



UNIUNEA EUROPEANĂ



GUVERNUL ROMÂNIEI  
MINISTERUL MUNCII, FAMILIEI,  
PROTECȚIEI SOCIALE ȘI  
PERSOANELOR VĂRSTNICE  
AMPOSDRU



Fondul Social European  
POSDRU 2007-2013



Instrumente Structurale  
2007-2013



MINISTERUL  
EDUCAȚIEI  
NAȚIONALE  
OPPOSDRU



UNIVERSITAS  
GALATIENSIS

**Universitatea „Dunărea de Jos” din Galați**

**Școala doctorală de Inginerie**



# **TEZĂ DE DOCTORAT**

**- Rezumat -**

## **CONTRIBUȚII PRIVIND CONDUCEREA AUTOMATĂ A SISTEMELOR DE COLECTARE ȘI TRATARE A APELOR UZATE**

**Doctorand,**

**Ing. Mioara Daniela BARBU (CARP)**

**Conducător științific,**

**Prof. univ. dr. ing. Viorel MÎNZU**

**GALAȚI**

**2014**





UNIUNEA EUROPEANĂ



GUVERNUL ROMÂNIEI  
MINISTERUL MUNCII, FAMILIEI,  
PROTECȚIEI SOCIALE ȘI  
PERSOANELOR VÂRSTNICE  
AMPOSDRU



Fondul Social European  
POSDRU 2007-2013



Instrumente Structurale  
2007-2013



MINISTERUL  
EDUCAȚIEI  
NAȚIONALE  
OIPOSDRU



UNIVERSITAS  
GALATIENSIS

**Universitatea „Dunărea de Jos” din Galați**

**Școala doctorală de Inginerie**



# TEZĂ DE DOCTORAT

**- Rezumat -**

## **CONTRIBUȚII PRIVIND CONDUCEREA AUTOMATĂ A SISTEMELOR DE COLECTARE ȘI TRATARE A APELOR UZATE**

**Doctorand**

**Ing. Mioara Daniela BARBU (CARP)**

**Conducător științific,  
Referenți științifici**

Prof univ.dr.ing. Viorel MÎNZU  
Prof univ.dr.ing. Aurelian STĂNESCU  
Prof univ.dr.ing. Sergiu ILIESCU  
Prof univ.dr.ing. Sergiu CARAMAN

**Seria I 8: Inginerie sistemelor Nr. 1**

**GALAȚI**

**2014**

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

Domeniul **ȘTIINȚE INGINEREȘTI**

Seria I 1: **Biotehnologii**

Seria I 2: **Calculatoare și tehnologia informației**

Seria I 3: **Inginerie electrică**

Seria I 4: **Inginerie industrială**

Seria I 5: **Ingineria materialelor**

Seria I 6: **Inginerie mecanică**

Seria I 7: **Ingineria produselor alimentare**

Seria I 8: **Ingineria sistemelor**

Domeniul **ȘTIINȚE ECONOMICE**

Seria E 1: **Economie**

Seria E 2: **Management**

Domeniul **ȘTIINȚE UMANISTE**

Seria U 1: **Filologie- Engleză**

Seria U 2: **Filologie- Română**

Seria U 3: **Istorie**



2544/05.02.2014

C ă t r e

Universitatea “Dunărea de Jos” din Galați vă face cunoscut că, în data de **20.02.2014**, ora **11.00**, în sala **Y 405 a Facultății de Automatică, Calculatoare, Inginerie Electrică și Electronică**, va avea loc susținerea publică a tezei de doctorat intitulată: **„CONTRIBUȚII PRIVIND CONDUCEREA AUTOMATĂ A SISTEMELOR DE COLECTARE ȘI TRATARE A APELOR UZATE”**, elaborată de doamna/domnul **BARBU MIOARA-DANIELA (CARP)**, în vederea conferirii titlului științific de doctor în domeniul de doctorat **Ingineria sistemelor**.

Comisia de doctorat are următoarea componență :

- |                           |   |
|---------------------------|---|
| 1. Președinte             | <b>Conf.univ.dr.ing. Emilia PECHEANU</b><br>Universitatea „Dunărea de Jos” din Galați       |
| 2. Conducător de doctorat | <b>Prof.univ.dr.ing. Viorel-Nicolae MÎNZU</b><br>Universitatea „Dunărea de Jos” din Galați  |
| 3. Referent oficial       | <b>Prof.univ.dr.ing. Aurelian STĂNESCU</b><br>Universitatea POLITEHNICA București           |
| 4. Referent oficial       | <b>Prof.univ.dr.ing. Sergiu ILIESCU</b><br>Universitatea POLITEHNICA București              |
| 5. Referent oficial       | <b>Prof.univ.dr.ing. Sergiu-Viorel CARAMAN</b><br>Universitatea „Dunărea de Jos” din Galați |

Cu această ocazie vă transmitem rezumatul tezei de doctorat, și vă invităm să participați la susținerea publică. În cazul în care doriți să faceți eventuale aprecieri sau observații asupra conținutului lucrării, vă rugăm să le transmiteți în scris pe adresa universității, str. Domnească nr. 47, 800008 Galați, Fax 0236 / 461353, e-mail [rectorat@ugal.ro](mailto:rectorat@ugal.ro).

Re c t o r,

Prof. univ. dr. ing. Iulian Gabriel BÎRSAN





# CUPRINS

## INTRODUCERE

CAP. 1. STADIUL ACTUAL ÎN MODELAREA ȘI CONDUCEREA AUTOMATĂ A SISTEMELOR DE COLECTARE ȘI TRATARE A APELOR UZATE.....	1
1.1. Introducere privind problematica sistemelor de colectare a apelor uzate.....	1
1.2. Introducere privind problematica sistemelor de tratare a apelor uzate .....	3

## PARTEA I: MODELAREA SISTEMELOR DE COLECTARE ȘI TRATARE A APELOR UZATE

CAP. 2: MODELAREA REȚELELOR DE COLECTARE A APELOR UZATE.....	7
2.1. Modelarea analitică a rețelilor de colectare a apelor uzate.....	7
2.2. Modelarea rețelilor de colectare a apelor uzate utilizând software-ul de simulare SIMBA .....	8
2.3. Concluzii .....	11
CAP. 3: MODELAREA INSTALAȚIILOR DE TRATARE A APELOR UZATE .....	12
3.1. Modelarea analitică a instalațiilor de tratare a apelor uzate.....	12
3.2. Modelarea instalațiilor de tratare a apelor uzate utilizând software-ul de simulare SIMBA .....	14
3.3. Concluzii .....	16

## PARTEA a II-a: CONDUCEREA AUTOMATĂ A SISTEMELOR DE COLECTARE A APELOR UZATE

CAP. 4: CONDUCEREA AUTOMATĂ A REȚELELOR DE COLECTARE A APELOR UZATE CU REGULATOARE FUZZY .....	18
4.1. Elemente privind conducerea fuzzy a proceselor.....	18
4.2. Conducerea automată a rețelilor de colectare a apelor uzate utilizând logica fuzzy.....	18
4.3. Concluzii .....	23
CAP. 5: CONDUCEREA OPTIMALĂ A REȚELELOR DE COLECTARE A APELOR UZATE. PROGRAMAREA DINAMICĂ DISCRETĂ. REGULATOR PREDICTIV .....	24
5.1. Definirea problemei de conducere a unei rețele de colectare a apelor uzate ca problemă de optimizare dinamică .....	24
5.2. Rezolvarea problemei de optimum folosind programarea dinamică discretă.....	26

5.3. Implementarea unui algoritm de programare dinamica discretă pentru conducerea optimală a unei rețele de colectare a apelor uzate.....	26
5.4. Conducerea predictiva a rețelelor de colectare a apelor uzate .....	30
5.5. Concluzii .....	35

## **PARTEA a III-a: CONDUCEREA AUTOMATĂ A SISTEMELOR DE TRATARE A APELOR UZATE**

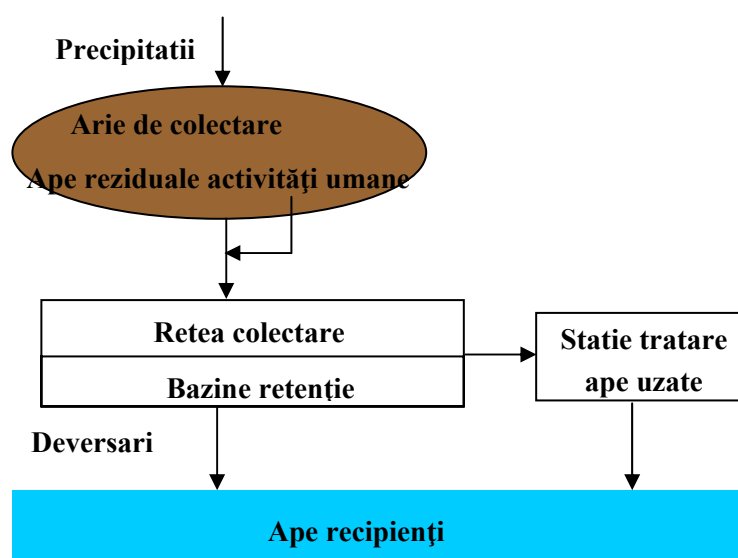
<b>CAP. 6: CONDUCEREA AUTOMATĂ A INSTALAȚIILOR DE TRATARE A APELOR UZATE UTILIZÂND TEHNICI BAZATE PE DATE .....</b>	<b>37</b>
6.1. Conducerea automată a proceselor utilizând metode bazate pe date .....	37
6.2. Conducerea automată a instalațiilor de tratare a apelor uzate utilizând structuri de reglare bazate pe date .....	44
6.3. Concluzii .....	48
<b>CAP. 7: REGULATOR QFT ÎN CONDUCEREA AUTOMATĂ A INSTALAȚIILOR DE TRATARE A APELOR UZATE .....</b>	<b>49</b>
7.1. Elemente privind metoda QFT de proiectare a structurilor de reglare.....	49
7.2. Conducerea automată a instalațiilor de tratare a apelor uzate utilizând structuri de reglare QFT .....	50
7.3. Concluzii .....	54
<b>CAP. 8: CONCLUZII .....</b>	<b>55</b>
8.1. Contribuții și diseminarea rezultatelor obținute.....	55
8.2. Direcții viitoare de cercetare .....	57
<b>BIBLIOGRAFIE .....</b>	<b>58</b>



## INTRODUCERE

Sistemele de colectare a apelor uzate au cunoscut în istorie o evoluție sinuoasă. Astfel, în Grecia Antică (300 î.H. - 500 d.H.) și, mai ales, în Roma Antică (800 î.H. - 450 d.H.) au existat sisteme funcționale de colectare a reziduurilor umane. Anii care au urmat însă (450 d.H. - 1750 d.H.) au constituit o perioadă în care aspectul salubrității publice practic nu a existat, perioada fiind cunoscută și ca "Sanitary Dark Ages" (Henze ș.a., 2008). Ulterior acestei perioade, dezvoltarea din ce în ce mai pronunțată a orașelor și înțelegerea rolului reziduurilor umane în răspândirea bolilor au dus la crearea de sisteme din ce în ce mai performante de colectare a reziduurile umane. Dezvoltarea activităților industriale a determinat apariția de poluanți rezultați din aceste activități, apele rezultate din astfel de activități fiind deversate în același sistem de colectare. Astfel, apele rezultate din activitățile umane, casnice sau industriale, constituie apa uzată. Pe măsură ce aceste sisteme de colectare avansau, a apărut o nouă problemă: cea a afectării calității apei în recipientii naturali (râuri, lacuri etc.), recipientii în care erau evacuate apele uzate. Astfel, sunt introduse sisteme care să realizeze o tratare a acestor ape înainte de deversare în recipientii naturali. Prin tratare se înțelege eliminarea parțială sau totală a substanțelor cu caracter poluant din compoziția apei uzate și care ar putea afecta mediul înconjurător.

Dacă inițial problemele de colectare și tratare a apelor uzate erau tratate distinct, fără a se considera că există o legătură directă între cele două sisteme, în ultimii ani a devenit din ce în ce mai clar necesitatea tratării unitare, integrate, a celor două sisteme. În Figura I.1 se prezintă schematic un sistem urban de ape uzate. Acesta este compus din zona de acumulare, rețeaua de colectare, instalația de tratare a apelor uzate și apele recipientii (râuri, lacuri, mare etc.) (Graells și Katebi, 2006). Din Figura I.1 se observă că atât rețeaua de colectare, cât și instalația de tratare a apelor uzate contribuie negativ asupra stării mediului înconjurător. În evaluarea importanței acordate acestei probleme trebuie avut în vedere și faptul că majoritatea așezărilor urbane se alimentează cu apă curentă din apele de suprafață, deci din apele în care se realizează aceste deversări.



**Figura I.1:** Schema unui sistem de ape uzate urbane (Graells și Katebi, 2006)

În anul 2000, în Uniunea Europeană a fost adoptată Directiva Europeană privind Calitatea Apei, Directiva 2000/60/EC, directivă care completează directivele precedente. Această directivă menționează în mod explicit că integritatea ecologică este un scop important. Acest lucru are consecințe importante privind practica curentă în managementul integrat al apelor urbane. Soluțiile tradiționale ingineresti, cum ar fi minimizarea deversărilor nu mai sunt suficiente, deoarece nu garantează că va fi obținută o stare bună din punct de vedere ecologic. Practic directiva își propune să conducă la o dezvoltare durabilă a activităților umane, principalele obiective impuse prin această directivă fiind (Bloch, 2001):

- managementul integrat al bazinelor râurilor, depășind astfel nivelul granițelor;
- protecția tuturor surselor de apă, de suprafață sau subterane, atât în ceea ce privește calitatea, cât și în ceea ce privește cantitatea;
- emisii și deversări controlate printr-o abordare combinată, impunându-se valori limită pentru emisii și standarde de calitate;
- introducerea de politici privind taxarea deversărilor.

În aceste condiții, ținând cont de impactul calității apei asupra mediului și sănătății publice, adresarea unei probleme care să aibă în vedere atât sistemele de colectare, cât și pe cele de tratare a devenit o prioritate a mai multor grupuri de cercetare, lucrările științifice publicate fiind de valoare și, în același timp, încurajatoare. O astfel de temă de cercetare este prioritară și în România ținând cont de faptul că prin integrarea în Uniunea Europeană, aceasta este obligată să respecte legislația de mediu europeană existentă. România a acceptat implementarea până în anul 2015 a standardele impuse prin Directiva 91/271/EEC privind epurarea apelor uzate urbane. Astfel, în cadrul Planului Național de acțiune pentru protecția mediului, elaborat în 1995 și revizuit în 1999, unul din obiectivele strategice prevăzute îl reprezintă modernizarea și extinderea sistemelor de colectare a apelor uzate și construirea de noi stații de epurare a apelor uzate, care să includă și tratamentul biologic al apelor uzate.

*Teză de doctorat intitulată "CONTRIBUȚII PRIVIND CONDUCEREA AUTOMATĂ A SISTEMELOR DE COLECTARE ȘI TRATARE A APELOR UZATE" își propune realizarea unui prim pas spre tratarea integrată a sistemelor de tratare și colectare a apelor uzate, în cadrul tezei fiind abordate problema conducerii automate atât a sistemelor de colectare a apelor uzate, cât și a celor de tratare a apelor uzate. În cazul ambelor procese vor fi considerate modele standard din literatura de specialitate și vor fi investigate abordări de conducere automată specifice fiecărui tip de proces considerat. Metodele investigate vor fi susținute prin studii de caz implementate în cadrul simulatorului SIMBA.*

***Teza de doctorat a fost realizată cu sprijinul financiar al proiectului "Calitatea și continuitatea formării în cadrul ciclului de studii doctorale - TOP ACADEMIC", POSDRU/107/1.5/S/76822.***

# CAPITOLUL 1: STADIUL ACTUAL ÎN MODELAREA ȘI CONDUCEREA AUTOMATĂ A SISTEMELOR DE COLECTARE ȘI TRATARE A APELOR UZATE

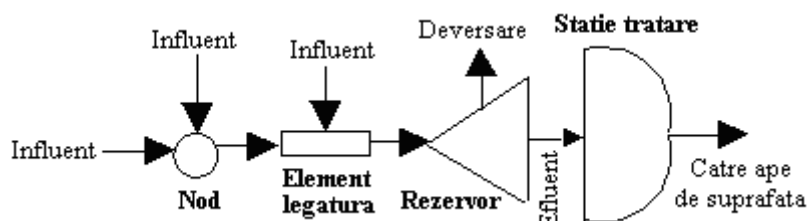
## 1.1. INTRODUCERE PRIVIND PROBLEMATICA SISTEMELOR DE COLECTARE A APELOR UZATE

Sistemele actuale de colectare a apelor uzate sunt de două tipuri:

- **sisteme combinate** care colectează atât apa uzată rezultată din activitatea umană, cât și apele pluviale și o transportă către sistemele de tratare a apelor uzate;

- **sisteme separate** pentru colectarea apei uzate rezultate din activitatea umană și pentru apele pluviale. În acest caz, doar apa uzată este transportată către instalația de tratare, apa pluvială fiind deversată, netratată, către receptori naturali (râuri, lacuri etc.).

În continuare, în cadrul tezei de doctorat ne vom referi doar la sistemele combinate de colectare a apelor uzate. Alegerea acestui tip de sistem ca obiect de studiu a fost determinată de faptul că aceste sisteme sunt cele mai răspândite, fiind prezente în majoritatea așezărilor urbane și, în același timp, ridică cele mai mari probleme din punct de vedere al managementului apelor uzate pe durata regimurilor pluviometrice. Un sistem de colectare a apelor uzate este constituit din următoarele elemente: elemente de legătură (conducte), rezervoare cu capacitate de stocare și noduri (elemente în care se reunesc fluxurile de ieșire ale celorlalte elemente ale rețelei). Un exemplu de sistem de colectare a apelor uzate de mici dimensiuni este prezentat în Figura 1.1.1.



**Figura 1.1.1:** Reprezentarea schematică a unui sistem de colectare a apelor uzate de mici dimensiuni (Marinaki și Papageorgiou, 2005)

### *Stadiul actual în modelarea matematică și simularea rețelelor de colectare a apelor uzate*

Modelarea sistemelor de colectare a apelor uzate începe de la aria de colectare. Pentru aceste arii există diverse modele care includ, într-o manieră mai mult sau mai puțin extensivă, fenomenele de infiltrare care depind de natura suprafeței (Fuchs, 1996). Sistemele de colectare a apelor uzate pot fi descrise prin modele detaliate care permit considerarea în profunzime a fenomenelor care au loc în cadrul conductelor de canalizare până la modele simplificate ce fac un compromis rezonabil între nevoia de a avea o descriere precisă a rețelei și necesitatea unor modele cât mai simple pentru a putea fi utilizate în algoritmi de control (Marinaki și Papageorgiou, 1999), (Schutze ș.a., 2002). Modelele cele mai complexe sunt cele hidrodinamice care se bazează pe ecuațiile de tip Saint-Venant pentru curgere unidimensională nestaționară. O altă abordare de modelare a sistemelor de colectare a apelor uzate este bazată pe modelele hidrologice, în care o structură matematică derivată din legile fizicii este fitată pe date. Ținând cont de complexitatea modelelor menționate, pentru implementarea structurilor de control automat se utilizează modele simplificate, cum ar fi cele din (Marinaki și Papageorgiou, 2005), în care conductele sunt descrise prin ecuații diferențiale de ordinul întâi, sau cele propuse în

(Ocampo-Martinez, 2010), unde rețeaua de canalizare este modelată ca un sistem hibrid conținând atât subsisteme cu stări continue, cât și subsisteme cu evenimente discrete.

La momentul actual există mai multe pachete de programe destinate simulării rețelelor de colectare a apelor uzate: MOUSE, FLUPOL, MOSQUITO, KOSIM, SYNOPSIS, SWMM, WEST, ICS și SUPERLINK. Pachetul software cel mai potrivit utilizării în cazul cercetărilor din domeniul simulării și conducerii automate a rețelelor de colectare a apelor uzate și al instalațiilor de tratare a apelor uzate este SIMBA. Acesta este implementat sub forma unui toolbox MATLAB-Simulink, permițând astfel utilizarea tuturor capacităților MATLAB și MATLAB-Simulink.

### ***Stadiul actual în conducerea automată a rețelelor de colectare a apelor uzate***

Instalațiile combinate de colectare a apelor uzate orășenești nu au colectori separați pentru apele uzate rezultate din uzul casnic sau industrial și apele rezultate în urma precipitațiilor. Pe durata precipitațiilor, instalațiile de colectare a apelor uzate și stația de tratare pot fi supraîncărcate, putând avea loc deversări ce cauzează poluarea apelor de suprafață. Plasarea tancurilor de retenție în diverse puncte ale instalației de colectare a apelor uzate este o metodă eficientă de eliminare a deversărilor în cazul precipitațiilor moderate și de reducere a acestora în cazul celor mai puternice. Acest lucru se realizează prin stocarea apei în rezervoare pe durata precipitațiilor și transportul acesteia către stația de tratare după ce precipitațiile s-au oprit.

În Figura 1.1.2a) este prezentat un exemplu de implementare a unei astfel de rețele de colectare în care au fost introduse capacități de stocare cu volume impresionante pentru evitarea sau, cel puțin, limitarea deversărilor pe durata evenimentelor pluviometrice semnificative. În România, din păcate, deși sunt derulate programe europene pentru modernizarea instalațiilor de colectare a apelor uzate, nu au fost adoptate astfel de soluții. Acest lucru implică apariția de refluări ale canalizărilor (vezi Figura 1.1.2b)) atunci când cantitatea de ape pluviale și ape reziduale din activitatea umană depășește capacitatea rețelei.



**Figura 1.1.2:** Exemple de funcționări ale unui sistem de colectare a apelor uzate  
a) orașul Tokyo (Sursa: [slide.news.sina.com.cn](http://slide.news.sina.com.cn)); b) orașul Galați (Sursa: [www.viata-libera.ro](http://www.viata-libera.ro))

În cadrul problemei de conducere automată a rețelelor de colectare a apelor uzate obiectivul principal urmărit este cel de minimizare a deversărilor de apă netratată din rețea în receptorii naturali. Pe lângă acest obiectiv, în cadrul strategiei de conducere automată a rețelei pot fi avute în vedere și următoarele obiective (Marinaki și Papageorgiou, 2005):

- evitarea supraîncărcării bazinelor care nu au capacitate de deversare. Acesta este obiectivul cu cea mai mare importanță deoarece asigură funcționarea în condiții de siguranță a rețelei;

- maximizarea utilizării stației de tratare a apelor uzate atât pe durata precipitațiilor, cât și imediat după finalizarea acestora. În primul caz, se urmărește ca rețeaua să aibă o posibilitate de prelucrare de apă tratată cât mai mare, deoarece apa tratată are o încărcare cu poluanți semnificativ mai mică decât apă uzată netratată. În al doilea caz, se urmărește ca rețeaua să fie golită cât mai repede pentru a o pregăti pentru eventuale noi precipitații care pot apare;

- utilizarea echilibrată pe structura rețelei a capacităților de stocare ale bazinelor. Ca și în cazul precedent, prin acest obiectiv se dorește utilizarea eficientă a tuturor capacităților de stocare ale rețelei pe durata precipitațiilor, dar și golirea uniformă a rețelei după finalizarea precipitațiilor, pregătind astfel rețeaua pentru noi precipitații;

- evoluția comenzii cât mai lină, pentru a nu forța elementele de execuție de la nivelul bazinelor.

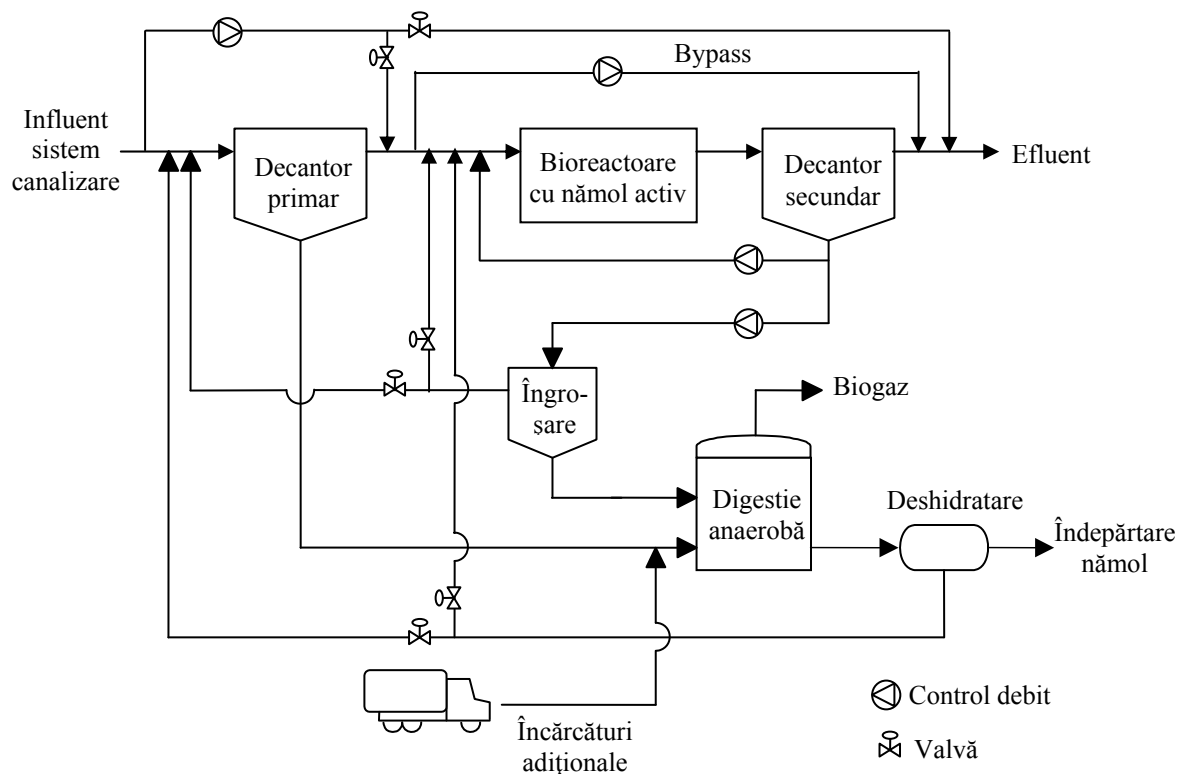
Problema controlului rețelelor de colectare a apelor uzate a fost abordată utilizând diferite tehnici de optimizare. Cele mai utilizate sunt tehnicile de control optimal fie în cazul continuu (Dorsano și Labadie, 2007), (Marinaki și Papageorgiou, 2005), (Pleau ș.a., 2005), fie în cazul hibrid (Ocampo-Martinez, 2010). Alegerea metodei de optimizare depinde de caracteristicile sistemului, datele disponibile și obiectivele strategiei de control.

## **1.2. INTRODUCERE PRIVIND PROBLEMATICA SISTEMELOR DE TRATARE A APELOR UZATE**

Dezvoltarea sistemelor de colectare a reziduurilor umane cu deversarea acestora în râuri, lacuri etc. și dezvoltarea așezărilor urbane, în care aceste soluții erau implementate, a condus la apariția unei noi probleme: afectarea calității apelor în care se făcea deversarea. În aceste condiții, a apărut necesitatea unor forme de tratament a apelor reziduale înainte de deversare.

Ținând cont de situația existentă la acest moment, schema generală a unei stații de tratare a apelor uzate cu nămol activ ce deservește o comunitate urbană este prezentată în Figura 1.2.1 (Vrecko ș.a., 2006). Din figură se observă că stația de tratare este alimentată direct de la rețeaua de colectare a apelor uzate, iar ieșirea instalației de tratare este conectată la un râu, lac etc., de aici și rolul foarte important al acesteia. Elementele principale ale instalației de tratare sunt: decantorul primar (cu rol în tratamentul mecanic al apelor uzate), bioreactoare cu nămol activ (în care are loc tratamentul biologic al apelor uzate), decantor secundar (cu rol în separarea nămolului activ de apa uzată) și ansamblul format din elementul de îngroșare, stația de digestie anaerobă și stația de deshidratare (cu rol în tratarea nămolului excedentar). Stația pentru digestia anaerobă poate primi și încărcături adiționale de la entități neconectate la sistemul general de canalizare.

