

O NOUĂ BIBLIOTECĂ DE MODELE DE SIMULARE ȘI CONTROL CU APLICAȚII ÎN ECOLOGIE ȘI PROTECȚIA MEDIULUI

dr. ing. Florin Stănciulescu

mat. Victor Popa

ing. Mina Boboc

ing. Clara Nichel

Institutul Național de Cercetare-Dezvoltare în Informatică

Rezumat: Se prezintă o nouă versiune a bibliotecii de modele de simulare și control, cu aplicații în ecologie și protecția mediului. Această nouă versiune a bibliotecii include, în afara de modelele de simulare a unor ecosisteme acvatice, terestre și a atmosferei, și modele de control fuzzy, capabile să fundamenteze acțiuni care să conducă la reintroducerea marimilor de stare în interiorul intervalelor de suboptimalitate, dorite de către experți, în cazul în care acestea au ieșit din limitele admisibile. Se prezintă o serie de aplicații concrete, de rezolvare a unor probleme complexe de ecologie și protecția mediului, privind ecosistemul Delta Dunării, ecosistemul forestier din munții Bucegi, ecosistemul sol, precum și controlul calității aerului în orașul București.

Cuvinte cheie: biblioteca de modele, model de simulare, model de control, sistem fuzzy, sistem ecologic, protecția mediului.

1. Introducere

Într-un articol anterior [6], am prezentat prima versiune a unei biblioteci de modele de simulare și de control hibrid pentru ecologie și protecția mediului. În această versiune, modelele elaborate cu ajutorul limbajului de programare Mathcad 5.0, erau alimentate cu date aflate în același fișier cu modelul. În noua versiune pe care o prezentăm, alimentarea cu date este făcută dintr-o bază de date Access, descrisă în unul din articolele prezentate în acest număr al revistei. Această soluție este considerată ca fiind superioară din punct de vedere informatic deoarece permite alimentarea cu date recente, la zi. Mai mult decât atât, utilizarea bibliotecii de modele se poate face acum și în contextul unui sistem telematic, în care culegerea datelor se face cu ajutorul unui sistem de monitorizare al acestora, sistem prevăzut cu senzori, traductori și sistem de transmitere a datelor la distanță (prin sistem radio sau cablu) și depozitarea lor, într-o bază de date aflată pe un server local.

S-au introdus în bibliotecă modele de simulare a difuziei poluanților chimici industriali în atmosfera urbană datorită unor procese cu mai multe surse de emisie. Pe de altă parte, noua versiune a bibliotecii de modele de simulare și control, pentru ecologie și protecția mediului, include noi modele de simulare și control fuzzy [13], bazate pe cunoștințe

euristice, exprimate cu ajutorul regulilor fuzzy, aflate în baza de cunoștințe, și a faptelor derivate din procesele care au loc în mediul înconjurător. Aceste modele de control fuzzy au permis reintroducerea marimilor de stare ecologice în intervalele de suboptimalitate, prescrise de către experți, în cazul în care acestea au depășit limitele inferioare și superioare prescrise. Acest mod de a privi rezolvarea problemelor ecologice și de protecția mediului vine în întâmpinarea dorinței managerilor din acest domeniu, precum și a biologilor, ecologilor, silvicultorilor, pedologilor, hidrologilor de a dispune nu numai de metode de simulare adecvate, ci și de mijloacele de a fundamenta măsuri (acțiuni) capabile să prezerveze echilibrul ecologic, să protejeze speciile pe cale de dispariție și mai ales, să determine gradul de suportabilitate al sistemelor ecologice la intervenția antropică [3]. Este, de asemenea, important de a sublinia faptul că biblioteca de modele de simulare și control pentru ecologie și protecția mediului este utilă și pentru fundamentarea unor acțiuni cu caracter experimental privind renaturarea unor ecosisteme cum sunt: renaturarea luncii Dunării și a Deltei Dunării, reampădurirea unor ecosisteme forestiere de interes național și altele.

Structura matematică a modelelor de simulare și de control, incluse în bibliotecă, este aceea a unor modele hibride, compuse din mai multe modele de naturi diferite, interconectate între ele în cadrul unor modele complexe. Pentru a înțelege mai bine structura acestor modele, în cele ce urmează prezentăm formalismul matematic al acestora.

2. Structura modelelor incluse în bibliotecă

Modelul proceselor continue

Acest model este reprezentat dintr-un set de ecuații diferențiale neliniare, reprezentând ecuațiile de stare ale proceselor fizice, chimice, biologice și a unor procese complexe hidro-bio-chimice, care au loc în mediul acvatic, terestru sau în atmosferă.

Forma standard a acestui model este următoarea:

$$\dot{x}_i(t) = A_i x_i(t) + B_i u_i(t) + f_i(x) + v_i(x_i, x_j) + w_i(t) \quad (1)$$

$$x_i(0) = x_{i0} \quad (2)$$

$$v_i(x) = \sum_{j=1, j \neq i}^n g_{ij}(x_j) \quad (3)$$

$$x_{i \min} \leq x_i \leq x_{i \max} \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (4)$$

unde: $x_i, v_i: R^n \rightarrow R$, $u_i: R^m \rightarrow R$ și A, B sunt matrici de stare și control, f_i este o funcție vectorială, care descrie neliniaritățile din proces. Inegalitatea dublă reprezintă dorința experților ca valoarea x_i să fie în intervalul de suboptimalitate $[x_{i \min}, x_{i \max}]$.

Modelul proceselor discrete

Modelul simulării discrete în timp a sistemelor complexe este un set de ecuații neliniare, discrete în timp, într-o formă standard, rezultate din discretizarea unui model de simulare continuu:

$$x_i(k+1) = A_i x_i(k) + B_i u_i(k) + f_i(x_i(k), a_i) + v_i(x(k)) \quad (5)$$

k ia valori dintr-un set de valori discrete în timp: $\{k_0, k_1, \dots, k_i, \dots, k_f\}$.

Modelul evoluției unui eveniment discret este:

$$x_i(k+1) = F_i(x_1(k), x_2(k), \dots, u_1(k), u_2(k), \dots, U_m(k)) \quad (6)$$

unde F_i sunt funcții booleene.

Fie $x_i(t)$, ($i = 1, 2, \dots, n$) starea evenimentului simulat. Putem defini variația evenimentului discret:

$$U_j(k) = \begin{cases} 1, & \text{if } u_j(t) \rightarrow x_i(t+1) \in [x_{i \min}, x_{i \max}] \\ 0, & \text{other} \end{cases} \quad (7)$$

$$X_i(k) = \begin{cases} 1, & \text{if } x_i(t) \in [x_{i \min}, x_{i \max}] \\ 0, & \text{other} \end{cases} \quad (8)$$

unde intervalul $[x_{i \min}, x_{i \max}]$ este intervalul de suboptimalitate stabilit de expert.

Modelul de control fuzzy

Problema care se pune este de a aduce variabila de stare $x_i(k)$, $i = 1, 2, \dots, n$; $k = 0, 1, \dots, k_f$ în intervalul de suboptimalitate $[x_{i \min}, x_{i \max}]$. Modelul de control este fuzzy. Variabila de stare $x_i(k)$ aparține unuia din intervalele de mai jos ca și $dx_i(k) = x_i(k) - x_i(k-1)$:

Tabelul 1

| | | |
|-----------------|------------------------------|--|
| Interval x_i | $< x_{i \min} - \varepsilon$ | $(x_{i \min} - \varepsilon, x_{i \min})$ |
| x_i | VS | S |
| Interval dx_i | $< -\alpha$ | $(-\alpha, 0)$ |
| dx_i | -L | S |

| | | |
|----------------------------|-------------------------------------|-------------------------|
| $(x_{i \min}, x_{i \max})$ | $(x_{i \max}, x_{i \max} + \delta)$ | $> x_{i \max} + \delta$ |
| O | L | VL |
| 0 | $(0, \beta)$ | $> \beta$ |
| Z | S | L |

unde: VS = Very Small, S = Small, O = (sub) Optimal, L = Large, VL = Very Large, Z = Zero, sunt valori calitative în sensul teoriei fuzzy. Variabila de stare x_i aparține setului calitativ: $\chi = \{VS, S, O, L, VL\}$ pe cînd derivatele dx_i aparțin setului calitativ: $d\chi = \{L, -S, Z, S, L\}$. Reprezentarea funcției $\mu_i(x_i)$ este trapezoidală:

