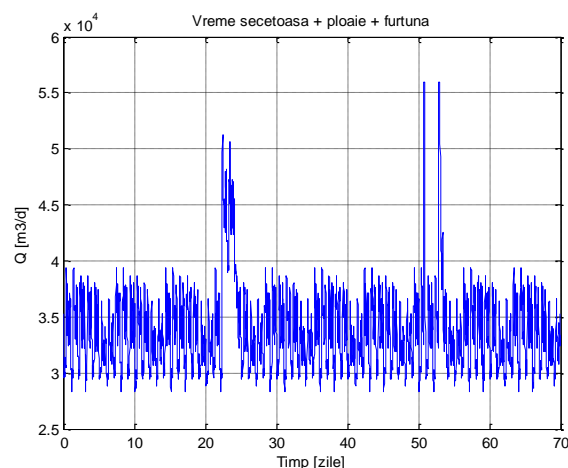


Fig. 4.10 - Variația debitului influentului combinat

4.3 Strategii pentru controlul stației de tratare în vederea eliminării substanțelor organice și a azotului

Stația de tratare care deservește municipiul Galați este modelată în mediul SIMBA utilizând modele de tip ASM1 pentru reactoarele biologice (bazinele $B_1 - B_7$) și modelul ADM1 pentru digesterul anaerob. Modelul stației este similar cu cel prezentat în secțiunea 3.4. El include, ca elemente principale, un decantor primar, o linie de tratare biologică formată din șapte bazine, decantorul secundar și digesterul anaerob precedat de un sistem de îngroșare a nămolului. O schemă simplificată a stației de tratare este prezentată în Fig. 4.21.

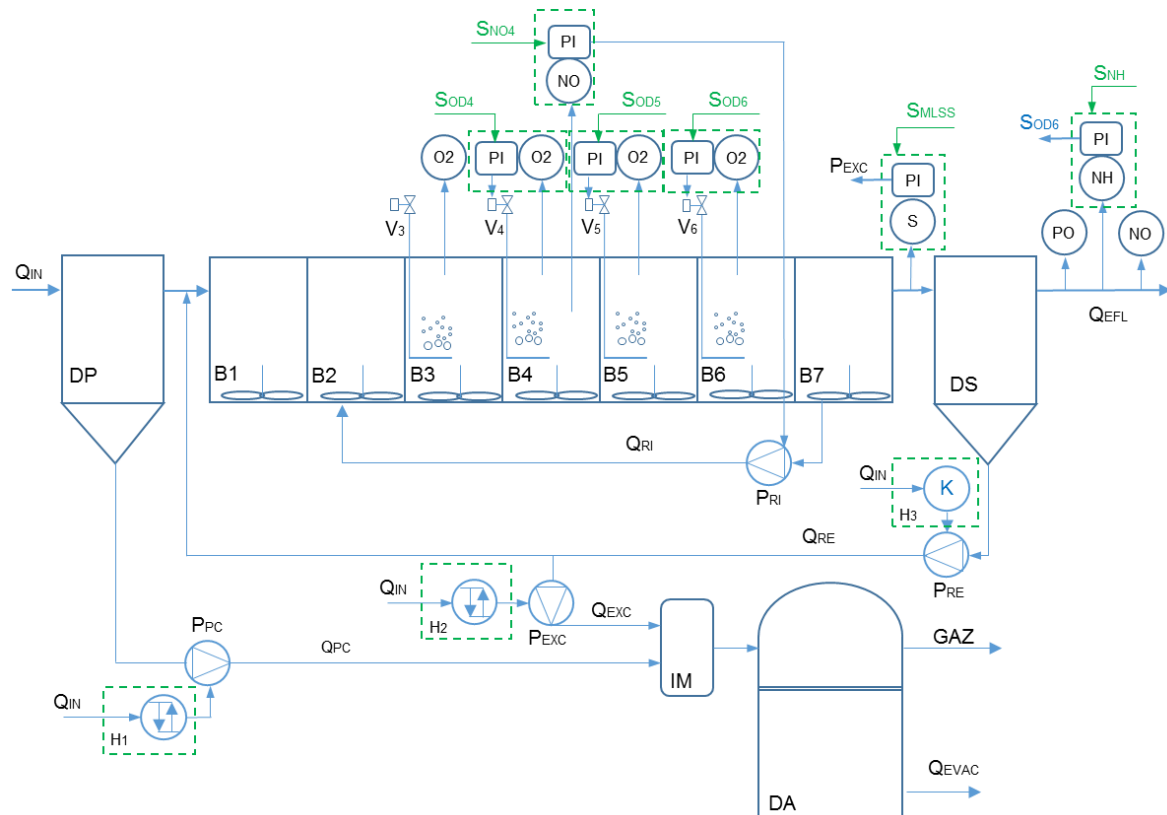


Fig. 4.21 - Schema simplificată a stației de tratare – model ASM1 + ADM1

Pentru evaluarea strategiilor de control se va utiliza influentul agregat, format din alternarea perioadelor de vreme secetoasă, vreme ploioasă și vreme cu furtună, așa cum a fost prezentat în secțiunea 4.3, pentru o perioadă totală de 210 de zile. Analiza funcționării, calculul indicatorilor și al depășirilor s-a realizat pe ultimele 70 de zile dintre cele 210 ale simulării.

Au fost considerate cinci strategii de control care utilizează reglatoare clasice de tip PI în buclele de reglare implementate (cele pentru reglarea concentrațiilor de oxigen dizolvat, a nitraților prin intermediul recirculării interne, a materiei solide în suspensie prin intermediul debitului de nămol excedentar, reglarea amoniului din efluent prin intermediul referinței de oxigen dizolvat în bazinul B_6). Schema de reglare include o secvență anti-windup pentru limitarea efectului componentei integratoare a regulatorului atunci când sunt impuse limitări tehnologice de operare ale elementelor de execuție. Parametrii reglatoarelor sunt similari cu cei folosiți în BSM2 însă ajustați la mărimile de comandă și schema folosită.

Cele cinci strategii de control considerate în lucrare determină cinci puncte diferite de operare a stației de tratare permițând alegerea acelei strategii pentru care rezultă un număr minim de depășiri de limite ale efluentului, costuri minime de operare și, în final, o calitate foarte bună a efluentului. Parametrii efluentului, costurile de operare precum și indicatorii de calitate ai acestuia sunt calculați conform relațiilor din secțiunea 3.5.

Cele cinci strategii considerate sunt următoarele:

Strategia S_1 – Procesul funcționează în buclă deschisă

În cadrul acestei strategii de control se consideră bazinele B_4 , B_5 și B_6 ca fiind aerate, bazinele B_2 și B_3 sunt anoxice iar bazinul B_1 - anaerob. Sunt în funcțiune, de asemenea, următoarele subsisteme: recircularea internă, recircularea externă, extragerea de nămol în exces, precum și extragerea de nămol din decantorul primar. În această situație, elementele de execuție sunt comandate la valoarea maximă de operare din datele de proiectare ale stației de tratare, fără reglare. Se reamintește faptul că prin punctul de operare B se înțelege un punct de operare a procesului în buclă deschisă, cu toate elementele de execuție comandate la valorile maxime din specificația de proiectare a stației de tratare. Pentru strategia S_1 , în Fig. 4.22 – 4.24 sunt prezentate evoluțiile parametrilor efluentului și producția de gaz metan din digesterul anaerob pentru ultimele 70 de zile analizate.

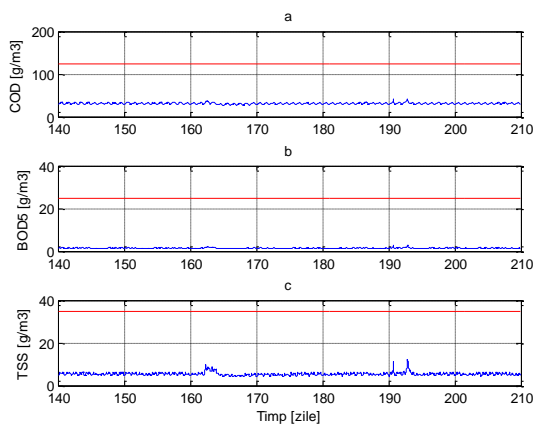


Fig. 4.22 - Variațiile încărcărilor organice în cazul strategiei S_1

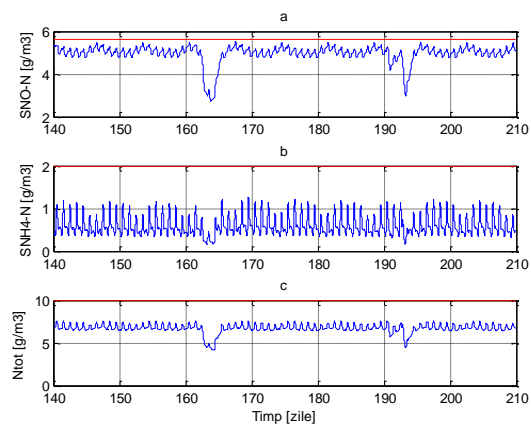


Fig. 4.23 - Variațiile încărcărilor cu azot în cazul strategiei S_1

Valorile încărcărilor organice, COD și BOD_5 , precum și aceea a concentrației de substanțe solide în suspensie, TSS , sunt sub limita legală urmărită. Perturbațiile debitului de intrare datorate evenimentelor de ploaie și de furtună sunt rejectate, variațiile mărimilor datorate acestor perturbații sunt aproape inexistente. Azotul total se află în limitele admise, se observă o scădere a acestuia la evenimentele de ploaie și de furtună. Concentrația de azot amoniacal este sub limita maximă admisă, media este chiar sub jumătatea limitei legale iar concentrația de nitrați se încadrează în limite, variațiile ajungând aici foarte aproape de limită. Pe perioada evenimentelor de ploaie, o scădere mai pronunțată se produce pentru azotul din nitrat și pentru azotul total, pentru azotul amoniacal variațiile nefiind semnificative.

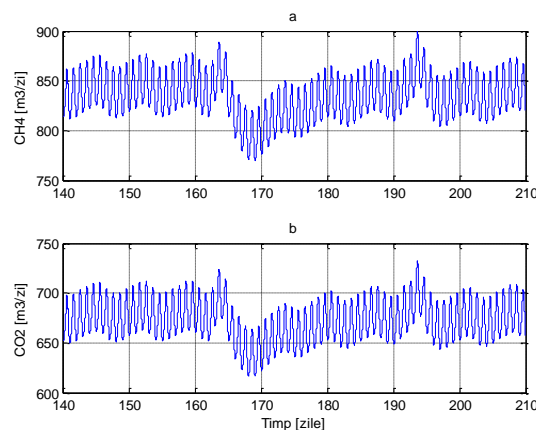


Fig. 4.24 - Producția de CH_4 și CO_2 din digesterul anaerob în cazul strategiei S_1

Strategia S_2 – Reglarea concentrației de O_2 dizolvat în bazinele B_5 și B_6 și a concentrației de nitrați în bazinul B_4 prin intermediul recirculării interne

În cadrul acestei strategii se configurează bazinele după cum urmează: se păstrează bazinul B_1 anaerob iar B_2 și B_3 anoxice. Conținutul acestor trei bazine este continuu amestecat prin intermediul mixerelor. Bazinul B_4 este considerat anoxic, deci nu se insuflă oxigen, și este cu amestecare continuă. Bazinele B_5 și B_6 se consideră în continuare aerate, referințele de oxigen dizolvat pentru fiecare dintre ele fiind setate la 4 mg/l. Leșirile reguletoarelor de oxigen dizolvat reprezintă comenzile de deschidere sau închidere pentru vanele de reglare de pe circuitul de aer al suflantelor. În bazinul B_4 se reglează concentrația de nitrați prin intermediul recirculării interne. Referința de nitrați (NO_3) este setată la 1 mg/l. Leșirea regulatorului aferent recirculării interne reprezintă comanda variației turației motorului pompei și, deci, de creștere sau scădere a debitului de recirculare internă. Nămolul în exces este extras în funcție de valoarea debitului de intrare. Astfel, dacă debitul de intrare depășește valoarea de 40000 m³, atunci referința de debit de nămol extras de către pompele de nămol în exces este de 720 m³ de nămol. Dacă debitul de intrare scade sub valoarea de 38500 m³, atunci referința este de 360 m³. Nămolul din decantorul primar este extras după aceeași regulă ca și nămolul în exces. Pentru un debit de intrare care depășește 40000 m³ se va impune pompelor un debit de extracție de 250 m³, iar pentru cazul în care debitul este sub 38500 m³, referința va fi de 60 m³ de nămol extras.