În România, ținând cont de restricțiile privind calitatea apei evacuate în apele de suprafață care vor trebui atinse până la sfârșitul anului 2015, au fost finalizate sau sunt în curs de finalizare multiple instalații moderne de tratare a apelor uzate. Una dintre ele este cea finalizată în orașul Brăila. Aceasta conține două bazine anoxice și trei aerobe, este proiectată pentru eliminarea substratului organic și poate trata un influent cu debitul de 9000 m<sup>3</sup>/zi. În Figurile 1.2.2a) și 1.2.2b) sunt prezentate principalele componente ale instalației de tratare, astfel: a) bazinele aerobe cu apă uzată supuse tratamentului cu nămol activ; b) decantorul instalației de tratare din care apa este eliminată prin preaplin.



**Figura 1.2.1:** Schema generală a unei stații de tratare a apelor uzate (Vrecko ș.a., 2006)



**Figura 1.2.2:** Imagini din instalația de tratare a apelor uzate din orașul Brăila

### ***Stadiul actual în modelarea matematică și simularea sistemelor de tratare a apelor uzate***

În 1983, International Water Quality Association, devenită ulterior International Water Association, a format un grup de lucru, care urma să promoveze și să faciliteze aplicarea modelelor practice pentru proiectarea și operarea sistemelor de tratare biologică a apelor uzate cu nămol activ. Rezultatul final al acestui grup a fost prezentarea în 1987 a modelului ASM1 (Activated Sludge Model 1) (Henze ș.a., 1987). Rezultatul obținut a fost un model care trata doar reactorul biologic, nu și decantorul, și care cuprindea eliminarea carbonului organic și a azotului. Modelul propus conținea 9 fenomene și 13 variabile de stare, iar parametrizările utilizate sunt de

tip Monod. Grupul de lucru din cadrul IWA a mai propus trei dezvoltări ulterioare ale modelului ASM1, și anume: ASM2, ASM2d și ASM3 (Henze ș.a., 2000). La acest moment, modelele ASM sunt considerate modele standard în domeniul tratării apelor uzate cu nămol activ.

O problemă distinctă în cazul modelării instalațiilor de tratare a apelor uzate cu nămol activ este cea a modelării decantorului. În literatură sunt utilizate în principal două tipuri de modele matematice: cele bazate pe teoria fluxului, care realizează o descriere precisă a fenomenelor ce au loc la nivelul decantorului (Vesilind, 1968), (Takacs ș.a., 1991) și cele bazate pe bilanțul de masă, în care se neglijează fenomenele de la nivelul decantorului și se ține cont doar de fluxurile de intrare - ieșire din decantor (Nejjari ș.a., 1999).

În literatura din domeniul tratării apelor uzate sunt menționate foarte multe simulatoare pentru aceste procese. Dintra acestea, cele mai semnificative sunt: SIMBA, AQUASIM, software dezvoltat în mediul academic și BioWin. Ținând cont că SIMBA oferă posibilitatea simulării atât a rețelelor de colectare a apelor uzate, cât și a instalațiilor de tratare a apelor uzate, dar și de facilitățile oferite de MATLAB și MATLAB-Simulink, acest software va fi utilizat în continuare în cadrul tezei de doctorat.

### ***Stadiul actual în conducerea automată a sistemelor de tratare a apelor uzate***

Reglementările din ce în ce mai stricte privind calitatea apei deversate în apele de suprafață impuse la nivel mondial, dar, în special la nivelul Uniunii Europene, precum și progresele făcute în domeniul echipamentelor de măsură și dificultatea de a construi instalații de tratare tot mai mari au condus la o intensificare a utilizării controlului automat în zona acestor procese.

În problema conducerii automate a proceselor de tratare a apelor uzate au existat două tipuri de abordări (Barbu, 2009):

1) Controlul separat al principalelor mărimi de interes din proces: cea mai veche problemă în ceea ce privește controlul proceselor de epurare a apelor uzate, și una dintre cele mai importante, o reprezintă controlul nivelului de oxigen dizolvat. Astfel, asigurarea unui nivel satisfăcător de oxigen dizolvat permite dezvoltarea populațiilor de microorganisme folosite în proces (Ingildsen, 2002), (Barbu ș.a., 2011a). Dintre problemele mai recente, un loc important îl ocupă controlul azotului și al fosforului (Ingildsen ș.a., 2001).

2) Controlul bazat pe modelul matematic al procesului de tratare a apelor uzate: Folosirea modelului descris în (Nejjari ș.a., 1999) a permis utilizarea tehnicilor clasice și moderne de conducere: pornind de la structurile clasice de tip PI, PID (Katebi ș.a., 1999), în care se folosește pentru proiectarea reguletoarelor liniarizarea modelului neliniar în jurul unui punct de funcționare și ajungând până la controlul liniarizant exact multivariabil sau în variantă adaptivă, împreună cu un estimator de stare și parametri (Nejjari ș.a., 1999), (Ifrim, 2011), (Carp ș.a., 2012). Folosind același model au fost implementate cu succes tehnici de control robust de tip Quantitative Feedback Theory (Barbu și Caraman, 2011) sau Gain Scheduling (Vlad ș.a., 2012), și tehnici de control predictiv (Caraman ș.a., 2006). În cazul utilizării modelului ASM1, în (Brdys și Konarczak, 2001) se propune o structură ierarhică de control. O abordare care se pretează foarte bine acestui proces este controlul bazat pe inteligență artificială. Astfel, controlul inteligent utilizează cunoștințele dobândite de operatorii umani sub forma structurilor de reglare de tip sisteme expert, fuzzy, neuro-fuzzy (Manesis ș.a., 1998), (King ș.a., 2004).

## **PARTEA I:**

# **MODELAREA SISTEMELOR DE COLECTARE ȘI TRATARE A APELOR UZATE**



## CAPITOLUL 2: MODELAREA REȚELELOR DE COLECTARE A APELOR UZATE

În cadrul acestui capitol sunt prezentate principalele modele existente în literatura de specialitate pentru rețelele de colectare a apelor uzate. Aceste elemente de modelare stau la baza software-ului de simulare SIMBA care a fost utilizat ca suport pentru testarea metodelor de control din cadrul acestei teze de doctorat. În finalul capitolului este prezentat un studiu de caz privind implementarea și simularea în SIMBA a unei rețele de colectare a apelor uzate.

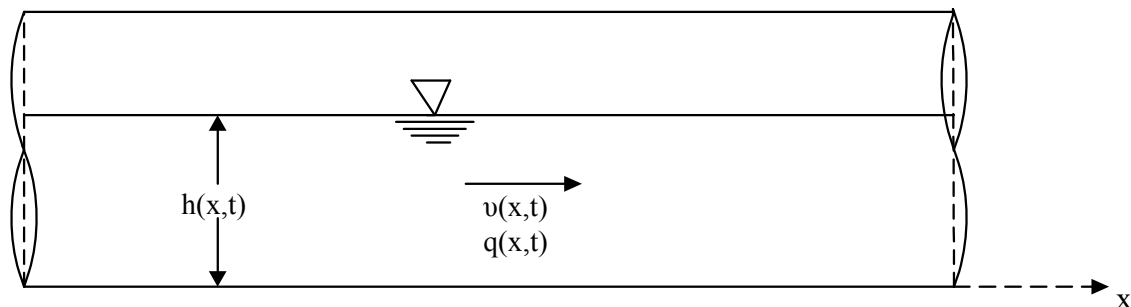
### 2.1. MODELAREA ANALITICĂ A REȚELELOR DE COLECTARE A APELOR UZATE

Modelarea matematică a elementelor de legătură presupune utilizarea ecuațiilor Saint – Venant (Mays și Tung, 1978), și anume, ecuația de continuitate și ecuația momentului, care descriu cu o acuratețe satisfăcătoare comportarea dinamică a curgerii în rețeaua de canalizare. Procesul de curgere este privit ca un curent unidimensional unde variabilele dependente sunt debitul  $q$ , viteza fluxului de apă  $v$  și înălțimea fluxului  $h$ , iar variabilele independente sunt distanța  $x$  și timpul  $t$ , așa cum este prezentat și în Figura 2.1.1 (Marinaki și Papageorgiou, 2005).

Ecuția de continuitate, care exprimă conservarea de masă în curgerea de lichid, corespunde primei ecuații a lui Saint-Venant:

$$\frac{\partial F(h)}{\partial h} \frac{\partial h(x,t)}{\partial t} + \frac{\partial q(x,t)}{\partial x} = 0 \quad (2.1.1)$$

unde:  $q(x,t)$  este debitul în locația  $x$  de-a lungul axei elementului la momentul  $t$ ;  $h(x,t)$  este înălțimea fluxului de apă în locația  $x$  de-a lungul axei elementului la momentul  $t$ ;  $F(h)$  este aria secțiunii transversale a fluxului de apă.



**Figura 2.1.1:** Reprezentarea curgerii unidimensionale într-un element de legătură (Marinaki și Papageorgiou, 2005)

O reducere semnificativă a complexității se poate obține adoptând o variantă simplificată de modelare pentru elementele de legătură și pentru bazinele cu capacitate de stocare și deversare, modele care se pretează mai bine problemelor de control. O soluție de modelare simplificată o constituie cea propusă în (Marinaki și Papageorgiou, 2005). Astfel, ecuația dinamică pentru calculul debitului de ieșire pentru un element de legătură este cea a unui element discret de ordinul întâi:

$$q_{out}(k) = \frac{T}{\tau} \cdot q_{in}(k-1) + \left(1 - \frac{T}{\tau}\right) \cdot q_{out}(k-1) \quad (2.1.2)$$

în care  $q_{out}(k)$  este debitul de ieșire la pasul  $k$ ,  $q_{in}$  este debitul de intrare,  $T$  este perioada de eșantionare, iar  $\tau$  este constanta de timp a elementului de legătură.

Deoarece elementul de legătură admite un debit maxim  $q_{max}$ , atunci asupra debitului de intrare există următoarea restricție:

$$q_{in}(k) \leq q_{max} \quad (2.1.3)$$

Varianta simplificată de modelare propusă în cazul bazinelor cu capacitate de stocare și deversare are forma discretizată:

$$V(k+1) = V(k) + T \cdot [u_{in}(k) - u(k) - q_{dev}(k)] \quad (2.1.4)$$

unde  $V(k)$  este cantitatea de apă existentă în rezervor la momentul  $kT$ ,  $u_{in}(k)$  este debitul de intrare,  $u(k)$  este debitul de ieșire, iar  $q_{dev}(k)$  este deversarea din bazin.

Deversarea se produce atunci când  $V(k) > V_{max}$ , unde  $V_{max}$  este capacitatea de stocare maximă a rezervorului, și este descrisă de ecuația:

$$q_{dev}(k) = \begin{cases} 0 & \text{daca } V(k) \leq V_{max} \\ d_0 [V(k) - V_{max}] / T & \text{altfel.} \end{cases} \quad (2.1.5)$$

cu parametrul  $d_0$  determinat empiric.

Mărimea de comandă  $u(k)$  va fi și ea supusă unor restricții ce țin cont de limitările fizice ale instalației:

$$u_{min} \leq u(k) \leq u_{max} [V(k), k] \quad (2.1.6)$$

unde  $u_{min} \geq 0$ .

## 2.2. MODELAREA REȚELELOR DE COLECTARE A APELOR UZATE UTILIZÂND SOFTWARE-UL DE SIMULARE SIMBA

SIMBA (SIMulationsprogrammms für die Biologische Abwasserreinigung) este un pachet software dezvoltat de IFAK (Institut für Automation and Kommunikation e.V.). SIMBA utilizează MATLAB Simulink ca o platformă generală, fiind de fapt un toolbox pentru modelarea și simularea automată a proceselor de tratare a apelor uzate. Avantajul major al acestui pachet software este că permite utilizatorului să aibă acces la toate capacitățile MATLAB Simulink și să utilizeze MATLAB pentru procesarea datelor obținute prin simulare.

SIMBA conține și un sub-pachet software SIMBA Sewer care permite modelarea și simularea rețelelor de colectare a apelor uzate. Astfel, se pot integra într-un singur mediu de simulare atât rețelele de colectare a apelor uzate, cât și instalațiile de tratare.

Pachetul SIMBA Sewer permite modelarea tuturor aspectelor care privesc o rețea de colectare a apelor uzate (vezi Figura 2.2.1):

- modelarea influentului, ținând cont de debitele rezultate din consumul uman sau industrial și de debitele generate de regimul pluviometric;
- modelarea suprafeței care generează apa uzată;
- modelarea componentelor propriu-zise ale rețelei de colectare a apelor uzate (elemente de legătură și bazine);

De asemenea, în cadrul SIMBA Sewer sunt utilizate diferite tipuri de modele: hidrologice, hidrologice bazate pe abordarea Lagrange sau hidrodinamice.

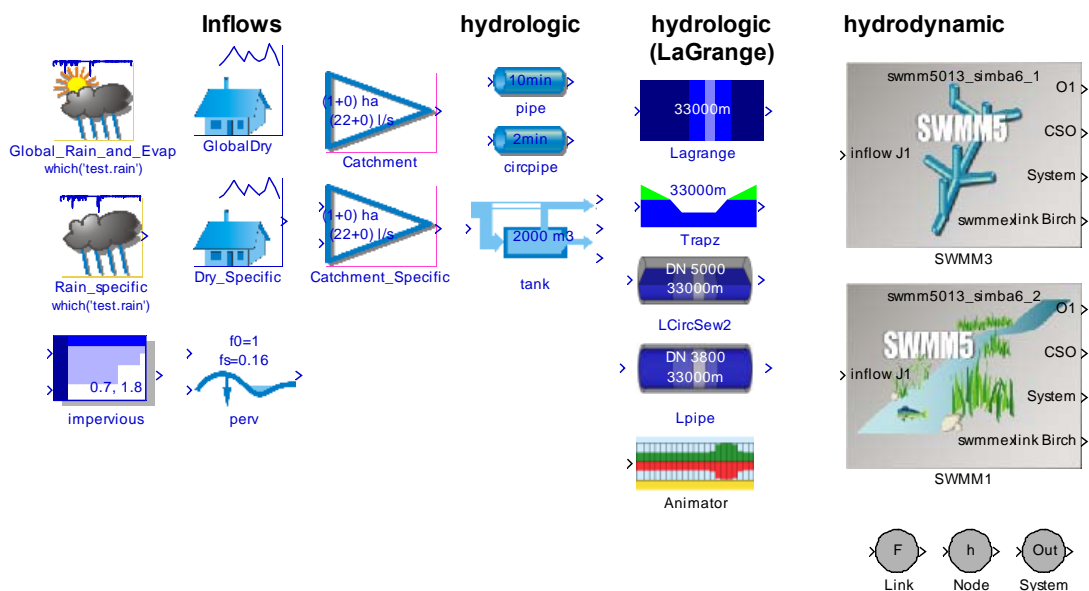


Figura 2.2.1: Componente ale pachetului software SIMBA Sewer

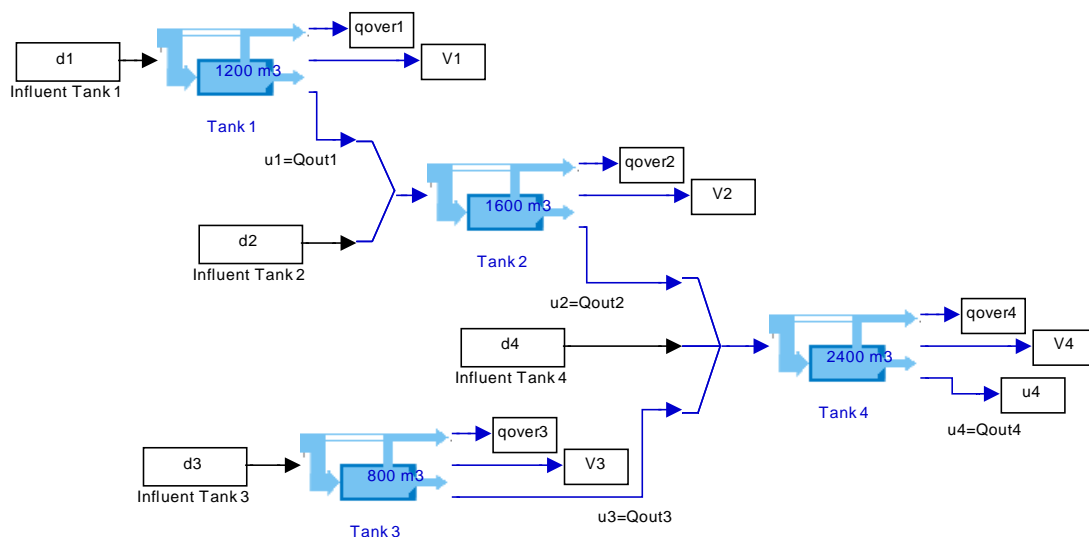


Figura 2.2.2: Modelul SIMBA a rețelei de colectare a apei uzate considerate în Studiul de caz 2.2.1

### Studiul de caz 2.2.1

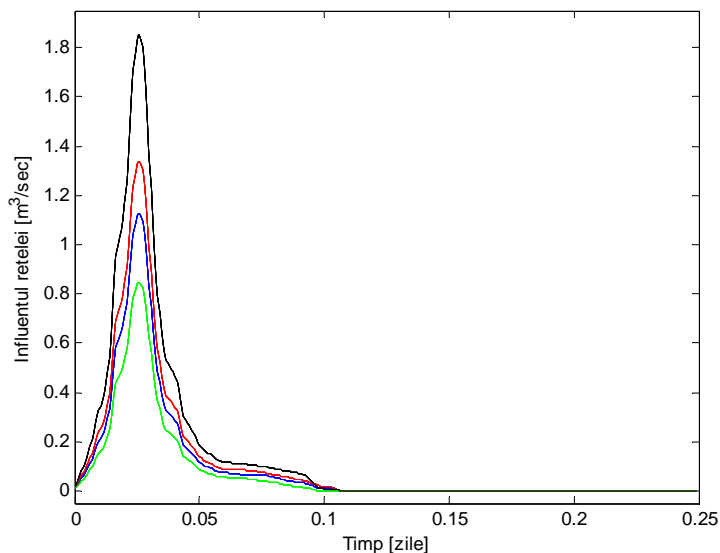
Rețeaua de colectare a apelor uzate considerată în cadrul acestui studiu de caz este una formată din 4 rezervoare cu capacitate de retenție și în care s-a considerat că nu există elemente de legătură între rezervoare. Exemplul, a cărui implementare SIMBA este prezentată grafic în Figura 2.2.1, este inspirat din (Marinaki și Papageorgiou, 2005).

Parametrii rețelei de colectare considerate ca studiu de caz sunt următorii:

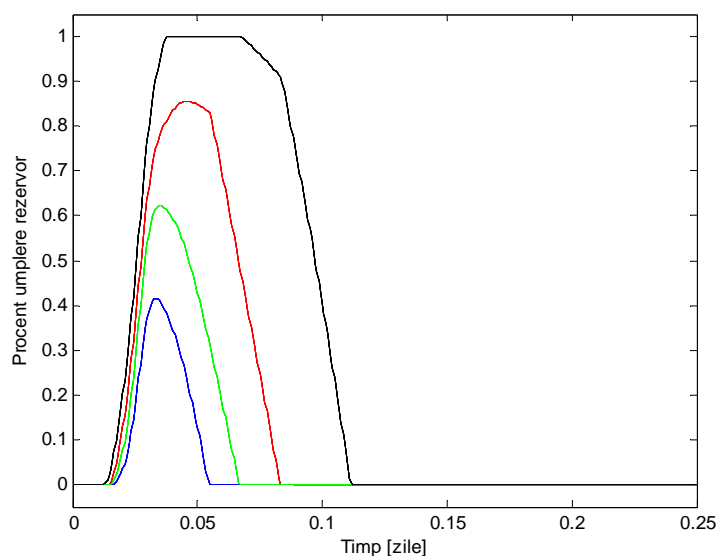
- volumele maxime ale rezervoarelor:  $V_{1\max} = 1200\text{ m}^3$ ,  $V_{2\max} = 1600\text{ m}^3$ ,  $V_{3\max} = 800\text{ m}^3$ ,  $V_{4\max} = 2400\text{ m}^3$ ;
- debitul de ieșire maxim al rezervoarelor:  $u_{1\max} = 0.5\text{ m}^3/\text{sec}$ ,  $u_{2\max} = 0.7\text{ m}^3/\text{sec}$ ,

$$u_{3\max} = 0.3 \text{ m}^3 / \text{sec}, u_{4\max} = 1 \text{ m}^3 / \text{sec}.$$

Pentru simularea rețelei a fost considerat un scenariu conținând un eveniment singular (o singură precipitație) și în care se testează efectul unei precipitații de foarte scurtă durată, dar de intensitate mare.



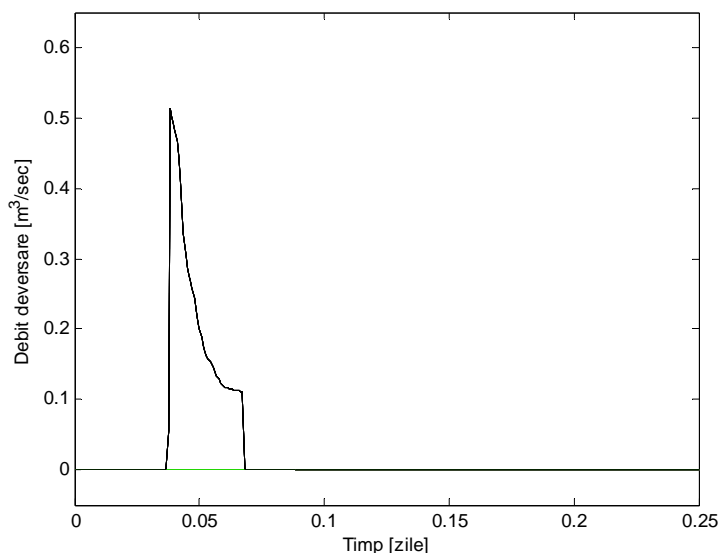
**Figura 2.2.3:** Debitul de intrare în rezervoarele rețelei (Rezervor 1 - Albastru, Rezervor 2 - Roșu, Rezervor 3 - Verde, Rezervor 4 - Negru)



**Figura 2.2.4:** Evoluție gradului de umplere a rezervoarelor rețelei - Cazul fără control (Rezervor 1 - Albastru, Rezervor 2 - Roșu, Rezervor 3 - Verde, Rezervor 4 - Negru)

Scenariul este descris prin debitele de intrare în rețea prezentate în Figura 2.2.3. Simularea rețelei pe baza acestui scenariu s-a realizat mai întâi considerând că debitele de ieșire ale rezervoarelor nu sunt controlate, ele fiind egale cu debitul de ieșire maxim al rezervoarelor. Rezultatele acestei simulări sunt prezentate în Figura 2.2.4, unde este prezentată evoluția în timp a gradului de umplere a rezervoarelor, Figura 2.2.5, unde este prezentată evoluția în timp a deversărilor din rețea. Din analiza datelor obținute rezultă că rețeaua de colectare este subutilizată. Astfel, în timp ce din rezervorul 4 are loc o importantă deversare, rezervoarele 1, 2

și 3 sunt subîncărcate, neutilizându-se capacitățile de stocare ale rețelei pe durata precipitațiilor, rețeaua având mai mult un rol de transmisie imediată a apei uzate către stația de tratare a apelor uzate. Această simulare dovedește necesitatea implementării unui control automat care să conducă la o mai bună distribuție a apei uzate în bazinele de stocare ale rețelei, rezultând astfel o minimizare a deversărilor din rețeaua de colectare a apelor uzate.



**Figura 2.2.5:** Evoluție debit de deversare din rezervoarele rețelei - Cazul fără control (Rezervor 1 - Albastru, Rezervor 2 - Roșu, Rezervor 3 - Verde, Rezervor 4 - Negru)

### 2.3. CONCLUZII

În cadrul acestui capitol au fost prezentate principalele modele existente în literatura de specialitate pentru rețelele de colectare a apelor uzate, precum și software-ul de simulare SIMBA, cu componenta SIMBA Sewer care permite simularea acestor rețele. În cadrul capitolului a fost prezentat un studiu de caz privind implementarea și simularea în SIMBA a unei rețele de colectare a apelor uzate.

Studiul de caz prezentat a arătat necesitatea implementării controlului automat al rețelelor de colectare a apelor uzate, care să conducă la o mai bună distribuție a apei uzate în bazinele de stocare ale rețelei. În acest mod, se poate realiza o minimizare a deversărilor de apă uzată din rețeaua de colectare.

## **CAPITOLUL 3: MODELAREA INSTALAȚIILOR DE TRATARE A APELOR UZATE**

În cadrul acestui capitol sunt prezentate principalele modele existente în literatura de specialitate pentru instalațiile de tratare a apelor uzate. Aceste elemente de modelare stau la baza software-ului de simulare SIMBA care a fost utilizat ca suport pentru testarea metodelor de control din cadrul acestei teze de doctorat. În finalul capitolului este prezentat ca studiu de caz o instalație de tratare a apelor uzate cu nămol activ implementată în SIMBA.

### **3.1. MODELAREA ANALITICĂ A INSTALAȚIILOR DE TRATARE A APELOR UZATE**

În modelarea instalațiilor de tratare a apelor uzate sunt avute în vedere cele două componente din cadrul instalațiilor:

- *sistemul biologic*, considerat în acest caz utilizând nămolul activ, conține totalitatea proceselor prin care sunt consumate componentele apei uzate;
- *decantorul* în care are loc separarea nămolului activ de efluent.

#### **3.1.1. Modelarea matematică a procesului de tratare a apelor uzate cu nămol activ**

În cazul proceselor de tratare a apelor uzate ce includ eliminarea carbonului și a azotului, modelul cel mai cunoscut în literatura de specialitate este ASM1 propus de o echipă din cadrul IWA, în 1987 (Henze ș.a., 1987). Modelul este deosebit de complex, surprinde un număr de opt fenomene care au loc în cadrul reactorului anoxic și a celui aerat (Jeppsson, 1996):

$P_1$  Creșterea aerobă a heterotrofelor – procesul este principalul generator de biomasă heterotrofă nouă și principalul consumator de COD. Astfel, în prezența oxigenului dizolvat, o fracție din substratul rapid biodegradabil este utilizat pentru creșterea heterotrofilor, în timp ce amoniul este utilizat ca o sursă de azot pentru sinteză și încorporat în masa celulelor;

$P_2$  Creșterea anoxică a heterotrofelor – procesul are ca principal rol pe cel de denitrificare. Astfel, în absența oxigenului, nitratul este utilizat ca sursă de oxigen pentru propria dezvoltare a heterotrofelor, rezultând în același timp azot gazos;

$P_3$  Creșterea aerobă a autotrofelor – procesul convertește amoniul în nitrat, în prezența oxigenului dizolvat, rezultând producerea de biomasă autotrofă nouă. Se face observația că rata de creștere a autotrofelor este mai mică în raport cu cea a heterotrofelor;

$P_4$  Descompunerea heterotrofelor – microorganismele mor, biomasa heterotrofă fiind descompusă în substrat lent biodegradabil și alte particule;

$P_5$  Descompunerea autotrofelor – microorganismele mor, biomasa autotrofă fiind descompusă în substrat lent biodegradabil și alte particule;

$P_6$  Amonificarea – azotul organic biodegradabil solubil este transformat în amoniu într-un proces mediat de biomasa heterotrofă activă;

$P_7$  Hidroliza materiei organice – substratul lent biodegradabil este convertit în substrat ușor biodegradabil;

$P_8$  Hidroliza azotului organic – azotul organic biodegradabil particule este transformat în

azot organic biodegradabil solubil.

și conține un număr de 13 variabile de stare:  $S_I$  - Materie organică inertă solubilă;  $S_S$  - Substrat ușor biodegradabil;  $X_I$  - Materie organică inertă particule;  $X_S$  - Substrat lent biodegradabil;  $X_{B,H}$  - Biomasă heterotrofă activă;  $X_{B,A}$  - Biomasă autotrofă activă;  $X_P$  - Produși particule rezultați din descompunerea biomasei;  $S_O$  - Oxigen dizolvat;  $S_{NO}$  - Nitrat și nitrit;  $S_{NH}$  - Amoniu și amoniac;  $S_{ND}$  - Azot organic biodegradabil solubil;  $X_{ND}$  - Azot organic biodegradabil particule;  $S_{ALK}$  - Alcalinitate.