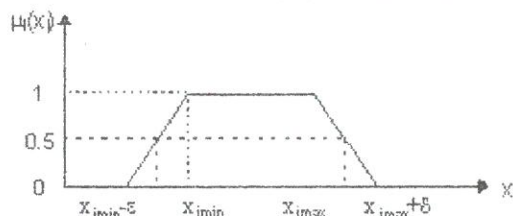


Figura 1. Reprezentarea trapezoidală a funcției de apartenență

Din figură reiese că:

$$\mu_i(x_i) = \begin{cases} 1, & \text{if } x_i \in [x_{i \min}, x_{i \max}] \\ 0, & \text{if } x_i < x_{i \min} - \varepsilon, \text{ or } x_i > x_{i \max} + \delta, \\ \frac{1}{\varepsilon} x_i - \frac{x_{i \min} - \varepsilon}{\varepsilon}, & \text{if } x_i \in [x_{i \min} - \varepsilon, x_{i \min}] \\ \frac{-1}{\delta} x_i + \frac{x_{i \max} + \delta}{\delta}, & \text{if } x_i \in (x_{i \max}, x_{i \max} + \delta] \end{cases} \quad (9)$$

În următoarea formulă $u_i(k+1)$ va putea aduce variabila de stare $x_i(k)$ în intervalul de suboptimalitate:

$$u_i(k+1) = u_i(k) + K_{ui} \Delta u_i(k) \quad (10)$$

unde $\Delta u_i(k)$ este un increment care are formula:

$$\Delta u_i(k) = \frac{\sum_{i=1}^n \mu_i(x_i) \cdot u_i(k)}{\sum_{i=1}^n \mu_i(x_i)}, \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (11)$$

Termenii K_{ui} sunt coeficienți experimentali, dați de către expert, sub forma unei matrici.

În final, setul de reguli de control fuzzy rezultate este:

$$\langle \text{If } (x_i(k) \text{ is } \chi_i) \wedge (dx_i(k) \text{ is } d\chi_i) \quad (12)$$

și noua regulă de control este:

$$u_i(k+1) = u_i(k) + K_{ui} \Delta u_i(k) \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (13)$$

modelele *FOREST* și *SOL* (pentru ecosisteme terestre) și modelele *DIFUZIE* 1-10 (pentru controlul calității aerului în orașul București). La un alt nivel se găsesc submodelele care sunt de fapt modele de mică complexitate capabile să surprindă evoluția unui proces relativ simplu cum ar fi unele procese hidrologice, procese biochimice și hidrobiocimice și altele. Pe ultima treaptă se găsesc formule de calcul utile în construirea modelelor de simulare și control cum ar fi: calculul debitului apei pe un canal și/sau enal, calculul factorului de împrăștiare al apei din lacurile unei rețele hidrografice (de exemplu a unei delte), expresia matematică a relației pradă-prădător, formula de calcul a concentrației de poluant, gazos sau

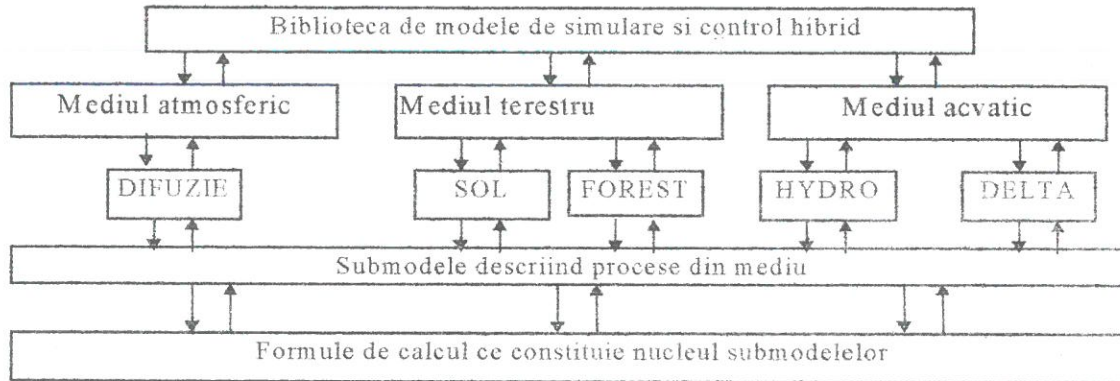


Figura 2. Schema structurii bibliotecii de modele de simulare și control pentru ecologie și protecția mediului

În formula (12) χ_i ia valorile $\chi = \{VS, S, O, L, L_j\}$, în timp ce $d\chi_i$ ia valorile $d\chi = \{-L, -S, Z, S, L_j\}$. Subliniem faptul că numărul de reguli de control este 25 n .

Generalizare. Dacă fiecare valoare calitativă a lui $x_i(t)$ este acompaniată de o funcție de apartenență $\mu_{\chi_i}(x_i)$ așa cum se arată în figura 1, calculul lui $\mu(x_i)$ este dat de ecuațiile (9).

3. Structura bibliotecii de modele

Biblioteca de modele de simulare și control pentru ecologie și protecția mediului are o structură ierarhicată, pe mai multe niveluri, așa cum rezultă din figura 2. La nivelul cel mai înalt se află ansamblul de modele hibride care constituie biblioteca; cu ajutorul lor se pot constitui modele de simulare și de control hibrid utile în rezolvarea problemelor complexe de ecologie și protecția mediului. La nivelul imediat următor, se află modele complexe de simulare și control pentru cele trei medii și anume: mediul acvatic, mediul terestru și atmosfera. La un alt nivel se află modelele concrete de simulare și control și anume: modelele *HYDRO*, *DELTA*, *PELICAN* și *CORMORAN* (pentru ecosisteme acvatice),

sub forma de pulberi, din atmosfera urbană.

Notă. Precizăm faptul că interfața dintre modelele incluse în biblioteca de modele de simulare și de control pentru ecologie și protecția mediului și baza de date Access se realizează prin intermediul unor fișiere de tip ASCII.

Deschiderea și închiderea unui fișier care conține un model din biblioteca de modele de simulare și de control pentru ecologie și protecția mediului se face cu ajutorul unui program scris cu ajutorul limbajului Visual C++ și constă dintr-o serie de ecrane care conțin butoane de acționare. Primul ecran care apare pe monitor este redat în figura 3.

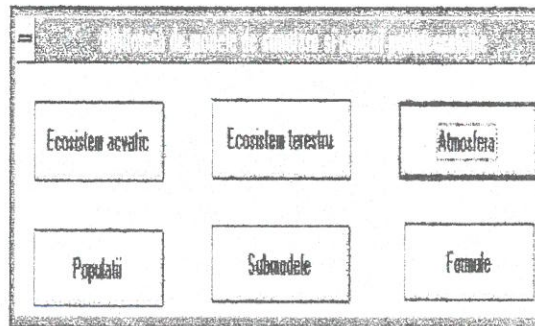


Figura 3. Ecran pentru accesarea automată a modelelor din biblioteca de modele

Acționând cu ajutorul mouse-ului butonul *Ecosistem acvatic* pe monitor va apare un nou ecran care conține două butoane și anume *Hydro* și *Delta* ca în figura 4.

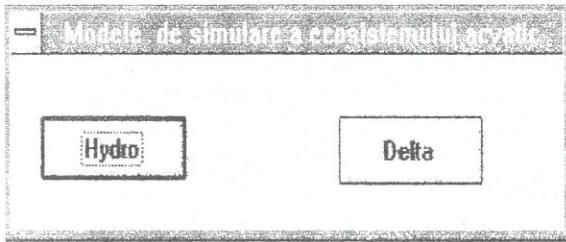


Figura 4. Ecran pentru accesarea automată a modelelor pentru ecosistemul acvatic

Aționând butonul *Ecosistem terestru* cu ajutorul mouse-ului pe monitor va apare un nou ecran care conține două butoane și anume *Sol* și *Forest* ca în figura 5.

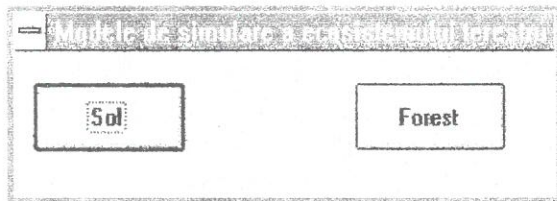


Figura 5. Ecran pentru accesarea automată a modelelor pentru ecosistemul terestru

Aționând butonul *Atmosfera* cu ajutorul mouse-ului, pe monitor va apare un nou ecran care conține zece butoane și anume câte unul pentru fiecare model de difuzie ca în figura 6.