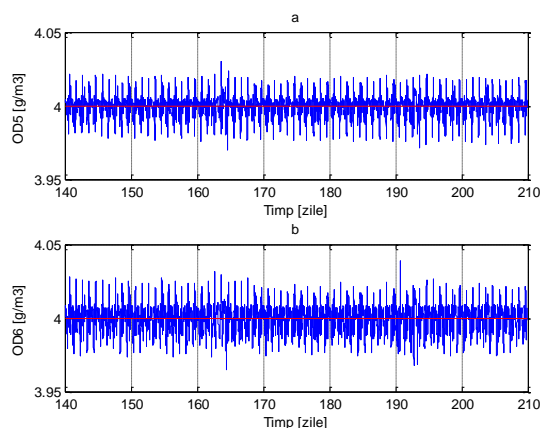


Fig. 4.26 - Reglarea concentrației de O_2 dizolvat în bazinele B_5 și B_6

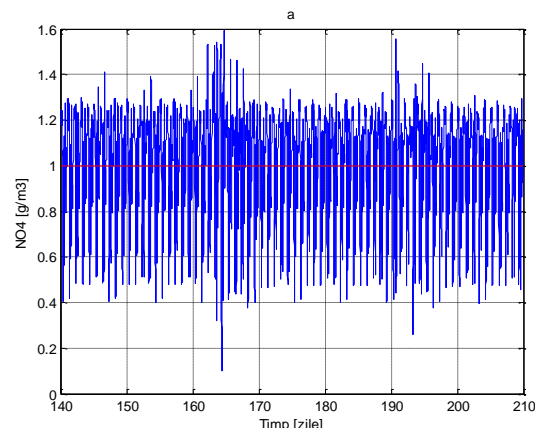


Fig. 4.27 - Reglarea concentrației de nitrat în bazinul B_4

Pentru ultimele 70 de zile analizate, variațiile parametrilor efluentului și producția de gaz metan din digesterul anaerob sunt prezentate în Fig. 4.28 – 4.30.

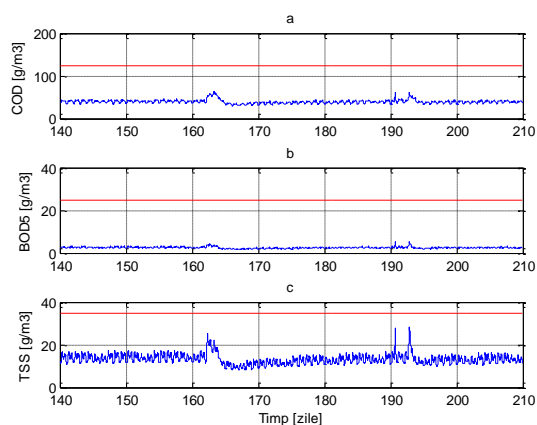


Fig. 4.28 - Variațiile încărcărilor organice în cazul strategiei S_2

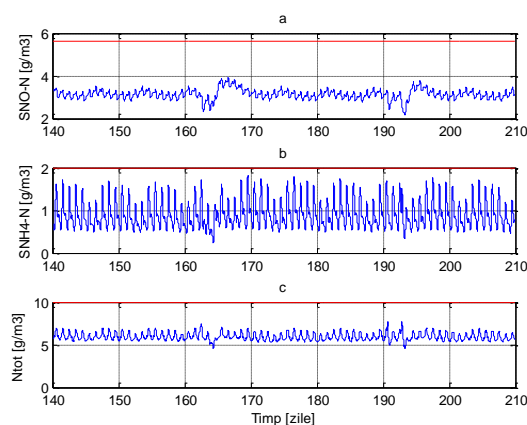


Fig. 4.29 - Variațiile încărcărilor cu azot în cazul strategiei S_2

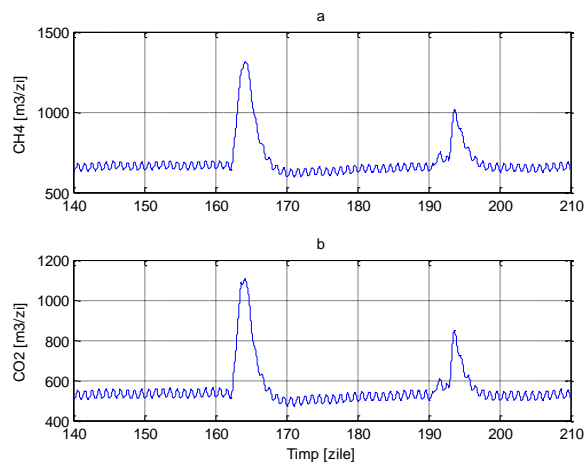


Fig. 4.30 - Producția de CH_4 și CO_2 din digesterul anaerob în cazul strategiei S_2

În Fig. 4.26 – 4.27 sunt prezentate evoluțiile concentrațiilor de O_2 dizolvat în bazinele B_5 și B_6 și a celei de nitrați în bazinul B_4 la referințele impuse (4 mg/l și, respectiv 1 mg/l). Se observă că mărimile menționate urmăresc referințele impuse. Valorile încărcărilor organice, COD și BOD_5 , precum și a concentrației de substanțe solide în suspensie, TSS , obținute din efluentul stației de tratare în cadrul acestei strategii sunt sub limita legală impusă.

Strategia S_3 – Reglarea concentrației de O_2 dizolvat în bazinele B_4 , B_5 , B_6 și a concentrației de nitrați în bazinul B_4 prin intermediul recirculării interne

În cadrul acestei strategii se păstrează bazinul B_1 anaerob, iar bazinele B_2 și B_3 anoxice. Aceste trei bazine sunt continuu amestecate prin intermediul mixerelor. Bazinele B_4 , B_5 și B_6 vor fi aerate, referința de oxigen dizolvat pentru bazinul B_4 fiind setată la 0.4 mg/l, iar pentru bazinele B_5 și B_6 referința de oxigen dizolvat este de 2 mg/l. Leșirea reglatoarelor de oxigen dizolvat reprezintă comanda de deschidere sau închidere pentru vana de reglare de pe circuitul de aer al suflantelor. În bazinul B_4 se reglează concentrația de nitrați prin intermediul recirculării interne. Referința de nitrați (NO_3) este de 5 mg/l. Leșirea regulatorului reprezintă comanda de variație a turației motorului pompei și, deci, de creștere sau scădere a debitului recirculat, în mod similar cu strategia de control S_2 . Cantitatea de nămol în exces extras precum și nămolul extras din decantorul primar este impusă după aceleași reguli ca și în cazul strategiei S_2 .

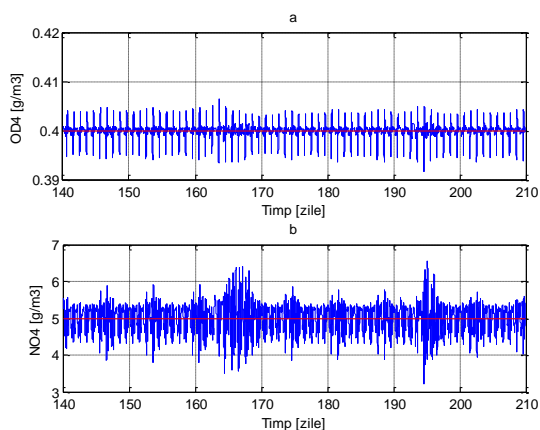


Fig. 4.32 - Reglarea concentrației de O_2 dizolvat și a nitraturii în bazinul B_4

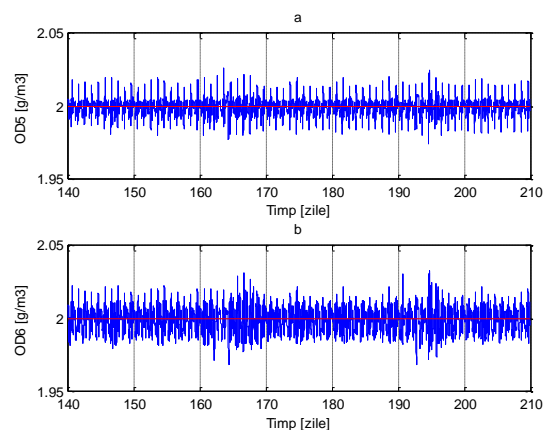


Fig. 4.33 - Reglarea concentrației de O_2 dizolvat în bazinele B_5 și B_6

Pentru ultimele 70 de zile analizate, variațiile parametrilor efluentului și producția de gaz metan din digesterul anaerob sunt prezentate în Fig. 4.34 – 4.36.

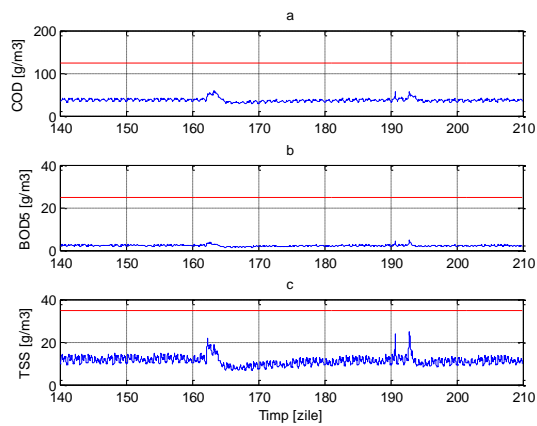


Fig. 4.34 - Variațiile încărcărilor organice în cazul strategiei S_3

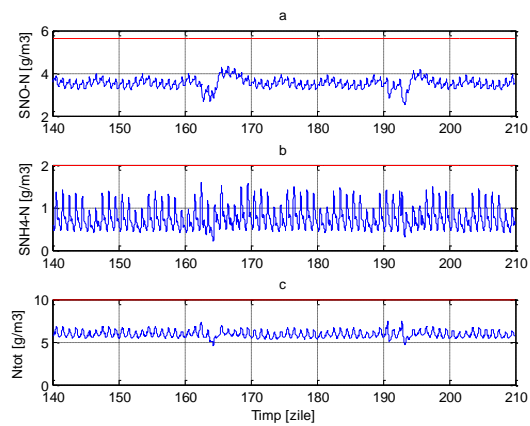


Fig. 4.35 - Variațiile încărcărilor cu azot în cazul strategiei S_3

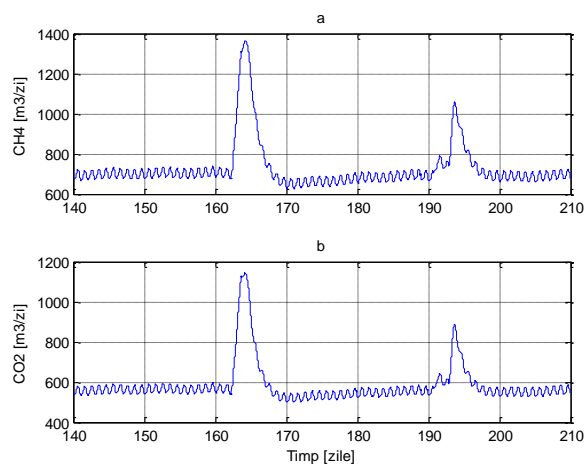


Fig. 4.36 - Producția de CH_4 și CO_2 din digestorul anaerob în cazul strategiei S_3

În Fig. 4.32 – 4.33 sunt prezentate evoluțiile concentrațiilor de O_2 dizolvat în bazinele B_4 , B_5 și B_6 care urmăresc referințele de 0.4 mg/l (bazinul B_4) și, respectiv 2 mg/l (bazinele B_5 și B_6) precum și pe cea a concentrației de nitrați în bazinul B_4 (5 mg/l).