### 3.1.2. Modelarea matematică a decantorului

Una din problemele esențiale în cadrul modelării instalațiilor de tratare a apelor uzate cu nămol activ este cea a modelării decantorului. Decantorul are trei funcționalități principale:

- limpezirea, prin care floculii individuali de biomasă sunt separați de apa tratată;
- îngroșarea, în care floculii individuali de biomasă, pe măsură ce concentrația crește, tind să devină un tot unitar;
- înmagazinarea, de obicei temporară, în cazul perioadelor în care influentul are valori mari (Henze ș.a., 2008).

Modele uzuale sunt cele care presupun împărțirea decantorului în  $n$  secțiuni, alimentarea decantorului cu apa rezultată din bazinele de tratare făcându-se la nivelul secțiunii  $m$ . Eliminarea din decantor a apei tratate se face prin preaplin, iar a biomasei decantate prin extracție prin partea inferioară a decantorului. În fiecare secțiune se consideră că există un amestec omogen, numărul de secțiuni considerate uzual variind de la 10 la 100 (Olsson și Newell, 1999).

Pentru fiecare din cele trei tipuri de secțiuni, deasupra secțiunii de alimentare, secțiunea de alimentare și sub secțiunea de alimentare, se scrie o ecuație de bilanț masic pentru solide (Olsson și Newell, 1999).

Elementul cheie în obținerea unui model fidel al decantorului este definirea fluxului de decantare. Modelul care redă cel mai fidel separarea biomasă - apă tratată de la nivelul decantorului este cel propus în (Takacs ș.a., 1991):

$$f_i = x_i v_i = x_i C_1 \left( e^{-C_2(x_i - x_f)} - e^{-C_3(x_i - x_f)} \right) \quad (3.1.1)$$

unde:  $v_i$  este viteza de decantare;  $x_f$  este fracția de particule care nu decantează;  $C_1$ ,  $C_2$  și  $C_3$  sunt constante determinate empiric corelate cu indicele volumetric al nămolului ( $SVI$  - sludge volume index).

Un model simplificat al decantorului este acela în care decantorul este structurat în trei compartimente verticale, corespunzătoare celor trei funcționalități ale decantorului: un compartiment cu volum variabil, în care are loc fenomenul de limpezire, un compartiment cu volum variabil, în care are loc fenomenul de îngroșare, și un compartiment cu volum fix, în care are loc comprimarea nămolului. Alimentarea cu apă tratată a decantorului se face în zona secțiunii de mijloc. În acest caz, viteza de decantare este modelată cu ecuația (SIMBA, 2009):

$$v_s = v_{\max} e^{-(sa+sb \cdot SVI)TSS/1000} \quad (3.1.2)$$

unde:  $v_s$  este viteza de decantare a floculilor;  $v_{\max}$  este viteza maximă de decantare;  $sa$  este un coeficient (constant) care descrie rata de scădere a vitezei de decantare ca o funcție în raport cu concentrația totală a solidelor suspendate ( $TSS$  - total suspended solids);  $sb$  este un coeficient (variabil cu  $SVI$ ) care descrie rata de scădere a vitezei de decantare în raport cu o funcție de concentrația totală a solidelor suspendate.

### 3.2. MODELAREA INSTALAȚIILOR DE TRATARE A APELOR UZATE UTILIZÂND SOFTWARE-UL DE SIMULARE SIMBA

Implementarea în SIMBA a instalațiilor de tratare a apelor uzate cu nămol activ are la bază modele de tip ASM, fiind predefinite blocuri bazate pe modele ASM1, ASM2d și ASM3, precum și blocuri pentru modelul ASM3 care include și problematica eliminării fosforului. De asemenea, în cadrul SIMBA au fost implementate blocuri pentru generarea influentului și decantoare folosind diferite tipuri de modele, inclusiv decantorul multi-secțiune propus de (Takacs ș.a., 1991) și decantorul cu trei compartimente orizontale, ambele prezentate în cadrul secțiunii 3.1.2. SIMBA permite și evaluarea instalațiilor de tratare a apelor uzate din punct de vedere al costurilor energetice determinate de operarea acestora. Astfel, în cadrul SIMBA există blocuri predefinite conținând modele privind consumul de energie al elementelor unei instalații de tratare a apelor uzate. Trebuie subliniat că în cazul instalațiilor aerobe de tratare a apelor uzate principalul cost este cel determinat de aerarea bazinelor.

#### Studiul de caz 3.2.1

Ca studiu de caz fost considerat cazul unei instalații de tratare a apelor uzate în care se urmărește eliminarea azotului și a substratului organic. În Figura 3.2.1 este prezentată implementarea în cadrul software-ului de simulare SIMBA a unei astfel de instalații. Elementele de modelare considerate sunt: pentru bazinele anoxic și aerobice au fost considerate modele de tip ASM1, iar pentru decantor a fost considerat un model cu trei compartimente. Volumele bazinelor considerate sunt:  $V_{\text{bazin\_anoxic}} = 5000 \text{ m}^3$  și  $V_{\text{bazin\_aerob}} = 10000 \text{ m}^3$ , iar decantorul a fost considerat ca având o suprafață de  $2500 \text{ m}^2$  și o înălțime de 4 m.

Pentru această instalație se consideră că influentul, impus prin blocul *Influent zilnic*, are o variație diurnă, variație determinată de consumul uman și industrial, așa cum este prezentată în Figura 3.2.2. Cele trei elemente care caracterizează apa uzată sunt: debitul influentului; consumul chimic de oxigen al apei (COD - Chemical Oxygen Demand); azotul Kjeldhal (TKN - Total Kjeldahl nitrogen). TKN-ul este constituit din amoniu și din azotul organic, iar el nu include concentrația de nitrat din apă. Azotul total este compus din azotul Kjeldhal și concentrația de nitrat.

Principalii indicatori de calitate ai efluenților instalațiilor de tratare a apelor uzate sunt: azotul total și COD.

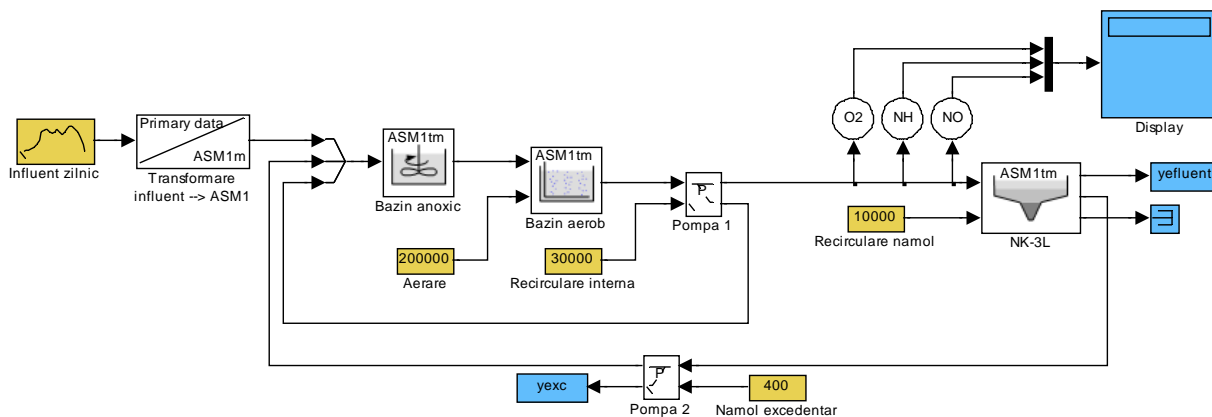
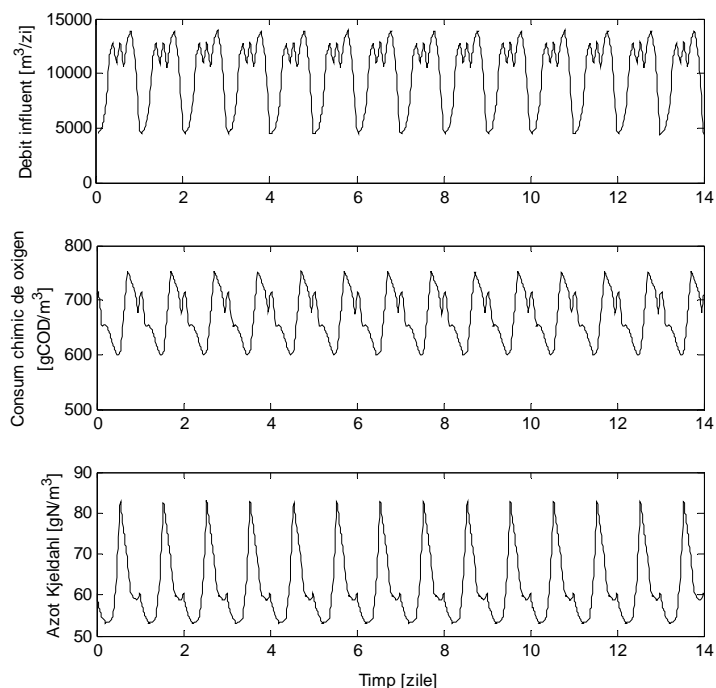


Figura 3.2.1: Schema SIMBA a instalației de tratare a apelor uzate





**Figura 3.2.2:** Evoluția influentului în instalația de tratare a apelor uzate

Pentru instalația considerată în Figura 3.2.1, s-a realizat o simulare fără implementarea controlului automat, pe durata a 14 zile. Din analiza datelor obținute s-a constatat o variabilitate mare a oxigenului dizolvat și valori constant peste  $2 \text{ g(-COD)/m}^3$ . Acest lucru implică un cost foarte mare, cost determinat de aerarea bazinului aerob. Pentru a evalua funcționarea instalației de tratare a apelor uzate din punct de vedere al calității apei trebuie calculați cei doi parametri menționați anterior: COD-ul și azotul total. Evoluția COD, TKN și a azotului total al efluentului instalației de tratare a apelor uzate, obținute în urma simulării în circuit deschis, este prezentată în Figura 3.2.3. În aceeași figură au fost reprezentate, cu linie roșie, limitele legale pentru COD și azot total, limite impuse de normele NTPA-001 (NTPA-001, 2002). Din figură se observă că, dacă în cazul COD evoluția acestuia este sub limita legală impusă, în cazul azotului total acesta depășește limita legală. Corelând rezultatele obținute, rezultă că această valoare mare a azotului total este determinată de concentrația mare de nitrat din efluent, aceasta fiind cauzată de recircularea internă prea mică.

Această simulare dovedește necesitatea implementării unui control automat care să conducă la:

- o mai mare eficiență a funcționării instalației de tratare a apelor uzate, eficiență care să implice atât o încadrare a calității efluentului în limitele legale;
- o minimizare a costurilor energetice pentru asigurarea aerării bazinului aerob.

De asemenea, această simulare arată că principala problemă este cea a eliminării biologice a azotului, prezent în efluent sub formă de amoniu și, mai ales, de nitrat.

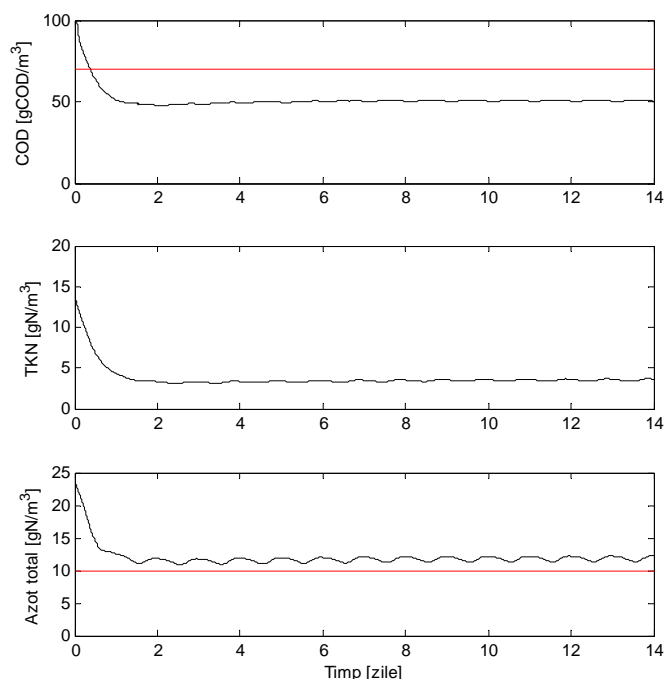
Pentru această instalație, se pot considera ca mărimi măsurabile: oxigenul dizolvat, nitratul și amoniul. Acest lucru este justificat deoarece, în acest moment, doar pentru aceste mărimi există traductoare on-line accesibile ca preț. Mărimile de comandă disponibile pentru această instalație sunt: debitul de aerare al bazinului aerob, debitul de recirculare internă, debitul de recirculare al instalației și debitul de eliminare a nămolului excedentar. Ținând cont de complexitatea modelului instalației de tratare, în cadrul acestei teze vor fi utilizate tehnici de

control de tip intrare - ieșire, iar dintre structurile posibile de control vor fi adoptate următoarele:

- oxigenul dizolvat în bazinul aerob va fi reglat prin intermediul debitului de aer insuflat în bazinul aerob, iar nitratul în bazinul anoxic va fi reglat prin intermediul debitului de recirculare internă;

- oxigenul dizolvat în bazinul aerob va fi reglat prin intermediul debitului de aer insuflat în bazinul aerob, iar nitratul în efluent va fi reglat prin intermediul debitului de recirculare internă.

În ambele cazuri, dinamica celor două bucle este total diferită, astfel: în timp ce bucla de oxigen dizolvat are o dinamică relativ rapidă, de ordinul minutelor, cea de nitrat este lentă, de ordinul unei zile.



**Figura 3.2.3:** Evoluția indicatorilor privind calitatea efluentului obținut prin simularea în circuit deschis a instalației de tratare a apelor uzate

### 3.3. CONCLUZII

În cadrul acestui capitol au fost prezentate principalele modele existente în literatura de specialitate pentru instalațiile de tratare a apelor uzate cu nămol activ, precum și software-ul de simulare SIMBA care permite simularea acestor instalații. În cadrul capitolului a fost prezentat un studiu de caz privind implementarea și simularea în SIMBA a unei instalații de tratare a apelor uzate.

Studiul de caz prezentat a arătat necesitatea implementării controlului automat al instalațiilor de tratare a apelor uzate, care să conducă la o încadrare a calității efluentului în limitele legale existente și, în același timp, la o micșorare a costurilor de operare a instalației de tratare.

**PARTEA a II-a:**

**CONDUCEREA AUTOMATĂ A SISTEMELOR  
DE COLECTARE A APELOR UZATE**

## CAPITOLUL 4: CONDUCEREA AUTOMATĂ A REȚELELOR DE COLECTARE A APELOR UZATE CU REGULATOARE FUZZY

În cadrul acestui capitol este prezentată o soluție de conducere automată a rețelelor de colectare a apelor uzate având la bază logica fuzzy. Soluția propusă urmărește atât minimizarea deversărilor din fiecare rezervor cu capacitate de retenție, cât și încercarea obținerii unei utilizări eficiente a capacităților de retenție ale rețelei, astfel încât să existe o încărcare echilibrată a acesteia.

### 4.1. ELEMENTE PRIVIND CONDUCEREA FUZZY A PROCESELOR

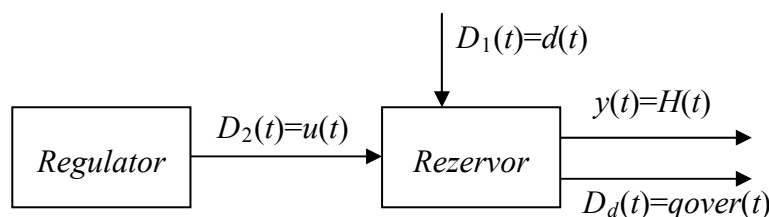
În anul 1965 a apărut articolul profesorului american Lotfi Zadeh „Fuzzy Sets” (Zadeh, 1965) punând astfel bazele matematice ale logicii fuzzy. În cadrul articolului, autorul renunță la logica bivalentă (sau DA sau NU exclusiv) și propune fundamentele matematice ale unei logici multivalente (și DA și NU) prin definirea mulțimii fuzzy ca o extensie a conceptului de mulțime clasică, exactă (crisp). Mulțimea fuzzy, spre deosebire de mulțimile obișnuite, clasice, nu are granițele bine delimitate, elementele sale aparținând mulțimii doar într-o anumită măsură. În același timp un element poate aparține la două mulțimi diferite (Preitl și Precup, 1997).

### 4.2. CONDUCEREA AUTOMATĂ A REȚELELOR DE COLECTARE A APELOR UZATE UTILIZÂND LOGICA FUZZY

Din punct de vedere al conducerii automate a unei rețele de colectare a apelor uzate, în cadrul acestui capitol se va considera utilizarea câte unui regulator pentru fiecare rezervor. Astfel, structura sistemică a ansamblului regulator - rezervor este prezentată în Figura 4.2.1, unde (Mînză și Ceangă, 2002):

- $D_2(t)=u(t)$  este debitul de ieșire din rezervor și reprezintă mărimea de comandă din sistem;
- $D_1(t)=d(t)$  este debitul de intrare în rezervor (influentul) și reprezintă mărimea perturbatoare din sistem;
- $y(t)=H(t)$  este înălțimea coloanei de lichid din rezervor și reprezintă mărimea de ieșire din sistem;
- $D_d(t)=q_{over}(t)$  este debitul de deversare din rezervor și reprezintă mărimea de calitate din sistem.

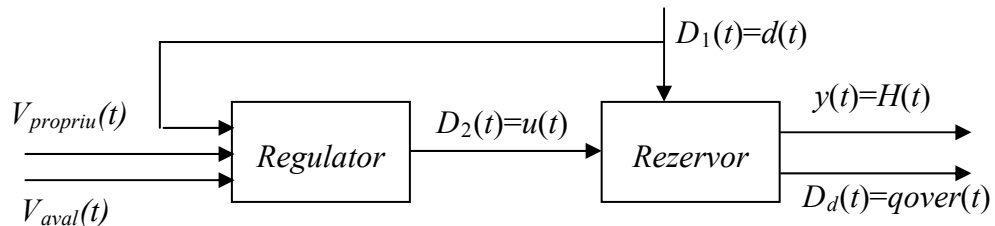
Se face precizarea că în acest caz nu se implementează o lege de reglare, ci un obiectiv al conducerii. Acest obiectiv este  $\min D_d(t)$ , astfel încât să se realizeze un  $\max D_2(t)$ . Astfel, la nivelul rezervorului avem de a face cu o reglare după perturbație, iar obiectivul conducerii este de obținere a unei deversări minime, printr-o comandă maximală.



**Figura 4.2.1:** Structura sistemică a ansamblului regulator - rezervor

În proiectarea unui bloc fuzzy care realizează controlul unui rezervor vom considera trei

mărimi de intrare și o mărime de ieșire. Mărimile de intrare sunt: debitul de intrare în rezervorul respectiv, volumul propriu al rezervorului respectiv la momentul la care se calculează comanda și volumul la momentul respectiv al rezervorului situat în aval în raport cu bazinul pentru care se calculează comanda. Mărimile de ieșire a blocului este debitul de ieșire din rezervorul controlat. Schema structurii de reglare cu regulator fuzzy este dată în Figura 4.2.2.



**Figura 4.2.2:** Schema structurii de reglare cu regulator fuzzy

#### 4.2.1. Implementarea regulatorului fuzzy

Blocul fuzzy a fost definit utilizând interfața existentă în cadrul toolbox-ului MATLAB: *Fuzzy Logic Toolbox*. În final, regulatorul fuzzy proiectat a fost folosit în cadrul MATLAB/Simulink, utilizând un bloc de tip *Fuzzy Logic Controller*, astfel fiind foarte ușor de integrat împreună cu SIMBA, construit la rândul lui, așa cum a fost prezentat în cadrul Capitolului 2, tot ca un toolbox MATLAB/Simulink. Pentru aplicația de conducere automată a rețelelor de colectare a apelor uzate, pentru mărimile de intrare au fost adoptate funcții de apartenență de tip trapezoidal, iar pentru mărimea de ieșire au fost adoptate funcții de apartenență de tip singleton. Baza de reguli conține 27 de reguli. În continuare, sunt prezentate câteva reguli care să ilustreze urmărirea obiectivelor propuse:  $\min D_d(t)$  și  $\max D_2(t)$ .

Astfel, reguli precum:

DACĂ (Debit\_intrare este Mediu) ȘI (Volum\_propruu este Mare) ȘI (Volum\_aval este Mic)  
ATUNCI (debies este Foarte\_Mare)

sau

DACĂ (Debit\_intrare este Mare) ȘI (Volum\_propruu este Mic) ȘI (Volum\_aval este Mic)  
ATUNCI (debies este Foarte\_Mare)

conduc la o valoare a debitului apropiată de valoarea maximă, deci la o maximizare a efluentului din rezervor în vederea pregătirii acestuia pentru eventuale viitoare evenimente pluviometrice. În același timp, așa cum este cazul primei reguli ele vor conduce și la o minimizare a deversărilor din bazinul propriu.

Dar, în proiectarea regulatorului fuzzy s-a avut în vedere și echilibrul întregii rețele de colectare. Astfel, o regulă precum:

DACĂ (Debit\_intrare este Mediu) ȘI (Volum\_propruu este Mediu) ȘI (Volum\_aval este Mediu) ATUNCI (debies este Mediu)

implică o limitare a încărcării bazinului din aval, conducând practic la o încărcare echilibrată a întregii rețele de colectare, unul din scopurile fundamentale ale conducerii automate a rețelelor de colectare a apelor uzate.

Pentru testarea acestei aplicații au fost considerate două studii de caz. Primul studiu de caz

a fost prezentat în cadrul Capitolului 2 (Studiul de caz 2.2.1) și el constă în verificarea aplicației de conducere automată în cazul unor evenimente singulare. Practic se testează capacitatea de stocare a rețelei pe durata ploii (stocarea echilibrată între diferitele bazine ale rețelei) și evacuarea cât mai rapidă a apei uzate la sfârșitul ploii. Al doilea studiu de caz este inspirat din (SIMBA, 2009) și el constă în verificarea aplicației de conducere automată pe o perioadă mai lungă, caz în care rețeaua este afectată de multiple evenimente pluviometrice. Ambele studii de caz au fost implementate utilizând toolbox-ul SIMBA.

### **Studiul de caz 4.2.1**

Rețeaua de colectare a apelor uzate considerată în cadrul acestui studiu de caz a fost prezentată în cadrul Capitolului 2 (Studiul de caz 2.2.1) și este una formată din 4 rezervoare cu capacitate de retenție și în care s-a considerat că nu există elemente de legătură între rezervoare. Pentru simularea rețelei au fost considerate două scenarii, ambele conținând evenimente singulare (o singură precipitație):

- Scenariul 1: în care se testează efectul unei precipitații de foarte scurtă durată, dar de intensitate mare (pentru care atât influența, cât și rezultatele de simulare în cazul în care debitele de ieșire ale rezervoarelor nu sunt controlate au fost prezentate în cadrul Capitolului 2);

- Scenariul 2: în care se testează efectul unei precipitații de durată și de intensitate medie.

Rezultatele obținute în cazul utilizării strategiei de control bazată pe logica fuzzy pentru Scenariul 1 sunt prezentate în Tabelul 4.2.1 unde este prezentată, comparativ, situația volumului de apă deversat în cazul fiecărui rezervor pentru cele 2 situații, fără control și cu control fuzzy. Pe lângă îmbunătățirea debitului de apă uzată deversată, rezultatul obținut în cazul controlului fuzzy mai prezintă un avantaj care trebuie considerat: în cazul rețelelor de colectare, ultimul rezervor, cel care transmite apa uzată către stația de tratare, deversează în același punct ca și stația de tratare. Astfel, se dorește ca deversarea din acest rezervor să fie evitată deoarece în acel loc al apei receptor (râu, lac etc.) s-ar acumula o cantitate foarte mare de substanțe poluante. Acest lucru este determinat de faptul că, de obicei, deversarea în diferite puncte ale rețelei se poate face în receptori diferiți. Dar, chiar dacă și celelalte rezervoare deversează în același receptor ca și stația de tratare, totuși, este de dorit ca deversările, dacă nu pot fi evitate, să se producă în puncte câte mai distribuite pe suprafața apei receptor.

În continuare a fost simulată comportarea rețelei de colectare considerate în cazul Scenariului 2. Rezultatele obținute sunt prezentate în Tabelul 4.2.2, unde este prezentată, comparativ, situația volumului de apă deversat în cazul fiecărui rezervor pentru cele 2 situații, fără control și cu control fuzzy. Îmbunătățirea obținută și în acest caz este semnificativă, atât din punct de vedere al volumului total deversat, cât și al punctelor rețelei din care are loc deversarea.

**Tabelul 4.2.1: Volumul deversat din rețeaua de colectare**

Rezervor	Deversare [m <sup>3</sup> ]	
	Cazul - Fără Control	Cazul - Control Fuzzy
1	0	0
2	0	26.09
3	0	0
4	580.72	0
<b>TOTAL</b>	<b>580.72</b>	<b>26.09</b>

**Tabelul 4.2.2:** Volumul deversat din rețeaua de colectare

Rezervor	Deversare [m <sup>3</sup> ]	
	Cazul - Fără Control	Cazul - Control Fuzzy
1	0	324.65
2	0	555.53
3	0	682.86
4	2849.43	0
<b>TOTAL</b>	<b>2849.43</b>	<b>1563.04</b>

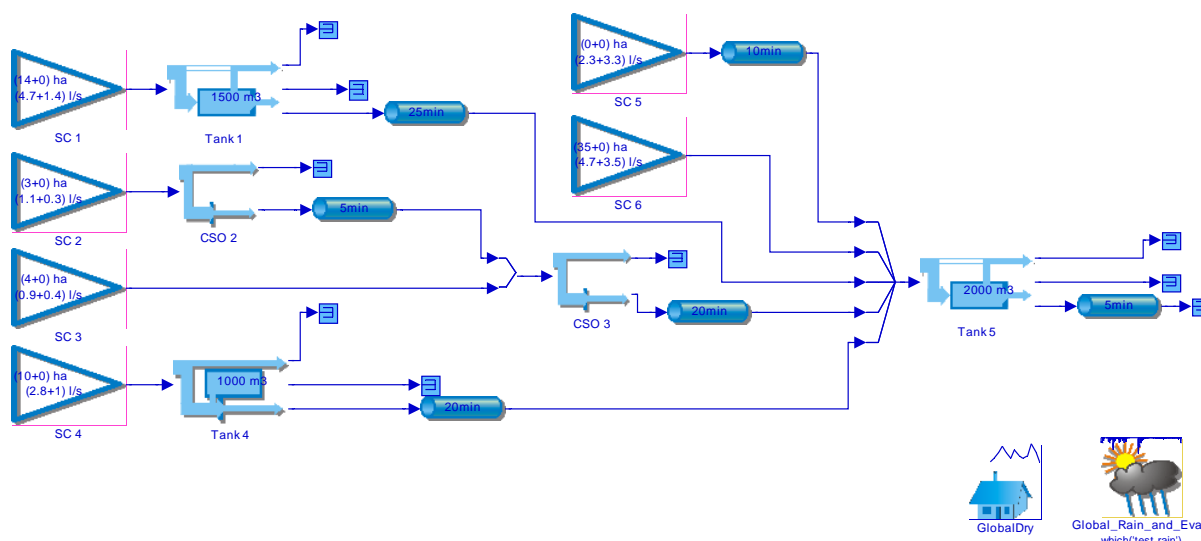
### Studiul de caz 4.2.2

Rețeaua de colectare a apelor uzate considerată în cadrul acestui studiu de caz este una formată din 5 rezervoare și este inspirată din (SIMBA, 2009). Dintre aceste rezervoare 3 au capacitate de stocare (Rezervoarele 1, 4 și 5), iar două dintre ele nu au capacitate de retenție (Rezervoarele 2 și 3). De asemenea, în cadrul acestei rețele au fost introduse și elemente de legătură între rezervoare. Exemplul, a cărui implementare în SIMBA este prezentată grafic în Figura 4.2.3, are următorii parametri:

- volumele maxime ale rezervoarelor:  $V_{1\max} = 1500 \text{ m}^3$ ,  $V_{4\max} = 1000 \text{ m}^3$ ,  $V_{5\max} = 2000 \text{ m}^3$ ;

- debitul de ieșire maxim al rezervoarelor:  $u_{1\max} = 6480 \text{ m}^3 / \text{zi}$ ,  $u_{4\max} = 4320 \text{ m}^3 / \text{zi}$ ,

$u_{5\max} = 8640 \text{ m}^3 / \text{zi}$ .