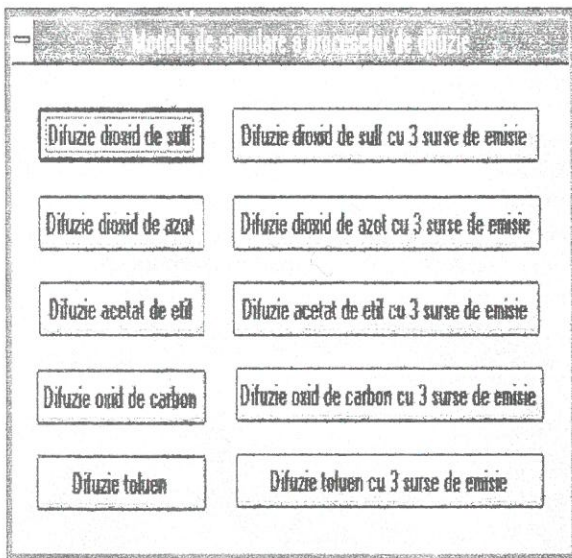


Figura 6. Ecran pentru accesarea automată a modelelor de simulare a proceselor de difuzie

Aționând butonul *Populatii* cu ajutorul mouse-ului pe monitor va apare un nou ecran care conține două butoane și anume *Pelican* și *Cormoran* ca în figura 7.

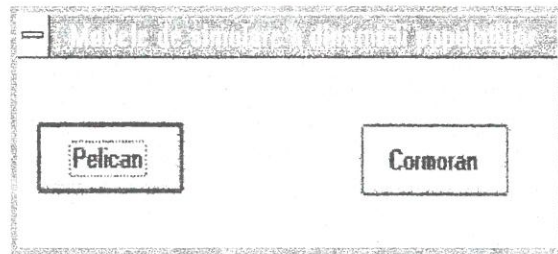


Figura 7. Ecran pentru accesarea automată a modelelor de simulare a dinamicii populațiilor de pelican și cormoran

4. Aplicații în ecologie și protecția mediului

Pentru a demonstra utilitatea bibliotecii de modele care face obiectul acestei lucrări, în cele ce urmează vom prezenta trei dintre aplicațiile acestuia în domeniul Simulării și controlului ecosistemelor, cu aplicație directă în managementul acestora

Sistemul ecologic Delta Dunării, declarat din anul 1994 Rezevația Biosferei Delta Dunării, de către organismele internaționale abilitate, pentru importanța sa la menținerea echilibrului ecologic, pentru marile sale resurse naturale (pește, vânat - pasări și animale, stof etc.) și pentru gravele pericole ecologice (ex. poluarea apei, entrozizarea apei, pericolul dispariției unor specii). Acest ecosistem este studiat de mulți ani de către Institutul de Cercetare -

Proiectare Delta Dunării - ICPDD, din Tulcea, în colaborare cu Institutul de Biologie al Academiei,

Institutul de Geografie al Academiei, Institutul National de Meteorologie și Hidrologie și alte instituții. ICPDD a creat o bază de date pentru Delta Dunării, fără însă a dispune de un sistem de monitoring automat pentru culegerea datelor din mediul acvatic și transmiterea lor la ICPDD (precizăm că, în cazul special al Deltei Dunării, singura cale de transmitere a datelor culese cu ajutorul senzorilor este un sistem radio). și pentru acest ecosistem credem că soluția ar fi o bază de date pentru ecologia acvatică, de tip SQL Server 6.0 sau mai nou. Probleme similare se pun și pentru un sistem telematic cu aplicație la sistemul ecologic al Dunării (între punctul de intrare în țară și punctul de intrare în Delta Dunării).

Ecosistemul forestier constituie principalul regulator natural al sistemului acvatic și un adevărat scut antierozional al zonelor carpatice și subcarpatice, fiind deopotrivă și un mare producător de oxigen în spațiul nostru geografic. Literatura de specialitate consemnează faptul că de modul cum sunt îngrijite ecosistemele forestiere depind nu numai industria lemnului, ci și multe

alte ramuri ca: hidroenergetica, industria, agricultura, centrele urbane și, nu în ultimul rând, turismul. Acestea sunt principalele noțiuni pentru care considerăm necesar că, cel puțin cele 4 ecosisteme forestiere mari, menționate, să fie incluse în sistemul telematic cu aplicații în ecologie. Un alt motiv este și faptul că, în apropierea acestora, se află câte o localitate urbană, unde poate fi proiectat, dezvoltat, menținut și administrat eficient (pe scurt organizat) o bază de date pentru ecologia forestieră, utilizând sistemul SQL server 6.0 și mai nou. Această soluție este posibilă datorită faptului că în centrele urbane apropiate (Suceava, Sinaia, Brașov, Cluj), există specialiști în ecologie forestieră (ROMSILVA) și informaticieni capabili să întrețină un SQL server pentru ecologia forestieră. Din investigațiile făcute de noi rezultă interesul specialiștilor (ecologi, silvicultori) pentru un astfel de sistem telematic, cu aplicație în ecologia forestieră.

Ecosistemul atmosferei urbane, din zonele principalelor centre urbane, industrializate, cunoscute în România, dar noi am considerat că fiind foarte nocive pentru populație situația existența în centrul orașului București, precum și în zonele orașelor : Baia Mare, Coșca Mică și Pitești. Principalele elemente poluante, a căror difuzie în atmosfera urbană periclitează sănătatea populației sunt: dioxidul de sulf (SO_2), diferiți oxizi de azot (NO_x), acetatul de etil, toluenul, pulberi metalice, dioxidul de carbon (CO_2) și altele ca potențial periculoase pentru sănătatea populației, din cauza concentrației de poluant chimic industrial, pulberi metalice și/sau noxe produse de transportul rutier.

Simularea și controlul ecosistemului Delta Dunării

Ecosistemul Delta Dunării este un ecosistem de importanța națională, care se confruntă cu unele probleme de natură ecologică, hidrologică și economică.

Delta este un sistem mare, complex, compus din brațele fluviului, prin care acesta se varsă în mare, și dintr-o rețea de lacuri interconectate, prin canale și șenale, între ele și/sau cu brațele fluviului. În interiorul unei delte, au loc procese complexe, cum sunt de exemplu: procese hidrologice (circulația apei pe canale și șenale, îmborsărea apei s.a.), procese fizico-chimice (fotosinteza, eutrofizarea apei) și procese biochimice (evoluția speciilor, natalitatea, mortalitatea, relația pradă-prădător, dinamica populațiilor de plante, păsări și animale). Toate acestea pot fi simulate cu ajutorul modelului

DELTA. În plus, modelul permite simularea acțiunilor antropice, cum sunt: pescuitul, vânătoarea, introducerea în ecosistem a unor noi specii, amenajări hidrologice, combaterea procesului de eutrofizare, optimizarea factorului de îmborsărea al apei etc.

În esență, modelul de simulare și control al unui ecosistem complex este compus din: modelul de simulare și modelul de control predictiv:

În continuare, vom prezenta rezultate de simulare obținute cu ajutorul modelului *Delta* pentru un ecosistem acvatic. Aplicația realizată asupra ecosistemului Delta Dunării are în vedere studierea proceselor ce au loc în șase din lacurile Deltei Dunării. Rezultatele au fost evidențiate prin grafice care reprezintă evoluțiile unor mărimi de stare, mai semnificative, dintre care putem menționa factorul de îmborsărea al apei, biomasa de pește răpitor și pește omnivor, biomasa de fitoplancton, cantitatea de detritus, biomasa de plante macrofite. Din grafice se observă că, în anumite luni ale anului, mărimile de stare ies din intervalele de suboptimalitate, prescrise de experți. Pentru a aduce mărimile de stare respective în intervalele de suboptimalitate s-a introdus un model de control fuzzy.

Spre exemplificare vom prezenta graficele factorului de îmborsărea al apei (w_{12}), graficele biomasei de pește omnivor și răpitor (PP_{12} și Pr_{12}) și graficele populației totale de comoran (NT). Factorul de îmborsărea al apei și biomasa de pește omnivor și răpitor sunt reprezentate pentru fiecare din cele șase lacuri pe un interval de 12 luni. nfw_{12} reprezintă evoluția factorului de îmborsărea al apei în regim controlat prin introducerea unui regulator fuzzy.

