

BIBLIOTECA DE MODELE DE SIMULARE ȘI CONTROL PENTRU ECOLOGIE ȘI PROTECȚIA MEDIULUI

dr.ing. Florin Stănculescu
mat. Victor Popa
ing. Adriana Zamfir
mat. Marius Mincă

Institutul de Cercetări în Informatică

Rezumat: Se prezintă o bibliotecă de modele, destinată realizării de experimente de simulare și de control pentru ecologie și protecția mediului. Biblioteca de modele are o structură ierarhizată pe 5 niveluri: nivel global; mediu acvatic, terestru, atmosferic, ecologie, modele operationale, submodele, formule de calcul. Ea permite utilizatorului să creeze propriile sale modele de simulare și de control, utilizând facilitățile limbajului de simulare Mathcad sub Windows, dacă dispune de un PC 386 sau superior. Modelele existente în bibliotecă au fost testate și validate în aplicații reale (cum sunt: ecosistemul Delta Dunării, un ecosistem forestier, difuzia substanțelor chimice industriale poluante, în atmosfera orașului București și altele).

Cuvinte cheie: model, simulare, control, ecologie, protecția mediului.

1. Introducere

Biblioteca de modele de simulare și de control pentru ecologie și protecția mediului este una dintre componentele principale ale sistemului expert pentru modelarea, simularea și controlul sistemelor complexe, cu aplicație la supravegherea mediului și a proceselor industriale implicate. Astfel de modele de simulare și de control pentru mediu au fost realizate, dar trebuie subliniat caracterul lor particular, în contrast cu caracterul exhaustiv al bibliotecii prezentată în lucrarea de față.

Rațiunea care a stat la baza deciziei de a realiza o bibliotecă incluzând o gamă amplă de modele de simulare și de control pentru ecologie și protecția mediului are la bază următoarele:

- mediul înconjurător este un sistem mare, complex care include mediul acvatic, mediul terestru și mediul atmosferic, fiecare din acestea având particularitățile sale. Este normal ca această complexitate să se reflecte și în biblioteca de modele de simulare și de control pentru mediu;
- dacă unele probleme de mediu privesc o anumită componentă a acestuia (de exemplu: eutrofizarea unui lac), altele implică mai multe componente ale acestuia (de exemplu: ploaia acidă, rezultată din poluarea atmosferei cu

efectele ei nocive asupra pădurilor); de aici, nevoia unei biblioteci de modele de simulare și de control cât mai completă.

Biblioteca de modele de simulare și de control pentru mediu a fost creată pentru următoarele scopuri:

(1) *Rezolvarea prin simulare a problemelor complexe privind mediul înconjurător, caracterizarea stadiului actual al sistemelor ecologice și/sau controlul acestora de către om. Ca exemplu se pot da:*

- simularea și controlul procesului de eutrofizare a apei lacurilor mari;
- simularea și controlul populațiilor de păsări ihtiofage (ex. cormoranul);
- controlul factorului de îmbospătare a apei;
- fundamentarea (prin simulare) a măsurilor de prezervare a speciilor rare, pe cale de dispariție (ex. pelicanul creț din Delta Dunării) sau a unor specii cu valoare economică ridicată (ex. sturionii și alte specii din Delta Dunării);
- simularea și controlul procesului de creștere a biomasei vegetale vii, atât în sistemele ecologice antropizate (ex. agroecosisteme), cât și în cele naturale (ex. ecosisteme forestiere);
- simularea și controlul procesului de difuzie a substanțelor chimice industriale poluante, în atmosfera de tip urban.

Notă: Exemplele de mai sus nu cuprind nici pe departe gama largă de probleme complexe care pot fi rezolvate prin simulare, probleme privind mediul înconjurător, ele având doar caracterul de a ilustra ceea ce poate realiza această bibliotecă.

(2) *Construcția de noi modele de simulare și de control pentru mediu, precum și completarea modelelor existente cu noi submodele, restricții etc.*

Acest lucru este posibil prin faptul că, biblioteca de modele include două module speciale: un modul care conține submodele de simulare (interacțiunea a două specii, variația concentrației de fosfor în apă etc.) și un modul conținând formule de calcul utile în simulare (ex. calculul debitului de apă pe un canal, relația pradă-prădător etc.). Ambele module permit crearea de noi modele de simulare și/sau de control sau îmbogățirea modelelor existente cu noi submodele, atunci când utilizatorul consideră necesar acest lucru.

Se precizează faptul că, modelele de simulare și de control, submodelele și formulele de calcul,

incluse în bibliotecă, sunt izvorâte din necesitatea de a putea rezolva, prin simulare, problemele complexe ale mediului. În capitolele care urmează, se va demonstra că biblioteca de modele de simulare și de control pentru ecologie și protecția mediului răspunde scopurilor pentru care a fost creată.

Biblioteca de modele de simulare și de control are următoarele funcțiuni principale:

- *stocarea de modele de simulare și de control și algoritmi asociați* (pentru rezolvarea problemelor de ecologie și de protecția mediului);
- *asistarea utilizatorului* în operația de construire de noi modele (utile în rezolvarea problemelor), grație a două niveluri existente în bibliotecă: submodele de simulare (și de control) și formule de calcul;
- *furnizarea de modele experimentului de simulare și de control al proceselor ecologice și de mediu, continue și/sau discrete, cu evenimente discrete, deterministe sau nedeterministe (fuzzy).*

Interfața cu utilizatorul este asigurată, aceasta primind toate informațiile despre modelele aflate în bibliotecă și putând, la rândul-i, facilita operarea de modificări în modele.

Biblioteca de modele de simulare și de control primește intrări de la baza de date și oferă intrări (modele și algoritmi) programului de simulare. Ea este o bibliotecă complexă, având o structură ierarhizată (pe mai multe niveluri).

2. Modelele bibliotecii

Modelele aflate în bibliotecă se încadrează în următoarele tipuri de modele:

Modelul de simulare continuă / discretă

Acest model este reprezentat de un set de ecuații diferențiale și/sau cu timp discret. În primul caz acestea sunt discretizate (conform normelor din analiza matematică) pentru a face modelul de simulare numerică apt de a fi prelucrat de către calculator.

Se prezintă forma continuă a modelului:

$$dx_i(t)/dt = A_i x_i(t) + B_i u_i(t) + f_i(x_i(t)) + v_i(x_i(t)) \quad (1)$$

$$v_i = \sum_{j=1, j \neq i}^n g_{ij}(x(t)) \quad (2)$$

$$x(t_0) = x_{i0}, \quad (3)$$

$$i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m; k = 0, 1, 2, \dots, k_i$$

Modelului de simulare (1)-(3) i se atașează restricțiile:

$$x_{i1} < x_i < x_{i2} \quad (4)$$

(de apartenență la intervalele dorite de expert)

$$u_{i1} < u_i < u_{i2} \quad (5)$$

(de admisibilitate a comenzii)

unde: (1) reprezintă ecuațiile de stare ale modelului, A_i , B_i matricile de stare, respectiv de comandă; f_i funcțiile vectoriale, care descriu neliniaritățile procesului; v_i descrie interacțiunile dintre procesul i și celelalte $n-1$ procese; x_{i0} starea inițială a procesului i .

Pentru rezolvare, acest model se discretizează, obținându-se un set de ecuații cu timp discrete, de forma:

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

$$v_i = \sum_{j=1, j \neq i}^n g_{ij}(x(k)) \quad (2')$$

$$x_i(0) = x_{i0}, i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, m; k=0, 1, \dots, k \quad (3')$$

cu aceleași restricții.