Valorile pentru încărcările organice, COD și BOD_5 , precum și pentru concentrația de substanțe solide în suspensie, TSS , obținute din efluentul stației de tratare în cadrul acestei strategii sunt sub limita legală impusă. Perturbațiile debitului de intrare datorate evenimentelor de ploaie și de furtună conduc la variații minime ale valorilor calculate care se observă pe graficele aferente mărimilor COD , BOD_5 și TSS , valori care nu depășesc limitele.

Strategia S_4 – Reglarea concentrației de O_2 dizolvat în bazinele B_4 , B_5 , B_6 , a concentrației de nitrați în bazinul B_4 prin intermediul recirculării interne și a concentrației substanțelor solide în suspensie la intrarea în decantorul secundar.

În cadrul acestei strategii, similar cu strategia S_3 , se păstrează bazinul B_1 anaerob, iar bazinele B_2 și B_3 anoxice. Aceste trei bazine sunt continuu amestecate prin intermediul mixerelor. Bazinele B_4 , B_5 și B_6 vor fi aerate, referința de oxigen dizolvat pentru bazinul B_4 fiind de 0.4 mg/l, iar pentru bazinele B_5 și B_6 referința de oxigen dizolvat este de 2 mg/l. Ieșirea reglatoarelor de oxigen dizolvat reprezintă comanda de deschidere sau închidere a vanei de reglare de pe circuitul de aer al suflantelor. În bazinul B_4 se reglează concentrația de nitrați prin intermediul recirculării interne.

Referința de nitrați (NO_3) este de 5 mg/l. Ieșirea regulatorului reprezintă comanda de variație a turației motorului pompei și, deci, de creștere sau scădere a debitului recirculat, în mod similar cu strategia de control S_2 .

Cantitatea de nămol extras din decantorul primar este impusă, în acest caz, la o valoare constantă de $100 \text{ m}^3/\text{zi}$. În plus se reglează concentrația substanțelor solide în suspensie la intrarea în decantorul secundar.

Referința S_{MLSS} este setată la valoarea de 3500 g/m^3 . Ieșirea regulatorului reprezintă comanda de variație a turației motorului pompei de nămol în exces. Odată cu nămolul în exces este scoasă și o parte de biomasă care este vitală pentru procesul de epurare dar cantitatea rămasă asigură desfășurarea corespunzătoare a reacțiilor de nitrificare și denitrificare astfel încât concentrațiile parametrilor din efluent nu depășesc limitele legale. În Fig. 4.38 - 4.40 sunt prezentate evoluțiile concentrațiilor de O_2 dizolvat în bazinele B_4 , B_5 și B_6 care urmăresc referințele de 0.4 mg/l (bazinul B_4) și, respectiv 2 mg/l (bazinele B_5 și B_6), a concentrației de nitrați în bazinul B_4 (5 mg/l), precum și pe cea a $MLSS$ la intrarea în decantorul secundar.

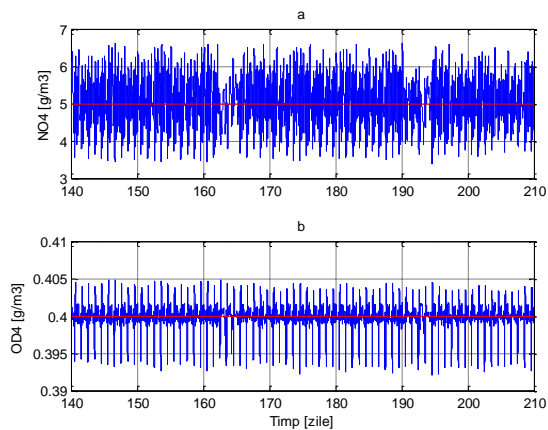


Fig. 4.38 - Reglarea concentrației de O_2 dizolvat și a nitratului în bazinul B_4

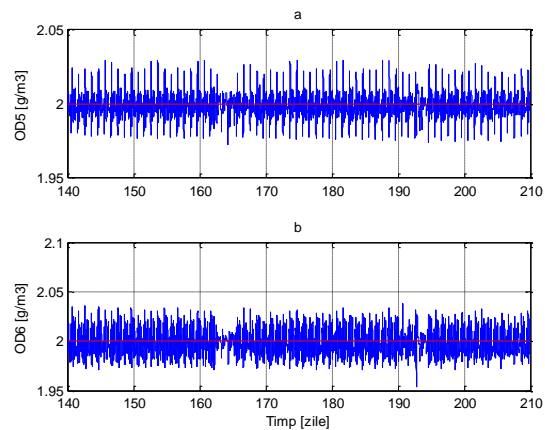


Fig. 4.39 - Reglarea concentrației de O_2 dizolvat în bazinele B_5 și B_6

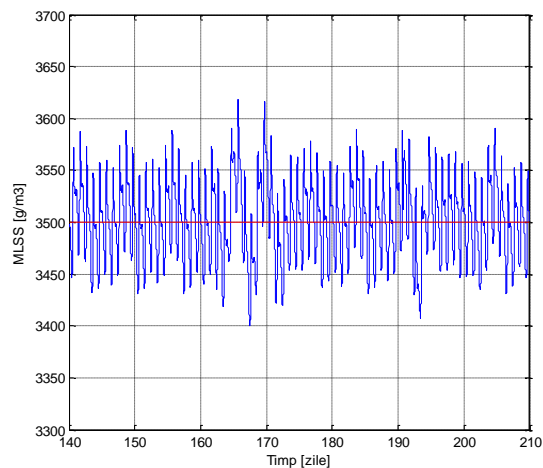


Fig. 4.40 - Reglarea concentrației de $MLSS$ la intrarea în decantorul secundar

Pentru ultimele 70 de zile analizate, variațiile parametrilor efluentului și producția de gaz metan din digesterul anaerob sunt prezentate în Fig. 4.41 – 4.43.

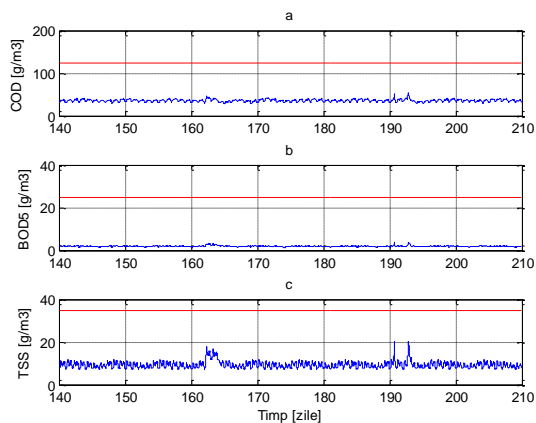


Fig. 4.41 - Variațiile încărcărilor organice în cazul strategiei S_4

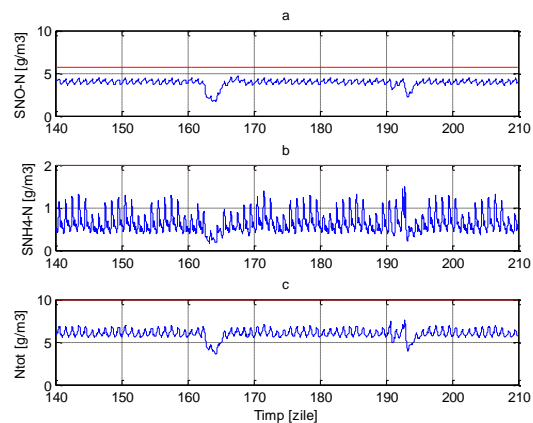


Fig. 4.42 - Variațiile încărcărilor cu azot în cazul strategiei S_4

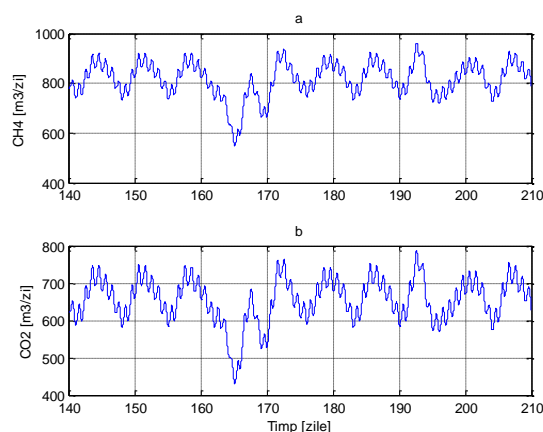


Fig. 4.43 - Producția de CH_4 și CO_2 din digesterul anaerob în cazul strategiei S_4

Valorile pentru încărcările organice, COD și BOD_5 , precum și pentru concentrația de substanțe solide în suspensie, TSS , obținute din efluentul stației de tratare în cadrul acestei strategii sunt sub limita legală impusă. Perturbațiile debitului de intrare datorate evenimentelor de ploaie și de furtună conduc la variații minime ale valorilor calculate care se observă pe graficele aferente mărimilor COD , BOD_5 și TSS , valori care nu depășesc limitele. Perturbațiile influențează mai mult concentrația de azot din nitrați, se observă variații mai pronunțate pe grafic însă nu sunt atinse limitele maxime.

Strategia S_5 – Reglarea concentrației de O_2 dizolvat în bazinele B_4 , B_5 , B_6 și a concentrației de nitrați în bazinul B_4 prin intermediul recirculării interne și a amoniului din efluent.

În cadrul acestei strategii se păstrează bazinul B_1 anaerob, iar bazinele B_2 și B_3 anoxice. Aceste trei bazine sunt continuu amestecate prin intermediul mixerelor. Bazinele B_4 , B_5 și B_6 vor fi aerate, referința de oxigen dizolvat pentru bazinul B_4 fiind de 0.4 mg/l , iar pentru bazinul B_5 referința de oxigen dizolvat are valoarea de 2 mg/l (Fig. 4.47). Referința de oxigen dizolvat în bazinul B_6 va fi dată de bucla de reglare a amoniului (NH_4) din componența efluentului. Ieșirea regulatorilor de oxigen dizolvat reprezintă comanda de deschidere sau închidere pentru vana de reglare de pe circuitul de aer al suflantelor. În bazinul B_4 se reglează concentrația de nitrați prin intermediul recirculării interne. Referința de nitrați (NO_3) este de 5 mg/l (Fig. 4.45). Ieșirea regulatorului reprezintă comanda de variație a turației motorului pompei și, deci, de creștere sau scădere a debitului recirculat, în mod similar cu strategia de control S_2 . Cantitatea de nămol în exces extras precum și cantitatea de nămol extras din decantorul primar este fixată la o valoare constantă astfel: pentru nămolul în exces valoarea este de $360 \text{ m}^3/\text{zil}$ iar pentru nămolul extras din decantorul primar valoarea este de

100 m³/zi. Concentrația de amoniu din efluent se reglează utilizând bucla *NH* care are referința setată la valoarea de 1 mg/l, valoarea concentrației de amoniu fiind citită de la traductorul aflat pe conducta de ieșire din decantorul secundar. Ieșirea regulatorului de amoniu (*NH*) reprezintă referință pentru bucla de reglare a oxigenului dizolvat în bazinul *B*₆ (Fig. 4.45 – 4.46). O cantitate mai mare de oxigen dizolvat în bazinul *B*₆ duce la scăderea concentrației de amoniu din efluent.