Prima aplicație realizată cu ajutorul bibliotecii de modele de simulare și control a fost simularea și controlul regimului hidrologic al Deltei Dunării, în special simularea circulației apei în Delta Dunării și controlul factorului de îmborsărea al apei lacurilor din delta. Modelul de simulare a proceselor hidrologice din Delta Dunării este bazat pe ecuațiile mecanicii fluidelor și are ca mărimi de stare: nivelul apei lacurilor, adâncimea apei în lacuri, volumul de apă acumulată în lacuri și factorul de îmborsărea al apei lacurilor. Mărimile de stare depind de debitele de intrare/ieșire ale apei în/din lacuri, care la rândul lor sunt funcție de geometria canalelor și șenalelor care leagă lacurile între ele, cu brațele Dunării sau cu Marea Neagră, precum și de coeficienții de rugozitate ai canalelor de apă, de gradul de acoperire cu vegetație a acestora și de alți factori.

Modelul de simulare a ecosistemului Delta Dunării este un model de mare complexitate, a cărui prezentare ar depăși cu mult cadrul acestui articol. Pentru a da cititorului posibilitatea de a aprecia complexitatea modelului, vom prezenta o parte semnificativă a acestuia, și anume modelul de simulare a proceselor hidrologice. Acest model este:

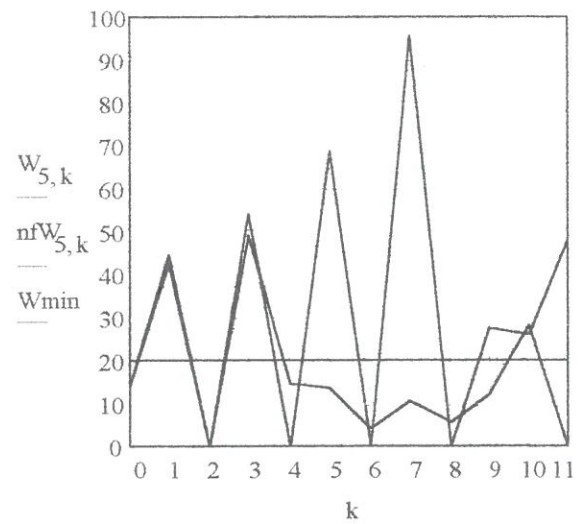
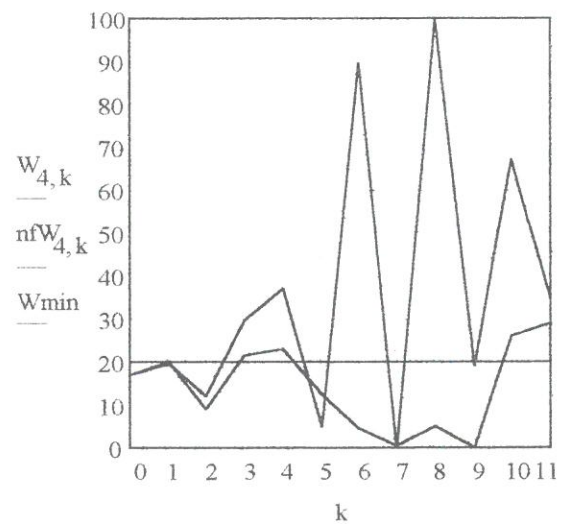
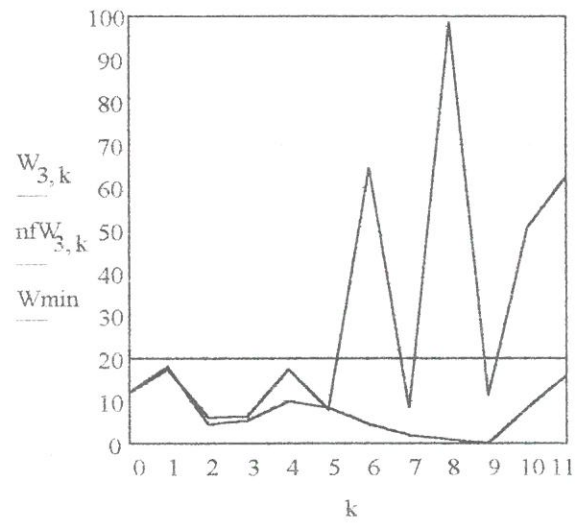
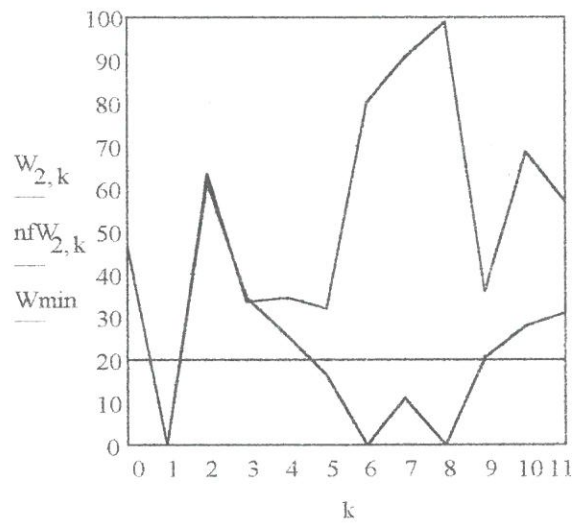
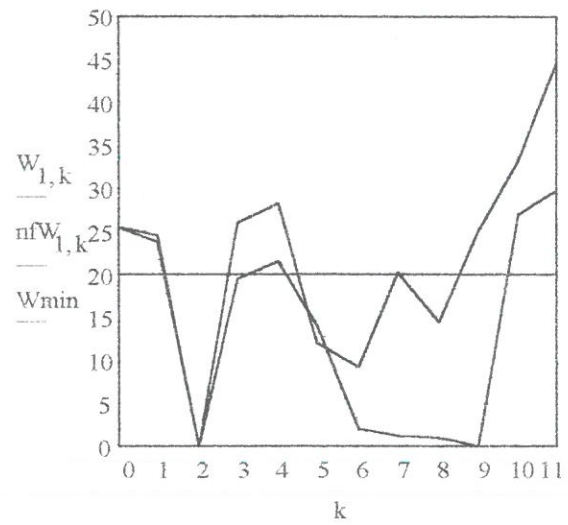
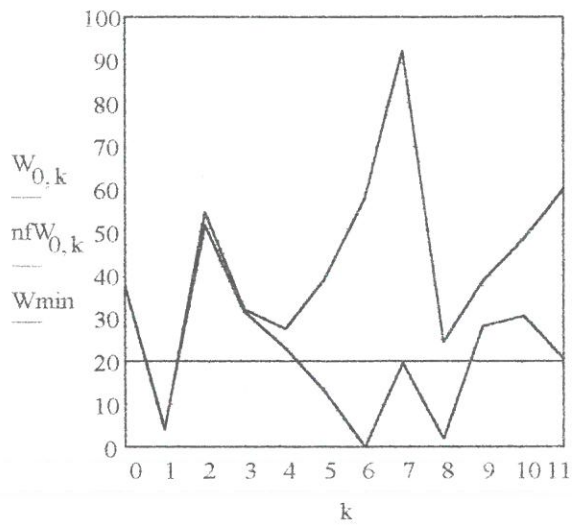


Figura 8. Graficele factorului de îmborsărire al apei în regim natural ($W_{i,k}$) și în regim controlat ($nfW_{i,k}$)

$$H_j(k+1) = H_j(k) + p(k) \cdot e(k) + V_j Q_j(k) - B_j Q_e(k) + B_j u_j(k),$$

$$HH_j(k+1) = HH_j(k) + H_{j, \text{max}},$$

$$V_j(k) = A_j H_j(k),$$

$$W_j(k) = V_j(k) / (V_j(k) + V_{j, \text{max}}(k)), \quad (j=1, 2, \dots, n; \text{ unde } n=10)$$

unde: H_j reprezintă nivelul apei în lacul i , HH_j este adâncimea apei în lacul i , V_j este volumul de apă acumulată în lacul i , W_j fiind factorul de împropătare al apei în lacul i .

În modelul de mai sus, $Q_{j, i}(k)$ și $Q_{j, e}(k)$ reprezintă debitele de apă de intrare ieșire în și din lacuri și au următoarea expresie:

$$Q_{j, i}(k) = \rho_{j, i} A_{j, i} (2g)^{1/2} \text{sign} x_{j, i} (\bar{A} x_{j, i} \bar{A})^{1/2}, x_{j, i} = z_i + V_j / A_{j, i} - (z_j + V_j / A_{j, i}),$$

$$Q_{j, e}(k) = \rho_{j, e} A_{j, e} (2g)^{1/2} \text{sign} x_{j, e} (\bar{A} x_{j, e} \bar{A})^{1/2}, x_{j, e} = z_j + V_j / A_{j, e} - (z_e + V_j / A_{j, e}),$$

unde

$$A_{j, i} = L_{j, i} H_{j, i}, \quad H_{j, i} = 1/2(V_j / A_{j, i} + V_j / A_{j, i}),$$

$$A_{j, e} = L_{j, e} H_{j, e}, \quad H_{j, e} = 1/2(V_j / A_{j, e} + V_j / A_{j, e}), \quad V_{j, i} = Q_{j, i} \Delta t, \quad B_j = 1/A_{j, i}$$

Condițiile inițiale sunt date. $L_{j, i}$ reprezintă lățimea apei din canalul care leagă lacurile i și j , iar $V_{j, i}$ este volumul apei care intră în lacul j prin canalul ij .