Rezultatul acțiunii de rezolvare prin simulare a modelului de simulare (1)-(3) este o matrice de stare X având forma:

$$X = \begin{pmatrix} & 0 & 1 & 2 & \dots & k & \dots & k_f \\ x_1 & x_{10} & x_{11} & x_{12} & & x_{1k} & \dots & x_{1kf} \\ x_2 & x_{20} & x_{21} & x_{22} & & x_{2k} & \dots & x_{2kf} \\ \vdots & & & & & & & \\ \vdots & & & & & & & \\ x_n & x_{n0} & x_{n1} & x_{n2} & \dots & x_{nk} & \dots & x_{nkf} \end{pmatrix}$$

Modelul de simulare cu evenimente discrete

Pornind de la matricea rezultatelor de simulare numerică X , se construiește matricea booleană X ale cărei elemente sunt stări cu evenimente discrete:

$$X_i(k) = \begin{cases} 1, & \text{daca } x_i \in [x_{i1}, x_{i2}] \\ 0, & \text{daca } x_i \notin [x_{i1}, x_{i2}] \end{cases} \quad (6)$$

$$i = 1, 2, \dots, n; k = 1, 2, \dots, k_f$$

Ca rezultat, se obține o matrice booleană de forma (exemplu):

$$X = \begin{pmatrix} & 0 & 1 & 2 & \dots & \dots & k_i & \dots & k_f \\ X_1 & 1 & 1 & 0 & \dots & \dots & 1 & \dots & 1 \\ X_2 & 0 & 1 & 1 & \dots & \dots & 0 & \dots & 1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ X_n & 1 & 0 & 1 & \dots & \dots & 0 & \dots & 1 \end{pmatrix}$$

Cu ajutorul mărimilor de stare cu evenimente discrete, $X_i(k)$, se construiește modelul procesului cu evenimente discrete. Acesta este un model diferențial boolean de forma:

$$Y_i(k+1) = \overline{X_1}(k) \circ \overline{X_2}(k) \circ \dots \circ \overline{X_n}(k), \quad (7)$$

$i=1, 2, \dots, n$

unde operatorul "o" poate fi oricare dintre operatorii "∧" (și), "∨" (sau),

iar $\overline{X_i}(k)$ poate fi $X_i(k)$ sau $\neg X_i(k)$

Dacă:

$$Y_i(k) = \begin{cases} 1, & \text{procesul de simulare continua} \\ & \text{(nu se semnaleză apariția unui} \\ & \text{eveniment discret)} \\ 0, & \text{procesul de simulare este oprit} \\ & \text{și se alertează modulul de control} \\ & \text{(un eveniment discret a apărut)} \end{cases}$$

($i=1, 2, \dots, n$)

Modelul de control bazat pe cunoștințe

Acest model este compus din reguli euristice, derivate din cunoștințe preluate de la expert, ca și din fapte din proces.

Regulile euristice au fost grupate în trei clase de reguli, și anume:

(a) Regulile euristice de comportare

Aceste reguli au forma standard:

$$\begin{aligned} < \text{Dacă } C_{i1}(k) \circ C_{i2}(k) \circ \dots \circ C_{in}(k), \\ \text{Atunci } x_i(k) > \quad (bf) \quad i=1, 2, \dots, n \end{aligned} \quad (8)$$

citeste: dacă condițiile $C_{i1}, C_{i2}, \dots, C_{in}$ sunt îndeplinite la momentul de timp k , atunci sistemul se afla în starea $x_i(k)$;

(b) Regulile euristice de control

Aceste reguli au forma standard:

$$\begin{aligned} < \text{Dacă } C_i(k) \wedge u_j(k+1) \leftarrow u_j(k) + \Delta u_j(k), \\ \text{Atunci } x_i(k+1) > \quad (bf), \quad i=1, 2, \dots, n \end{aligned} \quad (9)$$

citeste: dacă este îndeplinită condiția C_i la momentul k și comenzii $u_j(k+1)$ i se asignează valoarea precedentă plus un increment $\Delta u_j(k)$, atunci sistemul trece în starea $x_i(k+1)$;

(c) Regulile euristice de decizie

Aceste reguli au una din formele standard:

$$\begin{aligned} < \text{Dacă } x_i(k) < x_{i1} \\ \text{Atunci } u_j(k+1) \leftarrow u_j(k) + \Delta u_j(k) > \quad (bf) \\ i=1, 2, \dots, n \end{aligned} \quad (10')$$

citeste: dacă $x_i(k)$ este inferioară limitei minime x_{i1} , atunci modifică comanda $u_j(k+1)$ asignându-i valoarea $u_j(k) + \Delta u_j(k)$,

sau:

$$\begin{aligned} < \text{Dacă } x_i(k) > x_{i2}, \\ \text{Atunci } u_j(k+1) \leftarrow u_j(k) - \Delta u_j(k) > \quad (bf) \end{aligned} \quad (10'')$$

citeste: dacă $x_i(k)$ este superioară limitei maxime x_{i2} , atunci modifică comanda $u_j(k+1)$, asignându-i valoarea $u_j(k) - \Delta u_j(k)$.

În regulile euristice (8), (9), (10'), (10''), bf reprezintă coeficientul de încredere sau de (in-)certitudine (în sens fuzzy sau probabilistic) acordat regulii respective.

Modelul de control fuzzy

Teoria (și logica) sistemelor fuzzy este o nouă abordare în simularea și în controlul sistemelor, dezvoltată în ultimii ani. Important este faptul că, în momentul de față, se tratează prin metode fuzzy sisteme multivariabile, care, în plus, sunt și neliniare, ceea ce este important, dacă se ține seama de faptul că, multe procese (ex. cele întâlnite în sistemele naturale, care îi preocupă și pe autori) sunt neliniare.

În această lucrare, se va insista asupra modelului de simulare și de control fuzzy și, mai ales, asupra modelului regulatorului fuzzy, interesant prin generalitatea sa și prin ușurința de adaptare la orice sistem. Schema generală de construcție a unui astfel de model fuzzy este următoarea:

Intrare \rightarrow Fuzzificare \rightarrow Inferență \rightarrow Ieșire \rightarrow Defuzzificare

Componenta principală a modelului fuzzy este baza de reguli euristice, împreună cu mecanismul de inferențe (din motorul inferențial). El consta din reguli de decizie euristice, care pot fi privite ca o aproximare a unei funcții complexe, ca reguli de forma "dacă-atunci". Premisele și consecințele acestor reguli sunt funcții de apartenență.

Funcțiile de apartenență sunt triunghiulare (sau trapezoidale), simetrice și regulat spațiate.

Se consideră un element fuzzy, care poate fi descris sub forma:

$$DAC\ddot{A} X \text{ este } A_i, ATUNCI Y \text{ este } B_i \quad (11)$$

unde $1 \leq i \leq n$, X este universul tuturor intrărilor și Y este universul tuturor ieșirilor; A_i și B_i sunt denumite mulțimi fuzzy, dacă funcțiile de apartenență ale lor, $\mu_{A_i}(x)$ și $\mu_{B_i}(y)$ iau valori în intervalul $[0,1]$, atunci când $x \in X$, $y \in Y$. Cele mai comune funcții, utilizate în practică, sunt cele triunghiulare și cele trapezoidale. Numerele fuzzy sunt utilizate pentru a defini variabile lingvistice, de exemplu, în figura 1, variabila x_i poate lua una din cele cinci valori lingvistice:

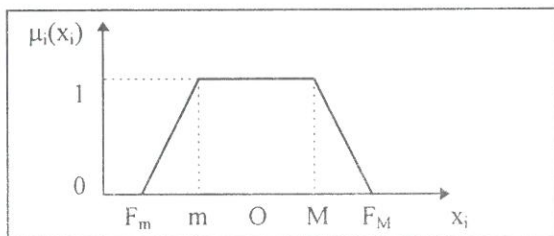


Figura 1. Funcția de apartenență trapezoidală

M (Mare); m (mic); O (optim); Fm (Foarte mic);

FM (Foarte Mare); derivata dx_i ia valoarea ZE (Zero), în loc de O.

Matricile de reguli euristice sunt (anti)simetrice:

$dX \backslash X$	NL	NS	O	PS	PL
NL	S1	S2	S3	S4	S5
NS	S2	S3	S4	S5	S6
ZE	S3	S4	S5	S6	S7
PS	S4	S5	S6	S7	S8
PL	S5	S6	S7	S8	S9

Metoda de defuzzificare utilizată este cea a centrelor de greutate, care poate fi definită cu ajutorul relației:

$$du = \sum_i \mu_i(x_i) u_i / \sum_i \mu_i(x_i) \quad (12)$$

unde μ_i sunt funcțiile de apartenență, iar u_i sunt valorile mărimii de comandă.