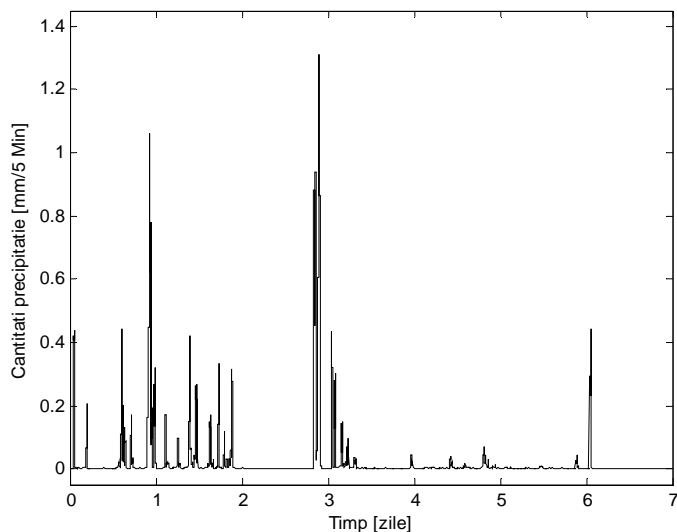


**Figura 4.2.3:** Implementarea în SIMBA a rețelei de colectare a apelor uzate considerate în Studiul de caz 4.2.2.

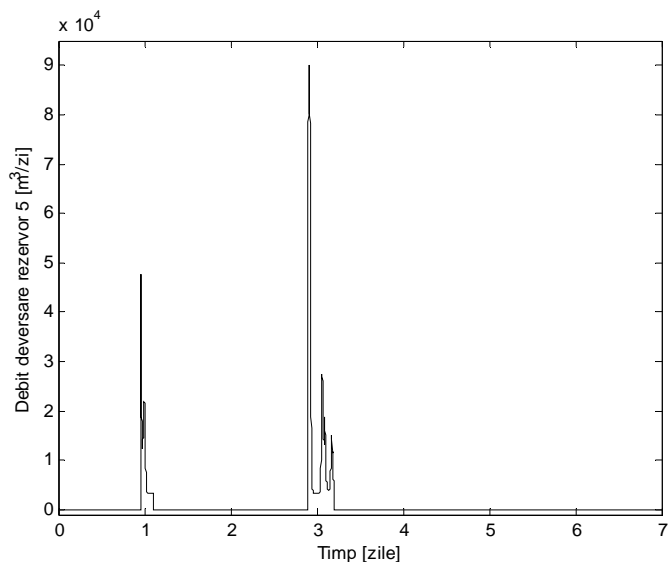
Pentru simularea rețelei a fost considerat un influent pe durata a 7 zile. Acest influent este furnizat de către SIMBA și el conține atât o componentă determinată de consumul uman (specificat prin suprafețele care colectează apa rezultată de consumul uman), cât și o componentă de precipitații. În Figura 4.2.4 este prezentat grafic scenariul de precipitații considerat.

Rețeaua de colectare a fost simulată atât în cazul când ieșirea din rezervoare este necontrolată, fiind la valoarea debitului maxim, cât și în cazul în care ieșirea rezervoarelor este

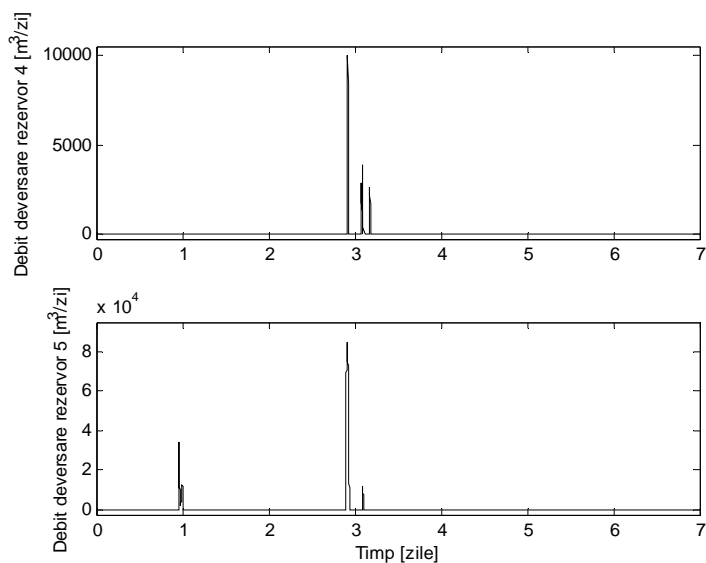
controlată utilizând blocul fuzzy proiectat anterior.



**Figura 4.2.4:** Debitul de intrare furnizat de către scenariul de precipitații



**Figura 4.2.5:** Evoluție debit de deversare din rezervorul 5 - Cazul fără control



**Figura 4.2.6:** Evoluție debit de deversare din rezervoarele 4 și 5 - Cazul cu control fuzzy



În Figurile 4.2.5 și 4.2.6 sunt prezentate evoluțiile debitelor de deversare din cadrul rețelei de colectare pentru cele două cazuri considerate. Aceleași rezultate sunt prezentate și tabelar în Tabelul 4.2.3, unde se observă că, și în acest caz, s-a reușit diminuarea semnificativă a deversării de la bazinul premergător instalației de tratare, cu beneficiile menționate anterior.

**Tabelul 4.2.3:** Volumul deversat din rețeaua de colectare

Rezervor	Deversare [m <sup>3</sup> ] Cazul - Fără Control	Deversare [m <sup>3</sup> ] Cazul - Control Fuzzy
1	0	0
2	117.29	117.29
3	179.36	179.36
4	0	78.44
5	6334.97	2949.71
<b>TOTAL</b>	<b>6631.62</b>	<b>3324.80</b>

### 4.3. CONCLUZII

În cadrul acestui capitol a fost prezentată o soluție de conducere automată a rețelelor de colectare a apelor uzate având la bază logica fuzzy. În cazul rețelelor de colectare a apelor uzate problema principală este cea a minimizării deversărilor care au loc din bazinele de retenție pe durata ploilor. Deși încărcarea biochimică a apei provenite din ploii nu este mare, totuși prin combinarea acesteia cu apa rezultată din consumul uman sau industrial, care folosește aceeași rețea de colectare și transport, rezultatele unor deversări pot să fie semnificative. Ceea ce are un impact și mai mare este efectul cumulativ al acestor deversări în cazul mai multor evenimente pluviometrice repetate în perioade scurte de timp. Evitarea sau măcar minimizarea acestor deversări este o problemă care ține de utilizarea eficientă a capacităților de retenție a apei (rezervoare), astfel încât să existe o încărcare echilibrată a rețelei de colectare. În caz contrar, rețeaua de colectare poate produce deversări importante în cazul unor rezervoare, în condițiile în care alte rezervoare ale rețelei sunt ocupate cu mult sub capacitatea lor. Acest aspect este determinat de doi factori: ploile nu afectează în mod egal suprafețele de pe care este colectată apa și, în același timp, plasarea rezervoarelor trebuie să țină cont de suprafețele disponibile, în special în cazul marilor orașe.

Rezultatele obținute prin simulare în cadrul a două studii de caz în care s-a urmărit atât efectul unor evenimente pluviometrice singulare, cât și al unor evenimente pluviometrice multiple arată o îmbunătățire semnificativă a rezultatelor obținute. Acest lucru este cuantificat prin intermediul volumului deversat din cadrul rețelelor din cele două studii de caz pe baza scenariilor considerate. Pe lângă îmbunătățirea debitului de apă uzată deversată, rezultatul obținut în cazul controlului fuzzy mai prezintă un avantaj care trebuie considerat: distribuția deversărilor care nu au putut fi evitate între diverse puncte ale rețelei, evitând astfel acumularea unei cantități foarte mare de substanțe poluante în zona finală de deversare a rețelei, acolo unde au loc deversări și din instalația de tratare a apelor uzate. Aceste rezultate demonstrează justetea abordării din cadrul acestui capitol.

## CAPITOLUL 5: CONDUCEREA OPTIMALĂ A REȚELELOR DE COLECTARE A APELOR UZATE. PROGRAMAREA DINAMICĂ DISCRETĂ. REGULATOR PREDICTIV

Motivația principală în utilizarea acestei tehnici este implementarea unei metode de conducere care:

- să poată fi utilizată eficient, adică cu complexitate redusă, în cadrul unui regulator predictiv cu fereastră alunecătoare. Este cunoscut faptul că programarea dinamică este o metodă relativ costisitoare în termeni de resurse utilizate (memorie și timp) și deci este utilizabilă pentru probleme de dimensiuni acceptabile. În contextul unui regulator predictiv cu fereastră alunecătoare, când optimizarea se va face pe un orizont de câteva perioade de eșantionare, utilizarea poate fi nu numai acceptabilă, ci chiar eficientă.

- să permită determinarea comenzilor optimale și a costului minim pentru o rețea de colectare stabilită. Cu alte cuvinte trebuie să deținem o metodă de soluționare exactă a problemei de optimizare. Acest lucru este esențial pentru a putea valida rezultatele obținute cu alte metode de optimizare exacte sau aproximative și pentru a putea evalua complexitatea numerică a acestora.

### 5.1. DEFINIREA PROBLEMEI DE CONDUCERE A UNEI REȚELE DE COLECTARE A APELOR UZATE CA PROBLEMĂ DE OPTIMIZARE DINAMICĂ

Vom recurge la exemplul din Studiul de caz 2.2.1 pentru a ilustra modelarea problemei de conducere optimală a unei rețele de colectare a apelor uzate ca problemă de programare dinamică discretă. Pentru că obiectivul fundamental este reducerea volumului de apă uzată deversată prin stabilirea debitelor  $u_i(t)$ ,  $i = \overline{1,4}$ , modelul trebuie să integreze și aceste cantități deversate. Acest lucru este echivalent cu existența a încă 4 bazine asociate fiecare unui bazin de colectare. Dacă notăm cu  $x_i(t)$ ,  $i = \overline{1,4}$  volumul bazinului  $i$  de colectare, mai trebuie să considerăm încă 4 variabile de stare  $x_i(t)$ ,  $i = \overline{5,8}$  pentru volumele celor 4 bazine asociate conținând apele deversate. Dacă  $T$  este perioada de eșantionare și dacă se consideră că bazinele au capacitățile maxime  $M_1, M_2, M_3, M_4$ , exprimate în unități de volum, ecuațiile de stare reale sunt:

$$\left\{ \begin{array}{l} x_1(t+1) = \min(x_1(t) + D_1(t) - U_1(t), M_1) \\ x_2(t+1) = \min(x_2(t) + D_2(t) + U_1(t) - U_2(t), M_2) \\ x_3(t+1) = \min(x_3(t) + D_3(t) - U_3(t), M_3) \\ x_4(t+1) = \min(x_4(t) + D_4(t) + U_2(t) + U_3(t) - U_4(t), M_4) \\ x_5(t+1) = x_5(t) + \max(0, x_1(t) + D_1(t) - U_1(t) - M_1) \\ x_6(t+1) = x_6(t) + \max(0, x_2(t) + D_2(t) + U_1(t) - U_2(t) - M_2) \\ x_7(t+1) = x_7(t) + \max(0, x_3(t) + D_3(t) - U_3(t) - M_3) \\ x_8(t+1) = x_8(t) + \max(0, x_4(t) + D_4(t) + U_2(t) + U_3(t) - U_4(t) - M_4) \end{array} \right. \quad (5.1.1)$$

unde:

$$D_i(t) = d_i(t) \cdot T, \quad i = 1, 2, 3, 4$$

$$U_i(t) = u_i(t) \cdot T, \quad i = 1, 2, 3, 4$$

Considerând funcția obiectiv

$$I(t) = M(x(t_f)) = M(x(N)) = x_5(N) + x_6(N) + x_7(N) + x_8(N)$$

se poate arăta că avem un criteriu de optim de tip Lagrange:

$$I(t) = \sum_{s=t}^{N-1} L(s, x(s), u(s)) \quad \text{unde}$$

$$\begin{aligned} L(s, x(s), u(s)) = & [\max(0, x_1(s) + D_1(s) - U_1(s) - M_1) \\ & + \max(0, x_2(s) + D_2(s) + U_1(s) - U_2(s) - M_2) + \\ & + \max(0, x_3(s) + D_3(s) - U_3(s) - M_3) + \\ & + \max(0, x_4(s) + D_4(s) + U_2(s) + U_3(s) - U_4(s) - M_4)] \end{aligned} \quad (5.1.1)$$

Ecuția de stare a sistemului discretizat cu pasul  $T$  poate fi scrisă astfel:

$$x(t+1) = f(t, x(t), U(t)) = \begin{bmatrix} \min(x_1(t) + D_1(t) - U_1(t), M_1) \\ \min(x_2(t) + D_2(t) + U_1(t) - U_2(t), M_2) \\ \min(x_3(t) + D_3(t) - U_3(t), M_3) \\ \min(x_4(t) + D_4(t) + U_2(t) + U_3(t) - U_4(t), M_4) \end{bmatrix} \quad (5.1.2)$$

unde:

$$x(t) = [x_1(t) \quad x_2(t) \quad x_3(t) \quad x_4(t)]^T \quad (5.1.3)$$

cu  $x_i(t) \in [0, M_i] \subset \mathbb{R}$ ,  $i = \overline{1, 4}$

și

$$U(t) = [U_1(t) \quad U_2(t) \quad U_3(t) \quad U_4(t)]^T \quad (5.1.4)$$

cu  $U_i(t) \in [0, U_{\max}^i] \subset \mathbb{R}$   $i = \overline{1, 4}$

$$U(t) \in U = [0, U_{\max}^1] \times [0, U_{\max}^2] \times [0, U_{\max}^3] \times [0, U_{\max}^4]$$

comenzile sistemului adică volumele scoase de pompele bazinelor într-o perioadă de eșantionare.

Deci, problema noastră de optimum discret este definită de:

- sistemul neliniar (5.1.2)
- restricțiile asupra stării (5.1.3) și
- restricțiile asupra comenzii (5.1.4)
- criteriul de performanță

$$\min_{U(t) \in U} I(t_0) \quad (5.1.5)$$

unde funcția obiectiv este definită de (5.1.1), iar  $t_0$  și  $N$  sunt fixate.

## 5.2. REZOLVAREA PROBLEMEI DE OPTIMUM FOLOSIND PROGRAMAREA DINAMICĂ DISCRETĂ

Considerând că procesul este optimal, funcția de cost minim asociată problemei de minim, definită anterior, este:

$$V(t, x) = \min_{\substack{u(s) \in U(s) \\ t \leq s \leq t_f - 1}} \{I(t)\} \quad (5.2.1)$$

Esențială pentru implementarea algoritmului este ecuația programării dinamice (Ionescu și Popeea, 1981):

$$V(t, x(t)) = \min_{v \in U(t)} \{L(t, x(t), v) + V(t+1, f(t, x(t), v))\} \quad (5.2.2)$$

unde  $V(t, x(t))$  este valoarea optimă a funcției cost  $I(t)$  plecând din starea inițială  $x(t)$ .

Ținând cont de relațiile (5.1.1) și (5.1.2), ecuația PDD (5.2.2) capată forma mai explicită:

$$V(t, x(t)) = \min_{v \in U(t)} \left\{ \begin{array}{l} \max(0, x_1(t) + D_1(t) - v_1 - M_1) + \\ + \max(0, x_2(t) + D_2(t) + v_1 - v_2 - M_2) + \\ + \max(0, x_3(t) + D_3(t) - v_3 - M_3) + \\ + \max(0, x_4(t) + D_4(t) + v_2 + v_3 - v_4 - M_4) + \\ + V \left( t+1, \left[ \begin{array}{l} \min(x_1(t) + D_1(t) - v_1, M_1) \\ \min(x_2(t) + D_2(t) + v_1 - v_2, M_2) \\ \min(x_3(t) + D_3(t) - v_3, M_3) \\ \min(x_4(t) + D_4(t) + v_2 + v_3 - v_4, M_4) \end{array} \right] \right) \end{array} \right\} \quad (5.2.3)$$

Această ecuație permite determinarea tuturor valorilor lui  $V(t, x(t))$  prin integrare în sens invers, adică  $t=N, N-1, \dots, 2, 1$ . Operația de minimizare permite ca pentru  $t$  curent și  $x(t)$  ales să se determine și valoarea:

$$v = [v_1 \quad v_2 \quad v_3 \quad v_4]^T \in U(t)$$

pentru care se atinge minimul. Aceasta valoare este chiar comanda optimă la pasul  $t$ , din  $x(t)$ :

$$u^*(t) = v.$$

Procesul se oprește când am ajuns la  $t=t_0$ . Iată mai jos descrierea procesului iterativ ce constituie algoritmul de rezolvare a problemei de optim.

## 5.3. IMPLEMENTAREA UNUI ALGORITM DE PROGRAMARE DINAMICĂ DISCRETĂ PENTRU CONDUCEREA OPTIMALĂ A UNEI REȚELE DE COLECTARE A APELOR UZATE

### 5.3.1. Algoritmul de bază

Pentru rețeaua de colectare din Studiul de caz 2.2.1 a fost realizat un program MATLAB de simulare a sistemului de conducere optimală utilizând programarea dinamică. Descrierea în pseudocod a acestui program de simulare este furnizată în Lista 5.1 și a stat la baza realizării

scriptului MATLAB. În cadrul acestui script simularea este realizată cu o perioadă de eşantionare de  $T=120$  secunde pentru un număr de  $N=40$  de perioade de eşantionare. Deci, perioada pentru care se face simularea este de 4800 sec., adică 4/3 ore. Această perioadă corespunde unei situații de variație a influentului care se găsește într-un fișier ce poate fi încărcat. Numim un astfel de fișier scenariu de influent. Acesta conține debitele de influent pentru fiecare bazin și fiecare moment de timp.

## LISTA 5.1

### *Simulare sistem de conducere optimala a RCAU- varianta de baza*

*/\* conducere optimala prin programare dinamica,  $t_i=1$  si  $t_f=N$ , aici dim  $x$ = numar de bazine*

start

- ◆ Initializari; */\*vezi script "Initializari"*
  - ◆ Incarcare scenariu influent; */\*se citesc dintr-un fisier debitele de influent pe bazine si timp*
  - ◆ Discretizare si corectie influent estimat; */\*se apeleaza scriptul "DiscrCorInflEstimat"*
  - ◆ *executa Calcul\_V(1, N-1);* */\*se calculeaza costurile si comenzile optimale  $u^*(k, x(k))$*
  - ◆ Citire stari initiale; */\*se apeleaza scriptul "CitireStariInitiale"*
- /\*determinare traiectorie optimala din starea initiala aleasa prin apelare script "DetTraiectOptimala"*
- /\* ce contine ciclul urmator si afisarile finale*
- pentru  $t=1$  pana la  $N-1$
- afisare stare curenta  $x(t)$
  - afisare influent la pasul curent
  - $U(t) \leftarrow u^*(t, x(t));$  */\*recupereaza comanda optimala din faza  $(t, x(t))$*
  - afisare comanda optimala  $U(t)$
  - integreaza sistemul (5.1.2), determina starea urmatoare  $x(t+1)$  si deversarile celor NB bazine  
*/\* se apeleaza functia "next\_stat(t)"*
  - afiseaza deversari pe bazine in perioada de esantionare curenta  $t$
  - contorizare si afiseaza deversari;
  - afiseaza starea urmatoare
- 
- ◆ Realizare si afisare bilant deversari si efluent
  - ◆ Realizare grafice influent, evolutie stari si deversari

stop

În simulările făcute în acest capitol, comenzile pompelor pentru bazine sunt 0 sau 1, ceea ce înseamnă că într-o perioadă de eşantionare se pot evacua  $0 \text{ m}^3$  sau 1 unitate de discretizare ( $1 \text{ UM}=120 \text{ m}^3$ ). Problema de optimizare prin programare dinamică, așa cum este formulată este singulară, adică există mai multe secvențe de comenzi optimale, care asigură minimizarea deversărilor. Acest lucru a fost constatat prin simulare. Algoritmul de bază caută, pentru o stare dată și pentru fiecare bazin, comenzile optimale maximale admisibile.

Se constată că starea inițială  $x_{01}=[3, 3, 3, 3]^T$  permite sistemului să găsească o evoluție optimă astfel încât deversările să fie nule (vezi Figurile 5.3.1 și 5.3.2). În schimb, bazinele sunt practic umplute la maximum în ultima parte a perioadei analizate (perioadele de eşantionare 25-

40).

Repetând simularea pentru o stare inițială  $x_{02} = [7, 6, 5, 6]^T$  se obține o deversare de 12 UM, iar rezultatele sunt prezentate grafic în Figurile 5.3.3 și 5.3.4.

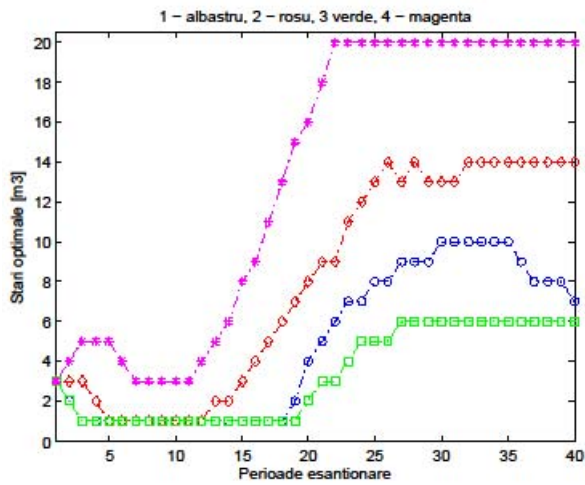


Figura 5.3.1: Evoluția stărilor din  $x_{01}$

$x_{01}$

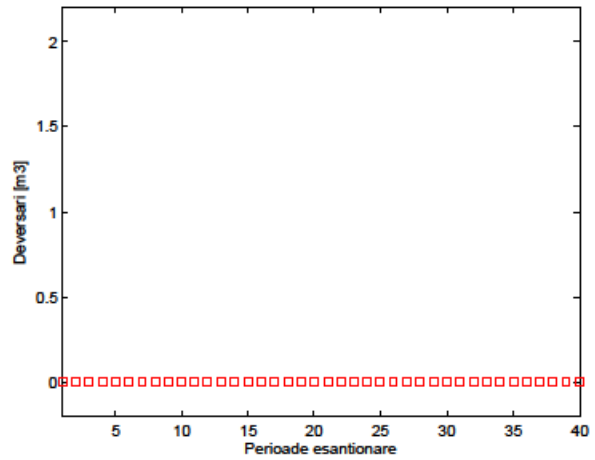


Figura 5.3.2: Deversari cumulate pentru

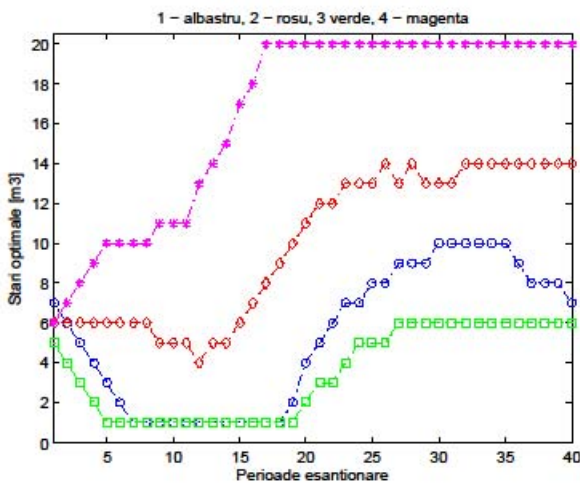


Figura 5.3.3: Evoluția optimă a stărilor din starea inițială  $x_{02}$

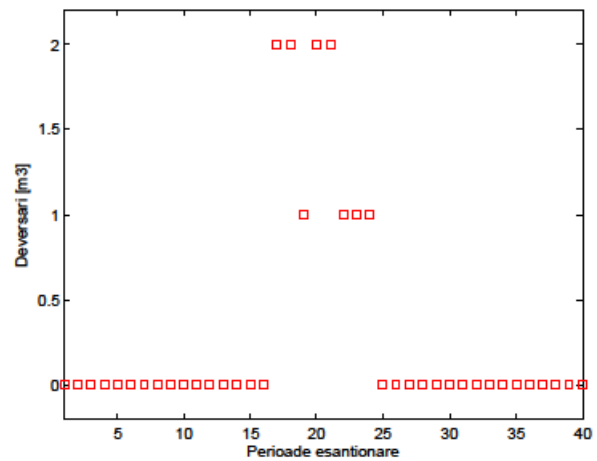


Figura 5.3.4: Deversări cumulate pentru starea inițială  $x_{02}$

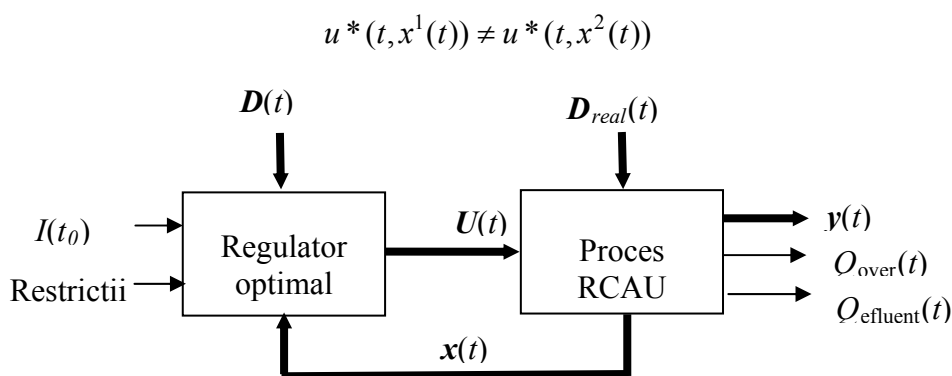
Deși prezintă dezavantajele unui interpretor, programul dezvoltat are o eficiență mai mult decât satisfăcătoare în privința utilizării resurselor de timp și de memorie, putând fi utilizat chiar la o conducere în timp real pe un orizont de timp semnificativ. Oricum, programul se constituie într-o unealtă utilă în soluționarea unor astfel de probleme, măcar și pentru dezideratul esențial de a caracteriza soluțiile de comandă optimă și de a cunoaște minimumul funcției criteriu pentru un sistem și o situație dată.

### 5.3.2. Regulator optimal pentru conducerea unei RCAU în timp real

Programul de conducere optimă prin programare dinamică prezentat în secțiunea anterioară are ca și caracteristică principală posibilitatea de rezolvare a unei probleme de optimizare a RCAU. Simulările efectuate au arătat că rezultatele sunt corecte și obținute într-un timp convenabil. Dar, programul nu poate fi folosit așa cum este structurat acum într-o structură

în buclă închisă. Pentru a realiza un regulator optimal utilizabil într-un sistem în buclă închisă, *regulator-proces real*, trebuie să ținem cont de următoarele aspecte:

- Procesul este influențat de un influent real, nu de cel estimat (prognozat);
- Comanda optimală pe un orizont de timp, calculată a priori de programul de conducere, ține cont de influentul prognost;
- Dacă se schimbă influentul prognost, secvența de comenzi optimale, pornind din aceeași stare inițială a procesului, se schimbă;
- Evoluția stării procesului real nu reproduce evoluția stărilor *modelului procesului* (presupus fidel procesului) folosit în obținerea secvenței de comenzi optimale, pentru că influentul real este, într-o oarecare măsură, diferit de cel prognost;
- Pentru un moment dat  $t$ , la stări diferite  $x^1(t) \neq x^2(t)$  ale procesului corespund comenzi optimale diferite:



**Figura 5.3.5:** Sistemul de conducere cu regulator optimal pentru RCAU

Rezolvarea aspectelor listate mai sus ne duce la adoptarea unei structuri de conducere cu regulator optimal, ca în Figura 5.3.5. Să facem niște precizări sistemice legate de această buclă. Reamintim aici ca problema de optim este definită prin:

- sistemul nelinier (5.1.2)
- restricțiile asupra stării (5.1.3) și
- restricțiile asupra comenzii (5.1.4)
- criteriul de performanță

$$\min_{U(t) \in \mathbf{U}} I(t_0)$$

unde funcția obiectiv este definită de (5.1.1), iar  $t_0$  și  $N$  sunt fixate. Vom detalia notațiile pentru sistemul dat ca exemplu, în Secțiunea 5.1, furnizând astfel o interpretare sistemică.