În continuare, este prezentat un model care detectează mărimi de stare, care ies din limitele de suboptimalitate. În cazul de față, mărimea testată este factorul de împropătare.

Modelul de simulare cu evenimente discrete al proceselor hidrologice folosește stările evenimentelor:

$$W(i, k) = \begin{cases} 1, & W(i, k) \in [0.1, 0.5] \\ 0, & \text{altfel} \end{cases}$$

Matricea evenimentelor discrete W este o matrice booleană. Variabilele de ieșire ale evenimentului discret fiind $Y_j(k)$, modelul evenimentelor discrete poate fi descris de formula de mai jos:

$$Y_j(k+1) = W_1(k) \wedge W_2(k) \wedge \dots \wedge W_j(k) \dots \wedge W_n(k), \text{ unde: } k=0, 1, 2, \dots, k; \quad n=10. \text{ Dacă:}$$

$$Y_j(k+1) = \begin{cases} 1, & \text{atunci procesul continuă} \\ 0, & \text{atunci alertează regulatorul} \end{cases}$$

Mărimile de comandă, care au fost utilizate în modelul hidrologic, vizează atât geometria canalelor de apă, cât și diminuarea coeficientului de rugozitate și a gradului de acoperire cu vegetație al acestora.

Modelul de control fuzzy al factorului de împropătare al apei lacurilor include, în primul

rând, funcțiile de apartenență, descrise de următorul grup de relații:

$$\mu_i(W_i(k)) = \begin{cases} 1, & \text{if } W_i \in [0.2, 0.5], \\ 0, & \text{if } W_i \in [0, 0.1] \text{ or } W_i \in (0.8, 1], \\ 10W_i - 1, & \text{if } W_i \in [0.1, 0.2] \\ -\frac{10}{3}W_i + \frac{8}{3}, & \text{if } W_i \in (0.5, 0.8] \end{cases}$$

Noile variabile de comandă se calculează cu ajutorul formulei de calcul:

$$f_i(k+1) = f_i(k) + Kf_i \Delta f(k),$$

unde:

$$\Delta f(k) = \frac{\sum_{i=1}^6 \mu_i(W_i) \cdot f_i(k)}{\sum_{i=1}^6 \mu_i(W_i)}$$

reprezintă un increment care se adaugă vechii mărimi de comandă $u_i(k)$, iar Kf_i reprezintă coeficienții euristici, dați de experți, în funcție de valoarea calitativă a variabilei de stare $W_{i, k}$ și de derivata acesteia ($W_{i, k+1} - W_{i, k}$).

Așa cum am arătat în capitolul 2, numărul de reguli euristice de decizie este $25n$ (în cazul nostru 250). Pentru a ilustra modul de scriere al acestor reguli vom prezenta numai una din acestea, restul putând fi deduse de către cititorul interesat. O astfel de regulă are forma:

< Dacă ($W_i(k) = S$) \wedge ($dW_i(k) = -L$), Atunci legea de control fuzzy este: $f_i(k+1) = f_i(k) - 0.35 \Delta f(k)$ >.

Experimentul de simulare pe calculator s-a referit la o depresiune lacustră, formată din șase lacuri, interconectate atât între ele, cât și cu brațele Dunării, prin canale de apă și șenaluri. Este vorba de lacurile:

Matia, Merhei, Babina, Roșca, Trei Iezere și Bogdaproste. Alegerea acestei depresiuni lacustre s-a făcut la sugestia ecologilor și a hidrologilor care studiază Delta Dunării, deoarece acest ecosistem prezintă o deosebită importanță ecologică și economică și se confruntă, de asemenea, cu unele probleme ca: o împropătare nesatisfăcătoare a apei, un proces de eutrofizare a apei lacurilor (creșterea peste limita admisibilă a biomasei algelor microscopice), scăderea oxigenului dizolvat în apă, precum și diminuarea biomasei unor specii de pește pașnic și răpitor, cu valoare economică ridicată.

În figura 8 sunt reprezentate rezultatele de simulare și de control ale factorului de împropătare a apei $W_{i, k}$ pentru cele șase lacuri mai sus menționate. Examinând graficele din figura 8, se constată că, pentru o lungă perioadă de timp, mărimea respectivă este sub limita inferioară, stabilită de către ecologi (W_{min}). Pentru a remedia această situație cu urmări ecologice și economice grave, s-a recurs la modelul de control fuzzy, care s-a dovedit apt să sintetizeze noi mărimi de comandă, capabile să conducă la reintroducerea factorului de împropătare a apei în interiorul intervalelor de

suboptimalitate, din care acesta ieșise ca urmare a unor influențe naturale și/sau antropice nedorite. Ca urmare, factorul de înprospătare a apei resimulat, folosind noua comandă/acțiune ($nfW_{i,k}$) a reintrat în interiorul intervalului de suboptimalitate, ceea ce demonstrează eficacitatea modelului de control fuzzy.

Cea de-a doua aplicație privind simularea și controlul unor procese din Delta Dunării se referă la biomasa piscicolă de pește pasnic și răpitor, în special la controlul acestor biomase în situația în care aceste biomase scad sub limita inferioară, dorită de biologi.

macrofitelor submerse, biomasa descompunătorilor (bacterio-plancton), forța numerică a populațiilor de păsări ichtiofage (pelicanul și cormoranul), concentrația de nutrienți în apa lacurilor (fosfor și compuși de azot), oxigenul dizolvat în apă. În ecuațiile de stare mai sunt parametri fizico-chimici, de mediu, cum ar fi: productivitatea naturală a fitoplanctonului și macrofitelor submerse, fertilitatea și mortalitatea speciilor, relația pradă-prădător, precum și relațiile de ponderare a acestora, datorată parametrilor fizico-chimici de mediu (temperatura, intensitatea radiației luminoase, presiunea atmosferică, viteza vântului s.a.)