Mărimea de comandă trimisă procesului condus este:

$$u(k+1) = u(k) + K \cdot du \quad (13)$$

unde K este un coeficient de ponderare (cuprins între 0 și 1), dat de către expert.

Așadar, se poate acum rezuma metoda de construire a unui model de simulare și de control fuzzy astfel:

1. se modelează procesul condus cu ajutorul modelului (diferențial) cu timp discret:

$$x(k+1) = f(x(k), u(k)), x(0) = x_0 \quad (14)$$

$$y(k+1) = g(x(k), u(k)), u(k) \in \mathbf{R}^m \quad (15)$$

2. cu ajutorul formulelor de calcul (12) și (13) și al funcțiilor de apartenență se află incrementul du și noua valoare a comenzii $u(k+1)$.

3. se construiește matricea de reguli euristice de forma:

$$(R_j) \text{ "DAC\ddot{A } } y_j(k) \text{ este } A_j \text{ și } u_j(k) \text{ este } B_j, \\ \text{ATUNCI } y_j(k+1) \text{ este } C_j \text{"}, \quad (16) \\ j = 1, 2, \dots$$

3. Structura bibliotecii de modele

În paragrafele precedente, s-a subliniat faptul că, biblioteca de modele de simulare și control pentru ecologie și protecția mediului este complexă. Dacă se adaugă și faptul că, modelele respective prezintă și un anumit grad de varietate, atât după mediu (acvatic, terestru, atmosferic), cât și din punct de vedere matematic (continue, discrete, cu evenimente discrete sau bazate pe cunoștințe), rezultă nevoia unei structuri ierarhizate a acestei biblioteci. În figura 2, biblioteca de modele de simulare și de control pentru mediu este prezentată având o structură ierarhizată pe 5 niveluri:

Nivelul 1: Modelul global de simulare și de control al mediului înconjurător;

Nivelul 2: Modele de simulare și de control, specifice celor 3 tipuri de probleme de mediu (acvatic, terestru și atmosferic) și ecologie;

Nivelul 3: Modele operaționale de simulare și de control pentru ecologie și protecția mediului;

Nivelul 4: Submodele de simulare și de control (pentru asistarea utilizatorului în construirea de noi modele);

Nivelul 5: Formule de calcul (utile în probleme de ecologie și protecția mediului).

Această structură ierarhizată permite accesul (secvențial) la oricare din modelele aflate în

biblioteca, îmbunătățirea unui model existent, crearea de noi modele, efectuarea de experimente de simulare și de control, pentru asistarea deciziei în probleme de mediu înconjurător (ex. sisteme naturale, sisteme ecologice etc.).

3.1 Descrierea modelelor aflate la diferite niveluri

Modelul global.

Modelul global de simulare și de control, pentru rezolvarea (prin simulare) a problemelor complexe ale mediului înconjurător, trebuie privit, de fapt, ca un model complex, rezultat din reuniunea modelelor existente în bibliotecă (sau numai a unei părți semnificative a acestora), în scopul rezolvării problemelor complexe.

Asadar, în cazul în care utilizatorul are de rezolvat o problemă complexă de mediu, la rezolvarea căreia concurează modele ale unor procese acvatic, terestre și/sau atmosferice, acesta va selecta modelele indicate în acest scop și va constitui el însuși modelul global. Un exemplu poate fi util în acest caz:

Problema ploii acide (care afectează ecosistemele forestiere). În acest caz, modelul global va apela modele specializate ca: modelul de simulare a difuziei substanțelor chimice industriale poluante în atmosferă, modelul de simulare a ecosistemului forestier și va evidenția interacțiunea ecosistem terestru-ecosistem atmosferic.

Problema irigației agro-ecosistemelor. În acest caz, modelul global va apela la modele specializate ca: modelul de simulare hidrologic (al râului, lacului etc.) și modelul de simulare a agroecosistemului (ca sistem ecologic controlat de om). Modelul global va evidenția interacțiunea ecosistem acvatic-ecosistem terestru.

Modele specifice mediului acvatic, terestru, atmosferic. Modele ecologice

La acest nivel, se pot considera modele complexe, care sunt realizate pentru a rezolva probleme referitoare la un mediu omogen: acvatic, terestru sau atmosferic (eventual o problemă de natură ecologică, cum ar fi dinamica unei populații).

Modele specifice mediului acvatic. Modelele specifice mediului acvatic sunt ele însele modele complexe, deoarece în mediul acvatic întâlnim astfel de procese ca: procese hidrologice (circulația apei, nivelul, adâncimea și volumul apei, împropătarea apei), procese chimice (evoluția concentrației de substanțe nutritive și/sau substanțe poluante în apă etc) și procese biohidrochimice (eutrofizarea apei, dinamica biomaselor și/sau numărului de indivizi dintr-o specie care trăiește în apă etc.)

Pentru a realiza un astfel de model, modelul DELTA utilizează modelele operaționale: HYDRO, PELICAN, CORMORAN ș.a.

Modele specifice mediului terestru. Aceste modele sunt, de asemenea, modele complexe, rezultate din mai multe submodele, care surprind procese care au loc: în sol (ex. biodescompunerea substanțelor moarte, chimismul solului - substanțe nutritive, levigarea solului etc.), în plantă (fotosinteza) și relația sol-plantă (hrănirea plantei ș.a.). Astfel de modele vizează simularea și controlul ecosistemelor terestre naturale (ex. un ecosistem forestier) - modelul FOREST sau a unui ecosistem terestru controlat de om (ex. un agroecosistem) - modelul SOL.

Modele specifice mediului atmosferic. Sunt, de asemenea, modele complexe, cele mai multe fiind modele care concurează la simularea și controlul difuziei substanțelor chimice industriale poluante în atmosfera de tip urban. Biblioteca de modele de simulare și de control pentru mediu dispune de 6 astfel de modele, capabile să simuleze repartitia spațială a substanțelor chimice industriale poluante, pe o rază de câteva mii de metri de la sursă și harta conținând curbele de izopoluare (curbe de-a lungul cărora concentrația de poluant este aceeași), pentru astfel de poluanți ca: SO₂, NO₂, acetat de etil, toluen ș.a. (modelele DIFUZIE 1-6).

Modele ecologice. Aceste modele sunt modele (complexe) care intră în componența modelelor precedente, dar pot fi folosite și în experimente de simulare separate, ele referindu-se la simularea dinamicii unor specii (cum ar fi specii de păsări ihtiofage din Delta Dunării, pelicanul și cormoranul).

Modele operaționale

La acest nivel, biblioteca de modele de simulare și de control grupează o serie de modele specifice, care pot fi direct utilizate în simulare și în control, și anume:

Modelul HYDRO. Acest model este utilizabil în experimente de simulare și de control ale unui sistem hidrologic (ex. lac, râu, canal de apă, rețea de lacuri, sistem deltaic/o deltă etc.), putând furniza - sub forma grafică sau numerică - evoluția unor mărimi cu caracter hidrologic: debite de apă, nivelul, adâncimea și volumul apei acumulate, factorul de împropătare a apei etc., precum și controlul acestor mărimi de stare, în sensul menținerii lor în limitele prescrise de către expert (în colaborare și cu baza de cunoștințe și cu un algoritm de control euristic). Modelul include ecuații diferențiale neliniare (discretizate), ecuații diferențiale booleene, formule de calcul specifice, restricții etc. și a fost aplicat în cazul sistemului Delta Dunării.