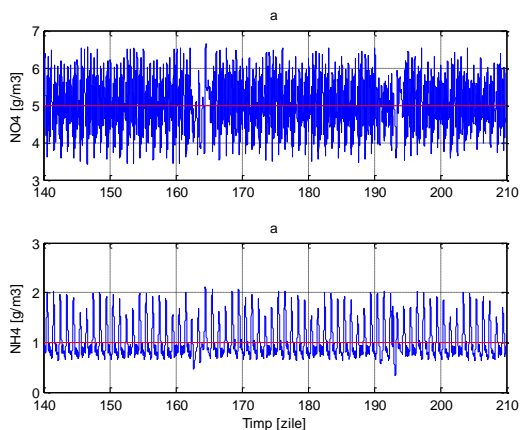


Fig. 4.45 - Reglarea concentrației de amoniu în efluent a nitratului în bazinul *B*₄

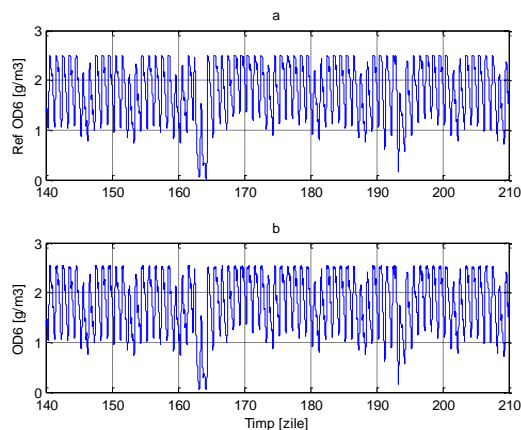


Fig. 4.46 - Referința și reacția de O₂ dizolvat în bazinul *B*₆

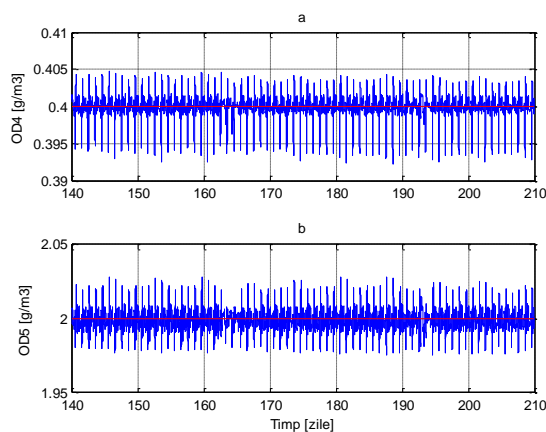


Fig. 4.47 - Reglarea concentrației de O₂ dizolvat în bazinele *B*₄ și *B*₅

Pentru ultimele 70 de zile analizate, variațiile parametrilor efluentului și producția de gaz metan din digesterul anaerob sunt prezentate în Fig. 4.48 – 4.50.

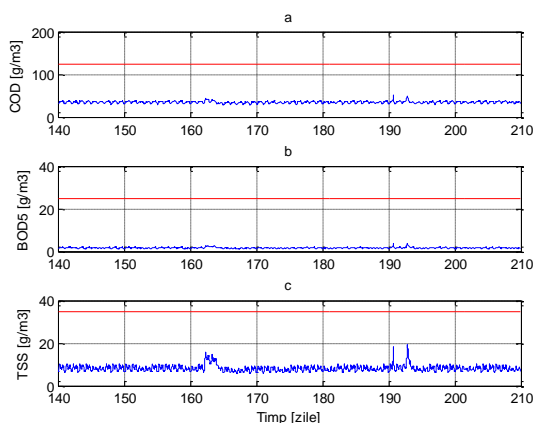


Fig. 4.48 - Variațiile încărcărilor organice în cazul strategiei *S*₅

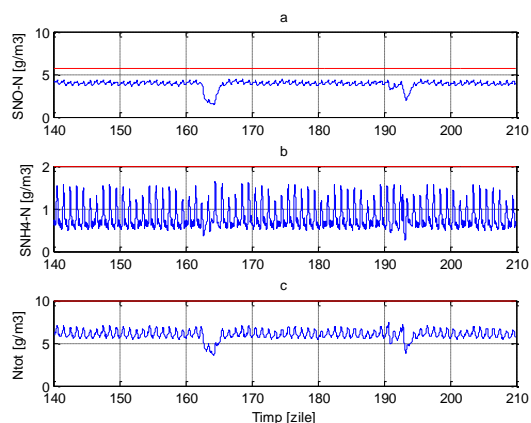


Fig. 4.49 - Variațiile încărcărilor cu azot în cazul strategiei *S*₅

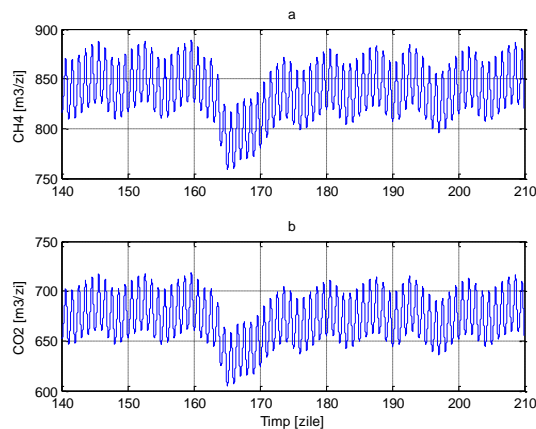


Fig. 4.50 - Producția de CH_4 și CO_2 din digesterul anaerob în cazul strategiei S_5

Valorile pentru încărcările organice, COD și BOD_5 , precum și pentru concentrația de substanțe solide în suspensie, TSS , obținute din efluentul stației de tratare în cadrul acestei strategii sunt sub limita legală impusă. Azotul total se află în limitele admise, evenimentele de ploaie și de furtună modifică nesemnificativ valorile acestuia. Reglarea oxigenului dizolvat în bazinul B_6 după referința calculată de regulatorul de amoniu rejectează perturbațiile care apar pe graficul concentrației de amoniu datorate evenimentelor de ploaie.

Concluzia este ca, în principiu, fiecare strategie poate fi aplicată, în sensul că limitele indicatorilor de calitate sunt respectate, deci efluentul corespunde normelor de calitate pentru a putea fi deversat în emisari. În aceste condiții, se recomandă ca alegerea strategiei de control să se facă în funcție de cel mai bun raport cost/calitate.

4.4 Strategii pentru controlul stației de tratare în vederea eliminării fosforului

Pentru eliminarea fosforului, stația de tratare este modelată în SIMBA cu modelul ASM2d pentru reactoarele biologice și decantorul secundar. Modelul stației este similar cu cel prezentat în secțiunea 3.8 cu excepția că, pentru simplitate, lipsește partea de digestie anaerobă (modelul ADM1).

Similar cu Fig. 4.21, în schema stației au fost figurate traductoarele care măsoară următoarele mărimi: concentrații de oxigen dizolvat, nitrați, amoniu, suspensii solide și fosfat, precum și următoarele elemente de execuție: vane de reglare, pompe poziționate în zonele în care se găsesc fizic în cadrul fluxului tehnologic al stației de tratare. Adiția de clorură ferică se realizează cu ajutorul pompei P_{FeCl_3} la intrare în decantorul secundar.

De asemenea, este luat în calcul faptul că stația de tratare funcționează în regim normal cu numai două linii din patru.

Și în acest caz, pentru evaluarea strategiilor de control, se utilizează efluentul compus, format din alternarea perioadelor de vreme secetoasă, vreme ploioasă și vreme cu furtună, așa cum a fost prezentat în secțiunea 4.3, pe o perioadă totală de 210 zile. Analiza funcționării, calculul indicatorilor și al depășirilor se realizează pe ultimele 70 de zile dintre cele 210 ale simulării.

Au fost considerate patru strategii de control în care buclele de reglare implementate utilizează regulatoare clasice de tip PI ca și în cazul schemelor de control pentru reducerea substanțelor organice și a azotului.

Cele patru strategii de control considerate în această secțiune sunt următoarele:

1. strategie de control în buclă deschisă;
2. strategie care rezolvă problema eliminării substanțelor organice și a azotului fără să se țină cont de depășirea componentei de fosfor;

3. strategie în care s-a urmărit eliminarea componentelor cu fosfor fără să se țină cont de limitele concentrației de azot;
4. strategie combinată, care ia în considerație toate limitările pentru componentele organice, pentru azot și fosfor.

Astfel, din punctul de operare aferent strategiei combinate, procesul poate migra către celelalte puncte de funcționare, rezultând o eficiență mai bună pentru eliminarea fosforului sau a azotului, în funcție de perturbațiile de la momentul respectiv ale sistemului.

În concluzie, pentru influențul real considerat, strategia S_4P furnizează depășiri foarte mici, subunitare la nivel procentual, pentru azotul din amoniu, cu un maxim de 2.39 mgN/l pentru o singură depășire.

4.5 Conducerea procesului de tratare a apelor uzate la referințe optime

În strategiile de control expuse în secțiunile anterioare, au fost implementate legi de reglare astfel încât procesul de tratare să asigure respectarea legislației în vigoare privind calitatea efluentului pentru a fi deversate în receptorii naturali. În continuare, s-a abordat o procedură de optimizare care constă în căutarea referințelor optime ale buclelor de reglare din cadrul schemei instalației de tratare a apelor uzate, cazul în care obiectivul este de eliminare a substanțelor organice și a azotului cu componentele sale (schema din Fig. 4.21), fără a considera și partea de eliminare a fosforului.

Plecând de la rezultatele din [85], a fost investigată situația în care se caută referințele de oxigen dizolvat din bazinele B_4 , B_5 , B_6 și referința de nitrat în bazinul B_4 (NO_{B_4}) având ca mărime de comandă debitul de recirculare internă.

O schemă a sistemului de conducere (optimizare) este prezentată în Fig. 4.77. Se observă că este o schemă de conducere ierarhizată, în care, pe nivelul superior se află optimizatorul, iar pe nivelul inferior buclele de reglare de bază, menționate în paragraful anterior.

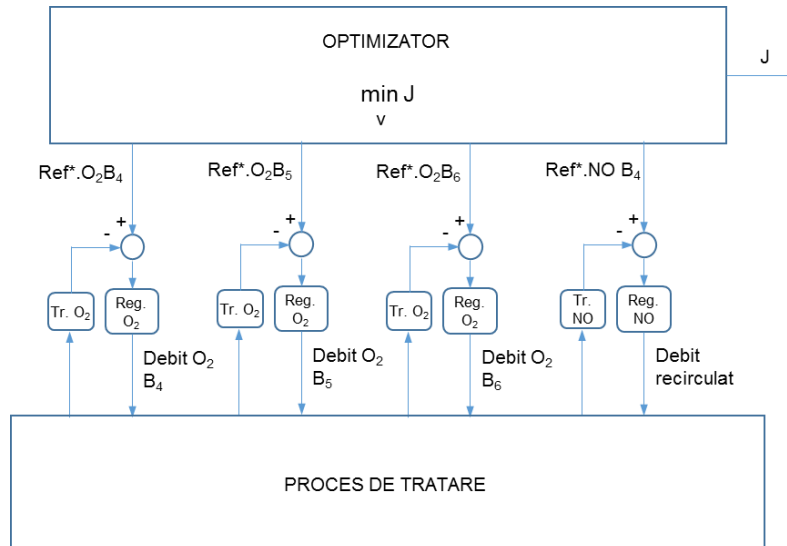


Fig. 4.77 - Schema sistemică de conducere a procesului de tratare biologică

Pentru aceasta au fost aplicate două proceduri de optimizare, după cum urmează:

- a. procedură de căutare unidimensională a optimului (metoda relaxării coordonatelor) într-o versiune modificată (simplificată), astfel încât căutarea extremului funcției criteriu să se facă într-un timp rezonabil. Trebuie menționat faptul că integrarea modelului procesului se face în aproximativ 4 min, timpul de căutare depinzând, practic, de numărul de pași până la găsirea punctului de optim;
- b. procedură de optimizare stohastică care se bazează pe generarea de numere aleatoare în intervale prestabilite pentru determinarea referințelor căutate.

a. Căutarea referințelor optime prin metoda relaxării

Se caută referințele optime pentru schema stației de tratare din Fig. 4.21 considerându-se următoarele bucle de reglare:

1. OD_4, OD_5, OD_6 – buclele de reglare pentru concentrația de oxigen dizolvat în bazinele B_4, B_5, B_6 . Coordonatele corespunzătoare punctului inițial, de unde începe căutarea referințelor optime pentru buclele considerate, sunt următoarele: pentru OD_4 , $Ref_OD_4 = 0.5$ mg/l, pentru OD_5 , $Ref_OD_5 = 2$ mg/l, iar pentru OD_6 , $Ref_OD_6 = 2$ mg/l.
2. NO_{B4} – bucla de reglare a concentrației de nitrat prin intermediul recirculării interne pentru reglarea valorii de nitrat în bazinul B_4 . Coordonata corespunzătoare punctului inițial este de 5 mg/l.