- Pentru că funcția obiectiv însumează deversările bazinelor, vom considera forma extinsă a vectorului de stare

$$\mathbf{x}(t) = [x_1(t) \ x_2(t) \ x_3(t) \ x_4(t) \ x_5(t) \ x_6(t) \ x_7(t) \ x_8(t)]^T;$$

- $U(t)$ : *mărimile de comandă ale procesului*, exprimate în unități de volum.  $U_i(t)$  furnizează cantitatea de apă ce se va scurge din bazinul  $i$ , în perioada de eșantionare  $t$ ,  $1 \leq t \leq N - 1$ .
- $D(t)$  cu componentele  $D_i(t)$ : *perturbația principală a procesului (sarcina)* pentru fiecare bazin exprimată în unități de volum.  $D_i(t)$  furnizează cantitatea de influent ce va intra în bazinul  $i$ , în perioada de eșantionare  $t$ ,  $1 \leq t \leq N - 1$

$$\mathbf{U}(t) = [U_1(t) \ U_2(t) \ U_3(t) \ U_4(t)]^T, \quad \mathbf{D}(t) = [D_1(t) \ D_2(t) \ D_3(t) \ D_4(t)]^T$$

- $\mathbf{y}(t)$  cu componentele  $y_i(t)$ : *ieșirile procesului*, adică mărimile de interes în urmărirea procesului, în cazul nostru poate fi nivelul de apă din bazine. Preferăm, pentru omogenitatea expresiilor matematice, să exprimăm ieșirea printr-o mărime proporțională cu nivelul, adică volumul de apă din bazin, obținut prin înmulțirea nivelului cu suprafața bazinului.
- $\mathbf{x}(t)$  cu componentele  $x_i(t)$ ,  $1 \leq i \leq 8$ : *starea procesului*. S-a ales ca  $y_i(t) = x_i(t)$ ,  $1 \leq i \leq 8$
- $\mathbf{y}(t) = [y_1(t) \ y_2(t) \ y_3(t) \ y_4(t) \ y_5(t) \ y_6(t) \ y_7(t) \ y_8(t)]^T$

Se alege  $\mathbf{y}(t) = \mathbf{x}(t)$ ;

- $Q_{\text{over}}(t)$ : volumul de apă deversat din cele 4 bazine până la momentul  $t$ , ceea ce este o *mărime de calitate* a procesului. Cum variabilele de stare  $x_5(t)$ ,  $x_6(t)$ ,  $x_7(t)$ ,  $x_8(t)$  integrează cantitățile de apă deversată din bazine, avem, în mod evident:

$$Q_{\text{over}}(t) = x_5(t) + x_6(t) + x_7(t) + x_8(t)$$

- $Q_{\text{effluent}}(t)$ : volumul de apă ce iese normal din ultimul bazin spre stația de tratare. Aceasta este o a doua *mărime de calitate* a procesului, fiind cu atât mai bine cu cât volumul este mai mare. Avem, în mod evident:

$$Q_{\text{effluent}}(t) = U_4(t)$$

- $I(t_0)$ : funcția obiectiv ce poate fi exprimată prin suma:

$$I(t_0) = Q_{\text{over}}(N) = x_5(N) + x_6(N) + x_7(N) + x_8(N).$$

Practic, însă,  $I(t_0)$  se calculează prin însumarea deversărilor la fiecare moment  $t$ ,  $1 \leq t \leq N$

- "Restricțiile" din Figura 5.3.5 se referă la restricțiile asupra stării (5.1.3) și la restricțiile asupra comenzii (5.1.4)
- Criteriul de performanță al problemei de optimum rezolvată de modulul de conducere optimală, așa cum am văzut, se exprimă prin formula (5.1.5):

$$\min_{\mathbf{U}(t) \in \mathbf{U}} I(t_0)$$

și privește mărimea de calitate legată de deversare.

## 5.4. CONDUCEREA PREDICTIVĂ A REȚELELOR DE COLECTARE A APELOR UZATE

### 5.4.1. Conceptul de conducere cu predicție bazată pe model, cu orizont alunecător

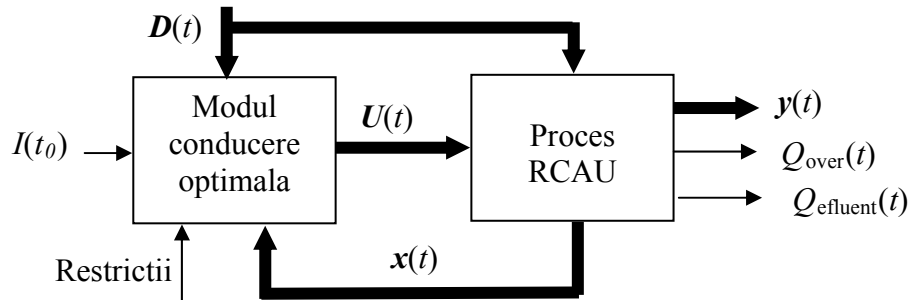
În această secțiune, se propune adaptarea conceptului de conducere cu predicție la conducerea rețelelor de colectare a apelor uzate. Vorbim de o adaptare a acestui concept și nu o utilizare integrală a teoriei existente care este dezvoltată, în special, în condiții favorabile de regularitate a spațiului în care se face modelarea procesului. În lucrarea (Lazăr, 1999), sunt subliniate caracteristicile acestui concept.

### 5.4.2. Structura sistemului de conducere predictivă a RCAU

În Secțiunea 5.3.2 a fost definită matematic exact problema de optimizare pentru o RCAU și soluția a fost prezentată și optimizată. Pentru a aplica o conducere predictivă cu orizont



anulecător, bazată pe modelul procesului, este nevoie, mai întâi, să precizăm structura sistemului de conducere optimă a RCAU, cu evidențierea rolului diferitelor mărimi fizice.



**Figura 5.4.1:** Sistem de conducere optimă a unei RCAU

Figura 5.4.1 descrie structura de bază a sistemului de conducere a RCAU, cea care a fost folosită în Secțiunea 5.2. Să constatăm că perturbația principală, influența  $D(t)$ , se consideră cunoscută pe un orizont de timp  $[0, N \cdot T]$ , orizont pe care se și rezolvă problema de optimizare. Influența este estimată (prognozat) a priori și este folosită ca dată de intrare în cadrul programului. De aceea structura sistemului de conducere optimă din Figura 5.4.1 prezintă două caracteristici care nu permit folosirea structurii în timp real:

- Perturbația  $D(t)$  este una estimată (prognozată). Este de presupus că influența reală  $D_{real}(t)$  se va abate, într-o măsură mai mică sau mai mare, de la cel estimat. Acest lucru face ca secvența de comenzi optimale  $U(t)$ ,  $t=1, \dots, N-1$  să nu mai asigure o cantitate de apă deversată minimă, adică se pierde caracterul optimal.
- Nu se ține cont de starea reală  $x(t)$  a procesului, care ar putea fi "citită" cu ajutorul unor traductoare sau estimată în timp real. Se presupune că starea reală este identică cu cea obținută prin simulare pe modelul procesului în cadrul procesului de determinare a secvenței de comenzi optimale. Astfel, secvența de comenzi optimale este determinată a priori și, de aceea, utilizată în timp real, își pierde caracterul optimal.

De fapt, această structură nu caracterizează utilizarea în buclă închisă, în timp real, a sistemului de conducere, ci doar structura unui sistem de simulare în buclă închisă, în care blocul "Proces RCAU" este, de fapt, înlocuit de un *model al procesului*. Acest model furnizează diferitele mărimi necesare *modulului de optimizare* în determinarea secvenței de comenzi optimale.

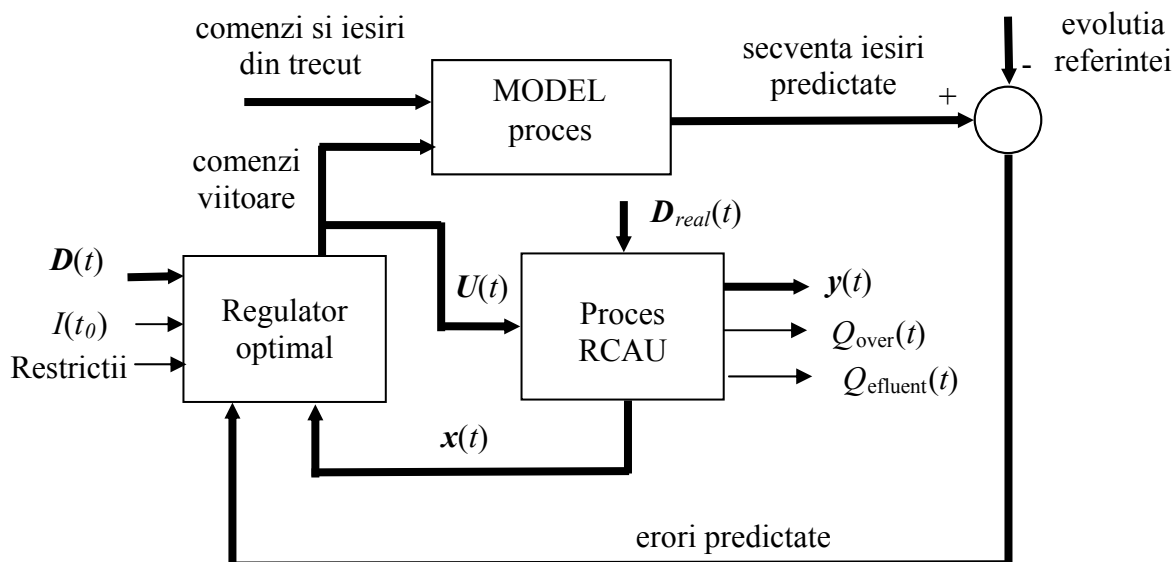
Pentru a realiza structura unui sistem de conducere cu predicție și orizont alunecător, vom utiliza sistemul prezentat în Figura 5.4.2. Precizăm următoarele caracteristici ale acestei structuri:

- Conducerea este în buclă închisă, buclă formată din "Regulatorul optimal" și "Procesul RCAU". Calea de reacție este formată de traductoarele de nivel care furnizează starea  $x(t)$  (identică cu ieșirea  $y(t)$ );
- Bucla exterioară, incluzând și blocul "Regulator optimal", corespunde procesului de predicție cu orizontul de predicție  $p$ . Această buclă se implementează în mod numeric printr-un program executat pe un echipament de calcul;
- Procesul evoluează sub influența perturbației reale, adică volumul influenței reale  $D_{real}(t)$ , cu efect asupra stării curente, în timp ce predicția se face pe baza influenței estimate  $D(k)$ ,  $k=1, \dots, N$ ;
- Comanda la momentul curent  $k$ ,  $U(k)$ , este determinată ca fiind prima din șirul de *comenzi viitoare* furnizat de blocul "Regulator optimal":

$$\{U(k+i|k), i=0\dots p-1\}$$

- Starea reală (identică cu ieșirea sistemului) poate fi estimată sau furnizată de un set de transductoare de nivel conectate la un convertor A/N;
- În momentul prezent  $k$ , comenzile și ieșirile din trecut se referă la datele următoare:

$$\{U(t) | t < k\}, \{y(t) | t < k\}$$



**Figura 5.4.2:** Structura sistemului de conducere predictiva a RCAU

Să remarcăm faptul că sistemul de conducere are ca scop rejecția perturbației  $D_{real}(t)$ , în sensul evitării deversărilor în condițiile existenței influentului. Dacă  $D_{real}(t)=0$ , atunci este evident că putem avea deversări nule, adică:

$$y_5(k+i|k)=y_6(k+i|k)=y_7(k+i|k)=y_8(k+i|k)=0, \text{ pentru } i=1,\dots,p$$

Dacă vom considera că *evoluția referinței* se referă doar la aceste componente ale ieșirii, adică:

$$r_5(k+i|k)=r_6(k+i|k)=r_7(k+i|k)=r_8(k+i|k)=0, \text{ pentru } i=1,\dots,p$$

atunci eroarea de predicție a unei secvențe de ieșiri predictate va conține exact deversările, iar la momentul final al orizontului:

$$\varepsilon(k+p) = y(k+p|k) - r(k+p|k) = \begin{bmatrix} y_5(k+p|k) - r_5(k+p|k) \\ y_6(k+p|k) - r_6(k+p|k) \\ y_7(k+p|k) - r_7(k+p|k) \\ y_8(k+p|k) - r_8(k+p|k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_5(k+p|k) \\ y_6(k+p|k) \\ y_7(k+p|k) \\ y_8(k+p|k) \end{bmatrix},$$

Dacă minimizarea erorii de predicție poate fi înțeleasă în sensul minimizării sumei deversărilor la finalul orizontului alunecător:

$$\sum_{i=5}^8 y_i(k+p|k),$$

atunci ajungem la problema de optimizare definită în Secțiunea 5.1.

### 5.4.3. Implementarea conducerii predictive utilizând programarea dinamică

Posibilitatea implementării practice a unui regulator cu predicție, pentru utilizare în timp real, într-o structură precum cea din Figura 5.4.2, a fost demonstrată prin realizarea unui program în MATLAB cu rol de regulator optimal bazat pe programarea dinamică. Descrierea pseudocod a programului de simulare este dată în Lista 5.2.

#### LISTA 5.2

##### *Simulare sistem de conducere cu Regulator cu Predicție*

/\* regulator bazat pe optimizarea cu programare dinamica.

start

◆ Initializari;  
◆  $mod \leftarrow (RegPred) \text{ sau } (RegPredIdeal)$ ; /\* Se alege modul de simulare

◆ Incarcare scenariu influent;

◆ Discretizare si corectie influent estimat;

◆ daca  $mod = RegPred$

atunci executa Generare influent real;

■

◆ Citire stari initiale;

pentru  $t=1$  pana la  $N-1$

• executa Regulator Predictie; /\* Apel calcul comenzi optimale si cost minim pt. un orizont de timp cu  $t_i=t$  si  $t_f=t+H$ , adica ultima comanda optimala se calculeaza pt. momentul  $t+H-1$  \*/

• recupereaza si aplica prima comanda  $U(k)$  din sirul de comenzi optimale pe orizontul  $H$ ;

• daca  $mod = RegPred$

atunci executa model procesului si perturbatie  $D_{real}(t)$

altfel executa modelul procesului si perturbatie  $D(t)$ ; /\*mod RegPredIdeal

■

• contorizare deversari;

• afiseaza starea curenta, comanda regulatorului, starea urmatoare, deversari;

■

◆ Afisari influent, evolutie stari, deversari

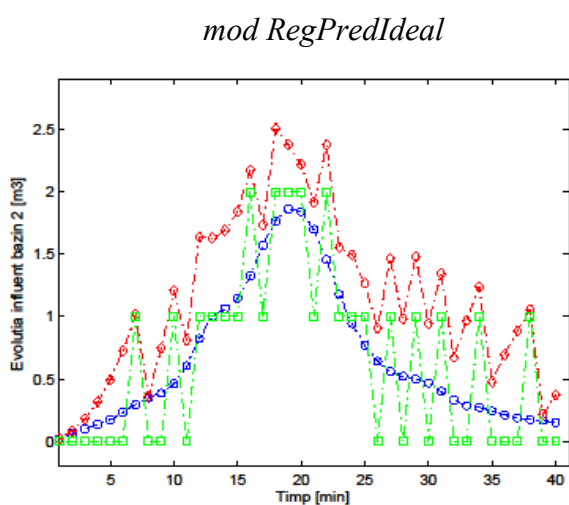
stop

Reglarea cu predicție se face pe baza unei predicții optimale pe un orizont  $H$ , predicție bazată pe influentul estimat (prognozat) disponibil ca dată de intrare în program. Deși comanda regulatorului la momentul  $k$  este calculată pe baza influentului estimat la  $H$  momente de timp ulterioare, starea urmatoare a procesului (RCAU) este calculată ținând cont de influentul real la momentul  $k$ . Să numim acest mod de simulare *RegPred* (mod regulator cu predicție). Opțional, programul poate realiza o conducere optimală pe baza influentului estimat (prognozat) disponibil ca dată de intrare în program, fără considerarea influentului real. În acest caz se păstrează structura buclei închise de la Regulatorul cu Predicție, dar se consideră că influentul real este identic cu cel estimat. Să numim acest mod *RegPredIdeal* (mod regulator cu predicție ideal). Acest mod de funcționare ne permite să comparăm, de exemplu, funcționarea ideală a buclei cu

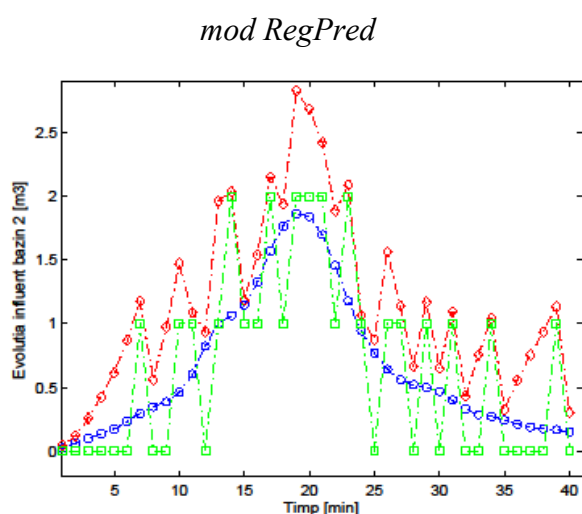
regulator cu predicție cu conducerea optimală ideală pe întreaga perioadă analizată.

Din date, rezultă că influentul prognozat pe perioada analizată are un volum de 74 UM (UM=unitate de discretizare=120 m<sup>3</sup>), în timp ce influentul real are un volum de 78 UM. De aceea, se observă, în Figura 5.4.4, că influentul este mai bogat decât în Figura 5.4.3, mai ales în intervalul 15-25 perioade de eșantionare. Figurile 5.4.5 și 5.4.6 prezintă evoluția stărilor discrete în cele două moduri de funcționare. Se constată că, în ambele cazuri, stările  $x_2$ ,  $x_3$  și  $x_4$  tind către volumele corespunzătoare nivelelor maxime din bazine, doar  $x_1$  având ceva rezervă. Dinamica stărilor este practic aceeași, ceea ce arată robustețea conducerii cu predicție, chiar când avem un surplus de max 10% de influent, în cazul real. Deversările cumulate pe cele 4 bazine la un moment  $k$  sunt: în primul caz avem deversări de 2 UM=240 m<sup>3</sup>, în timp ce în modul *RegPred* avem deversări în total de 9 UM=1080 m<sup>3</sup>. Volumul de apă ce iese normal din RCAU este același:

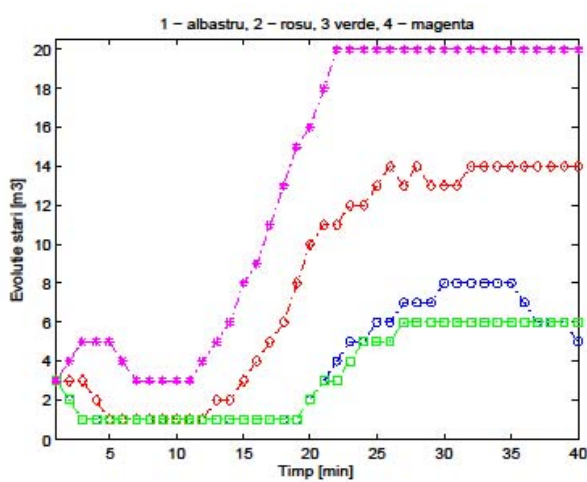
$$\sum_t Q_{\text{effluent}}(t) = 4680 \text{ m}^3, \text{ adică } 39\text{UM}.$$



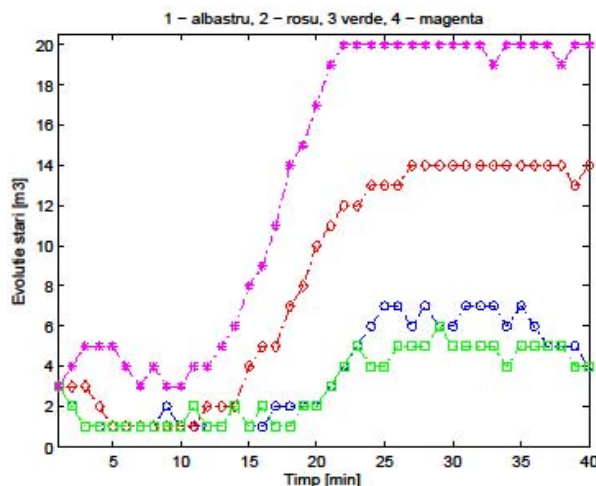
**Figura 5.4.3:** Influent bazinul 2



**Figura 5.4.4:** Influent bazinul 2



**Figura 5.4.5:** Evoluție stări



**Figura 5.4.6:** Evoluție stări

Să ne amintim că, în simularea din Secțiunea 5.3.1, din aceeași stare s-a obținut o deversare totală nulă. Acest lucru se explică prin faptul că, în varianta de bază, optimizarea se face pe un orizont egal cu cele 40 perioade de eșantionare. În modul *RegPredIdeal* optimizarea se face pe un orizont alunecător de  $H$  perioade de eșantionare, ceea ce face să se piardă caracterul optimal global și se obține o deversare ceva mai mare de 2 UM. Dar, complexitatea

calculatorie la nivelul unei perioade de eşantionare este mult mai mică, pentru că se rezolvă problema de optimum pe un orizont mult mai mic. De aici rezultă și avantajul utilizării unui regulator cu predicție în raport cu o conducere optimală globală. Acest fapt este cu atât mai important cu cât complexitatea calculelor în cazul programării dinamice este exponențială în raport cu dimensiunea datelor.

În modul *RegPred*, influentul este mai abundent și oarecum altfel distribuit ceea ce mărește valoarea funcției obiectiv la 9 UM. Și aici există, în contrapartidă, avantajul unei soluții realiste care ține cont de starea reală a RCAU.

## 5.4. CONCLUZII

O rețea de colectare a apelor uzate se poate modela (în mod realist) ca un sistem neliniar care răspunde la perturbație și mai puțin la referință. Perturbația principală (sarcina) este volumul de ape uzate care se colectează în bazine, ce au rolul de tampon spre stațiile de tratare. Modelul de stare discret al unei RCAU mai conține și două mărimi de calitate: volumul de influent deversat și volumul de efluent pe un orizont de timp stabilit.

Pe de altă parte, o RCAU permite formularea unei probleme de optimizare discretă întrucât obiectivul tehnic principal este minimizarea deversărilor eventuale.

Problema de optimum poate fi rezolvată prin programare dinamică, tehnică relativ ușor de implementat off-line, dar mare consumatoare de timp și spațiu de memorie. Numărul relativ mic de bazine dintr-o RCAU, precum și optimizarea pe un orizont de timp relativ redus (la câteva ore) fac această soluție realistă.

Soluția unei probleme deja formulate (parametrii stabiliți) are o singură variabilă de intrare esențială: distribuția volumului (sau debitului) de influent pe orizontul de timp analizat. De aceea, comenzile optime obținute ca soluție caracterizează perechea *model RCAU - distribuție influent*.

Dacă se pune, firesc, problema implementării unei structuri de optimizare în buclă închisă, atunci ajungem la regulatorul optimal din Secțiunea 5.3. Adoptarea acestei soluții înseamnă obligatoriu utilizarea unor structuri de date memorate care să conțină comenzile optime în funcție de stare, dar numai pentru un influent prognozat. Aceste structuri utilizează, pentru un număr de bazine relativ redus ( $\leq 5$ ), masive memorate de câteva zeci de kocteti, ceea ce este realist pentru orice implementare.

O altă soluție, care să evite structurile de date memorate, este utilizarea unui regulator cu predicție și orizont alunecător. Ideea de bază a acestei soluții este că regulatorul predictiv rezolvă la fiecare iterație o problemă de optimizare cu un orizont mult mai mic. Deși numărul de stări din spațiul stărilor nu se micșorează, complexitatea scade foarte mult, proporțional cu ponderea lungimii orizontului alunecător în lungimea orizontului problemei.

În ambele cazuri când se utilizează regulatoare ce comandă procesul real (soluțiile din Secțiunile 5.3 și 5.4) trebuie ținut cont că procesul este sub influența influentului real  $D_{real}(t)$ . Acest fapt a fost necesar mai ales pentru simularea făcută. Modelul procesului real utilizat ne arată că este mai ușor de adoptat soluția măsurării stărilor (care sunt și ieșiri), astfel încât nu mai este nevoie de cunoașterea influentului real.

În implementarea unei soluții din cele arătate în acest capitol, trebuie făcută o analiză temeinică a perioadei de eşantionare și un studiu al posibilității de utilizare a datelor memorate.

**PARTEA a III-a:**

**CONDUCEREA AUTOMATĂ A SISTEMELOR  
DE TRATARE A APELOR UZATE**

## CAPITOLUL 6: CONDUCEREA AUTOMATĂ A INSTALAȚIILOR DE TRATARE A APELOR UZATE UTILIZÂND TEHNICI BAZATE PE DATE

În cadrul acestui capitol este tratată problema conducerii automate a instalațiilor de tratare a apelor uzate cu nămol activ, considerându-se conducerea procesului biotehnologic propriu-zis, în care mărimile reglate pot fi: oxigenul dizolvat, nitratul sau amoniul. Pentru implementarea conducerii automate a mărimilor menționate anterior, în cadrul acestui capitol s-a utilizat o metodă bazată pe date experimentale, metodă care permite extragerea regulatorului pe baza datelor experimentale obținute în buclă deschisă din proces.

Pentru procesele de tratare a apelor uzate se propune utilizarea metodei Virtual Reference Feedback Tuning. Mai întâi metoda Virtual Reference Feedback Tuning este studiată privind măsura în care incertitudinile referitoare la modelul spectral al intrării procesului afectează calitatea sistemului de control rezultat. Cel de al doilea aspect studiat se referă la alegerea modelului de referință și a ordinului compensatorului din structura regulatorului. Este propusă o procedură iterativă de rezolvare a acestor probleme, inclusiv de obținere a unui regulator PID prin metodologia Virtual Reference Feedback Tuning.

În finalul capitolului metoda analizată în prima parte a capitolului este aplicată în cazul conducerii automate pentru controlul concentrației de nitrat din bazinul anoxic și al concentrației de oxigen dizolvat din bazinul aerob.

### 6.1. CONDUCEREA AUTOMATĂ A PROCESELOR UTILIZÂND METODE BAZATE PE DATE

#### 6.1.1. Metoda de conducere automată a proceselor *Virtual Reference Feedback Tuning*

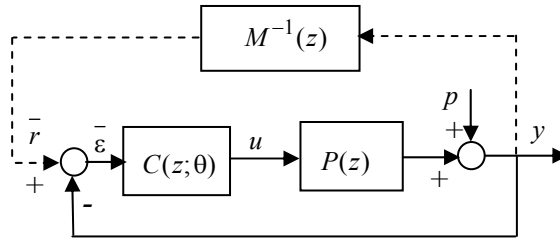
##### *Principiul metodei Virtual Reference Feedback Tuning*

Fie un proces descris prin funcția de transfer  $P(z)$ . Se presupune că această funcție nu este cunoscută, în schimb se cunoaște un set de date de intrare-ieșire, date experimentale obținute la funcționarea procesului în circuit deschis. Metoda Virtual Reference Feedback Tuning (VRFT), propusă în (Campi ș.a., 2002), presupune impunerea unor specificații de performanță asupra sistemului în buclă închisă, specificații date prin modelul de referință  $M(z)$ , și determinarea unui regulator  $C(z; \theta)$ , unde  $\theta$  este vectorul parametrilor regulatorului. Se face mențiunea că în această secțiune s-au utilizat notațiile din (Campi ș.a., 2002).