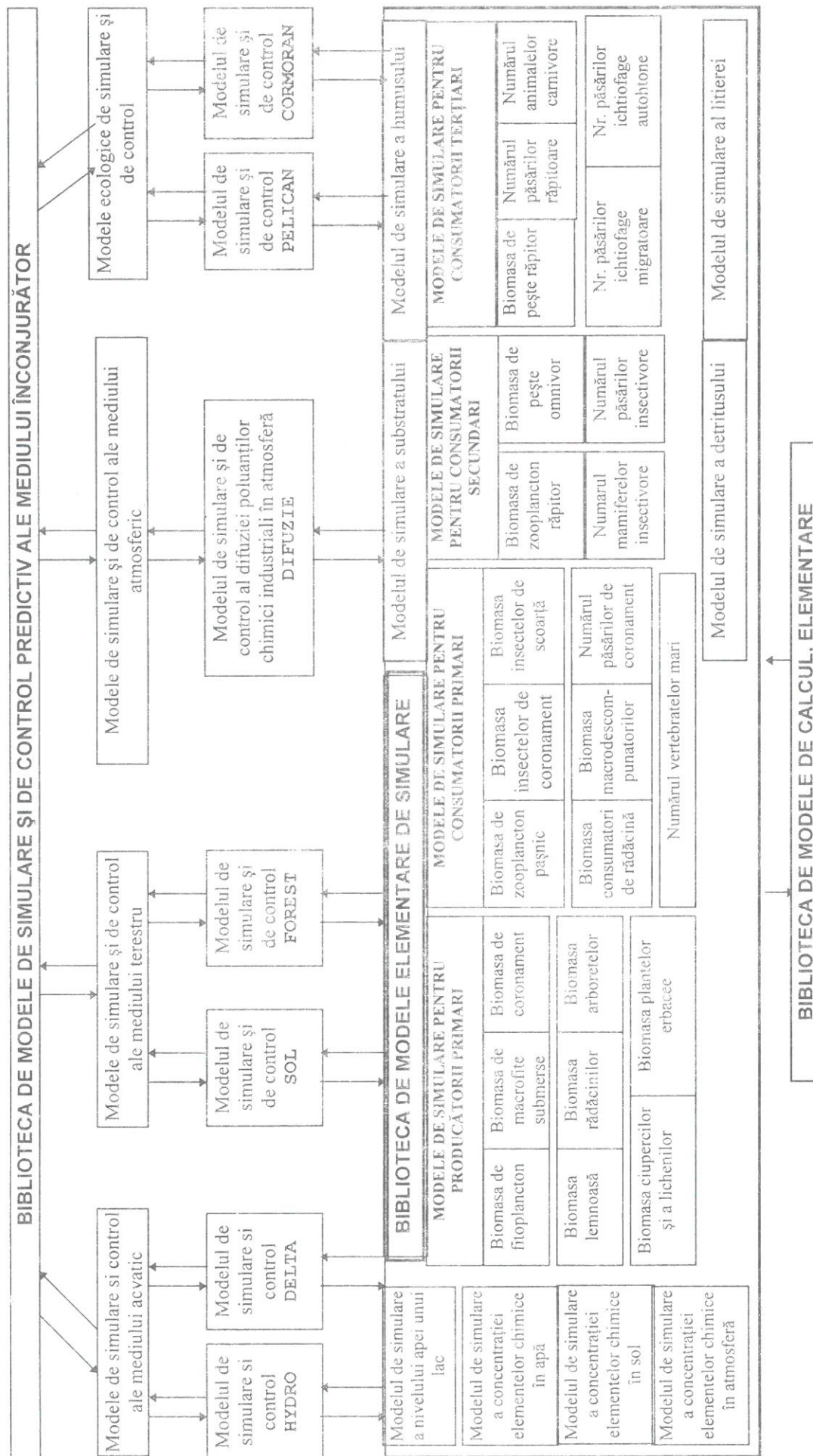


Figura 2. Structura bibliotecii de modele de simulare și de control pentru ecologie și protecția mediului

Modelul DELTA. Acest model realizează tot ceea ce realizează modelul HYDRO și, în plus, permite simularea proceselor chimice (chimismul apei - concentrația de substanțe nutritive și de substanțe poluante), dar și a proceselor bio-hidrochimice (eutrofizarea apei, evoluția biomasei unor specii, de la cele de fitoplancton până la peștele cu valoare economică ridicată); el include și modelele PELICAN și CORMORAN, precum și controlul acestor mărimi de stare, în sensul menținerii lor în limitele prescrise de către expert (în colaborare și cu baza de cunoștințe și cu un algoritm de control euristic). Modelul include ecuații diferențiale neliniare (discretizate), ecuații diferențiale booleene, formule de calcul specifice, restricții etc. și a fost aplicat în cazul sistemului Delta Dunării.

Modelul SOL. Acest model este destinat simulării și controlului ecosistemelor terestre supravegheate de om/agroecosisteme și a fost aplicat la simularea și în controlul relației sol-plantă, în cadrul unui agroecosistem, în care se cultivă cereale. Se simulează procesele pedologice (ex. descompunerea literei (reprezentată de substanța organică moartă), acumularea humusului, levigarea, chimismul solului ș.a.). Modelul include ecuații diferențiale neliniare (discretizate), ecuații diferențiale booleene, formule de calcul specifice, restricții etc.

Modelul FOREST. Acest model este destinat simulării și controlului ecosistemelor terestre naturale, mai exact ecosistemelor forestiere, și permite simularea proceselor din sol, a relației sol-arbore și a creșterii biomasei forestiere. Modelul include ecuații diferențiale neliniare (discretizate), ecuații diferențiale booleene, formule de calcul specifice, restricții etc. și a fost aplicat în cazul unui ecosistem forestier din zona colinară (mai exact de fâget - pădure de fag).

Modelul DIFUZIE. Acest model este destinat simulării și controlului difuziei substanțelor chimice industriale poluante (ex. SO₂, NO₂, acetat de etil, toluen), în atmosfera de tip urban. El permite trasarea curbelor care arată modul de răspândire a poluantului și trasarea hărților cuprinzând curbele de izopoluare. Modelul este un model de tip gaussian (rezultat din rezolvarea ecuației cu derivate parțiale a difuziei), incluzând formule de calcul specifice (unele euristice) etc. și a fost aplicat pentru a simula difuzia unor substanțe chimice industriale poluante în atmosfera orasului București.

Modelul PELICAN. Acest model permite simularea și controlul dinamicii efectivelor unei populații de păsări ihtiofage migratoare (în speță pelicanul). Este compus din ecuații cu diferențe finite, formule de calcul specifice, restricții etc. Furnizează numărul de păsări adulte, subadulte și pui și prezintă evoluția acestora sub forma grafică

sau numerică. A fost aplicat la cazul populației de pelicani din Delta Dunării.

Modelul CORMORAN. Acest model permite simularea și controlul dinamicii (efectivelor) unei populații de păsări ihtiofage nemigratoare (în speță cormoranul). Este compus din ecuații cu diferențe finite, formule de calcul specifice, restricții etc. Furnizează numărul de păsări adulte, subadulte și pui și prezintă evoluția acestora sub forma grafică sau numerică. A fost aplicat la cazul populației de cormorani din Delta Dunării.

Notă: Toate modelele prezentate permit simularea și controlul proceselor respective (cu ajutorul unor algoritmi specializați) și furnizează rezultatele, atât grafic, cât și numeric.

Submodelele pentru mediu

Submodelele pentru mediu sunt grupate în directorul SUB din Mathcad și sunt reprezentate prin următoarele subdirectoare și fișiere (acestea din urmă au extensia ".mcd", specifică limbajului de simulare Mathcad):

- subdirectorul CS, care conține două fișiere referitoare la concentrația elementelor chimice în apă:
 - *cn.mcd* - se referă la modelarea și la simularea concentrației compușilor de azot în apă;
 - *cp.mcd* - se referă la modelarea și la simularea concentrației de fosfor în apă;
- subdirectorul CS1, care conține două fișiere referitoare la concentrația elementelor chimice în sol:
 - *cn1.mcd* - se referă la modelarea și la simularea concentrației compușilor de azot în sol;
 - *cp1.mcd* - se referă la modelarea și la simularea concentrației de fosfor în sol;
- subdirectorul CS2, care conține următoarele fișiere:
 - *gaz.mcd* - se referă la modelarea și la simularea unui gaz poluant în atmosferă;
 - *izo.mcd* - se referă la metoda trasării curbelor de izopoluare;
- subdirectorul MSBPP - Modele de Simulare a Biomasei Producătorilor Primari, care conține 8 fișiere:
 - *bfp.mcd* - biomasa de fitoplancton (înmulțirea explozivă a fitoplanctonului constituie