Vectorul după care se face căutarea optimului este:

$$V = [Ref_OD_4 \ Ref_OD_5 \ Ref_OD_6 \ Ref_NO_4]^T \quad (4.1)$$

Debitul de nămol recirculat extern este considerat proporțional cu debitul de intrare, constanta de proporționalitate fiind $k = 0.9$. Debitul de nămol în exces, transferat către îngroșător și apoi către digestorul anaerob, este considerat constant și are valoarea de 320 m³/zi. Debitul de nămol extras din decantorul primar este, de asemenea, constant și are valoarea de 60 m³/zi. Așa cum s-a justificat în paragraful anterior, pentru fiecare dintre componentele vectorului referințelor, au fost considerate cinci puncte, după cum urmează:

$$Ref_OD_{4,0} = [0.2, 0.3, 0.5, 0.6, 0.8]^T \quad (4.2)$$

$$Ref_OD_{5,0} = [0.8, 1.6, 2, 2.3, 2.5]^T \quad (4.3)$$

$$Ref_OD_{6,0} = [0.8, 1.6, 2, 2.3, 2.5]^T \quad (4.4)$$

$$Ref_NO_4 = [2, 2.8, 3.6, 4.4, 5.2]^T \quad (4.5)$$

Criteriul de performanță considerat are următoarea expresie:

$$J = 0.5 \cdot EQ + OCI + 100 \cdot (N_{tot,p} + NH_{4,p} + TSS_p + COD_p + BOD_{5,p}) \quad (4.6)$$

unde: EQ reprezintă indicele de calitate aefluentului, OCI reprezintă indicele general de cost, $N_{tot,p}$ este depășirea procentuală de azot total, $NH_{4,p}$ este depășirea procentuală de amoniu total, TSS_p - depășirea procentuală a concentrației de solide în suspensie, COD_p este depășirea procentuală a cerinței chimice de oxigen, iar $BOD_{5,p}$ este depășirea procentuală a parametrului de cerință biochimică de oxigen la cinci zile.

Problema de optimizare poate fi formulată astfel:

$$\min_V J = 0.5 \cdot EQ + OCI + 100 \cdot (N_{tot,p} + NH_{4,p} + TSS_p + COD_p + BOD_{5,p}) \quad (4.7)$$

Algoritmul a rulat trei iterații, după care au fost îndeplinite condițiile de oprire.

În Fig. 4.78 – 4.81 sunt reprezentate, pentru fiecare componentă a vectorului referințelor, rezultatele obținute în cele trei iterații de optimizare cu criteriul calculat în punctele menționate, precum și reprezentarea grafică rezultată în urma interpolării. Funcțiile reprezentate prin interpolare sunt convexe pe domeniul de definiție, fapt care permite calculul coordonatelor punctului de minim. Culoarea roșie din grafic corespunde primei iterații, culoarea albastră corespunde celei de-a doua iterații, iar culoarea verde corespunde celei de-a treia iterații. Cu simbolul romb sunt marcate minimele globale. Criteriile estimate la fiecare iterație în parte sunt obținute pe baza coordonatelor punctelor de minim (referințele corespunzătoare valorilor criteriului minim) și pe baza curbei de interpolare aferentă fiecărei direcții de căutare. Astfel, rezultă:

$$J_{estimat1} = J(Ref_DO_{4,min1} \ Ref_DO_{5,min1} \ Ref_DO_{6,min1} \ Ref_NO_{B4,min1}) \quad (4.8)$$

$$J_{estimat2} = J(Ref_DO_{4,min2} \ Ref_DO_{5,min2} \ Ref_DO_{6,min2} \ Ref_NO_{B4,min2}) \quad (4.9)$$

$$J_{estimat3} = J(Ref_DO_{4,min3} \ Ref_DO_{5,min3} \ Ref_DO_{6,min3} \ Ref_NO_{B4,min3}) \quad (4.10)$$

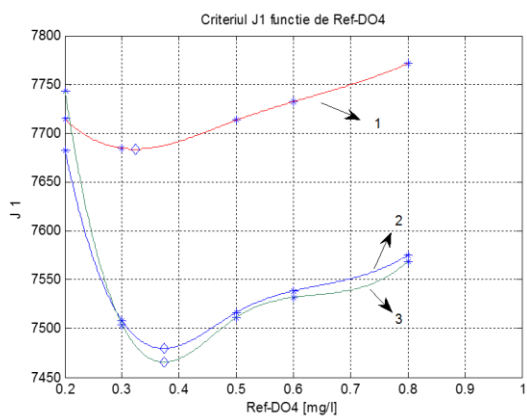


Fig. 4.78 - Criteriul de optimizare în cazul buclei de reglare OD_4

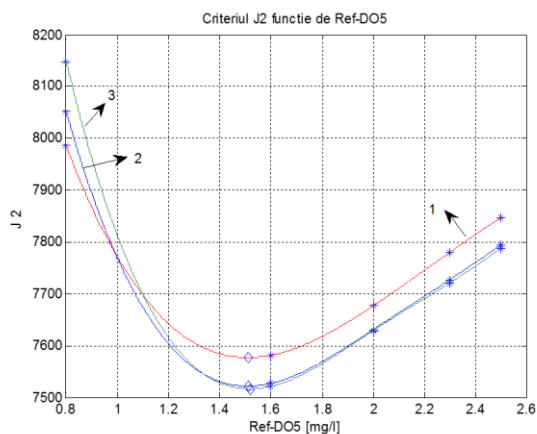


Fig. 4.79 - Criteriul de optimizare în cazul buclei de reglare OD_5

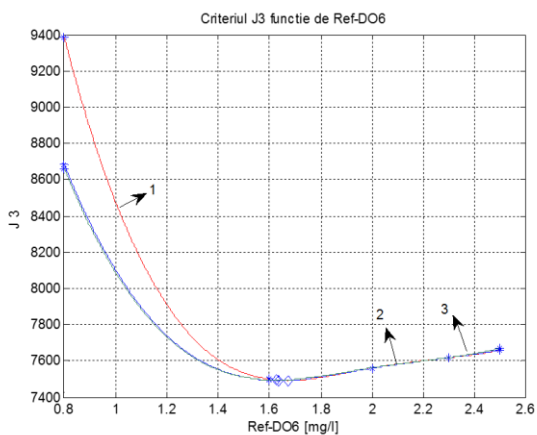


Fig. 4.80 - Criteriul de optimizare în cazul buclei de reglare OD_6

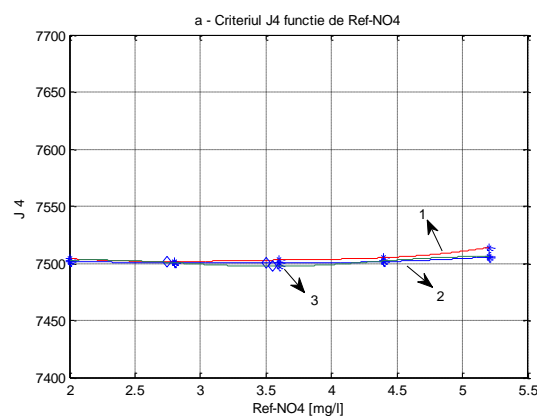


Fig. 4.81 – a - Criteriul de optimizare în cazul buclei de reglare NO_{B4} ;

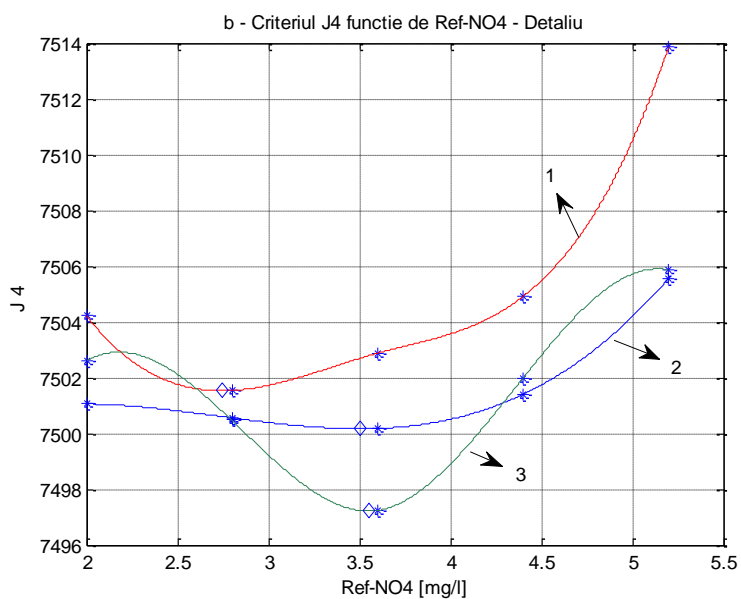


Fig. 4.81 – b - Criteriul de optimizare în cazul buclei de reglare NO_{B4} (Detaliu)

Observație:

În Fig. 4.78 – 4.81, J_i , cu $i = 1 - 4$, reprezintă valoarea criteriului J calculată pe coordonata i a vectorului referințelor, V . Valorile numerice obținute prin simulare sunt prezentate în tabelul următor:

Tabelul 4.9 - Valori minime ale referințelor și criteriilor

Nr.	$Ref_DO_{4,min}$ [mg/l]	$Ref_DO_{5,min}$ [mg/l]	$Ref_DO_{6,min}$ [mg/l]	$Ref_NO_{B_4,min}$ [mg/l]	$J_{estimat}$	$J_{calculat}$
1	0.32	1.51	1.67	2.75	7501.5	7501.90
2	0.37	1.51	1.64	3.51	7500.2	7499.90
3	0.37	1.52	1.63	3.55	7497.2	7500.80

În Tabelul 4.9 $J_{estimat}$ reprezintă valoarea criteriului obținută cu ajutorul curbelor de interpolare, iar $J_{calculat}$ reprezintă valoarea criteriului calculată numeric cu ajutorul coordonatelor punctului de minim. Se observă că diferențele sunt foarte mici, ceea ce denotă că aproximările prin curbele de interpolare sunt apropiate de realitate.

Din Fig. 4.78 – 4.81 și Tabelul 4.9 se pot trage următoarele concluzii:

- căutarea referințelor optimale a fost restricționată la intervale în conformitate cu practica strategiilor de reglare (valori specifice – practice, bazate pe considerente tehnologice utilizate în procesele de tratare aferente unui oraș de mărimea Galațiului), depășirea acestor limite ieșind din sfera de fezabilitate practică;
- valorile coordonatelor punctului de minim (criteriul și cele 4 referințe) diferă nesemnificativ în cadrul celor trei iterații. Ar putea fi exceptată coordonata $Ref_NO_{B_4,min}$ (a se vedea și Fig. 4.81 a și b), ceea ce arată că, în acest caz, minimul este atins doar într-o singură iterație. Din punct de vedere geometric, curbele de izocriteriu sunt similare unor hiperelipse cu semiaxe paralele cu axele de coordonate (reprezentate în spațiul R^4);
- forma criteriului este destul de plată, cel puțin în cazul coordonatei NO_{B_4} . Cu alte cuvinte, variația referinței de nitrat în bazinul B_4 influențează în mai mică măsură valoarea criteriului.

b. Căutarea referințelor optimale printr-o metodă stohastică

În cadrul acestei metode se caută componentele vectorului referințelor, V , dat de relația (4.1), funcția criteriu fiind cea folosită și în cadrul metodei relaxării, dată de relația (4.6). În principiu, metoda constă în generarea aleatoare a componentelor vectorului V , la fiecare pas fiind păstrate valorile "cele mai bune" ale coordonatelor punctului (valoarea criteriului + cele 4 referințe), în sensul scăderii valorilor criteriului spre un punct de minim. Oprea algoritmului se realizează când se atinge un număr maxim de iterații, N_{max} , în cazul de față – 115 iterații. Intervalele în care au fost generate aleator referințele sunt cele utilizate și în metoda anterioară.