Metoda VRFT are structura prezentată în Figura 6.1.1, unde  $p$  este perturbația care acționează la ieșirea procesului. Presupunem că sunt cunoscute datele de intrare-ieșire ale procesului pe un orizont de timp dat:  $\{u(t), y(t)\}_{t=1, N}$ . Pe baza modelului de referință, se construiește modelul invers, la limită cauzal, care oferă la ieșire referința virtuală,  $\bar{r}(t)$ :

$$\bar{r}(t) = M^{-1}(z) \cdot y(t) \quad (6.1.1)$$

Pe baza referinței virtuale se determină eroarea de urmărire virtuală,  $\bar{e}(t) = \bar{r}(t) - y(t)$ , care se aplică regulatorului  $C(z; \theta)$ , unde vectorul parametrilor,  $\theta$ , urmează a fi determinat.



**Figura 6.1.1:** Structura buclei de reglare utilizând metoda VRFT

În conformitate cu (Campi ș.a., 2002), eroarea de urmărire virtuală  $\bar{\varepsilon}(t)$  și comanda procesului,  $u(t)$ , sunt transferate prin filtre cu funcția de transfer  $L(z)$ , rezultând la ieșirile acestora semnalele  $\bar{\varepsilon}_L(t)$  și, respectiv,  $u_L(t)$ . Problema adoptării valorii optimale a vectorului parametrilor regulatorului se face în raport cu criteriul de performanță

$$I_{VR} = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \left( u_L(t) - C(z; \theta) \bar{\varepsilon}_L(t) \right)^2 \quad (6.1.2)$$

Cunoscând setul de date  $\left\{ \bar{\varepsilon}_L(t), u_L(t) \right\}_{t=1, N}$ , vectorul parametrilor  $\theta$  se deduce printr-o procedură de identificare a regulatorului, care realizează minimizarea criteriului (6.1.3).

În același timp, determinarea parametrilor optimali ai regulatorului se poate formula în raport cu bucla de reglare cu modelul de referință  $M(z)$ . Criteriu de performanță definit în acest caz este:

$$I_{MR}(\theta) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \left| \frac{P(e^{j\omega})C(e^{j\omega}; \theta)}{1 + P(e^{j\omega})C(e^{j\omega}; \theta)} - M(e^{j\omega}) \right|^2 \cdot |W(e^{j\omega})|^2 d\omega \quad (6.1.3)$$

În (Campi ș.a., 2002), autorii metodei discută condițiile în care parametrii optimali în raport cu criteriul (6.1.2) sunt aceiași cu cei aferenți criteriului (6.1.3). De asemenea, se stabilește că o cerință realistă ca parametrii optimali din cele două criterii să aibă, cu “o bună aproximare”, aceleași valori, este ca funcția de transfer a fitrelor  $L(z)$  să se aleagă astfel încât:

$$\left| L(e^{j\omega}) \right|^2 = |1 - M(e^{j\omega})|^2 |M(e^{j\omega})|^2 |W(e^{j\omega})|^2 \frac{1}{\Phi_u(e^{j\omega})}, \quad \forall \omega \in [-\pi, \pi] \quad (6.1.4)$$

unde  $\Phi_u(\omega)$  este densitatea spectrală a lui  $u(t)$ .

Fie funcția de transfer a regulatorului:

$$C(z, \theta) = \frac{1}{1 - z^{-1}} \sum_{i=0}^m \theta_i z^{-i} = \beta^T(z) \theta, \quad (6.1.5)$$

unde:

$$\beta(z) = [\beta_0(z) \ \beta_1(z) \ \dots \ \beta_m(z)]^T; \quad \theta = [\theta_0 \ \theta_1 \ \dots \ \theta_m]^T \quad (6.1.6)$$

Pe baza datelor disponibile  $\left\{ \bar{\varepsilon}_L(t), u_L(t) \right\}_{t=1, N}$ , vectorul parametrilor regulatorului se determină prin metoda celor mai mici pătrate, atunci când sistemul este fără zgomot ( $p = 0$ ). Dacă zgomotul nu este nul, este necesară utilizarea metodei variabilelor instrumentale, pentru a evita obținerea unui vector al parametrilor deplasat. În (Campi ș.a., 2002) sunt propuse două soluții pentru alegerea variabilelor instrumentale: 1) realizarea unui al doilea experiment,



utilizând aceeași secvență de intrare  $\{u(t)\}_{t=1, \overline{N}}$ ; secvența de ieșire va fi diferită de cea anterioară, deoarece realizările zgomotului sunt diferite în cele două experimente; 2) identificarea modelului  $\hat{P}(z)$  al procesului, pe baza datelor de intrare-ieșire disponibile și generarea prin simulare a ieșirii  $\{\hat{y}(t)\}_{t=1, \overline{N}}$ , pe baza relației  $\hat{y}(t) = \hat{P}(z)u(t)$ . Variabila instrumentală este:

$$\zeta(t) = \beta(z)L(z)(M^{-1}(z) - 1)\hat{y}(t) \quad (6.1.7)$$

În continuare, pentru dezvoltarea studiilor de caz din cadrul tezei s-a adoptat cea de a doua soluție pentru alegerea variabilei instrumentale. Ea are avantajul că nu solicită un nou experiment realizat în proces.

Principala dificultate în alegerea filtrelor  $L(z)$ , astfel încât să fie îndeplinită condiția (6.1.4), este că - în general -  $\Phi_u(\omega)$  nu este cunoscută, cu excepția situațiilor când semnalul de intrare  $u(t)$  a fost ales de operator sub forma unui proces pseudoaleator cu densitatea spectrală de putere impusă. Această situație nu este frecvent întâlnită în practică. În mod uzual se cunosc datele de intrare-ieșire în condițiile când  $u(t)$  este un semnal cu o variație oarecare pe un interval de timp redus, astfel încât interpretarea acestuia ca un proces aleator cu o densitate spectrală corect definită și precis determinată nu este posibilă. În aceste condiții, obiectivul determinării valorii optime a lui  $\theta$  nu este realist.

Obiectivele cercetării din teză, privind VRFT, au fost (Carp ș.a., 2013a):

- investigarea performanțelor VRFT atunci când modelul spectral al intrării procesului este incert;
- stabilirea unei proceduri de alegere a modelului de referință și a ordinului compensatorului dinamic. În acest context, s-a abordat problema obținerii unui regulator PID, sintetizat prin metoda VRFT.

### ***Performanțele VRFT când modelul spectral al intrării este incert***

În continuare se analizează în detaliu performanțele VRFT, considerând ca mărime incertă funcția  $\Phi_u(\omega)$ . Performanțele VRFT vor fi analizate în cadrul a două studii de caz (Carp ș.a., 2013): 1) controlul unui sistem cu dublă rezonanță, preluat din lucrarea în care a fost propusă metoda VRFT, (Campi ș.a., 2002), însă analizat mai detaliat în cele ce urmează; 2) controlul unui proces de ordinul 4, de fază neminimă. Se face mențiunea că acest al doilea studiu de caz a condus la rezultate similare cu primul și, din motive de spațiu, nu este prezentat în cadrul acestui rezumat.

#### ***1. Cazul sistemului cu dublă rezonanță***

Modelul procesului considerat ca studiu de caz este:

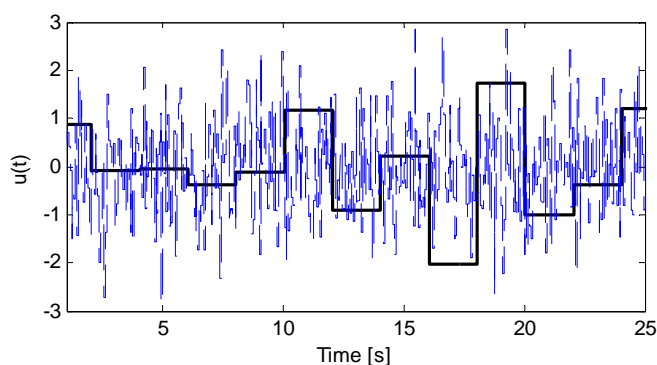
$$\begin{aligned} P(z) &= z^{-3}B(z)/A(z); \quad B(z) = 0.28261 + 0.50666z^{-1}; \\ A(z) &= 1 - 1.41833z^{-1} + 1.58939z^{-2} - 1.31608z^{-3} + 0.88642z^{-4} \end{aligned} \quad (6.1.8)$$

perioada de eșantionare fiind  $T_s = 0.05$  s.

În conformitate cu (Campi ș.a., 2002), modelul de referință este

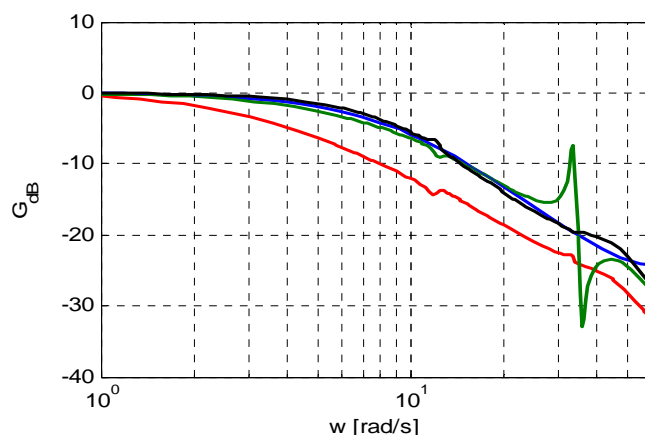
$$M(z) = \frac{z^{-3}(1-\alpha)^2}{(1-\alpha z^{-1})^2}, \quad \alpha = \exp(-T_s \bar{\omega}), \quad \bar{\omega} = 10 \quad (6.1.9)$$

iar funcția de transfer a regulatorului este de forma (6.1.5), cu  $m = 5$ . Ca și în (Campi ș.a., 2002), s-au analizat 3 ipoteze de funcționare: 1) sistemul este fără zgomot și  $L(z) = 1$ ; 2) sistemul este fără zgomot și  $L(z) = (1 - M(z))M(z)$ ; 3) sistemul este afectat de zgomot și  $L(z) = (1 - M(z))M(z)$ . Spre deosebire de (Campi ș.a., 2002), în fiecare din cele 3 cazuri, s-au considerat 3 tipuri de semnale aplicate la intrarea procesului, pentru obținerea setului de date “experimentale”: a) zgomot alb cu medie nulă și varianță unitară; b) semnal pseudoaleator de forma unei succesiuni aleatoare de trepte, unde intervalul în care semnalul de intrare se păstrează constant este  $r \cdot T_s$ , cu  $r = 4$ ; c) semnal de aceeași formă cu cel anterior, în care  $r = 40$ . În cazurile b și c, valorile salturilor la momentele discrete  $k \cdot (rT_s)$ ;  $k = 0, 1, 2, \dots$  sunt generate aleator, cu distribuție normală, valoare medie nulă și varianță unitară. În Figura 6.1.2 se prezintă două variante ale secvenței semnalului de intrare: cea din cazul a, așa cum este considerat în (Campi ș.a., 2002), și cea din cazul c. Din punctul de vedere al aplicațiilor din procesele industriale, semnalul de tip succesiune de trepte este de preferat, fiind mult mai ușor de compatibilizat cu restricțiile tehnologice.



**Figura 6.1.2:** Semnalul de intrare: de tip zgomot alb (dash) și de tip succesiune de trepte (solid)

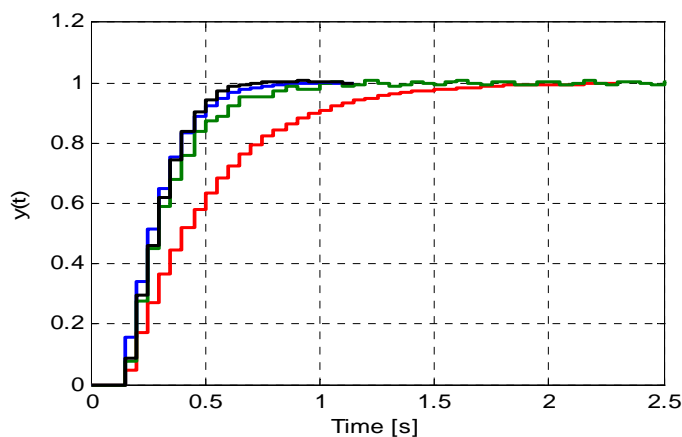
Cum este și firesc, în toate cele 3 ipoteze de funcționare menționate, rezultatele obținute cu semnal de intrare de tip zgomot alb (cazul a) au fost practic identice cu cele din (Campi ș.a., 2002). Obiectivul urmărit a fost însă analiza comparativă a acestor rezultate cu cele obținute la utilizarea semnalelor de intrare de tipul succesiunii de semnale treaptă.



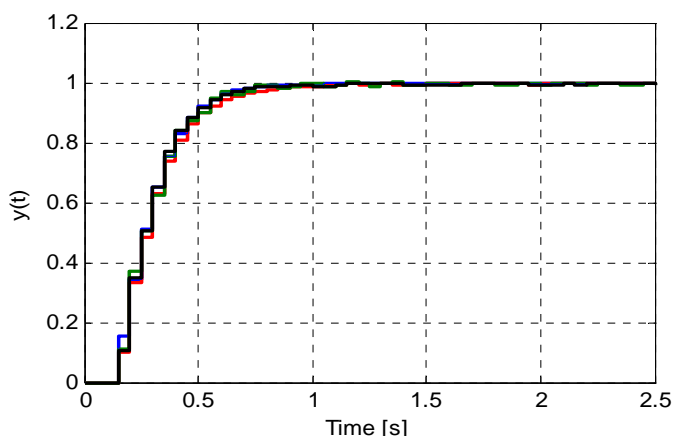
**Figura 6.1.3:** Caracteristica Bode de amplificare: modelul de referință (linie albastră); sistemul de control în cazul a (linie roșie), în cazul b (linie verde) și în cazul c (linie neagră)

*Ipoteza de funcționare 1:*  $L(z) = 1$ , fără zgomot, corespunde situației la care concluzia din (Campi ș.a., 2002) este că sistemul de control “diferă în mod remarcabil de  $M(z)$ ” (vezi curbele

cu roșu din Figurile 6.1.3 și 6.1.4, în raport cu cele cu albastru). Dacă se adoptă  $r = 4$  și  $r = 40$  (curbele cu verde, respectiv cu roșu), performanțele sistemului de control se ameliorează sensibil. În *cazul*  $r = 4$  există o eroare în estimarea celei de a doua pulsații de rezonanță, iar în *cazul*  $r = 40$  rezultatele sunt foarte bune (vezi Figurile 6.1.3 și 6.1.4). Rezultatele foarte slabe obținute în *cazul*  $a$  se explică prin eroarea mare de identificare a amplificării statice a compensatorului dinamic, așa cum se remarcă din Figura 6.1.3. Pentru *cazurile*  $b$  și, îndeosebi,  $c$ , eroarea de identificare a amplificării statice este sensibil mai redusă, ca urmare a creșterii ponderii regimurilor staționare în semnalul de intrare (vezi Figura 6.1.2).



**Figura 6.1.4:** Răspunsul treaptă unitară: modelul de referință (linie albastră); sistemul de control în cazul  $a$  (linie roșie), în cazul  $b$  (linie verde) și în cazul  $c$  (linie neagră)

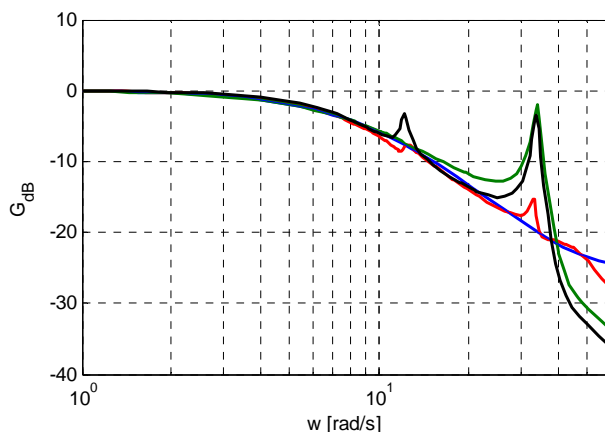


**Figura 6.1.5:** Răspunsul treaptă unitară: modelul de referință (linie albastră); sistemul de control în cazul  $a$  (linie roșie), în cazul  $b$  (linie verde) și în cazul  $c$  (linie neagră)

*Ipoteza de funcționare 2:*  $L(z) = (1 - M(z))M(z)$ , fără zgomot, conduce la rezultate excelente, ilustrate în Figura 6.1.5. Se remarcă totuși o eroare de compensare a efectului rezonant al procesului la frecvențe ridicate, pentru  $r = 4$  (curba cu verde în Figura 6.1.5), cu efecte neglijabile asupra răspunsului la treaptă. Este surprinzătoare diferența foarte mică dintre caracteristicile Bode ale controllerului, la utilizarea semnalelor de intrare de bandă largă și de bandă îngustă, adică atunci când  $r = 1$ , respectiv  $r = 40$ .

*Ipoteza de funcționare 3:*  $L(z) = (1 - M(z))M(z)$ , date afectat de zgomot. Ca și în lucrarea (Campi ș.a., 2002) s-a considerat că raportul semnal util / zgomot este egal cu 10. La identificarea procesului s-a utilizat un model neparametric, de tipul răspunsului la impuls eșantionat, deoarece s-a considerat că structura modelului parametric nu este cunoscută a priori.

Dimensiunea modelului neparametric s-a stabilit pe baza estimării duratei regimului tranzitoriu, rezultând  $m_s = 200$  eşantioane.



**Figura 6.1.6:** Caracteristica Bode de amplificare: modelul de referință (linie albastră); sistemul de control în cazul *a* (linie roșie), în cazul *b* (linie verde) și în cazul *c* (linie neagră)

Rezultatele obținute prin aplicarea metodei VRFT sunt ilustrate în Figurile 6.1.6. Erorile semnificative ale caracteristicii Bode ale sistemului de control, față de cea a modelului de referință, în zona celei de a doua rezonanțe, nu au efecte importante asupra răspunsului la treaptă. Această constatare, întâlnită și la analiza din cadrul *ipotezelor* 1 și 2, se datorează ponderii reduse a dinamicii de înaltă frecvență, care este indusă de rezonanța situată în imediata vecinătate a frecvenței Shannon.

Sintetizând rezultatele prezentate anterior, cât și cele din cadrul unor procese frecvent întâlnite în ingineria de proces, rezultă următoarele constatări:

- atunci când nivelul zgomotului este nul sau foarte redus (raportul semnal util / zgomot de aproximativ 100), principiul metodei VRFT este aplicabil și atunci când  $L(z)=1$ , **dacă semnalul de intrare este de tipul unei succesiuni de trepte**, dar nu este aplicabil când la intrare semnalul este de tip zgomot alb;

- utilizarea filtrului  $L(z)$  conform metodei VRFT conduce la legi de comandă eficiente, la care modificarea tipului de semnal, conform cazurilor considerate, nu are efecte importante asupra calității legii de comandă;

- banda de frecvențe în care se obține o bună aproximare a modelului de referință prin sistemul de control se îngustează în prezența unui zgomot semnificativ la ieșire.

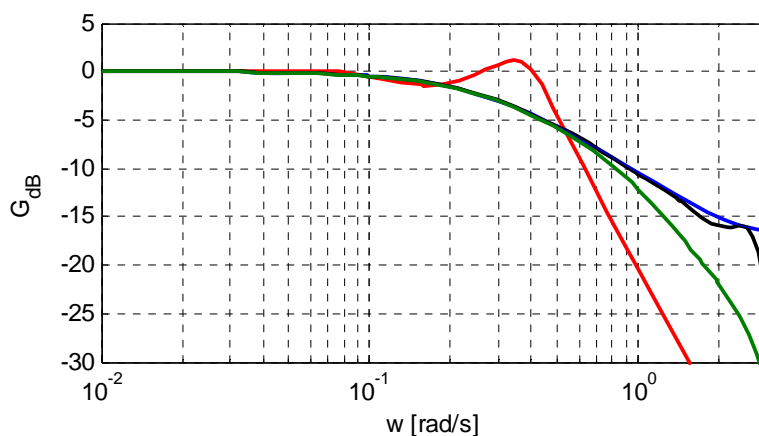
### ***Considerații privind alegerea modelului de referință și a ordinului compensatorului dinamic în cazul metodei VRFT***

Problema alegerii modelului de referință și a ordinului compensatorului dinamic din structura regulatorului sunt strâns corelate. Pentru ilustrarea acestei legături se consideră în cele ce urmează un proces de fază neminimă de ordinul 4 și se adoptă un model de referință de forma

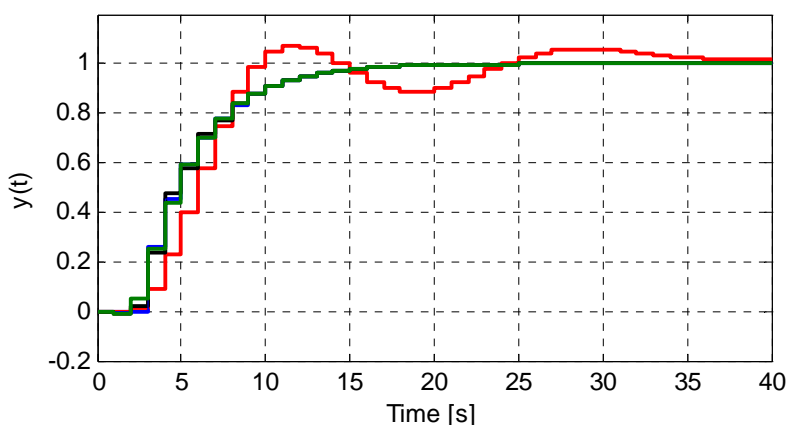
$$M(z) = \frac{z^{-(n_r+1)}(1-\alpha)^{n_r}}{(1-\alpha z^{-1})^{n_r}}, \quad \alpha = \exp(-T_s \bar{\omega}), \quad \text{în care } n_r = 1. \text{ Prezența unui model de referință de}$$

ordinul unu, atunci când procesul este de ordin superior, pune problema dacă compensatorul dinamic are posibilitatea de a compensa caracteristica de frecvență a procesului, astfel încât

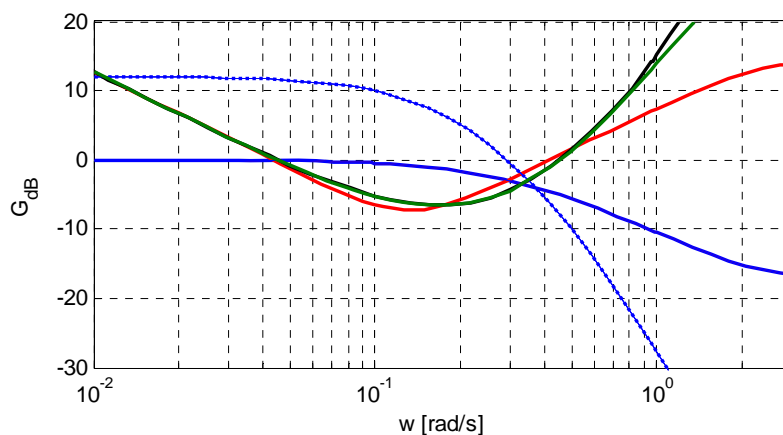
sistemul de control să aproximeze satisfăcător modelul de referință. O ilustrare a acestei probleme s-a realizat în cadrul *Ipotezei de funcționare 2*, iar rezultatele sunt date în Figurile 6.1.7 - 6.1.9. S-au utilizat următoarele valori ale ordinului compensatorului dinamic:  $m = 2$ ;  $m = 4$  și  $m = 10$ .



**Figura 6.1.7:** Caracteristica Bode de amplificare: modelul de referință (linie albastră); sistemul de control în cazul  $m = 2$  (linie roșie), cazul  $m = 4$  (linie verde) și în cazul  $m = 10$  (linie neagră)



**Figura 6.1.8:** Răspunsul treaptă unitară: modelul de referință (linie albastră); sistemul de control în cazul  $m = 2$  (linie roșie), cazul  $m = 4$  (linie verde) și cazul  $m = 10$  (linie neagră)



**Figura 6.1.9:** Caracteristica Bode de amplificare: modelul de referință (linie albastră); regulatorul în cazul  $m = 2$  (linie roșie), cazul  $m = 4$  (linie verde) și cazul  $m = 10$  (linie neagră)

În cazul  $m = 2$  se obține un regulator clasic de tip PID. Așa cum se remarcă din Figurile

6.1.7 și 6.1.8, calitatea aproximării caracteristicii modelului de referință este foarte slabă în acest caz. Explicația este furnizată de Figura 6.1.9, unde sunt prezentate caracteristicile Bode de amplificare ale modelului de referință, procesului și regulatorului. Panta ridicată a caracteristicii procesului la frecvențe medii și înalte nu poate fi compensată de un simplu efect derivativ al regulatorului, pentru a obține o caracteristică cu pantă redusă, așa cum este cea a modelului de referință de ordinul unu. Dacă se mărește ordinul compensatorului dinamic la  $m = 4$  și apoi la  $m = 10$ , corecția caracteristicii de frecvență se produce la frecvențe tot mai înalte (vezi Figura 6.1.9), iar calitatea aproximării caracteristicii Bode se ameliorează succesiv (vezi Figura 6.1.7).

VRFT este prezentată în literatură ca o metodă neiterativă. Acest lucru este adevărat dacă există informații a priori, în sensul că modelul de referință și ordinul compensatorului dinamic sunt cunoscute și generează rezultatele așteptate. În practica inginerescă, aceste informații a priori nu există, cu excepția timpului mort, care se poate evalua în cazul unui semnal de intrare de tipul unei succesiuni de trepte. În aceste condiții sunt necesare iterații pentru a se stabili modelul de referință și ordinul compensatorului dinamic. O soluție posibilă ar fi realizarea unei prime iterații cu un model de referință de ordin redus: ordinul 2 sau chiar ordinul întâi, și cu o valoare ridicată a parametrului  $\bar{\omega}$ . Cu alte cuvinte, se impune inițial un model de referință ambițios. În această primă iterație se utilizează o valoare ridicată a ordinului compensatorului dinamic (de ex.,  $m \geq 10$ ) și se determină controllerul și performanțele sistemului de control. Dacă performanțele nu sunt satisfăcătoare, se revine asupra modelului de referință, mărinđ ordinul acestuia și/sau micșorând parametrul  $\bar{\omega}$  (adică, impunând o dinamică mai lentă a modelului de referință). Procedura se repetă până când, cu valoarea adoptată pentru  $m$  ( $m \geq 10$ ), performanțele sistemului de control sunt satisfăcătoare. În continuare, se examinează răspunsul la impuls al compensatorului dinamic, ale cărui eșantioane sunt parametrii  $\theta_i, i = 0, m$ . Următoarele iterații vizează reducerea în continuare a parametrului  $m$ , urmărind în același timp calitatea sistemului de control. Dacă obiectivul urmărind este obținerea unui regulator PID, atunci este posibil ca prin reducerea succesivă a ordinului compensatorului dinamic, până la valoarea  $m = 2$ , calitatea sistemului de control să se deterioreze inacceptabil. În acest caz se revine asupra modelului de referință, prin creșterea ordinului acestuia și/sau scăderea parametrului  $\bar{\omega}$ .