În primele două grafice din figura 9, sunt reprezentate

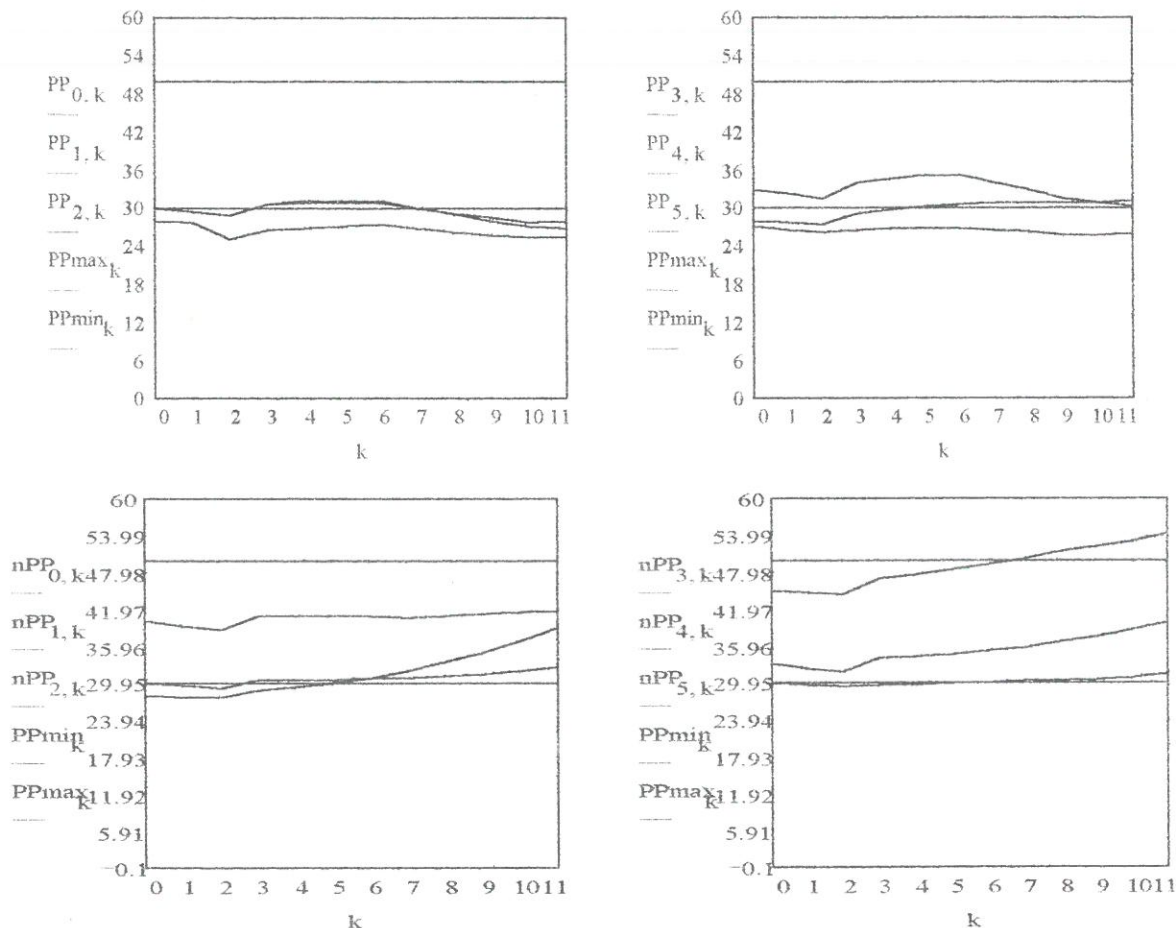


Figura 9. Dinamica biomasei de pește pasnic/omnivor ($PP_{i,k}$) și răpitor ($Pr_{i,k}$) în șase locuri din Delta Dunării, în regim natural și controlat

Acesta este cazul care se întâlnește în ecosistemul Delta Dunării.

Modelul de simulare este compus din ecuații cu timp discret și condiții inițiale date, relații de interacțiune și intervale de suboptimalitate, adică un model de simulare hibrid, așa cum am prezentat în capitolul 2. Mărimile de stare principale ale modelului sunt: biomasa peștelui pasnic, biomasa peștelui răpitor; mărimile de stare asociate modelului sunt: biomasa fitoplanctonului, biomasa zooplanctonului pasnic și răpitor, biomasa bentosului, biomasa

rezultatele de simulare a biomasei peștelui pasnic ($PP_{i,k}$) în cele șase lacuri. Se observă că în unele lacuri valoarea acestei mărimi de stare este sub limita inferioară. Utilizând modelul de control fuzzy în cazul în care mărimile de comandă sunt: cantitatea de biomasa pescuită și/sau biomasa de pește pasnic introdusă prin repopulare și resimulând ecosistemul se obțin noile valori ale biomasei de pește pasnic care arată o îmbunătățire substanțială în sensul că acestea se încadrează în intervalul de suboptimalitate cerut de experți.

O a treia aplicație o constituie simularea și controlul dinamicii populației totale de cormoran care include dinamica populațiilor de adulți, suadulți și pui. Modelul

de simulare și control este un model cu timp discret compus din trei ecuații de stare, câte una pentru fiecare categorie de populație. Mărimile de stare simulate sunt numărul de adulți, subadulți și pui. Parametrii esențiali ai modelului sunt: fertilitatea populației, mortalitatea populației, perturbațiile datorate acțiunilor naturale și antropice. Mărimea de control utilizată în acest model este diminuarea (de altfel mică) a numărului de ouă depuse de către populația de cormoran adult. Ca urmare a efectuării unui control științific fundamentat, populația totală de cormoran (notată în figura 10 cu NT_k), care în regim natural depășește cu mult limita superioară admisibilă, a reintrat în limitele normale (curba NNT_k din graficul din figura 10)

$$WB_i(k+1) = WB_i(k) + PWB_i(k) - KMWB_i(k) \cdot WB_i(k) - \frac{a_i \cdot WB_i(k) \cdot B_i(k)}{b_i + WB_i(k)} + RWB_i(k) - UWB_i(k),$$

$$LB_i(k+1) = LB_i(k) + PLB_i(k) - KMLB_i(k) \cdot LB_i(k) - \frac{a_j \cdot LB_i(k) \cdot B_j(k)}{b_j + LB_i(k)} + RLB_i(k) - ULB_i(k),$$

$$RB_i(k+1) = RB_i(k) + PRB_i(k) - KMRB_i(k) \cdot RB_i(k) - \frac{a_l \cdot RB_i(k) \cdot B_l(k)}{b_l + RB_i(k)} + RRB_i(k) - URB_i(k).$$

Există, în acest model, condiții inițiale, relații de interacțiune și funcții de ponderare, care determină influența factorilor de mediu (temperatura aerului și solului, umiditatea solului, presiunea atmosferică, intensitatea radiației solare, pH-ul solului, viteza vântului și altele).

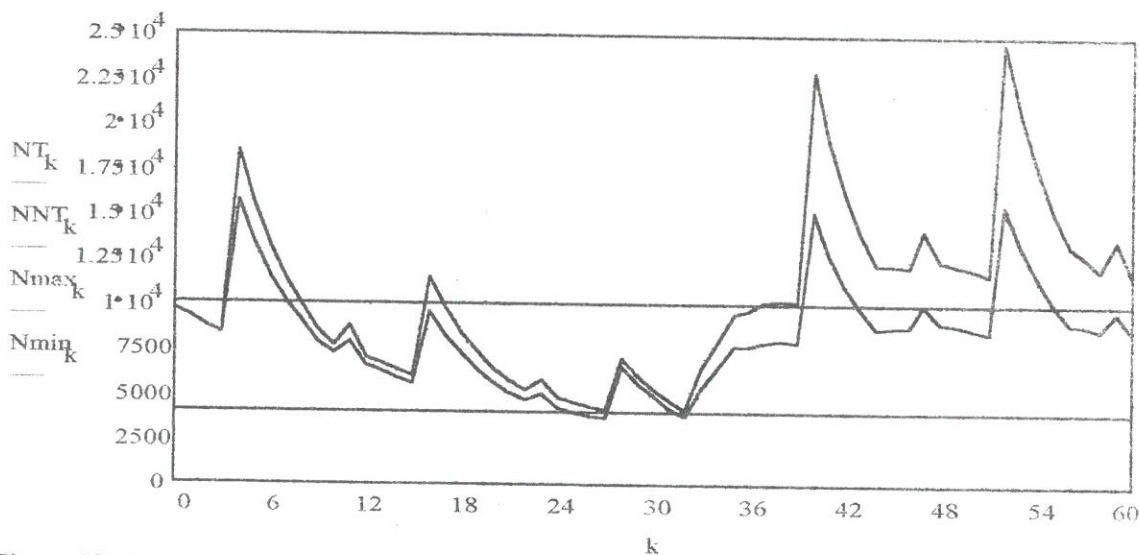


Figura 10. Dinamica populației totale de cormoran în regim natural (NNT_k) și în regim controlat (NT_k)

Simularea și controlul ecosistemului forestier

În continuare, vom prezenta rezultate de simulare, obținute cu ajutorul modelului *Forest* pentru un ecosistem forestier (o pădure de fag). Modelul de simulare este un model de simulare hibridă, compus din ecuații de stare cu timp discret, cu condiții inițiale, relații de interacțiune și intervale de suboptimalitate cerute de către experți (silvicultori). Principalele mărimi de stare sunt: biomasa lemnoasă (BI), biomasa coronamentului (Bc) și biomasa rădăcinilor (Br), la care se adaugă o serie de mărimi de stare asociate ca: biomasa vegetației concurente, biomasa insectelor de scoarță coronament și rădăcini, păsări și mamifere;

Rezultă așadar un model matematico-ecologic complex în care apar, în afara mărimilor de stare mai sus amintite, factori biologici (productivitatea naturală a florei din ecosistemul forestier, factorul de mortalitate, relația pradă-prădător) și parametri fizico-chimici de mediu: temperatura aerului și a solului, umiditatea solului, intensitatea radiației solare, presiunea atmosferică, viteza vântului, pH-ul solului și altele. În figura 11, se arată dinamica biomasei lemnoase, a coronamentului și a rădăcinilor; se observă că biomasa lemnoasă (mărimea de stare esențială din punct de vedere ecologic și economic a ecosistemului forestier) se află sub limita inferioară a intervalului de suboptimalitate. Ca și în cazul precedent, s-a aplicat algoritmul fuzzy de fundamentare a acțiunilor capabile să conducă la reintroducerea celor două mărimi de stare menționate în intervalele de suboptimalitate.