- procesul de eutrofizare, "înflorire" a apelor și, în special, a lacurilor)
- *bms.mcd* - biomasa de macrofite submerse
 - *bco.mcd* - biomasa coronamentului
 - *blm.mcd* - biomasa lemnoasă
 - *brd.mcd* - biomasa rădăcinilor
 - *bpi.mcd* - biomasa plantelor ierboase
 - *bcl.mcd* - biomasa ciupercilor și lichenilor
 - *bar.mcd* - biomasa arboretelor
- subdirectorul MSBNCP - Modele de Simulare a Biomasei sau a Numarului Consumatorilor Primari, care conține 7 fișiere:
 - *bzp.mcd* - biomasa de zooplanton pașnic
 - *bic.mcd* - biomasa insectelor de coronament
 - *bis.mcd* - biomasa insectelor de scoarță
 - *bcr.mcd* - biomasa consumatorilor de rădăcini
 - *bmd.mcd* - biomasa microdescompunătorilor (în aceasta categorie intră: bacterii, fungi-ciuperci microscopice etc.)
 - *npc.mcd* - numărul păsărilor de coronament
 - *nvm.mcd* - numărul de vertebrate mari
 - subdirectorul MSBNCS - Modele de Simulare a Biomasei sau a Numărului Consumatorilor Secundari, care conține 4 fișiere:
 - *bzr.mcd* - biomasa de zooplancton răpitor
 - *bpo.mcd* - biomasa de pește omnivor (pașnic)
 - *npi.mcd* - numărul păsărilor insectivore
 - *nmi.mcd* - numărul mamiferelor insectivore
 - subdirectorul MSBNCT - Modele de Simulare a Biomasei sau a Numărului Consumatorilor Terțiari, care conține 5 fișiere:
 - *bpr.mcd* - biomasa de pește răpitor
 - *npr.mcd* - numărul păsărilor răpitoare
 - *nac.mcd* - numărul animalelor carnivore
 - *npim.mcd* - numărul păsărilor migratoare
 - *npia.mcd* - numărul păsărilor autohtone (nemigratoare)
 - fișierul *d.mcd*, care conține modelarea și simularea *detritusului* (detritusul este reprezentat de litiera aflată într-o primă fază de descompunere);
 - fișierul *h.mcd*, care conține modelarea și simularea *humusului* (humusul este reprezentat de partea fertilă a solului rezultată prin descompunerea substratului sub acțiunea biodescompunătorilor);
 - fișierul *ha.mcd*, care conține modelarea și simularea *nivelului apei într-un lac*;
 - fișierul *l.mcd*, care conține modelarea și simularea *litierii* (litiera este reprezentată de substanța organică moartă);
 - fișierul *s.mcd*, care conține modelarea și simularea *substratului*.

Formule de calcul specifice

Formulele de calcul specifice mediului sunt grupate în directorul FOR din Mathcad și sunt reprezentate prin 25 de fișiere:

1. fișierul *bio.mcd* conține formula pentru funcția de ponderare a creșterii biomasei vegetale;

2. fișierul *ec_difuz.mcd* conține simularea difuziei, bazată pe ecuația difuziei:

$$\frac{d}{dt} \cdot f(x, t) := \frac{d^2}{dx^2} \cdot f(x, t)$$

3. fișierul *evtv.mcd* conține expresia pierderilor de apă din sol prin evapo-transpirație;

4. fișierul *fc.mcd* conține funcția de ponderare a creșterii biomasei vegetale din punct de vedere al concentrației de dioxid de carbon;

5. fișierul *fh.mcd* conține funcția de ponderare a creșterii biomasei vegetale din punct de vedere al humusului;

6. fișierul *fi.mcd* conține funcția de ponderare a creșterii biomasei vegetale din punct de vedere al intensității luminoase;

7. fișierul *fn.mcd* conține funcția de ponderare a creșterii biomasei vegetale din punct de vedere al concentrației compușilor de azot;

8. fișierul *fp.mcd* conține funcția de ponderare a creșterii biomasei vegetale din punct de vedere al concentrației de fosfor;

9. fișierul *fph.mcd* conține funcția de ponderare a creșterii biomasei vegetale din punct de vedere al pH-ului;

10. fișierul *ft.mcd* conține funcția de ponderare a creșterii biomasei vegetale din punct de vedere al temperaturii aerului;

11. fișierul *fua.mcd* conține funcția de ponderare a creșterii biomasei vegetale din punct de vedere al umidității aerului;

12. fișierul *fus.mcd* conține funcția de ponderare a creșterii biomasei vegetale din punct de vedere al umidității solului;

13. fișierul *fv.mcd* conține funcția de ponderare a creșterii biomasei vegetale în raport cu viteza de circulație a apei;

14. fișierul *h_cald.mcd* conține expresia înălțimii la care se produce amestecul gazelor calde poluante (ex. dioxidul de sulf este un gaz cald) în atmosferă;

15. fișierul *h_rece.mcd* conține expresia înălțimii la care se produce amestecul gazelor reci poluante (ex. acetatul de etil este un gaz rece) în atmosferă;

16. fișierul *hh.mcd* conține expresia adâncimii apei unui lac;

17. fișierul *ostwald.mcd* conține formula lui Ostwald referitoare la capacitatea de plutire;

18. fișierul *p-p.mcd* conține expresia generală a relației pradă-pradator împreună cu o aplicație a acesteia;

19. fișierul *prodnet.mcd* conține formula de calcul a producției nete;

20. fișierul *q.mcd* conține formula de calcul a debitului;

21. fișierul *sigmaxyz.mcd* conține modelarea dispersiei unei substanțe poluante emisă de o sursă punctiformă;

22. fișierul *stze.mcd* conține expresia sumei temperaturilor zilnice eficiente;

23. fișierul *vl.mcd* conține expresia volumului apei unui lac;

24. fișierul *vs.mcd* conține ecuația de bilanț a cantității de apă din sol;

25. fișierul *w.mcd* conține expresia factorului de îmbospătare a apei unui lac.

Fiecare din cele 25 de fișiere din subdirectorul formulelor de calcul elementare - FOR conține un exemplu numeric și reprezentarea grafică a simulării rezultate în urma aplicării formulei elementare respective. Intervalul de simulare este specificat

prin:

$$k := 0..11$$

ceea ce înseamnă o perioadă de 12 luni.

Un model complex rezultă din combinarea formulelor elementare (reprezentate de fișierele directorului FOR) cu modele elementare (reprezentate de fișierele directorului SUB). Se va prezenta, în continuare, cazul uneia din cele 23 ecuații de stare ale modelului FOREST, și anume ecuația pe baza căreia se poate simula concentrația de fosfor din solul unei păduri, element important în procesul de creștere al pădurii.

La elaborarea acestei ecuații de stare s-au folosit fișierul *vs.mcd* din subdirectorul formulelor de calcul specifice - FOR, fișierele *cp.mcd*, *cp1.mcd* din subdirectorul CS, respectiv CS1, fișierul *bmd.mcd* din subdirectorul MSBNCP și fișierul *d.mcd*, care sunt incluse în directorul modelelor elementare - SUB.

3.2 Automatizarea căutării fișierelor în biblioteca de modele

Căutarea oricărui fișier, dintre cele prezentate mai sus, conținând modele complexe, submodele și / sau formule de calcul, se face prin selectarea unei ferestre (obiectul cu care se lucrează cel mai mult în Windows) în care se află butonul pe care este marcat numele modelului căutat. Fereastra primește datele de intrare de la utilizator prin intermediul mouse-ului și afișează în mod grafic datele de ieșire: pentru a deschide un fișier este suficient un clic cu mouse-ul, atunci când sageata este poziționată pe butonul respectiv.

Aplicația - numită ECO - a fost realizată folosind facilitățile limbajului de programare Visual C++.