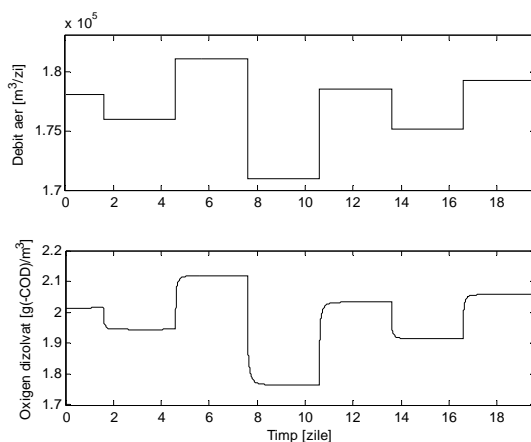
## 6.2. CONDUCEREA AUTOMATĂ A INSTALAȚIILOR DE TRATARE A APELOR UZATE UTILIZÂND STRUCTURI DE REGLARE BAZATE PE DATE

Metoda Virtual Reference Feedback Tuning este aplicată pentru controlul concentrației de nitrat din bazinul anoxic și al concentrației de oxigen dizolvat din bazinul aerob, utilizând modelele de tip ASM1 și mediul de simulare SIMBA pentru testarea structurii de reglare rezultate.

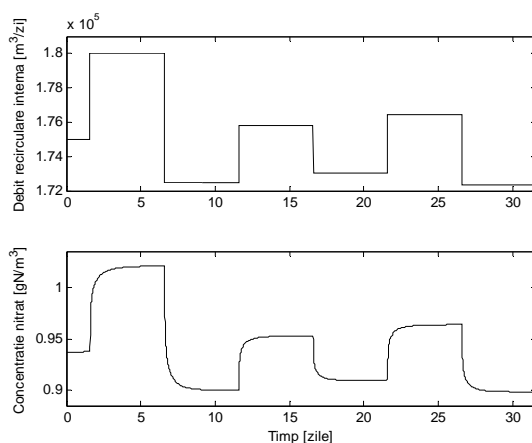
### *Studiul de caz 6.2.1*

În cadrul acestui studiu de caz a fost considerată instalația prezentată în Studiul de caz 3.2.1. Această instalație urmărește eliminarea azotului și a substratului organic din apa uzată. Pentru aceasta, din considerentele menționate anterior, va fi testată metoda VRFT de proiectare a reglatoarelor. Dintre structurile posibile de control va fi adoptată următoarea: oxigenul dizolvat în bazinul aerob va fi reglat prin intermediul debitului de aer insuflat în bazinul aerob ( $Q_{air} - S_{O_2}$ ), iar nitratul la ieșirea din bazinul anoxic va fi reglat prin intermediul debitului de recirculare internă ( $Q_{rec} - S_{NO}$ ). Pentru aplicarea metodei VRFT au fost aplicate semnale de intrare de tip treaptă pentru fiecare din cele două canale de comandă considerate, după ce procesul a fost adus în regim staționar de funcționare. Rezultatele obținute sunt prezentate în

Figurile 6.2.1 și 6.2.2 și ele prezintă datele care vor fi utilizate în cadrul metodei, fără a fi necesară identificarea celor două canale de comandă. Metoda VRFT aplicată în continuare în cazul celor două canale de comandă considerate a fost implementată conform Ipotezei de funcționare 2, atunci când  $L(z) = (1 - M(z))M(z)$ , iar datele se consideră a nu fi afectate de zgomot.



**Figura 6.2.1:** Aplicarea de semnale treaptă la intrarea canalului  $Q_{air} - S_{O_2}$



**Figura 6.2.2:** Aplicarea de semnale treaptă la intrarea canalului  $Q_{rec} - S_{NO}$

### ***Proiectarea regulatorului pentru canalul de comandă $Q_{air} - S_{O_2}$ utilizând metoda VRFT***

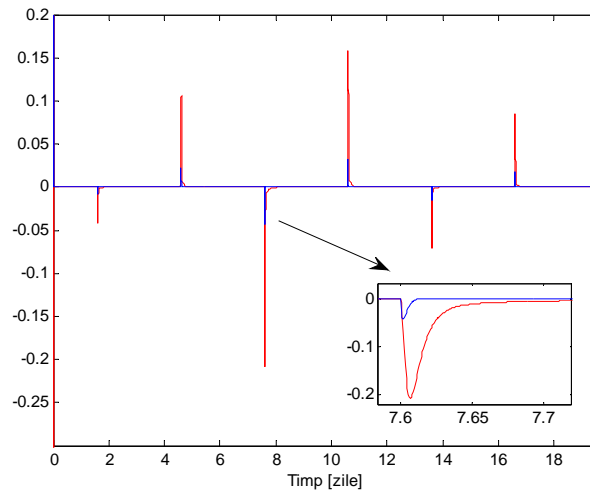
Se consideră un model de referință de ordinul întâi cu funcția de transfer:

$$H_{MR, Q_{air} - S_{O_2}}(s) = \frac{1}{Ts + 1} \quad (6.2.1)$$

în care:  $T = 0.002$  zile.

Eroarea virtuală filtrată și comanda filtrată, prezentate grafic în Figura 6.2.3, constituie semnalul de intrare și, respectiv, de ieșire din compensatorul dinamic  $C_D(z; \theta)$  ce trebuie identificat folosind metoda variabilei instrumentale (compensator dinamic aflat în structura regulatorului, conform formulei (6.1.5)). În urma parcurgerii procedurii de identificare, considerând că  $m = 5$ , rezultă un compensator dinamic ce are formula:

$$C_{Q_{air} - S_{O_2}}(z^{-1}) = 0.072 - 0.5z^{-1} + 2.06z^{-2} - 1.88z^{-3} + 0.31z^{-4} + 0.008z^{-5} \quad (6.2.2)$$



**Figura 6.2.3:** Eroarea virtuală filtrată (linie roșie) și comanda filtrată (linie albastră) pentru canalul  $Q_{air} - S_{O_2}$

**Proiectarea regulatorului pentru canalul de comandă  $Q_{rec} - S_{NO}$  utilizând metoda VRFT**

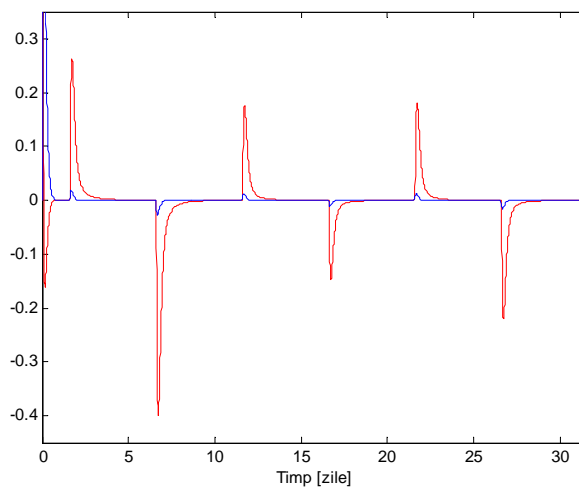
Se consideră un model de referință de ordinul întâi cu funcția de transfer:

$$H_{MR, Q_{rec} - S_{NO}}(s) = \frac{1}{Ts + 1} \quad (6.2.3)$$

în care:  $T = 0.08$  zile.

Eroarea virtuală filtrată și comanda filtrată, prezentate grafic în Figura 6.2.4, constituie semnalul de intrare și, respectiv, de ieșire din compensatorul dinamic  $C_D(z; \theta)$  care trebuie identificat folosind metoda variabilei instrumentale (compensator dinamic aflat în structura regulatorului, conform formulei (6.1.5)). În urma parcurgerii procedurii de identificare, considerând că  $m = 5$ , rezultă un compensator dinamic cu formula:

$$C_{Q_{rec} - S_{NO}}(z^{-1}) = 0.219 - 0.213z^{-1} + 0.249z^{-2} - 0.083z^{-3} - 0.47z^{-4} + 0.087z^{-5} \quad (6.2.4)$$

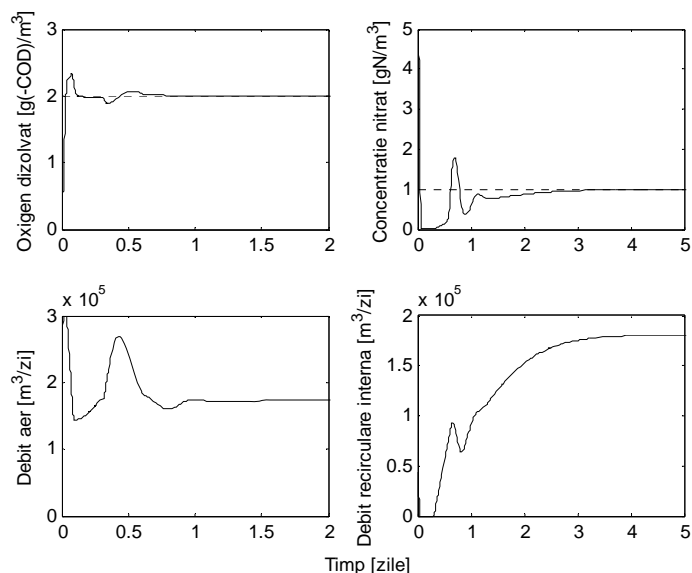


**Figura 6.2.4:** Eroarea virtuală filtrată (linie roșie) și comanda filtrată (linie albastră) pentru canalul  $Q_{rec} - S_{NO}$

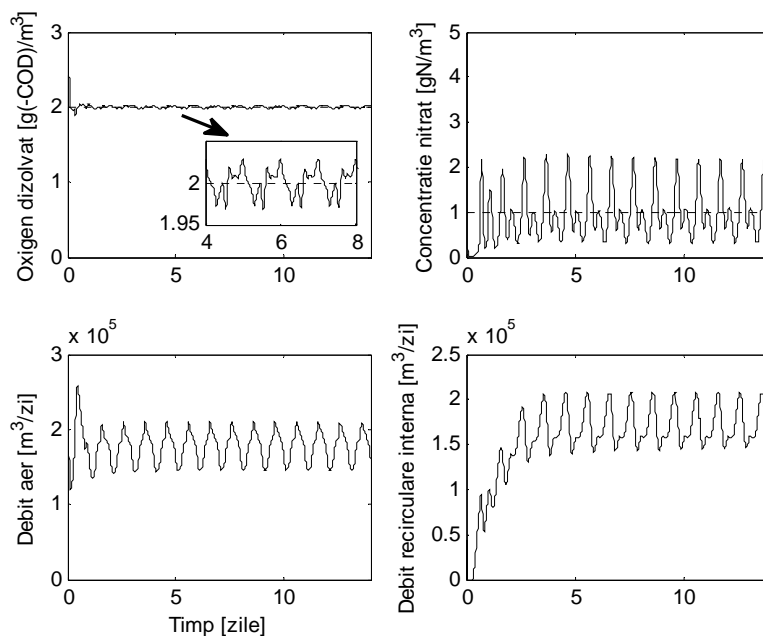


## Validarea prin simulare numerică a structurii de reglare rezultate utilizând metoda VRFT

Pentru validarea structurii de reglare propuse, prima testare a considerat cazul în care influența instalației este constant, rezultatul obținut fiind prezentat în Figura 6.2.5. Din această figură se observă că atât în cazul buclei de oxigen dizolvat, cât și al celei de nitrat din bazinul anoxic, funcționarea este corespunzătoare, cele două mărimi reglate urmărind referința impusă.



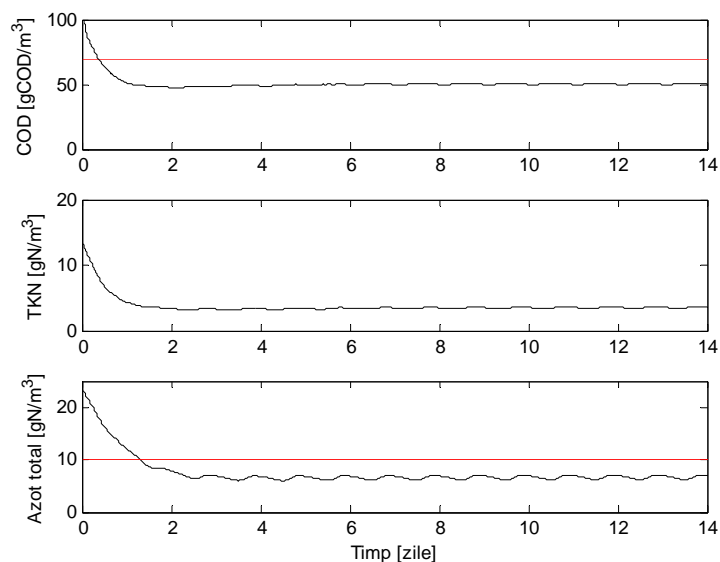
**Figura 6.2.5:** Simularea în buclă închisă a instalației de tratare a apelor uzate considerând influență constantă



**Figura 6.2.6:** Simularea în buclă închisă a instalației de tratare a apelor uzate considerând influență variabilă

În continuare, a fost testată structura de reglare proiectată în cazul în care la intrarea instalației avem influență variabilă, așa cum a fost el prezentat în cadrul Capitolului 3, Figura 3.2.2. Rezultatele obținute sunt prezentate în Figura 6.2.6. În această figură sunt prezentate

evoluțiile celor două mărimi reglate. Din figură se observă că, în cazul oxigenului dizolvat din bazinul aerob, acesta este ținut practic la valoarea impusă ( $2 \text{ g(-COD)/m}^3$ ), variațiile fiind practic ne semnificative. În cazul nitratului din bazinul anoxic se observă că variabilitatea foarte mare a amoniului în influent (de aproximativ  $30 \text{ gN/m}^3$ ) este semnificativ redusă, mărimea de ieșire a acestei bucle de reglare variind în jurul valorii de referință impusă. Pentru a evalua funcționarea instalației de tratare a apelor uzate din punct de vedere al calității apei, trebuie calculați COD-ul și azotul total din efluent. În Figura 6.2.7 se prezintă variația acestor mărimi (cu linie neagră) în raport cu limitele legale impuse de NTPA-001 pentru COD și azot total (cu linie roșie). Din figură rezultând că sunt respectate normativele legale în vigoare (NTPA-001) privind calitatea apei deversate din instalațiile de tratare a apelor uzate.



**Figura 6.2.7:** Evoluția mărimilor de calitate a efluentului în cazul simulării în buclă închisă a instalației de tratare a apelor uzate considerând influent variabil

### 6.3. CONCLUZII

Principalele rezultate obținute în acest capitol sunt:

1. Investigarea influenței incertitudinilor referitoare la modelul spectral al intrării procesului, în cadrul metodei VRFT și stabilirea, pe baza unor studii de caz, a performanțelor de reglare atunci când semnalul de intrare al procesului este de tipul unei secvențe aleatoare de trepte (semnal compatibil cu restricțiile tehnologice uzuale);
2. Stabilirea unei proceduri de alegere a modelului de referință din cadrul metodei VRFT, precum și a posibilității de obținere a unui regulator PID;
3. Utilizarea metodei VRFT, în condițiile rezultatelor obținute și menționate anterior (semnal de intrare de tip succesiune aleatoare de trepte), pentru reglarea automată a concentrației de oxigen dizolvat din bazinul aerob și a concentrației de nitrat din bazinul anoxic;
4. Din analiza realizată se constată încadrarea efluentului rezultat în limitele legale, atunci când se utilizează strategia de conducere bazată pe metoda VRFT analizată în cadrul acestui capitol.

## CAPITOLUL 7: REGULATOR QFT ÎN CONDUCEREA AUTOMATĂ A INSTALAȚIILOR DE TRATARE A APELOR UZATE

În cadrul acestui capitol este prezentată o soluție de conducere automată bazată pe metoda de control robust intitulată Quantitative Feedback Theory (QFT) aplicată în cazul instalațiilor de tratare a apelor uzate cu nămol activ în care se urmărește eliminarea azotului și a substratului organic. Deși în literatura de specialitate mai există abordări ale utilizării controlului robust QFT în cazul proceselor de tratare a apelor uzate, studiile existente au fost la nivel de modele simplificate, atât din punct de vedere al procesului propriu-zis, cât și al influentului. În cadrul capitolului va fi testată și o strategie de conducere a procesului diferită de cea din Capitolul 6, strategie în care se urmărește reglarea directă a concentrației de nitrat din efluent.

### 7.1. ELEMENTE PRIVIND METODA QFT DE PROIECTARE A STRUCTURILOR DE REGLARE

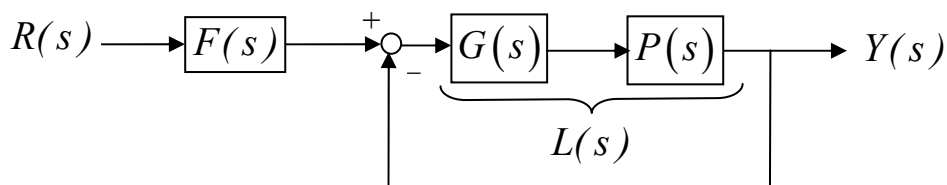
În 1973 Profesorul Isaac Horowitz propune o metodă de control robust intitulată Quantitative Feedback Theory (Horowitz, 1973). Metoda QFT este utilizată în cazul controlului proceselor descrise prin modele liniare cu parametri variabili și este o tehnică frecvențială care utilizează caracteristicile Nichols pentru asigurarea unei proiectări robuste asupra unei zone specificate de incertitudine a procesului.

Așa cum a fost menționat, metoda QFT este utilizată în cazul proceselor afectate de incertitudini parametrice sau a celor descrise prin modele liniare cu parametri variabili de tipul:

$$P(s) = \frac{Ka}{s(s+a)} \quad (7.1.1)$$

unde parametrii  $K$  și  $a$  variază în domeniile:  $K \in [K_{\min}, K_{\max}]$  și  $a \in [a_{\min}, a_{\max}]$ .

Metoda QFT presupune proiectarea pentru procesul,  $P(s)$ , a unui compensator,  $G(s)$ , și a unui prefiltru,  $F(s)$ , astfel încât comportarea sistemului în buclă închisă să se încadreze între marginile impuse sistemului. Schema sistemului utilizat în cazul metodei QFT este prezentată în Figura 7.1.1. Marginile impuse sunt de fapt limitele inferioară și superioară în care trebuie să se încadreze evoluția ieșirii,  $y(t)$ , a sistemului în buclă închisă în cazul aplicării unui semnal treaptă unitară la intrare. Aceste margini definesc zona de performanță acceptată pentru sistemul în buclă închisă. Astfel se impun o serie de performanțe sistemului în buclă închisă ce va rezulta în urma proiectării. Performanțele se referă la timpul de creștere, timpul de răspuns și suprareglare.



**Figura 7.1.1:** Sistem liniar compensat

Etapile proiectării robuste utilizând metoda QFT pentru o problemă de urmărire sunt (Houpis, 1999):

# **Pas 1:** Sintetizarea modelului de urmărire dorit

Sintetizarea modelului de urmărire dorit constă în definirea a două funcții de transfer liniare și invariante, corespunzătoare celor două limite, inferioară și superioară, care mărginesc zona de performanță acceptată.

# **Pas 2:** Descrierea procesului printr-un set de  $N$  modele liniare invariante

Procesul este descris printr-un set de  $N$  modele liniare invariante care trebuie alese astfel încât să definescă incertitudinea parametrică a modelului. Rezultă un contur în care sunt incluse toate situațiile în care se poate afla procesul conform ecuației (7.1.1).

# **Pas 3:** Obținerea șabloanelor, la frecvențe specificate, ce descriu grafic regiunea de incertitudine parametrică a procesului pe caracteristica Nichols

# **Pas 4:** Selectarea procesului nominal  $P_0(s)$

Uzual se alege procesul al cărui punct de pe caracteristica Nichols reprezintă colțul din stânga jos al șabloanelor, pentru oricare din frecvențele utilizate.

# **Pas 5:** Determinarea conturului de stabilitate – conturul U – pe caracteristica Nichols

Pentru asigurarea stabilității sistemului în buclă închisă, se dorește ca, în banda de frecvențe considerată, caracteristicile de amplificarea aferente funcției de transfer în buclă închisă să nu depășească o valoare limită superioară

$$|H_0| = \left| \frac{GP}{1+GP} \right| \leq M_L \quad (7.1.2)$$

# **Pas 6:** Determinarea marginilor de urmărire robustă pe caracteristica Nichols

Marginile de urmărire robustă trebuie să asigure, la fiecare frecvență aleasă, că prin plasarea transmisiei buclei pe această margine sau deasupra ei se asigură respectarea condiției de urmărire robustă.

# **Pas 7:** Determinarea marginilor optime pe caracteristica Nichols

Marginile de urmărire optimă se obțin din intersecția celor două tipuri de contururi stabilite la fiecare frecvență de interes, ținând cont de restricțiile ce se impun transmisiei buclei. Astfel, conturul de stabilitate rezultat la o anumită frecvență nu poate fi penetrat, deci vor fi considerate doar porțiunile din marginea de urmărire care nu se află în interiorul conturului de stabilitate.

# **Pas 8:** Sintetizarea transmisiei buclei nominale  $L_0(s) = G(s)P_0(s)$  care satisface conturul de stabilitate și marginile de urmărire.

Transmisia pe buclă se sintetizează astfel încât să nu penetreze contururile de stabilite, iar valorile amplificării trebuie să se găsească pe sau deasupra marginilor de urmărire robustă corespunzătoare frecvenței considerate.

# **Pas 9:** Sintetizarea prefiltrului  $F(s)$ .

Pentru a aduce sistemul în interiorul anvelopei definite de limitele specificațiilor de performanță se folosește filtrul  $F(s)$ .

## 7.2. CONDUCEREA AUTOMATĂ A INSTALAȚIILOR DE TRATARE A APELOR UZATE UTILIZÂND STRUCTURI DE REGLARE QFT

Așa cum a fost menționat, metoda de control robust QFT a fost propusă pentru controlul proceselor descrise prin modele liniare cu parametri variabili. Metoda poate fi aplicată și în cazul proceselor neliniare așa cum sunt procesele de tratare a apelor uzate. Astfel, prin liniarizarea

acestora în jurul a mai multe puncte de funcționare din zona de funcționare de interes a procesului, rezultă un model liniar cu parametri variabili care descrie comportarea procesului neliniar în fiecare punct din cadrul domeniului considerat. Limitele de variație ale parametrilor modelului liniar obținut pot fi lărgite pentru a încorpora și efectul incertitudinilor parametrice ce afectează procesul neliniar (Barbu, 2009). Pentru acest model liniar se proiectează apoi o structură robustă de control utilizând metoda QFT. În cadrul acestui capitol a fost utilizat toolbox-ul MATLAB QFT Control Toolbox propus în cadrul (Garcia-Sanz și Houpis, 2012).

### **Studiul de caz 7.2.1**

Pentru testarea aplicabilității acestei metode de proiectare a reguletoarelor în cazul instalațiilor de tratare a apelor uzate, a fost considerat cazul instalației prezentate în Studiul de caz 3.2.1 (Carp ș.a., 2013b). Dintre structurile posibile de control va fi adoptată următoarea: oxigenul dizolvat în bazinul aerob va fi reglat prin intermediul debitului de aer insuflat în bazinul aerob ( $Q_{air} - S_{O_2}$ ), iar nitratul în efluent va fi reglat prin intermediul debitului de recirculare internă ( $Q_{rec} - S_{NO}$ ). Dinamica celor două bucle este total diferită, astfel: în timp ce bucla de oxigen dizolvat are o dinamică relativ rapidă, de ordinul minutelor, cea de nitrat este lentă, de ordinul unei zile. Pentru determinarea funcției de transfer cu parametri variabili a canalului de comandă  $Q_{air} - S_{O_2}$ , au fost aplicate semnale de intrare de tip treaptă, după ce procesul a fost adus în regim staționar de funcționare. În aceste condiții, funcția de transfer a canalului de comandă  $Q_{air} - S_{O_2}$  va avea forma:

$$P_{Q_{air}-S_{O_2}}(s) = \frac{K_1}{T_1s + 1} \quad (7.2.1)$$

iar parametrii au următoarele limite de variație:  $K_1 \in [1.5 \quad 3] \cdot 10^{-5}$  și  $T_1 \in [0.01 \quad 0.015]$ .

Și în cazul determinării funcției de transfer cu parametri variabili a canalului de comandă  $Q_{rec} - S_{NO}$ , au fost aplicate semnale de intrare de tip treaptă, după ce procesul a fost adus în regim staționar de funcționare. În aceste condiții, funcția de transfer a canalului de comandă  $Q_{rec} - S_{NO}$  va avea forma:

$$P_{Q_{rec}-S_{NO}}(s) = \frac{K_2}{T_2s + 1} \quad (7.2.2)$$

iar parametrii au următoarele limite de variație:  $K_2 \in [1.1 \quad 1.9] \cdot 10^{-4}$  și  $T_2 \in [0.29 \quad 0.36]$ .

Se face precizarea că în cazul ambelor funcții de transfer identificate, limitele de variație ale parametrilor modelului liniar obținuți au fost lărgite pentru a încorpora, pe lângă modificarea punctului static de funcționare, și efectul incertitudinilor parametrice ce afectează procesul neliniar, cum ar fi temperatura apei, în special pe durata iernii, sau efectul diferitelor substanțe toxice care pot să fie deversate accidental în sistemul de canalizare, afectând astfel populația de microorganisme.

### **Proiectarea structurii de reglare QFT pentru canalul de comandă $Q_{air} - S_{O_2}$**

În continuare au fost parcurși toți pașii necesari proiectării structurii de reglare QFT, pași prezentați în cadrul Subcapitolului 7.1. Astfel, utilizând toolbox-ul MATLAB, QFTCT, au fost

$Q_{air} - S_{O_2}$

$$H_{ri, Q_{air} - S_{O_2}}(s) = \frac{1}{(0.001s + 1)(0.002s + 1)(0.0033s + 1)} \quad (7.2.3)$$

$$H_{rs, Q_{air} - S_{O_2}}(s) = \frac{0.001s + 1}{4 \cdot 10^{-6} s^2 + 0.002828s + 1} \quad (7.2.4)$$

În urma proiectării rezultă funcția de transfer a regulatorului proiectat:

$$G_{Q_{air} - S_{O_2}}(s) = \frac{3.7 \cdot 10^7 \cdot (0.01s + 1)}{s(0.00083s + 1)} \quad (7.2.5)$$

Sintetizarea prefiltrului se realizează pe caracteristica Bode de amplificare, urmărindu-se ca sistemul în buclă închisă și cu prefiltru să se încadreze între limitele de urmărire fixate prin ecuațiile (7.2.3) și (7.2.4):

$$F_{Q_{air} - S_{O_2}}(s) = \frac{0.00067s + 1}{0.004s + 1} \quad (7.2.6)$$

### **Proiectarea structurii de reglare QFT pentru canalul de comandă $Q_{rec} - S_{NO}$**

Procedura de proiectare a structurii de reglare QFT pentru canalul de comandă  $Q_{rec} - S_{NO}$  este identică cu cea prezentată anterior pentru canalul  $Q_{air} - S_{O_2}$ . Astfel, ținând cont de modelul cu parametri variabili ai canalului de comandă  $Q_{rec} - S_{NO}$ , dat de ecuația (7.2.2), au fost stabilite cele două modele de urmărire, marginile inferioară și superioară, astfel:

$$H_{ri, Q_{rec} - S_{NO}}(s) = \frac{1}{(0.03s + 1)(0.06s + 1)(0.15s + 1)} \quad (7.2.7)$$

$$H_{rs, Q_{rec} - S_{NO}}(s) = \frac{3.33 \cdot 10^{-5} s + 1}{0.0036s^2 + 0.08484s + 1} \quad (7.2.8)$$

În continuare au fost parcurși toți pașii necesari proiectării structurii de reglare QFT. Astfel, în urma proiectării, rezultă funcția de transfer a regulatorului:

$$G_{Q_{rec} - S_{NO}}(s) = \frac{9 \cdot 10^4 \cdot (0.25s + 1)}{s(0.055s + 1)} \quad (7.2.9)$$

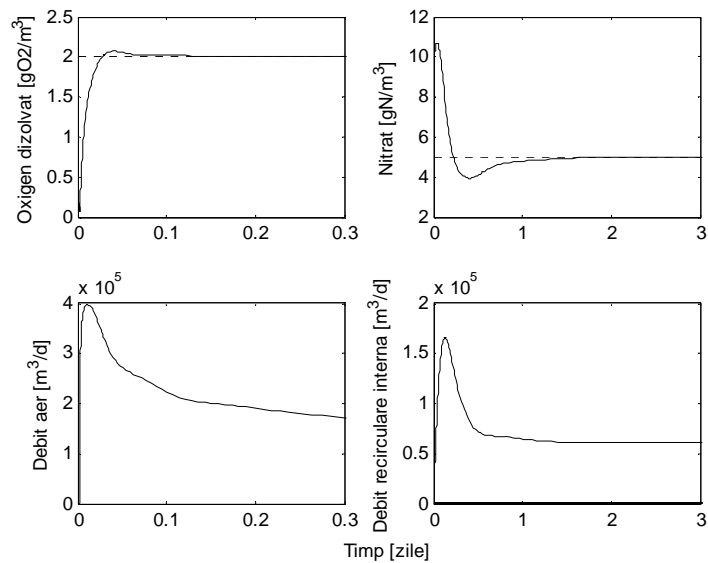
Rezultatul proiectării prefiltrului este:

$$F_{Q_{rec} - S_{NO}}(s) = \frac{0.126s + 1}{0.222s + 1} \quad (7.2.10)$$

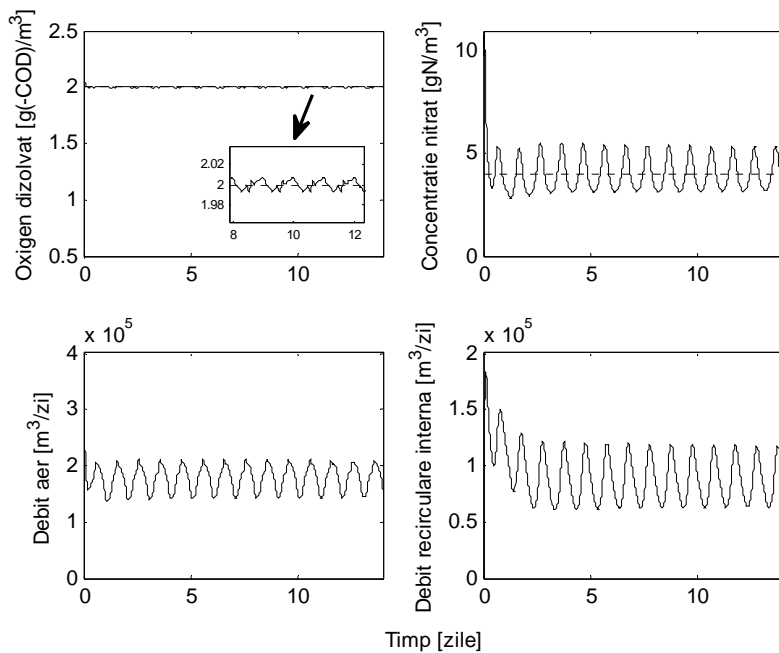
### **Validarea prin simulare numerică a structurii de reglare QFT proiectată**

Prima testare a structurii de reglare propuse a considerat cazul în care influența instalației este constant, rezultatul obținut fiind prezentat în Figura 7.2.1 (Carp ș.a., 2013d). Din această

figură se observă că atât în cazul buclei de oxigen dizolvat, cât și al celei de nitrat funcționarea este corespunzătoare, cele două mărimi reglate urmărind referința impusă.