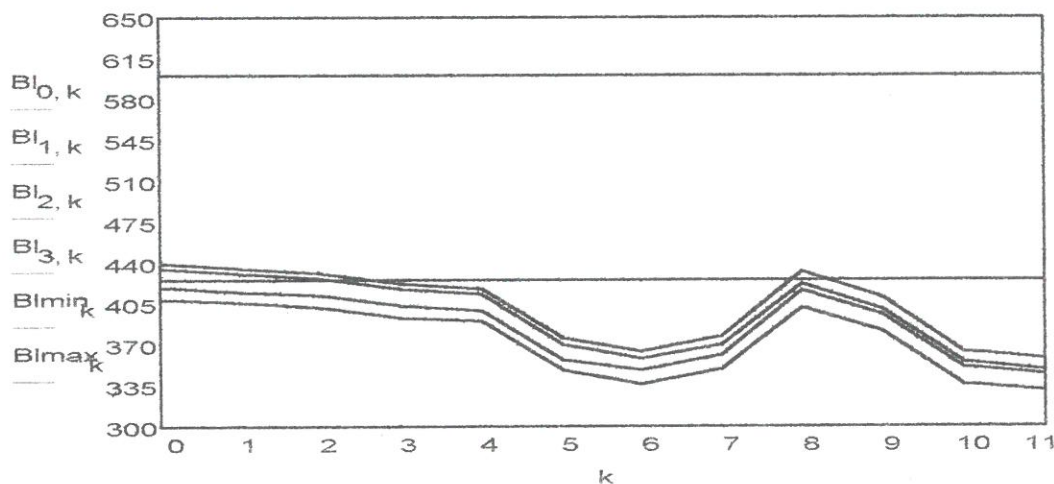
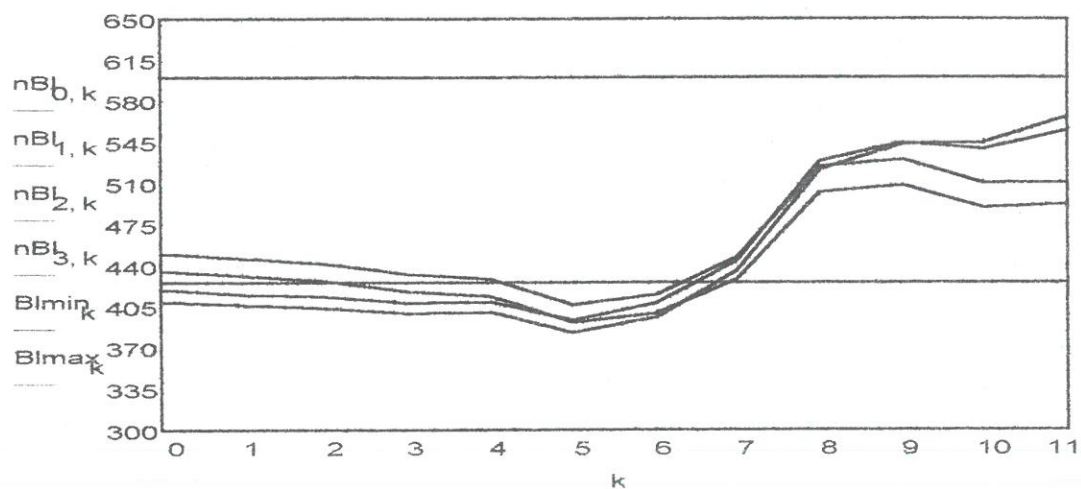


Figura 11. Dinamica biomasei lemnoase în regim controlat ($nBl_{i,k}$) în regim natural ($Bl_{i,k}$)

Simularea și controlul difuziei poluanților chimici industriali în atmosfera orașului București

Modelul descrie procesul de difuzie al poluantului SO_2 , în orice punct aflat la o distanță de sursă (surse); este posibil să se calculeze concentrațiile pe o arie din jurul sursei (pe termen scurt și/sau mediu, de exemplu mai multe ore). O altă posibilitate de vizualizare a concentrației medii constă în trasarea unor curbe pe care concentrația este constantă (curbe de izopoluare). Modelul este de fapt un model gaussian, dinamic, soluție a ecuației difuziei, dar care ține seama de unele elemente euristice, derivate din cunoștințele experților în domeniu (chimiști, fizicieni, meteorologi s.a.), privind de exemplu procesul tehnologic, sursa de poluare, condițiile meteo. Marimile de stare ale modelului de simulare sunt: concentrațiile de

noxe (SO_2 , Nox, CO, acetat de etil, toluen, precum și pulberi metalice și pulbere carbune). Experimentul realizat se referă la simularea și controlul difuziei poluantului SO_2 în atmosfera orașului București, pentru una sau trei surse de poluare. Modelul de simulare include relații de calcul a concentrației de poluant în spațiul tridimensional, dispersia după cele trei axe de coordonate Ox , Oy , Oz , relații de calcul a influenței factorilor de mediu (temperatura aerului, presiunea aerului, viteza vântului, umiditatea aerului, intensitatea radiației solare, gradul de instabilitate atmosferică).

În figura 12a) este reprezentată harta curbelor de izopoluare (izoconcentrație) pentru poluantul SO_2 în cazul unei singure surse de emisie. Se constată că valoarea maximă a concentrației de SO_2 este 0,14. Aplicând modelul de control fuzzy în cazul variabilei de comandă debit masic se constată o reducere cu 50% a concentrației maxime. Același efect se poate constata și în figura 13 care corespunde cazului a trei surse de emisie dispuse în triunghi. În regim natural (graficul de sus) și în regim controlat (graficul de jos).

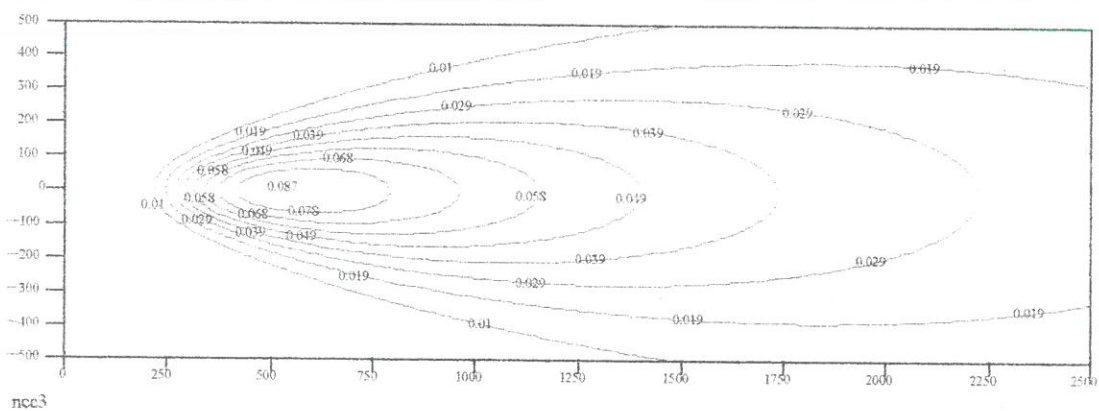
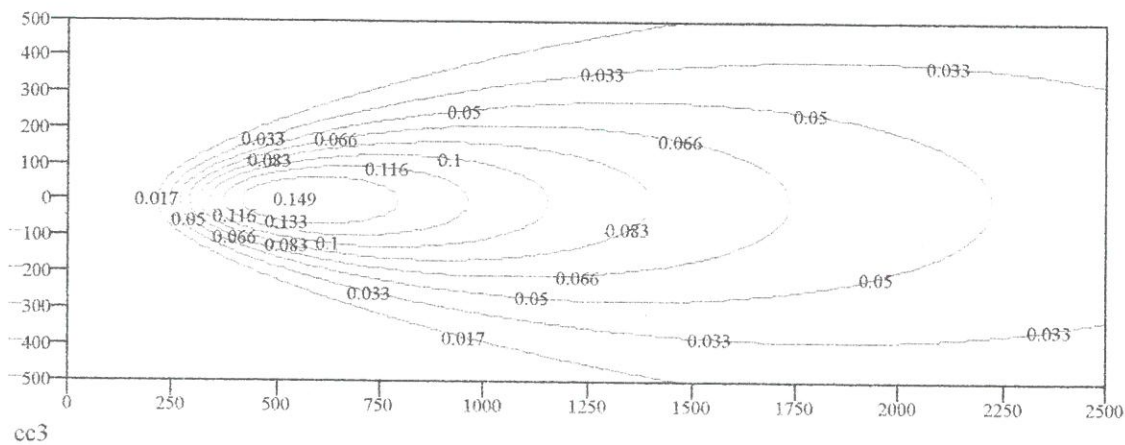