După ce aplicația ECO este lansată, utilizatorul selectează comanda "MODELE" din meniul principal, după care, pe ecran, va apărea boxa numită "biblioteca". În această boxă se găsesc cinci butoane de control:

- butonul "apa"
- butonul "aer"
- butonul "sol"
- butonul "ecosisteme"
- butonul "submodele"

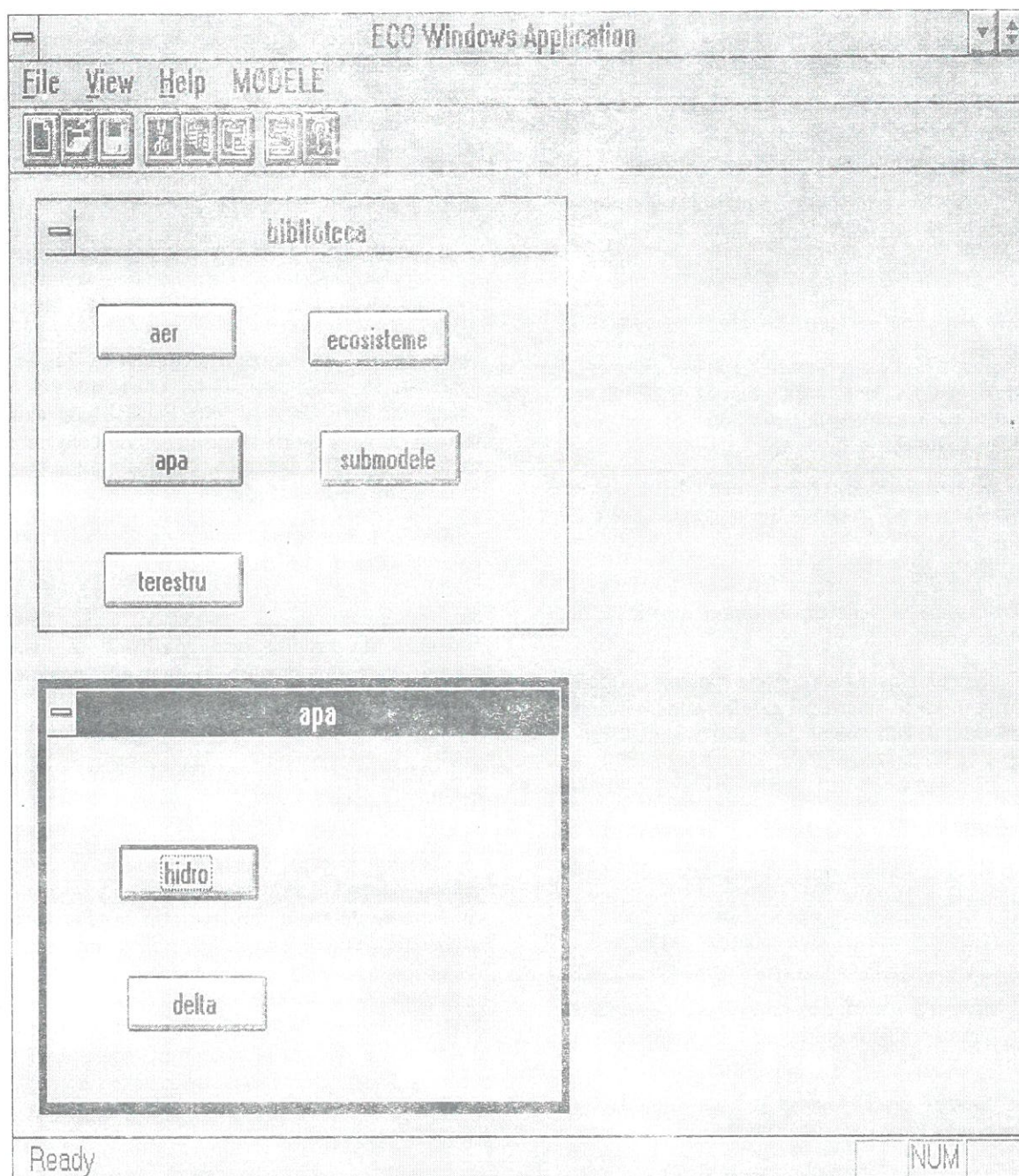


Figura 3. Ecranul conținând boxa cu cele 5 butoane de control principale și boxa cu cele două butoane “hidro” și “delta” (ale mediului acvatic)

Apăsând butonul “apa” ecranul curent este cel din figura 3 (partea de jos a figurii). Într-o versiune a ecranului apare și butonul “formule”. Apăsând butonul “aer”, pe ecran apar 6 butoane: difuzie 1, ..., difuzie 6; dacă se apasă butonul “terestru”, atunci pe ecran apar : “sol” și “forest”. La fel, dacă se apasă butonul “submodele” și “formule”, pe ecran apar 12, respectiv 25 de butoane.

La apăsarea butonului “ecosisteme” pe ecran apar butoanele “pelican” și “cormoran”.

4. Aplicații

Biblioteca de modele de simulare și de control pentru ecologie și protecția mediului își găsește utilizarea în realizarea de sisteme informatice și aplicații în domeniile menționate. Mai general, ea este utilă în acele aplicații care privesc sistemele naturale. Cu titlu de exemplu se vor prezenta câteva rezultate obținute în aplicații reale.

Aplicații în simularea difuziei substanțelor chimice industriale poluante în atmosfera urbană

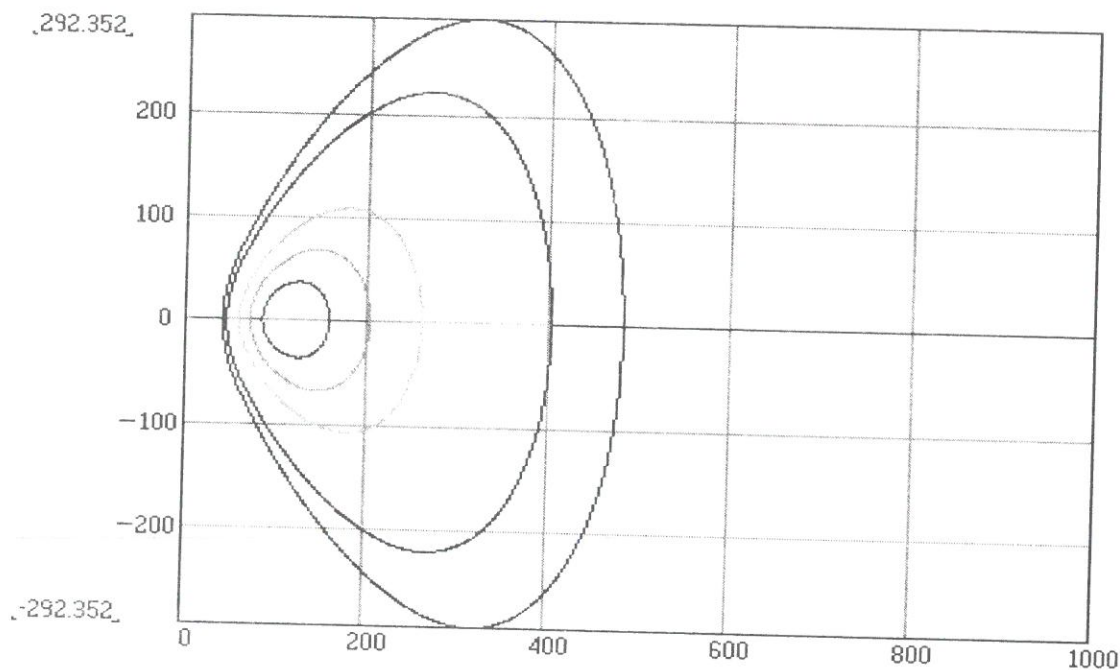


Figura 4. Harta curbelor de izopoluare pentru poluantul SO₂

S-au efectuat 4 astfel de experimente, pentru substanțele poluante: SO₂, NO₂, acetat de etil și toluen, utilizând modelul DIFUZIE.

În figura 4, se prezintă harta curbelor de izopoluare pentru substanța poluantă dioxid de sulf, în atmosfera urbana (Bucuresti), datorat unei surse punctiforme.