Trebuie precizat faptul că metoda, în sine, nu îmbunătățește timpul de simulare, fiind cunoscut faptul că, la această metodă, rezultatul este cu atât mai bun cu cât numărul de iterații este mai mare.

Metoda stohastică a fost utilizată ca alternativă la metoda relaxării, în condițiile în care, așa cum s-a afirmat mai sus, versiunea modificată a acesteia nu garantează o precizie suficient de bună.

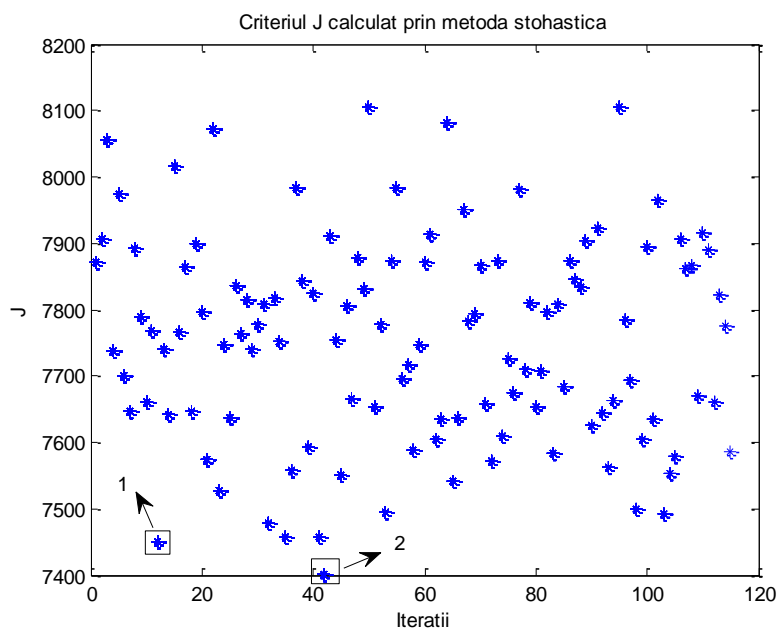


Fig. 4.82 - Criteriul de optimizare în cazul stohastic

Tabelul 4.11 - Valori minime ale referințelor și criteriului în cazul optimizării stohastice

Nr.	$Ref_DO_{4,min}$ [mg/l]	$Ref_DO_{5,min}$ [mg/l]	$Ref_DO_{6,min}$ [mg/l]	$Ref_NO_{B4,min}$ [mg/l]	$J_{calculat}$
1	0.59	1.08	1.74	3.59	7450.90
2	0.69	0.83	1.59	2.54	7400.90

Se face precizarea că liniile 1 și 2 din tabelul 4.11 reprezintă coordonatele punctelor marcate în chenar din Fig. 4.82 (2 – punctul de minim final și 1 – valoarea anterioară).

Capitolul 5

Concluzii finale

Problematika tratării apelor uzate este extrem de importantă pentru dezvoltarea comunităților umane, a ecosistemelor, conservarea mediului înconjurător. Însăși existența umanității este condiționată de existența unor resurse curate de apă, neafectate de poluare. Importanța domeniului este dată și de faptul că tratarea apelor reziduale stă în atenția imediată a forurilor europene (Uniunea Europeană, Comisia Europeană) care au stabilit o serie de directive cu misiunea de a impune o legislație foarte strictă privind calitatea apelor și limitele maxime admisibile de poluare ale apelor reziduale în vederea deversării acestora în receptorii naturali.

Dacă la început domeniul tratării apelor reziduale era privit numai din punct de vedere tehnologic (era considerat numai al chimiștilor, biotehnologilor, microbiologilor etc.) și practic evoluția acestuia s-a realizat numai prin găsirea unor tehnologii noi de tratare, actualmente acest domeniu a devenit interdisciplinar, într-o strânsă legătură cu domeniile automată și informatică. Aceste domenii, și în special cel de automată, au determinat creșterea eficienței proceselor de tratare a apelor uzate prin metode de modelare matematică și controlul proceselor de tratare. Pentru automatiști, domeniul tratării apelor reziduale a devenit o adevărată provocare prin faptul că procesele de epurare biologică sunt foarte complexe, puternic neliniare, afectate de zgomote de proces și de măsură și, de asemenea, de incertitudini parametrice și de model (dinamici ascunse – nemodelate).

În esență, această teză de doctorat și-a propus să analizeze, din punct de vedere al performanțelor, un proces de tratare biologică a apelor uzate aferent stației de tratare din municipiul Galați, oraș cu o populație medie la nivelul României, de aproximativ 250000-300000 locuitori. Stația de tratare are ca principale obiective eliminarea substanțelor organice, a azotului și componentelor sale, precum și a fosforului. Sunt prezentate detaliat cele trei trepte de tratare: mecanică, bio-chimică și a nămolului. Stația de epurare în discuție are un grad înalt de automatizare, fiind condusă cu echipamente de calcul de proces prin intermediul unui sistem SCADA organizat ierarhic pe mai multe niveluri – nivelul superior de monitorizare, nivelul de control al automatelor programabile și nivelul elementelor de câmp.

În continuare, în lucrarea de doctorat este abordată modelarea matematică a stației de tratare a apelor uzate din municipiul Galați. Aceasta este modelată matematic în mod gradual, în trei etape:

1. se modelează procesul de eliminare a substanțelor organice pe bază de carbon și azot utilizând modelul matematic ASM1;
2. se adaugă la modelul ASM1 partea de tratare a nămolului (modelul ADM1) rezultând un model matematic agregat al procesului de eliminare a substanțelor organice împreună cu cel de tratare a nămolului, cu producere de gaz metan;
3. se modelează procesul de eliminare a fosforului prin adiție de clorură ferică cu modelul matematic ASM2d.

O altă problemă abordată este definirea influențelor stației de tratare, pe baza influențelor dezvoltate pentru modelele de tip benchmark (BSM), adaptat la valorile de proiectare a stației de tratare biologică a municipiului Galați, din punct de vedere al debitului apei de tratat și al încărcărilor cu substanțe poluante în cele trei regimuri de funcționare standard: vreme secetoasă, vreme ploioasă și vreme cu furtună. Cele trei modele matematice au fost analizate în două puncte de operare aferente stației de tratare: primul, la jumătate din valorile maxime de comandă ale elementelor de execuție și al doilea, chiar la valorile maxime ale acestor valori. Trebuie menționat faptul că operarea stației de epurare în punctul B este limitată de debitele maxime ale suflantelor (care asigură oxigenul necesar) și ale pompelor care asigură debitele de alimentare, recirculare etc.

Analiza rezultatelor obținute prin simulare numerică s-a făcut comparând evoluțiile principalilor parametri de calitate cu limitele maxime admisibile prevăzute de legislația în vigoare și pe baza calculului unor indicatori de calitate. Două concluzii se desprind din această analiză realizată în capitolul 3 al tezei de doctorat:

- în general, în punctul *A* de operare se observă depășiri semnificative la principalii parametri de calitate;
- în punctul *B* de operare se observă ameliorarea valorilor parametrilor de calitate, în sensul că depășirile sunt mai mici și mai rare, dar indicatorii de calitate calculați arată creșteri semnificative ale consumurilor energetice și, implicit, și ale costurilor.

Ca o concluzie generală, rezultă că, pentru o funcționare eficientă a stației de tratare a apelor uzate, este necesară automatizarea acestuia prin metode de control adecvate.

Ultimul capitol de fond al tezei de doctorat, capitolul 4, este dedicat controlului stației de tratare a apelor uzate din municipiul Galați. Proiectarea structurilor și a legilor de control s-a realizat considerând un influent specific orașului Galați, din punct de vedere al proprietăților acestuia (debite, încărcări etc.) ținând cont de doi factori importanți, specifici orașului la momentul actual (anul 2017): numărul de locuitori și gradul de dezvoltare industrială.

Au fost investigate metode de control pentru următoarele trei situații:

- 1 eliminarea substanțelor organice și a azotului, împreună cu componentele sale (folosind modelele ASM1 și ADM1);
- 2 eliminarea fosforului (pe modelul ASM2d);
- 3 controlul la referințe optime al procesului de eliminare a substanțelor organice și a azotului.

În toate cazurile analizate s-a considerat mai utilă o abordare comparativă a mai multor strategii de control care utilizează același tip de lege de reglare (în cazul de față legi de reglare *PI*) față de cazul folosirii mai multor tehnici de control. Aceasta deoarece la nivelul întregului sistem, parametrii și indicatorii de calitate sunt influențați, în cea mai mare măsură, de alegerea referințelor și a punctelor de operare în care se desfășoară procesele de tratare. Pentru primul caz (eliminarea substanțelor organice și a azotului) au fost testate 5 strategii de control, iar pentru al doilea caz (eliminarea fosforului) – 4 strategii de control. În ambele cazuri, prima strategie a fost în buclă deschisă, pentru a avea termen de comparație și pentru evaluarea eficienței strategiilor de control. În ambele situații s-a observat o îmbunătățire a parametrilor efluentului, în sensul respectării normativelor și legislației în vigoare privind calitatea acestuia.

Ultima parte a capitolului se referă la controlul procesului de tratare a apelor uzate la referințe optime. Metoda a fost abordată în ideea de a lua în considerare o serie de alți indicatori, precum costurile și consumurile energetice, indicatori importanți în cazul unei stații de tratare de mare capacitate, cum este aceea a municipiului Galați. Au fost analizate două metode de optimizare:

- a. o metodă de căutare unidimensională (relaxare) într-o versiune modificată;
- b. o metodă de optimizare stohastică.

Optimizarea a fost realizată în raport cu referințele buclelor de oxigen dizolvat în bazinele $B_4 - B_6$ și cu referința de nitrați în bazinul B_4 . Rezultatele au arătat că variația criteriului este nesemnificativă ca valoare în raport cu a patra coordonată (referința de nitrați în bazinul B_4) și, astfel, s-a optat pentru căutarea coordonatelor punctului de optim în raport cu un vector de referințe redus, fără referința buclei de nitrat în bazinul B_4 , care a fost menținută constantă. Rezultatele obținute au fost similare cu cele din cazul anterior, valoarea criteriului fiind foarte apropiată.

De asemenea, trebuie menționat faptul că prima metodă (cea a căutării unidimensionale modificată), conține o serie de aproximații (de ex. determinarea minimului

pe o direcție prin 5 puncte, aproximarea curbei criteriului printr-o curbă de interpolare etc.) ceea ce nu garantează obținerea unui punct de optim suficient de precis datorită erorilor introduse de metoda utilizată. De aceea, a fost abordată și o a doua metodă (cea stohastică) care a permis obținerea unui punct de minim cu erori mai mici de calcul al criteriului, comparativ cu metoda anterioară.

5.1 Contribuții originale

Teza de doctorat conține următoarele contribuții originale:

Capitolul 2:

1. Analiza stației de tratare a apelor uzate din municipiul Galați din punct de vedere al structurii tehnologice, echipamentului de automatizare și al debitelor influentului și al încărcărilor cu substanțe organice, azot și fosfor.