Figura 12. Harta curbelor de izopoluare (izoconcentrație) pentru dioxid de sulf pentru o sursă de emisie

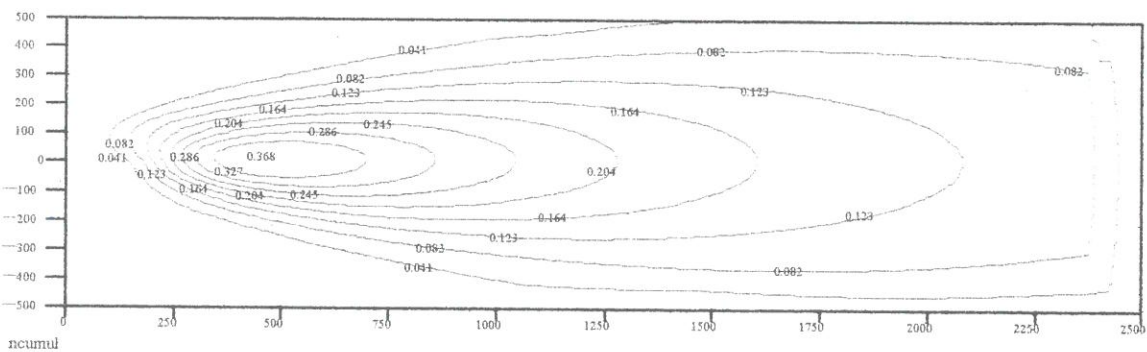
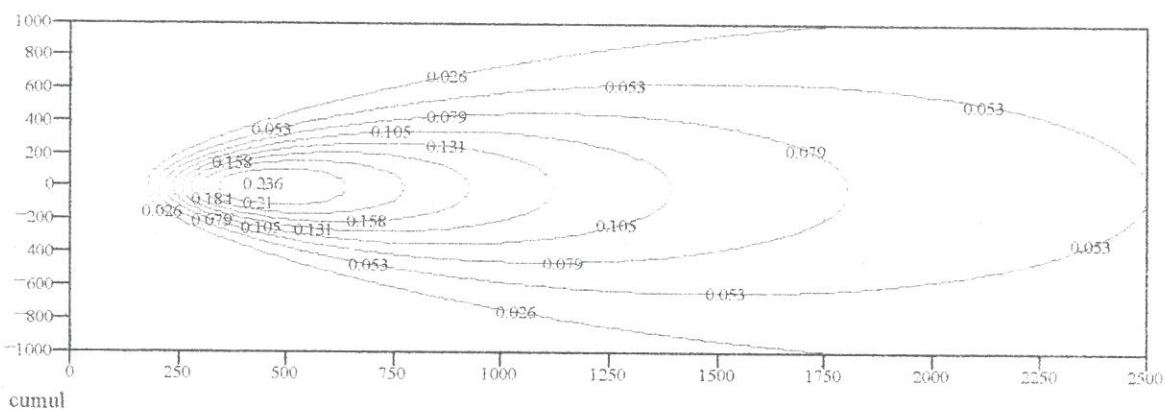


Figura 13. Harta de izoconcentrație (izopoluare) a noilor valori cumulate în cazul a trei surse diferite în regim natural (graficul de sus) și în regim controlat (graficul de jos)

5. Concluzii

În această lucrare se prezintă concepția și structura noii biblioteci de modele de simulare și control pentru ecologie și protecția mediului precum și aplicații realizate cu ajutorul acestei biblioteci pentru simularea și controlul unor ecosisteme acvatice și terestre precum și pentru controlul calității aerului. Modelele de simulare incluse în bibliotecă sunt modele de simulare hibride compuse din ecuații cu timp discret neliniare, cu condiții inițiale, relații de interacțiune, intervale de tip expert, sisteme cu evenimente discrete. Modelele de control, care au menirea de a readuce marimile de stare în interiorul intervalelor prescrise de către experți, sunt modele de control fuzzy, capabile să sintetizeze noile mărimi de comandă/acțiune capabile să realizeze dezideratul de mai sus. Biblioteca de modele de simulare și control pentru ecologie și protecția mediului include în forma actuală: două modele de simulare și control pentru ecosisteme acvatice (Hydro, Delta și Litoral), două modele de simulare și control pentru ecosisteme terestre (Forest și Sol), și zece modele de simulare și control pentru controlul calității aerului, mai exact pentru difuzia poluanților chimici industriali în atmosfera urbană (Difuzie 1-10). În toate aplicațiile în care modelele de simulare și control incluse în bibliotecă au fost utilizate rezultatele obținute au fost pe deplin satisfăcătoare. Ne referim la simularea și controlul ecosistemului Delta Dunării, simularea și controlul unui ecosistem forestier din munții Bucegi, precum și la controlul calității aerului în orașul București. Subliniem faptul că biblioteca de modele de simulare și control pentru ecologie și protecția mediului poate funcționa independent în aplicații. Ea a fost de asemenea inclusă în *Sistemul Expert pentru rezolvarea problemelor complexe de ecologie și protecția mediului* [7] ca și în *Sistemul telematic cu aplicații în ecologie* [8]. În același timp este important să subliniem și faptul că ea va putea fi inclusă în Sistemul Informațional al Mediului (SIM) [2].

Bibliografie

1. **CELLIER, F.:** Mixed Quantitative and Qualitative Modelling and Simulation. In *Proc. of the European Simulation Symposium* (Delft), 1993, pp 761-762.
2. **MARINESCU, M., MARINESCU, V., BARBU, C., FILIP, F. G.:** Spatial Decision Support and Their Applications to Environment-Related Problems In: *Proc. of*

Western MultiConference on Computer Simulation - WMC' 99, vol. Mission Earth, pp.71-74, San Francisco, 1999.

3. **NAKAMORI, Y. and SAWARAGI, Y.:** Methodology and Systems for Environmental Decision Support. In: *Preprints of IFAC Symposium Large Scale System* (London), 1995, vol.1, pp 1-11.
4. **OGLESBY, R. J. & all:** Assessing the Role of Climate in Environmental Modeling. In: *Proc. of Western MultiConference on Computer Simulation - WMC'99*, vol. Mission Earth, pp.27-32, San Francisco, 1999.
5. **SILJAK, D.D.:** Complex Dynamic Systems: Dimensionality, Structure and Uncertainty. *Large Scale Systems*, 1983, vol. 4, pp 278-294.
6. **STĂNCIULESCU, F., & all.:** Biblioteca de modele de simulare și control pentru ecologie și protecția mediului. In: *Revista Română de Informatică și Automatică*, Vol. 6, nr. 4, pp. 23-36, 1996.
7. **STĂNCIULESCU, F.:** An Expert System for large complex ecological problems solving and environmental protection. In: *Proc. of Western MultiConference on Computer Simulation - WMC' 99*, vol. Mission Earth, , San Francisco, 1999, pp.114-119.
8. **STĂNCIULESCU, F. & all.:** Sisteme telematice cu aplicații în ecologie. Raport de cercetare, ICI București, 1998.
9. **STĂNCIULESCU, F.:** Hybrid Modelling of Complex Systems and its Applications in Knowledge-based Simulation&Control. In: *Proceedings of the 15th IMACS World Congress on Scientific Computation, Modelling and Applied Mathematics*, W&T Verlag (Berlin, A.Sydow, ed.), 1997a, pp. 1-6.
10. **STĂNCIULESCU, F.:** Simulation and Control of Environmental Systems using a Mathematical-Heuristic Model and Algorithm. An Application to Danube Delta System. In: *Environmental Modelling & Software* (USA), 1997b, Vol. 12, Nos. 2-3, 211-218.
11. **STĂNCIULESCU, F.:** Hybrid Simulation of Control Engineering Systems and its Applications in Large Complex Environmental Systems. In: *Proceedings Eurosim' 98 Simulation Congress* (Helsinki, K. Juslin, ed), 1998a, Vol.2, pp 261-268.
12. **STĂNCIULESCU, F.:** Hybrid modelling of large complex systems under uncertainty conditions. Applications in simulations and control. In: *Preprints 8th Symposium on Large Scale Systems* (Patras, P. Groumpos, ed.), 1998b, vol. 1, 109-114.
13. **ZADEH, L.A.:** Fuzzy Control: Issues, Contention and Perspective. In: *13th IFAC Triennial World Congress* (San Francisco), 1996, pp 35-38.
14. **ZANNETTI, P. (ed.):** Environmental Modelling. Vol. 1-3, Computational Mechanics Publications, Southampton, 1996.