Aplicații în simularea și în controlul sistemelor acvatice

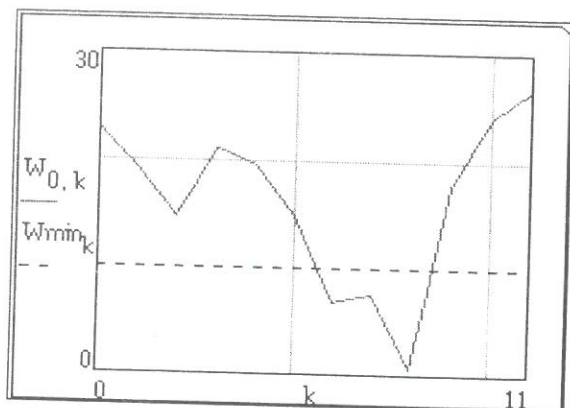


Figura 5. Rezultate de simulare a factorului de împrăștiere a apei

S-au efectuat mai multe experimente complexe, unul utilizând modelul HYDRO, celalalt utilizând modelul DELTA. Ambele experimente s-au referit la sistemul Delta Dunării și au fost efectuate cu date reale. În figurile 5-8, sunt redată 4 din cele mai semnificative rezultate, privind simularea și controlul factorului de împrăștiere a apei, a

biomasei de macrofite submerse și a biomasei de pește pașnic, respectiv răpitor.

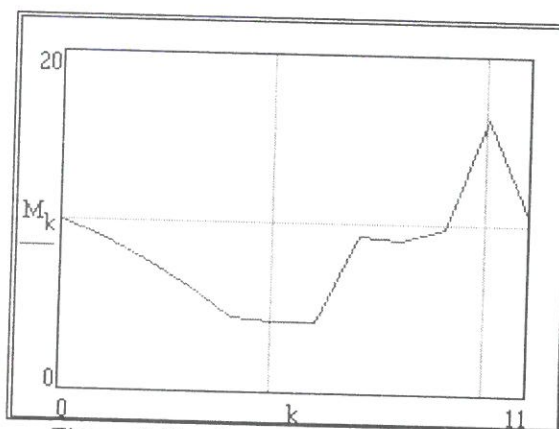


Figura 6. Simularea evoluției biomasei de macrofite submerse

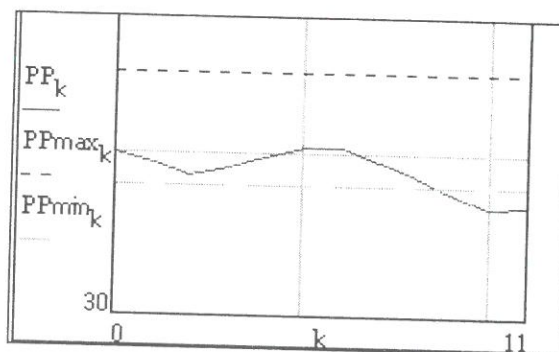


Figura 7. Simularea evoluției biomasei peștelui pașnic

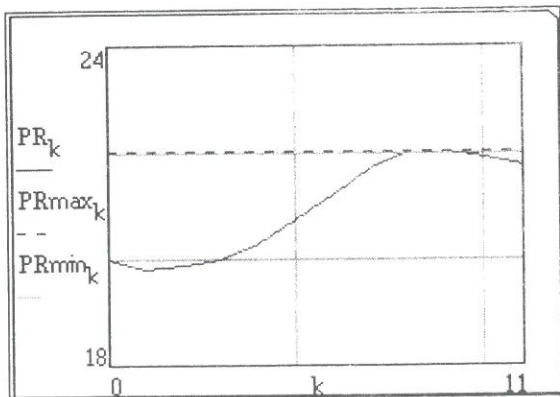


Figura 8. Simularea evoluției biomasei peștelui răpitor

De remarcant este faptul că, modelele HYDRO și DELTA permit optimizarea unor mărimi de stare (ex. biomasa piscicola).

Aplicații în simularea și controlul sistemelor terestre

S-au efectuat mai multe experimente complexe, utilizând modelele SOL (în cazul unui agroecosistem) și FOREST (în cazul unei păduri de fag). Rezultatele de simulare sunt prezentate (parțial) în figurile 9-12.

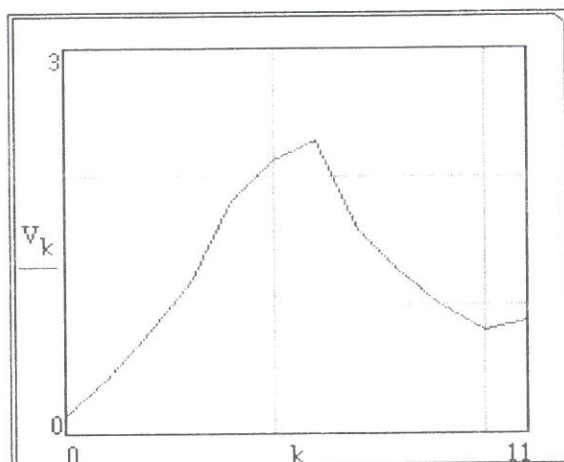


Figura 9. Simularea conținutului de apă din sol

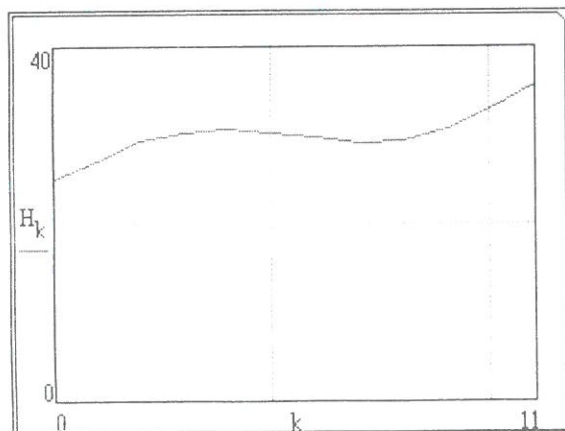


Figura 10. Simularea evoluției cantității de humus din sol

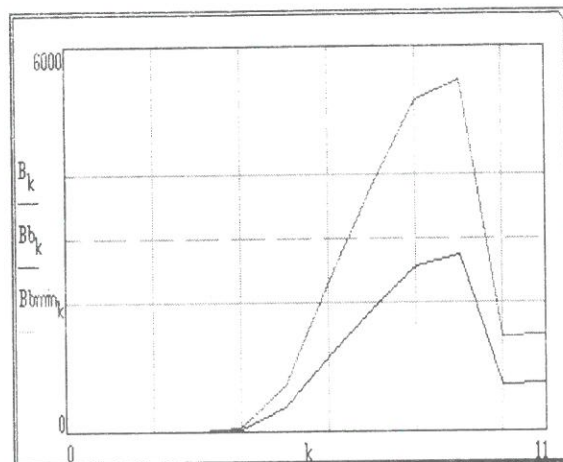


Figura 11. Simularea și controlul biomasei vegetale dintr-un agroecosistem

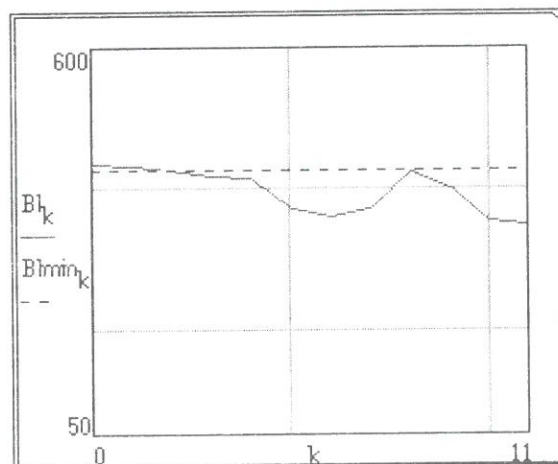


Figura 12. Simularea și controlul evoluției biomasei lemnoase dintr-un ecosistem forestier

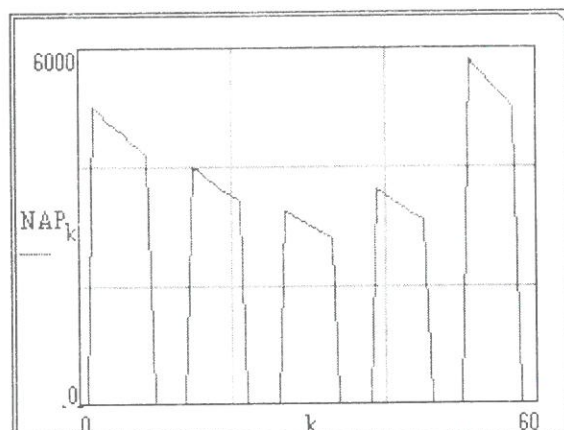


Figura 13. Simularea dinamicii populației de pelican comun din Delta Dunării

Aplicații în ecologie

Deși aplicațiile anterioare au caracter ecologic, aplicațiile de mai jos privesc direct simularea și controlul dinamicii unor populații care traiesc în arealul Delta Dunării, deci au un profund caracter

ecologic. S-a simulat pe calculator evoluția a două populații de păsări ihtiofage din Delta Dunării: una migratoare (pelicanul), cealaltă nemigratoare (cormoranul); rezultatele sunt date în figurile 13, 14.