Capitolul 3:

2. Stabilirea influentului pentru stația de tratare a apelor uzate din municipiul Galați pornind de la influentul din BSM1, calibrat pe datele de proiectare ale acestei stații de tratare, specific celor trei regimuri de operare: vreme secetoasă, vreme ploioasă și vreme cu furtună pentru eliminarea substanțelor organice și a azotului.
3. Stabilirea influentului pentru stația de tratare a apelor uzate din municipiul Galați pentru eliminarea fosforului în cele trei regimuri de operare menționate la punctul 2.
4. Modelarea matematică a liniei biologice de tratare (bazine + decantor secundar) pentru eliminarea substanțelor organice, azot și componentele sale (nitrați, nitriți, amoniu) cu modelul ASM1.
5. Validarea modelului matematic de la punctul 3 în mediul de simulare SIMBA.
6. Extinderea modelului liniei biologice de tratare prin adăugarea modelului matematic al procesului de fermentație anaerobă a nămolului, cu producere de gaz metan (model ADM1).
7. Validarea modelului extins (ASM1 + ADM1) în mediul de simulare SIMBA.
8. Modelarea stației de tratare a apelor uzate din municipiul Galați pentru eliminarea fosforului prin adiție de clorură ferică, cu modelul ASM2d.
9. Validarea modelului matematic de la punctul 7 în mediul de simulare SIMBA.
10. Analiza performanțelor stației de tratare (calitatea influentului, indicele de cost, numărul de depășiri ale limitelor, etc.) în două puncte de operare: primul la jumătate din valorile maxime de comandă ale elementelor de execuție și al doilea, chiar la valorile maxime ale acestor valori. Analiza se referă atât la cazul eliminării substanțelor organice și a azotului, cât și a fosforului.

Capitolul 4:

11. Stabilirea influentului actual (pe baza datelor experimentale din anul 2017) pentru cazul eliminării substanțelor organice și a azotului și pentru cazul eliminării fosforului.
12. Proiectarea, validarea în mediul de simulare SIMBA și analiza comparativă a cinci strategii pentru cazul eliminării substanțelor organice și a azotului împreună cu componentele sale (nitrați, nitriți, amoniu).
13. Proiectarea, validarea în mediul de simulare SIMBA și analiza comparativă a patru strategii pentru cazul eliminării fosforului.
14. Optimizarea procesului de eliminare a substanțelor organice și a azotului prin determinarea referințelor optime ale buclor de reglare a concentrațiilor de oxigen dizolvat în bazinele 4, 5 și 6 și a concentrației de nitrați prin intermediul recirculării interne prin două metode: 1. metoda relaxării într-o variantă simplificată și 2. o metodă stohastică.

5.2 Direcții viitoare de cercetare

Teza de doctorat deschide o serie de noi direcții de cercetare în domeniul modelării și controlului proceselor de tratare biologică a apelor uzate, după cum urmează:

1. Modelarea și simularea stației utilizând un model matematic global al proceselor de tratare biologică a apelor uzate care să integreze eliminarea substanțelor organice, a azotului împreună cu componentele sale (nitrați, nitriți, amoniu) și a fosforului.
2. Proiectarea și implementarea unor legi de control avansate pentru controlul proceselor de tratare biologică a apelor uzate.
3. Stabilirea unui criteriu de optimizare “mai sensibil” la anumite referințe ale buclelor de reglare din structura echipamentului de conducere a unui proces de tratare biologică a apelor uzate.
4. Optimizarea procesului de tratare biologică a apelor uzate și în raport cu alte referințe, de exemplu cele privind extragerea nămolului excedentar și a nămolului din decantorul primar.
5. Dezvoltarea unei structuri la nivel ierarhic superior de control pentru calculul și optimizarea online sau offline a referințelor buclelor de reglare aferente strategiilor de conducere aplicabile la stația de epurare.

Listă de lucrări

- Lucrări științifice publicate în domeniul tezei de doctorat:

1. **Luca L.**, Barbu M., Caraman S., *Modelling and performance analysis of an urban wastewater treatment plant*, Published in System Theory, Control and Computing (ICSTCC), 2014, 18th International Conference, pp. 285 – 290, DOI: 10.1109/ICSTCC.2014.6982430, 2014 ([indexat ISI proceedings](#)).
2. **Luca L.**, Barbu M., Ifrim G., Caraman S., *Analysis of phosphorus removal performances in a municipal treatment plant*, Published in System Theory, Control and Computing (ICSTCC), 2015, 19th International Conference, pag. 415 – 420, DOI: 10.1109/ICSTCC.2015.7321329, 2015 ([indexat ISI proceedings](#)).
3. **Luca L.**, Barbu M., Ifrim G., Ceangă E., Miron M., Caraman S., *Fuzzy Control of a Microalgae Growth Process in Photobioreactors*, Published in System Theory, Control and Computing (ICSTCC), 2018, 22th International Conference, Sinaia, România, 2018 ([indexat IEEEExplore](#), [în curs de indexare ISI proceedings](#)).
4. Chiroșcă A., Dumitrașcu G., **Luca L.**, Caraman S., *Fuzzy control of the activated sludge wastewater treatment process treated as multivariable process*, The Annals of „Dunărea de Jos” University of Galați, Fascicle III Electrotechnics, Electronics, Automatic Control, Informatics, 34(2): 1-5, ISSN 1221-454X, 2011.
5. Chiroșcă A., **Luca L.**, Ifrim G., Caraman S., *Robust control of the biological wastewater treatment process*, Published in System Theory, Control and Computing (ICSTCC), 2013, 17th International Conference, pag. 113 - 118, DOI: 10.1109/ICSTCC.2013.6688945, 2013 ([indexat ISI proceedings](#)).
6. **Laurențiu Luca**, George Ifrim, Emil Ceangă, Sergiu Caraman, Marian Barbu, Ignacio Santin, Ramon Vilanova, *Optimization of the Wastewater Treatment Processes Based on the Relaxation Method*, The 5th International Symposium on Electrical and Electronics Engineering (ISEEE - 2017), Galați, 20 - 22 October, România, 2017 ([indexat ISI proceedings](#)).
7. Miron M., Frangu L., **Luca L.**, Caraman S., *Artificial Neural Network Approach for Fault Recognition in a Wastewater Treatment Process*, Published in System Theory, Control and Computing (ICSTCC), 2018, 22th International Conference, Sinaia, România, 2018 ([indexat IEEE xplore](#), [în curs de indexare ISI proceedings](#)).
8. **Luca L.**, Barbu M., Ifrim G., Ceangă E., Caraman S., *Control Strategies of a Wastewater Treatment Plant*, 12th IFAC Symposium on Dynamics and Control of Process Systems, including Biosystems, April 23 – 26, 2019, Florianopolis, Brazil ([Lucrare în curs de evaluare](#)).

- Lucrări științifice publicate în domeniul automatizărilor industriale:

1. Iulian Nacu, **Laurențiu Luca**, Nicu Roman, and Dorel Aiordăchioaie, *On VIBROMOD - An Electronic Equipment for Data Vibration Measurement and Analysis*, The 22nd IEEE International Symposium for Design and Technology in Electronic Packaging (SIITME-2016), Oradea, 20-23 October, 2016 ([indexat ISI proceedings](#)).
2. Bogdan Theodor, Anamaria Tiron, George Marinescu, Iulian Nacu, **Laurențiu Luca**, Nicu Roman and Dorel Aiordăchioaie, *A Multi-level Software Solution for Process Monitoring and Diagnosis*, The 5th International Symposium on Electrical and Electronics Engineering (ISEEE - 2017), Galati, 20 - 22 October, Romania, 2017. Special Session “Change Detection In Vibrational Processes” ([indexat IEEEExplore](#)).

Bibliografie

- [1] "Water - Environment - European Commission." [Online]. Available: http://ec.europa.eu/environment/water/index_en.htm. [Accessed: 11-Oct-2018].
- [2] C. O. T. E. COMMUNITIES, "EUR-Lex - 52005DC0540 - EN - EUR-Lex - IPPC." [Online]. Available: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52005DC0540>. [Accessed: 24-Oct-2018].
- [3] DCE, "Directive 2000/60/CE du Parlement européen et du Conseil du 23 octobre 2000 établissant un cadre pour une politique communautaire dans le domaine de l'eau," *J. Off. des Communautés Eur. du 22.12.2000*, 2000.
- [4] CEC – Council of the European Communities, "Directive concerning urban waste water treatment (91/271/EEC)," *Off. J. Eur. Communities*, 1991.
- [5] G. Rom *et al.*, "HOTĂRÂRE nr . 188 din 28 februarie 2002 pentru aprobarea unor norme privind condițiile de descărcare în mediul acvatic a apelor uzate," no. 188, pp. 5–6, 2002.
- [6] M. B. Pescod, "Wastewater treatment and use in agriculture," *FAO Irrig. Drain. Pap.*, 1992.
- [7] W. Verstraete, P. Van de Caveye, and V. Diamantis, "Maximum use of resources present in domestic 'used water,'" *Bioresource Technology*, vol. 100, no. 23. pp. 5537–5545, 2009.
- [8] M. Henze, M. C. M. Van Loosdrecht, G. A. Ekama, and D. Brdjanovic, *Biological wastewater treatment : principles, modelling and design*. 2008.
- [9] U. Jeppsson, "Modeling aspects of wastewater treatment processes," 1996.
- [10] U. Jeppsson *et al.*, "Benchmark simulation models, quo vadis?," *Water Sci. Technol.*, 2013.
- [11] D. Dochain and P. Vanrolleghem, "Dynamical Modelling & Estimation in Wastewater Treatment Processes," *Water Intell. Online*, 2005.
- [12] K. V. K. V. Gernaey, M. C. M. M. C. M. Van Loosdrecht, M. Henze, M. Lind, and S. B. S. B. Jørgensen, "Activated sludge wastewater treatment plant modelling and simulation: State of the art," *Environ. Model. Softw.*, 2004.
- [13] Herring and Fantel, "Phosphate Rock Demand Into the Next Century: Impact on World Food Supply," *Nonrenewable Resour.*, 1993.
- [14] D. Seyhan, H. P. Weikard, and E. Van Ierland, "An economic model of long-term phosphorus extraction and recycling," *Resour. Conserv. Recycl.*, 2012.
- [15] D. Cordell and S. White, "Peak phosphorus: Clarifying the key issues of a vigorous debate about long-term phosphorus security," *Sustainability*. 2011.
- [16] K. S. Le Corre, E. Valsami-Jones, P. Hobbs, and S. A. Parsons, "Phosphorus recovery from wastewater by struvite crystallization: A review," *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*. 2009.
- [17] J. Monod, "The Growth of Bacterial Cultures," *Annu. Rev. Microbiol.*, 1949.
- [18] N. Cheremisinoff, *Biotechnology for waste and wastewater treatment*. 1996.
- [19] A. Segneanu, M. Milea, B. Pinteaa, M. Simon, and C. Csunderlik, "N,N'-Disuccinimidylcarbonate, A potential reagent in fine organic synthesis of reactive asymmetrical carbonates, used to protect amino groups from aminoacids for peptides synthesis," *Rev. Chim.*, 2006.