**Figura 7.2.1:** Simularea în buclă închisă a instalației de tratare a apelor uzate considerând influent constant

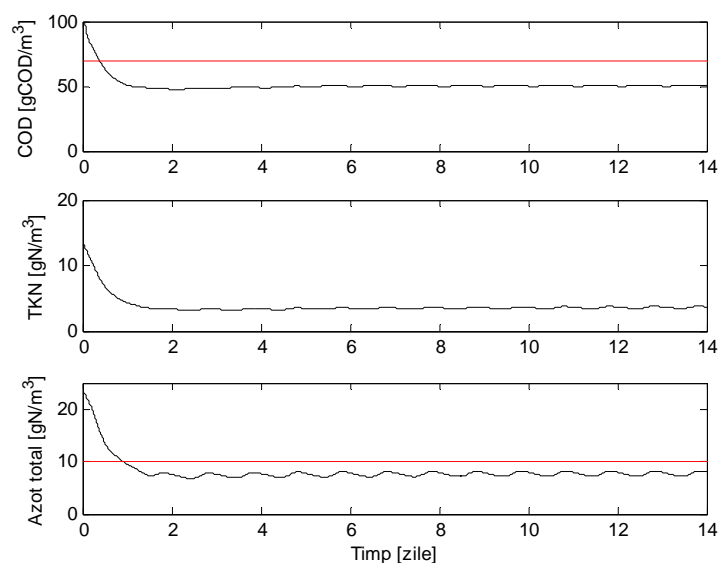


**Figura 7.2.2:** Simularea în buclă închisă a instalației de tratare a apelor uzate considerând influent variabil

În continuare a fost testată structura de reglare proiectată în cazul în care la intrarea instalației avem influentul variabil, așa cum a fost el prezentat în cadrul Capitolului 3, Figura 3.2.2. Rezultatele obținute sunt prezentate în Figura 7.2.2. În această figură sunt prezentate evoluțiile celor două mărimi reglate. Din figură se observă că în cazul oxigenului dizolvat din bazinul aerob acesta este ținut practic la valoarea impusă ( $2 \text{ g(-COD)/m}^3$ ), variațiile fiind practic ne semnificative. În cazul nitrului din bazinul aerob se observă că variabilitatea foarte mare a amoniului în influent (de aproximativ  $30 \text{ gN/m}^3$ ) este redusă la o variație de sub  $1 \text{ gN/m}^3$  a nitrului în efluent în jurul valorii de referință impusă. Pentru a evalua funcționarea instalației de tratare a apelor uzate din punct de vedere al calității apei trebuie calculați COD-ul și azotul total

din efluent. În Figura 7.2.3 se prezintă variația acestor mărimi (cu linie neagră) în raport cu limitele legale impuse de NTPA-001 pentru COD și azot total (cu linie roșie). Din figură rezultând că sunt respectate normativele legale în vigoare (NTPA-001) privind calitatea apei deversate din instalațiile de tratare a apelor uzate.

În final a fost realizată o evaluare a structurii de control QFT propuse din punct de vedere al costurilor energetice pentru asigurarea aerării bazinului aerob, acesta fiind principalul cost energetic al instalației de tratare a apelor uzate. Astfel, s-a considerat că aerarea se realizează cu ajutorul unui motor și a unei pompe ale cărei caracteristici au fost preluate din SIMBA. În urma evaluării cantitative a consumului energetic determinat de aerare, a rezultat o micșorare cu 11.03% a energiei electrice consumate în cazul utilizării structurii de control QFT în raport cu situația fără control al oxigenului dizolvat (Studiul de caz 3.2.1).



**Figura 7.2.3:** Evoluția mărimilor de calitate a efluentului în cazul simulării în buclă închisă a instalației de tratare a apelor uzate considerând influent variabil

### 7.3. CONCLUZII

În cadrul acestui capitol a fost investigată posibilitatea aplicării metodei de control robust QFT în cazul instalațiilor de tratare a apelor uzate în condiții realiste atât din punct de vedere al modelului considerat pentru procesul de tratare, cât și al considerării unui influent variabil în raport cu activitățile casnice și industriale. Soluția de control bazată pe metoda de control robust QFT conduce la o îmbunătățire evidentă a performanțelor instalației de tratare a apelor uzate în raport cu cazul fără control. Această afirmație este justificată de încadrarea efluentului în limitele legale și de realizarea unei uniformizări a calității efluentului în raport cu variațiile diurne ale influentului. În același timp se constată o minimizare a costurilor energetice pentru asigurarea aerării bazinului aerob, acesta constituind principalul cost în operarea unei instalații de tratare a apelor uzate.

Din analiza rezultatelor obținute în cadrul Capitolelor 6 și 7 se poate trage concluzia că ambele metode de control a concentrației de nitrat, la ieșirea din bazinul anoxic sau în efluent, sunt metode valide, conducând la încadrarea calității efluentului în limitele impuse de normativele legale în vigoare.



## CAPITOLUL 8: CONCLUZII

În cadrul tezei de doctorat intitulată "CONTRIBUȚII PRIVIND CONDUCEREA AUTOMATĂ A SISTEMELOR DE COLECTARE ȘI TRATARE A APELOR UZATE" au fost tratate aspecte privind modelarea și conducerea automată a două categorii de procese, și anume: rețelele de colectare a apelor uzate și instalațiile de tratare a apelor uzate. Ambele tipuri de procese sunt neliniare, foarte complexe și necesită abordări specifice care să conducă la obținerea unor rezultate bune. Abordarea celor două tipuri de procese menționate anterior a fost determinată de dorința de a aborda un domeniu extrem de important la acest moment și a cărui importanță va crește în perioada următoare: sistemele integrate urbane de ape uzate.

### 8.1. CONTRIBUȚII ȘI DISEMINAREA REZULTATELOR OBTINUTE

În cadrul tezei pot fi considerate următoarele contribuții originale:

#### Capitolul 2:

- prezentarea principiilor de bază din modelarea sistemelor de colectare a apelor uzate și abordarea unui studiu de caz care să pună în evidență necesitatea implementării controlului automat pentru îmbunătățirea performanțelor sistemului.

#### Capitolul 3:

- prezentarea principiilor de bază din modelarea sistemelor de tratare a apelor uzate și abordarea unui studiu de caz care să pună în evidență necesitatea implementării controlului automat pentru îmbunătățirea performanțelor sistemului.

#### Capitolul 4:

- proiectarea și implementarea unei structuri de conducere bazată pe logică fuzzy pentru minimizarea deversărilor dintr-o rețea de colectare a apelor uzate;

- validarea structurii de conducere bazată pe logică fuzzy utilizând software-ul de simulare SIMBA.

#### Capitolul 5:

- formularea problemei de control optimal pentru minimizarea deversărilor dintr-o rețea de colectare a apelor uzate;

- realizarea și implementarea unui algoritm de programare dinamică discretă pentru minimizarea deversărilor dintr-o rețea de colectare a apelor uzate;

- regulator bazat pe programare dinamică, cu o structură de date memorată a priori, structură ce furnizează comanda optimală în funcție de starea discretă curentă a RCAU;

- regulator predictiv cu orizont alunecător, care rezolvă, într-o perioadă de eșantionare, problema de programare dinamică având ca stare inițială, starea curentă a RCAU, pe un orizont alunecător ce cuprinde câteva perioade de eșantionare;

- evidențierea unor aspecte ce duc la micșorarea complexității calculului în algoritmi optimali folosiți, validați prin simulare.

## Capitolul 6:

- investigarea influenței incertitudinilor referitoare la modelul spectral al intrării procesului, în cadrul metodei VRFT și stabilirea, pe baza unor studii de caz, a performanțelor de reglare atunci când semnalul de intrare al procesului este de tipul unei secvențe aleatoare de trepte;

- stabilirea unei proceduri de alegere a modelului de referință din cadrul metodei VRFT, precum și a posibilității de obținere a unui regulator PID;

- utilizarea metodei VRFT, în condițiile rezultatelor obținute și menționate anterior, pentru reglarea automată a concentrației de oxigen dizolvat din bazinul aerob și a concentrației de nitrat din bazinul anoxic;

- validarea structurii de conducere bazată pe metoda VRFT utilizând software-ul de simulare SIMBA.

## Capitolul 7:

- implementarea unei structurii de conducere automată bazată pe metoda robustă QFT pentru controlul instalațiilor de tratare a apelor uzate;

- validarea structurii de conducere bazată pe metoda robustă QFT utilizând software-ul de simulare SIMBA.

Rezultatele obținute în cadrul tezei de doctorat au fost diseminate în cadrul următoarelor reviste sau manifestări științifice:

- Articole în reviste cotate ISI:

1. Marian Barbu, Sergiu Caraman, Gabriela Bahrim, **Daniela Carp**, Results regarding the control of the dissolved oxygen concentration in wastewater treatment processes, Romanian Biotechnological Letters, Vol. 6, Is. 2, Pp. 6096 - 6104, 2011 (Factor de impact calculat de către ISI pentru anul 2012: 0.363).

- Articole în conferințe internaționale indexate:

1. **Daniela Carp**, Marian Barbu, Ramon Vilanova, Emil Ceanga, Process Control Engineering Considerations on the Application of Virtual Reference Feedback Tuning Method, 17th International Conference on System Theory, Control and Computing Joint Conference SINTES 17, SACCS 13, SIMSIS 17, 11 - 13 October 2013, Sinaia (Articol indexat IEEE Xplore).

2. **Daniela Carp**, Marian Barbu, Viorel Minzu, Robust Control of an Activated Sludge Wastewater Treatment Process, 17th International Conference on System Theory, Control and Computing Joint Conference SINTES 17, SACCS 13, SIMSIS 17, 11 - 13 October 2013, Sinaia (Articol indexat IEEE Xplore).

3. **Daniela Carp**, Marian Barbu, Viorel Minzu, Sewer Network Discharge Control Using a Fuzzy Logic Approach, The 4th International Symposium on Electrical and Electronics Engineering, 11 - 13 Octombrie 2013, Galați (Articol indexat IEEE Xplore).

4. **Daniela Carp**, Marian Barbu, Sergiu Caraman, Robust State Observers for Biological Wastewater Treatment Processes with Activated Sludge, 16th International Conference on System Theory, Control and Computing, Joint Conference SINTES 16, SACCS 12, SIMSIS 16, 12 - 14 October, Sinaia, Romania (Articol indexat SCOPUS și IEEE Xplore).

5. Ciprian Vlad, Sergiu Caraman, **Daniela Carp**, Viorel Minzu, Marian Barbu, Gain Scheduling Control of Dissolved Oxygen Concentration in a Wastewater Treatment Process,

20th Mediterranean Conference on Control and Automation, Barcelona, July 3-6, 2012 (Articol indexat SCOPUS și IEEE Xplore).

6. Marian Barbu, Viorel Mînză, **Daniela Carp**, Emil Ceangă, Identification and Sensitivity Analysis of a Trickling Biofilter Viewed as a Distributed Parameters System, Proceedings of the 15th International Conference on System Theory, Control and Computing, ISBN 978-973-621-322-9, Pp. 87-92, Editura Politehnică, Sinaia, 14 – 16 Octombrie 2011 (Articol indexat SCOPUS și IEEE Xplore).

- Articole în conferințe internaționale:

1. **Daniela Mioara Carp**, Ciprian Vlad, Marian Barbu, Evaluation of Control Strategies Applied on a Wastewater Treatment Process with Activated Sludge, 7th International Conference Environmental Engineering and Management, September 18 – 21, 2013, Vienna, Austria (**Articolul a fost selectat pentru a fi publicat în variantă extinsă în revista: Environmental Engineering and Management Journal, jurnal cu factor de impact calculat de către ISI pentru anul 2012: 1.117. Vezi Anexa 9).**

2. Ciprian Vlad, **Daniela Carp**, Sergiu Caraman, Marian Barbu, Mathematical Model for Food Industry Wastewater Treatment Processes, VI EWRA International Symposium - Water Engineering and Management in a Changing Environment, Catania, 29 Iunie -2 Iulie 2011.

3. Marian Barbu, **Daniela Carp**, Viorel Minzu, Emil Ceanga, A three - level model of a recirculating aquaculture system, International Conference EcoTechnologies for Wastewater Treatment, Santiago de Compostela, Spania, 25-27 Iunie 2012.

- Articole în conferințe naționale:

1. George Ifrim, Tudor Ionescu, **Daniela Carp**, Marian Barbu, Sergiu Caraman, Emil Ceanga, Interdisciplinary training in scientific research on bioprocesses control. Case study: control of recirculating aquaculture systems. Proceedings of 1st Workshop on Education by Research and Competition, ISSN 2248-0811, Pp. 2-15, Editura MatrixRom, Bucuresti, 20 Aprilie 2011.

## 8.2. DIRECȚII VIITOARE DE CERCETARE

Direcția principală de cercetare care trebuie să continue această teză de doctorat este aceea a studierii sistemului integrat urban de ape uzate prin conectarea cele două sisteme: rețeaua de colectare a apelor uzate și instalația de tratare a apelor uzate, dar și prin considerarea unui model pentru receptorul apelor deversate (râu, lac etc.). Utilizarea software-ului SIMBA, cu capacitățile menționate în cadrul tezei, va permite realizarea acestui demers ambițios.

De asemenea, pe cele două tipuri de sisteme tratate în cadrul tezei există direcții de cercetare cu potențial deosebit:

- în cazul rețelei de colectare este necesară definirea unui model care să includă informațiile privind calitatea apei. Acest lucru ar permite și o conectare mai ușoară a rețelei de colectare cu instalația de tratare a apelor uzate;

- în cazul instalației de tratare obiectivul imediat este de a aplica tehnicile adoptate în cazul tezei pe modelul Benchmark Simulation Model 1, iar ca direcție viitoare de propunere a unor noi metode, precum și de noi strategii tehnologice pentru controlul acestui sistem foarte complex.

## BIBLIOGRAFIE

(Barbu, 2009) Barbu, M., *Conducerea avansată a proceselor biotehnologice*, Galați University Press, 2009.

(Barbu și Caraman, 2011) M. Barbu, S. Caraman, “QFT Robust Control of Wastewater Treatment Processes”, in *Robust Control, Theory and Applications*, pp. 577-602, Intech, 2011.

(Barbu ș.a, 2011a) Marian Barbu, Sergiu Caraman, Gabriela Bahrim, Daniela Carp, Results regarding the control of the dissolved oxygen concentration in wastewater treatment processes, *Romanian Biotechnological Letters*, Vol. 6, Is. 2, Pp. 6096 - 6104, 2011

(Barbu ș.a, 2011b) Marian Barbu, Viorel Mînză, Daniela Carp, Emil Ceangă, Identification and Sensitivity Analysis of a Trickle Biofilter Viewed as a Distributed Parameters System, *Proceedings of the 15th International Conference on System Theory, Control and Computing*, ISBN 978-973-621-322-9, Pp. 87-92, Editura Politehnică, Sinaia, 14 – 16 Octombrie 2011.

(Barbu ș.a, 2012) Marian Barbu, Daniela Carp, Viorel Minzu, Emil Ceanga, A three - level model of a recirculating aquaculture system, *International Conference EcoTechnologies for Wastewater Treatment*, Santiago de Compostela, Spania, 25-27 Iunie 2012.

(Brdys și Konarczak, 2001) Brdys, M.A., Konarczak, K., Dissolved Oxygen Control for Activated Sludge Processes, *Preprints of the 9th IFAC/IFORS/IMACS/IFIP Symposium Large Scale Systems: Theory & Applications – LSS’2001*, Bucharest, Romania, Pp. 548-553, July 18-20, 2001.

(Campi ș.a., 2002) M. C. Campi, A. Lecchini, and S. M. Savaresi, “Virtual reference feedback tuning: a direct method for the design of feedback controllers” *Automatica*, Vol. 38, no. 8, pp. 1337-1446, August, 2002.

(Caraman ș.a, 2006) Caraman, S., Sbarciog, M., Barbu, M., Predictive Control of a Wastewater Treatment Process, *1st IFAC Workshop on Applications of Large Scale Industrial Systems (ALSIS’ 06)*, Helsinki, August 30 - 31, 2006.

(Carp ș.a., 2012) Daniela Carp, Marian Barbu, Sergiu Caraman, Robust State Observers for Biological Wastewater Treatment Processes with Activated Sludge ,*16th International Conference on System Theory, Control and Computing, Joint Conference SINTES 16, SACCS 12, SIMSIS 16*, 12 - 14 October, Sinaia, Romania

(Carp ș.a., 2013a) Daniela Carp, Marian Barbu, Ramon Vilanova, Emil Ceanga, Process Control Engineering Considerations on the Application of Virtual Reference Feedback Tuning Method, *17th International Conference on System Theory, Control and Computing Joint Conference SINTES 17, SACCS 13, SIMSIS 17*, 11 - 13 October 2013, Sinaia.

(Carp ș.a., 2013b) Daniela Carp, Marian Barbu, Viorel Minzu, Robust Control of an Activated Sludge Wastewater Treatment Process, *17th International Conference on System Theory, Control and Computing Joint Conference SINTES 17, SACCS 13, SIMSIS 17*, 11 - 13 October 2013, Sinaia.

(Carp ș.a., 2013c) Daniela Carp, Marian Barbu, Viorel Minzu, Sewer Network Discharge Control Using a Fuzzy Logic Approach, *The 4th International Symposium on Electrical and Electronics Engineering*, 11 - 13 Octombrie 2013, Galați.

(Carp ș.a., 2013d) Daniela Mioara Carp, Ciprian Vlad, Marian Barbu, Evaluation of Control Strategies Applied on a Wastewater Treatment Process with Activated Sludge, *7th International Conference Environmental Engineering and Management*, September 18 – 21, 2013, Vienna, Austria.

(Dorsano și Labadie, 2007) Dorsano S., Labadie J.W., Neural-optimal control algorithm for real-time regulation of in-line storage in combined sewer systems, *Environmental Modelling & Software*, 22 (9), pp. 1349-1361.

(Fuchs, 1996) Fuchs L., Hydrology of Urban Catchments, NATO-ASI on Hydroinformatics in Planning, Design, Operation and Rehabilitation of Sewer Systems, Harrachov, 16-29 June.

(Garcia-Sanz și Houpis, 2012), M. Garcia-Sanz, C.H. Houpis, "Wind Energy Systems: Control Engineering Design", CRC Press, Taylor & Francis, 2012.

(Graells și Katebi, 2006), Graells F.P., Katebi R., Modelling, simulation and control of integrated urban wastewater systems, Control Report – WWT & SYSENG EU Research Training Network, (Editors: M. Barbu, D. Pradzynska, M. Papageorgiou), 2006.

(Henze ș.a., 1987) Henze, M., et al., Activated Sludge Model No. 1, IAWQ Scientific and Technical Report No. 1, IAWQ, London, Great Britain, 1987.

(Henze ș.a., 2000) Henze M., Gujer W., Mino T., van Loosdrecht M.C.M., Activated Sludge Models ASM1, ASM2, ASM2d and ASM3, IWA Publishing, 2000.

(Henze ș.a., 2008) Henze M., van Loosdrecht M.C.M., Ekama G.A., Brdjanovic D. (Editors), Biological Wastewater Treatment: Principles, Modelling and Design, IWA Publishing, 2008.

(Ifrim ș.a., 2011) George Ifrim, Tudor Ionescu, Daniela Carp, Marian Barbu, Sergiu Caraman, Emil Ceanga, Interdisciplinary training in scientific research on bioprocesses control. Case study: control of recirculating aquaculture systems. Proceedings of 1st Workshop on Education by Research and Competition, ISSN 2248-0811, Pp. 2-15, Editura MatrixRom, Bucuresti, 20 Aprilie 2011.

(Ifrim, 2012) Ifrim, G.A., Comandă de procedee de interes ambiental (tratare biologică a apelor uzate și producție de microalge în fotobioreactor), Teză de doctor, Universitatea "Dunărea de Jos" din Galați.

(Ingildsen ș.a., 2001) Ingildsen, P., Lant, P., Olsson, G., Benchmarking plant operation and instrumentation, control and automation in the wastewater industry, Proceedings from 2nd IWA World Congress, Berlin, October 15-19, 2001.

(Ingildsen, 2002) Ingildsen, P., Realising Full-Scale Control in Wastewater Treatment Systems Using In Situ Nutrient Sensors, Ph.D. Thesis, Department of Industrial Electrical Engineering and Automation, Lund University, Sweden, 2002.

(Ionescu și Popeea, 1981) Ionescu, V. și C. Popeea, *Optimizarea sistemelor*, Editura Didactică și Pedagogică, București, 1981.

(Jeppsson, 1996) Jeppsson, U., Modelling aspects of wastewater treatment processes, Ph.D. thesis, Dept. of Industrial Electrical Eng. and Automation, Lund University, Sweden, 1996.

(Jeppsson ș.a., 2005) Jeppsson, U., Rosen, C., Alex, J., Copp, J., Gernaey, K.V., Pons, M.-N., Vanrolleghem, P.A., Towards a benchmark simulation model for plant-wide control strategy performance evaluation of WWTPs, *Water Science Technology*, 2005.

(Katebi ș.a., 1999) Katebi, M.R., Johnson, M.A., Wilke, J., Control and Instrumentation for Wastewater Treatment Plant, Springer-Verlag, London, 1999.

(King ș.a., 2004) King, R.E., Stathaki, A., A multi-layer perceptron for the control of a wastewater treatment plant, 12<sup>th</sup> Mediterranean Conference on Control and Automation - MED2004, Kusadasi, Turkey, Proceedings CD-ROM, June 6-9, 2004.

(Lazar, 1999) Lazar, Corneliu; Cnducerea predictiva a proceselor cu model cunoscut, MATRIX ROM, 1999, ISBN 973-685-139-7

(Manesis ș.a, 1998) Manesis, S. A., Sapidis, D. J., King, R. E., Intelligent Control of Wastewater Treatment Plants, Artificial Intelligence in Engineering, Vol. 12, No. 3, Pp. 275-281, 1998

(Marinaki și Papageorgiou, 1999) Marinaki M., Papageorgiou M., “A Non-linear Optimal Control Approach to Central Sewer Network Flow Control.” International Journal of Control, 72(5), 418-429, 1999.

(Marinaki și Papageorgiou, 2005) Marinaki M., Papageorgiou M.: Optimal Real-Time Control of Sewer Networks. Springer-Verlag, 2005.

(Mays și Tung, 1978) Mays L. W., Tung Y. K., “State Variable Model for Sewer Network Flow Routing”, Journal of the Environmental Engineering Division, Proceedings of ASCE, Vol. 104, Pp. 15-30, 1978.

(Mînză și Ceangă, 2002), Bazele sistemelor automate - Sisteme automate monovariabile, EDITURA DIDACTICA SI PEDAGOGICA, 240 pag., 2002, ISBN 973-30-2821-5

(Nejjari ș.a, 1999) Nejjari, F., et al., Non-linear multivariable adaptive control of an activated sludge wastewater treatment process, International Journal of Adaptive Control and Signal Processing, Vol. 13, Issue 5, Pp. 347-365, 1999.

(NTPA-001, 2002) Normativ din 28 februarie 2002 privind stabilirea limitelor de incarcare cu poluanti a apelor uzate industriale si orasenesti la evacuarea in receptorii naturali NTPA-001/2002 Publicat in Monitorul Oficial, Partea I nr. 187 din 20 martie 2002.

(Ocampo-Martinez, 2010), Ocampo-Martinez C., Model Predictive Control of Wastewater Systems, Springer-Verlag, London.

(Olsson și Newell, 1999) Olsson G., Newell B., Wastewater treatment systems – modelling, diagnosis and control, IWA Publishing, 1999.

(Pleau ș.a., 2005) Pleau M., Colas H., Lavallee P., Pelletier G., Bonin R., Global optimal real-time control of the Quebec urban drainage system, Environmental Modelling & Software, 20 (4), pp. 401-413.

(Preitl și Precup, 1997) St. Preitl and R.-E. Precup, Introducere in conducerea fuzzy a proceselor, Editura Tehnica, 1997.

(Schutze ș.a., 2002), M. Schütze, D. Butler, and B. Beck, Modelling, Simulation and Control of Urban Wastewater Systems. Springer, 2002.

(SIMBA, 2009) SIMBA User Manual, 2009

(Takács ș.a., 1991) Takács I., Patry G.G., Nolasco D., A dynamic model of the clarification thickening process, Water Research, Vol. 25, Pp. 1263-1271, 1991.

(Vesilind, 1968) Vesilind P. A. (1968) Design of prototype thickeners from batch settling tests. Water Sewage Works 115 (7), 302 - 307.

(Vlad ș.a., 2012) Ciprian Vlad, Sergiu Caraman, Daniela Carp, Viorel Mnză, Marian Barbu, Gain Scheduling Control of Dissolved Oxygen Concentration in a Wastewater Treatment Process, 20th Mediterranean Conference on Control and Automation, Barcelona, July 3-6, 2012

(Vrecko ș.a., 2006) Vrecko, D., Gernaey, K.V., Rosen, C., Jeppsson, U., Benchmark simulation model No 2 in Matlab-Simulink: towards plant-wide WWTP control strategy evaluation, IWA World Water Congress, China, September, 2006.

(Zadeh, 1965) Zadeh, L.A., Fuzzy sets, Inf. Control 8, 338-353, 1965.