- [20] T. Ognean and L.-M. Vaicum, *Modelarea proceselor de epurare biologica*. București: Editura Academiei, 1987.
- [21] G. E. Briggs and J. B. S. Haldane, "A Further Note on the Kinetics of Enzyme Action.," *Biochem. J.*, 1925.
- [22] M. Henze, C. P. L. Grady Jr., W. Gujer, G. V. R. Maris, and T. Matsuo, "A general model for single-sludge wastewater treatment systems," *Water Research*. 1987.
- [23] H. Hauduc *et al.*, "Critical review of activated sludge modeling: State of process knowledge, modeling concepts, and limitations," *Biotechnology and Bioengineering*. 2013.
- [24] E. E. Petersen, *Chemical reaction analysis*. New Jersey: Prentice-Hall, 1965.
- [25] P. Grau, P. M. Sutton, and M. Henze, "Notation for use in the description of wastewater treatment processes," *Water Res.*, 1987.
- [26] R. Seviour and P. H. Nielsen, *Microbial Ecology of Activated Sludge*. 2010.
- [27] M. Henze, W. Gujer, T. Mino, T. Matsuo, M. C. Wentzel, and G. v. R. Marais, "Wastewater and biomass characterization for the Activated Sludge Model No. 2: Biological phosphorus removal," *Water Sci. Technol.*, 1995.
- [28] M. Henze *et al.*, "Activated Sludge Model No.2d, ASM2d," in *Water Science and Technology*, 1999.
- [29] D. Baetens, P. Vanrolleghem, and M. van Loosdrecht, "Enhanced biological phosphorus removal: modelling and experimental design," 2000.
- [30] W. Gujer, M. Henze, T. Mino, and M. van Loosdrecht, "Activated Sludge Model No. 3," *Water Science and Technology*. 1999.
- [31] H. Siegrist, L. Rieger, G. Koch, M. Kühni, and W. Gujer, "The EAWAG Bio-P module for activated sludge model No. 3," in *Water Science and Technology*, 2002.
- [32] H. M. Van Veldhuizen, M. C. M. Van Loosdrecht, and J. J. Heijnen, "Modelling biological phosphorus and nitrogen removal in a full scale activated sludge process," *Water Res.*, 1999.
- [33] S. C. F. Meijer, M. C. M. Van Loosdrecht, and J. J. Heijnen, "Modelling the start-up of a full-scale biological phosphorous and nitrogen removing WWTP," *Water Res.*, 2002.
- [34] S. Meijer, *Theoretical and practical aspects of modelling activated sludge processes*. 2004.
- [35] P. S. Barker and P. L. Dold, "General Model for Biological Nutrient Removal Activated-Sludge Systems: Model Presentation," *Water Environ. Res.*, 1997.
- [36] M. C. Wentzel, G. A. Ekama, R. E. Loewenthal, P. L. Dold, and G. Marais, "Enhanced polyphosphate organism cultures in activated sludge systems. Part II: Experimental behaviour," *Water S.A.*, 1989.
- [37] M. Wentzel, P. Dold, G. Ekama, and G. Marais, "Enhanced polyphosphate organism cultures in activated sludge systems: Part 3 Kinetic Model," *Water SA*, 1989.
- [38] P. Grau, M. de Gracia, P. A. Vanrolleghem, and E. Ayesa, "A new plant-wide modelling methodology for WWTPs," *Water Res.*, 2007.
- [39] F. Nejjari, B. Dahhou, A. Benhammou, and G. Roux, "Non-linear multivariable adaptive control of an activated sludge wastewater treatment process," *Int. J. Adapt. Control Signal Process.*, 1999.
- [40] Z. Boger, "Application of neural networks to water and wastewater treatment plant operation," *ISA Trans.*, 1992.
- [41] Y. Y. Yang and D. A. Linkens, "Modelling of Continuous Bioreactors via Neural Networks," *Trans. Inst. M.C.*, vol. 15, no. No. 4, pp. 158–169, 1993.

- [42] J. Alex *et al.*, *The COST Simulation Benchmark: Description and Simulator Manual*. .
- [43] J. Alex *et al.*, "Benchmark Simulation Model no. 1 (BSM1) Benchmark Simulation Model no. 1 (BSM1) Contributors," *Benchmark Simul. Model*, 2008.
- [44] K. V. Gernaey, U. Jeppsson, P. A. Vanrolleghem, J. B. Copp, and J. P. Steyer, *Benchmarking of control strategies for wastewater treatment plants*. 2014.
- [45] C. Rosen, U. Jeppsson, and P. a Vanrolleghem, "Towards a common benchmark for long-term process control and monitoring performance evaluation.," *Water Sci. Technol.*, 2004.
- [46] U. Jeppsson *et al.*, "Benchmark simulation model no 2: general protocol and exploratory case studies.," *Water Sci. Technol.*, 2007.
- [47] I. Nopens *et al.*, "Benchmark Simulation Model No 2: Finalisation of plant layout and default control strategy," *Water Science and Technology*. 2010.
- [48] K. V. Gernaey, X. Flores-Alsina, C. Rosen, L. Benedetti, and U. Jeppsson, "Dynamic influent pollutant disturbance scenario generation using a phenomenological modelling approach," *Environ. Model. Softw.*, 2011.
- [49] R. Otterpohl and M. Freund, "Dynamic models for clarifiers of activated sludge plants with dry and wet weather flows," in *Water Science and Technology*, 1992.
- [50] D. J. Batstone *et al.*, "The IWA Anaerobic Digestion Model No 1 (ADM1).," *Water Sci. Technol.*, 2002.
- [51] D. Vrecko, K. V. Gernaey, C. Rosen, and U. Jeppsson, "Benchmark Simulation Model No 2 in Matlab-Simulink: Towards plant-wide WWTP control strategy evaluation," in *Water Science and Technology*, 2006.
- [52] I. Nopens *et al.*, "An ASM/ADM model interface for dynamic plant-wide simulation," *Water Res.*, 2009.
- [53] X. Flores-Alsina *et al.*, "Modelling phosphorus (P), sulfur (S) and iron (Fe) interactions for dynamic simulations of anaerobic digestion processes," *Water Res.*, 2016.
- [54] K. Solon *et al.*, "Plant-wide modelling of phosphorus transformations in wastewater treatment systems: Impacts of control and operational strategies," *Water Res.*, vol. 113, pp. 97–110, 2017.
- [55] G. Ifrim, T. Ionescu, D. Carp, M. Barbu, S. Caraman, and E. Ceanga, "Interdisciplinary training in scientific research on bioprocesses control.," Bucuresti: Editura MatrixRom, 2011, pp. 2–15.
- [56] D. Carp, M. Barbu, and S. Caraman, "Robust state observers for biological wastewater treatment processes with activated sludge," in *2012 16th International Conference on System Theory, Control and Computing, ICSTCC 2012 - Joint Conference Proceedings*, 2012.
- [57] A. Chiroasca, L. Luca, G. Ifrim, and S. Caraman, "Robust control of the biological wastewater treatment process," in *2013 17th International Conference on System Theory, Control and Computing, ICSTCC 2013; Joint Conference of SINTES 2013, SACCS 2013, SIMSIS 2013 - Proceedings*, 2013.
- [58] M. Barbu, S. Caraman, G. Ifrim, G. Bahrim, and E. Ceanga, "State observers for food industry wastewater treatment processes," *J. Environ. Prot. Ecol.*, 2011.
- [59] C. Vlad, S. Caraman, D. Carp, V. Minzu, and M. Barbu, "Gain Scheduling control of dissolved oxygen concentration in a wastewater treatment process," in *2012 20th Mediterranean Conference on Control and Automation, MED 2012 - Conference Proceedings*, 2012.
- [60] A. Chiroșcă, G. Ifrim, A. Filipescu, and S. Caraman, "Multivariable H^∞ control of wastewater biological treatment processes," *Control Eng. Appl. Informatics*, 2013.

- [61] S. Caraman, M. Sbarciog, and M. Barbu, "Predictive control of a wastewater treatment process," in *IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline)*, 2006.
- [62] N. Nezam, "Tehnici inteligente pentru conducerea proceselor de epurare a apelor reziduale," Universitatea Politehnica Bucuresti, 2003.
- [63] M. A. Brdys, T. Chang, K. Duzinkiewicz, and W. Chotkowski, "Hierarchical Control of Integrated Quality and Quantity in Water Distribution Systems," in *Water Resources 2000*, 2000.
- [64] S. A. Manesis, D. J. Sapidis, and R. E. King, "Intelligent control of wastewater treatment plants," *Artif. Intell. Eng.*, 1998.
- [65] M. Barbu, S. Caraman, and E. Ceangă, "Bioprocess control using a recurrent neural network model," in *Proceedings of the 20th IEEE International Symposium on Intelligent Control, ISIC '05 and the 13th Mediterranean Conference on Control and Automation, MED '05*, 2005.
- [66] J. D. Rojas, X. Flores-Alsina, U. Jeppsson, and R. Vilanova, "Application of multivariate virtual reference feedback tuning for wastewater treatment plant control," *Control Eng. Pract.*, 2012.
- [67] M. A. Brdys and Y. Zhang, "Robust Hierarchical Optimising Control of Municipal Wastewater Treatment Plants," *IFAC Proc. Vol.*, vol. 34, no. 8, pp. 531–538, 2001.
- [68] K. V. Gernaey, M. C. Mussati, Z. Yuan, M. K. Nielsen, and S. B. Jørgensen, "CONTROL STRATEGY EVALUATION FOR COMBINED N AND P REMOVAL USING A BENCHMARK WASTEWATER TREATMENT PLANT," in *15th Triennial World Congress of International Federation of Automatic Control*, 2002.
- [69] H. Xu and R. Vilanova, "PI and fuzzy control for P-removal in wastewater treatment plant," *Int. J. Comput. Commun. Control*, 2015.
- [70] I. Santín, C. Pedret, and R. Vilanova, "Applying variable dissolved oxygen set point in a two level hierarchical control structure to a wastewater treatment process," *J. Process Control*, 2015.
- [71] I. Santín, M. Barbu, C. Pedret, and R. Vilanova, "Fuzzy logic for plant-wide control of biological wastewater treatment process including greenhouse gas emissions," *ISA Trans.*, 2018.
- [72] J. Guerrero, A. Guisasola, R. Vilanova, and J. A. Baeza, "Improving the performance of a WWTP control system by model-based setpoint optimisation," *Environ. Model. Softw.*, 2011.
- [73] I. Santín, C. Pedret, R. Vilanova, and M. Meneses, "Advanced decision control system for effluent violations removal in wastewater treatment plants," *Control Eng. Pract.*, 2016.
- [74] H. G. Han, L. Zhang, H. X. Liu, and J. F. Qiao, "Multiobjective design of fuzzy neural network controller for wastewater treatment process," *Appl. Soft Comput. J.*, 2018.
- [75] S. A. C. S. Galati, "Web Site - SC Apa Canal SA Galati." [Online]. Available: <http://www.apa-canal.ro/>. [Accessed: 23-Oct-2018].
- [76] "SIMBA#water | SIMBA Portal." [Online]. Available: <https://simba.ifak.eu/content/simba-sharp-water>. [Accessed: 26-Oct-2018].
- [77] D. J. Batstone and J. Keller, "Industrial applications of the IWA anaerobic digestion model No.1 (ADM1)," *Water Sci. Technol.*, 2003.
- [78] G. Lettinga and A. C. van Haandel, "Anaerobic digestion for energy production and environmental protection," *Renew. energy sources fuels Electr.*, 1993.
- [79] D. J. Batstone, D. Puyol, X. Flores-Alsina, and J. Rodríguez, "Mathematical modelling of anaerobic digestion processes: applications and future needs," *Rev. Environ. Sci.*

- Biotechnol.*, 2015.
- [80] S. K. Khanal, *Anaerobic Biotechnology for Bioenergy Production: Principles and Applications*. 2009.
- [81] G. F. Parkin and W. F. Owen, "Fundamentals of Anaerobic Digestion of Wastewater Sludges," *J. Environ. Eng.*, 1986.
- [82] P. A. Vanrolleghem, U. Jeppsson, J. Carstensen, B. Carlsson, and G. Olsson, *Integration of wastewater treatment plant design and operation - A systematic approach using cost functions*. 1996.
- [83] L. Luca, M. Barbu, and S. Caraman, "Modelling and performance analysis of an urban wastewater treatment plant," *2014 18th Int. Conf. Syst. Theory, Control Comput. ICSTCC 2014*, 2014.
- [84] L. Luca, M. Barbu, G. Ifrim, and S. Caraman, "Analysis of phosphorus removal performances in a municipal treatment plant," in *2015 19th International Conference on System Theory, Control and Computing, ICSTCC 2015 - Joint Conference SINTES 19, SACCS 15, SIMSIS 19*, 2015.
- [85] L. Luca *et al.*, "Optimization of the wastewater treatment processes based on the relaxation method," in *Proceedings - 2017 5th International Symposium on Electrical and Electronics Engineering, ISEEE 2017*, 2017, vol. 2017–Decem.
- [86] C. Rosen and U. Jeppsson, "Aspects on ADM1 Implementation within the BSM2 Framework," *Tech. Rep.*, 2006.