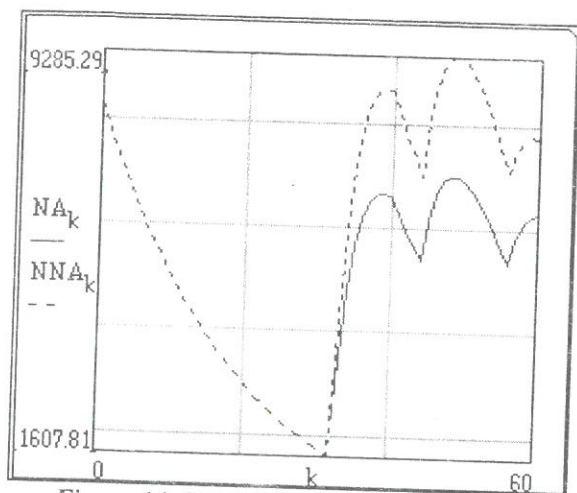


Figura 14. Simularea și controlul dinamicii populației de cormoran din Delta Dunării

7. Concluzii

Biblioteca de Modele de Simulare și Control pentru Ecologie și Protecția Mediului constituie (împreună cu baza de cunoștințe pentru mediu), unul dintre modulele esențiale ale sistemului expert pentru modelarea, simularea și controlul sistemelor complexe, cu aplicație la supravegherea mediului și a proceselor industriale implicate. Din experiența proprie, în domeniul modelării, simulării și controlului sistemelor ecologice, cât și din examinarea a numeroase realizări de software pentru mediu, a rezultat că, datorită complexității modelelor, Biblioteca trebuie să aibă o structură ierarhizată, pe 5 niveluri de complexitate (agregare), și anume:

- modelul global al mediului
- modele pentru mediul acvatic, terestru, atmosferic; modele ecologice
- modele operaționale
- submodele utilizabile în construcția de modele complexe
- formule de calcul specifice.

Modelele operaționale incluse în bibliotecă, ele însele modele complexe, care pot fi utilizate pentru a realiza experimente complexe de simulare și control, utile în asistarea deciziei în probleme de mediu, sunt:

- modelul HYDRO
- modelul DELTA
- modelul SOL

- modelul FOREST
- modelul DIFUZIE
- modelul PELICAN
- modelul CORMORAN

ale căror nume sunt caracteristice și pentru aplicațiile principale la care se referă (ex. modelul DELTA a fost realizat având în vedere simularea și de controlul sistemului Delta Dunării).

Modelele sunt (sau pot fi) alimentate dintr-o baza de date a mediului și/sau de la un sistem de monitoring al mediului (date culese prin senzori specializați și depuse într-o bază de date centrală, atunci când aceasta va exista). Ele oferă la ieșire rezultate de simulare, grafice sau numerice, pentru mărimile de stare ale sistemelor de mediu, precum și sintetizarea unor comenzi (acțiuni) de control al mărimilor de mediu (cazul cel mai curent fiind readucerea, în limitele dorite de către expert, a mărimilor de stare care au părăsit aceste limite). Controlul se realizează fie local (cu ajutorul unor algoritmi specializați), fie global (cu ajutorul unui algoritim de control, bazat pe cunoștințe pentru mediu).

Biblioteca de Modele de Simulare și de Control pentru Ecologie și Protecția Mediului este automatizată, în sensul că regăsirea, vizualizarea și utilizarea modelelor incluse în bibliotecă, se face utilizând un program special scris în Visual C++ sub Windows. Astfel, folosind mouse-ul, la un simplu clic al acestuia, cu prompter-ul pus pe butonul care poartă numele (inscripția) modelului respectiv, acesta apare pe ecran: mai întâi o scurtă descriere a modelului, apoi modelul complet (după un clic pe OK).

Biblioteca de modele de simulare și de control pentru ecologie și protecția mediului permite utilizatorului, nu numai exploatarea modelelor existente, ci și adăugarea de noi submodele (la cele existente), construcția de noi modele complexe etc. și aceasta grație nivelurilor care conțin submodele pentru mediu și formule de calcul specifice.

Toate modelele, submodelele și formulele de calcul, incluse în bibliotecă, au fost testate pe cazuri (și cu date) reale, de fapt chiar în cazul unor aplicații reale, astfel încât există garanția validării lor. Ca orice model și modelele incluse în această bibliotecă sunt perfectibile și se are în vedere realizarea acestui fapt, atât prin efectuarea de noi experimente privind modelarea, simularea și controlul unor sisteme de mediu, ca și cuplarea acestor modele cu baza de cunoștințe pentru mediu, în cadrul sistemului .expert pentru mediu. Experimente cu tandemul Biblioteca de modele de simulare și de control - Baza de cunoștințe vor aduce indubitabil noi elemente utile pentru

construcția finală a sistemului expert, dar și pentru biblioteca de modele de simulare și de control.

Se subliniază faptul că, pentru realizarea unei astfel de biblioteci, este nevoie de cunoștințe interdisciplinare, cum ar fi: analiza matematică, logica matematică, statistica matematică, teoria sistemelor, sisteme bazate pe cunoștințe, inteligența artificială, biologie, ecologie, pedologie, hidrologie și altele.

Biblioteca de modele de simulare și de control pentru ecologie și protecția mediului este operațională pe calculatoarele PC386 (sau superioare), cu coprocesor matematic, având instalat programul Mathcad 3.0 (sau Mathcad 4.0) sub Windows.

Deși biblioteca de modele de simulare și de control pentru ecologie și protecția mediului a fost realizată în vederea încorporării ei într-un sistem expert, ea poate fi valorificată, de pe acum, în aplicații de simulare și de control al unor sisteme ecologice și/sau de protecția mediului, la asistarea managerilor în luarea deciziilor în probleme complexe privind mediul înconjurător cum ar fi: ecosisteme acvatice (delte, lacuri, râuri, canale de apă), agroecosisteme, ecosisteme forestiere, poluarea aerului în mediul urban (datorată substanțelor chimice industriale poluante) și altele.

Bibliografie

1. STANCIULESCU, F., POPA, V., ZAMFIR, A., MINCA, M.: Sistem expert pentru modelarea, simularea și controlul sistemelor complexe, cu aplicație la supravegherea mediului și a proceselor industriale implicate. Studiu de fundamentare. Raport de cercetare la tema B40, ICI, București, 1995.
2. STANCIULESCU, FI.: Dinamica sistemelor mari. Editura Academiei Române, București, 1982.
3. JORGENSEN, S.E.: Fundamentals of Ecological Modelling. Elsevier Science Publishers, Amsterdam, 1986.
4. SHUKLA, J.B., HALLAM, T.G., CAPASSO, V. (eds.): Mathematical Modelling of Environmental and Ecological Systems. Ibidem, 1987.
5. VINCENT, T.L., & all: Applications of Optimal Control to the Modelling and Management of Ecosystems. In: Simulation, pp. 65-72, March, 1975.
6. STRASKRABA, M.: Cybernetic Formulation of Control in Ecosystems. In: Ecological Modelling, no.10, pp. 85-97, 1985.
7. DE CAPRARIIS, P.P.: The Mathematical Structure of an Aquatic Ecosystems Model. In: Simulation, pp. 133-137, October 1981.
8. STARFIELD, A.M. & all: A Rule-Based Ecological Model for the Management of an Estuarine Lake. Research Report, University of the Witwatersrand, 1987.
9. STARFIELD, A.M.: Biologist's Toolbox. Qualitative, Rule-based Modelling. In: BioScience, vol. 40, no. 8, pp. 601-604, September 1990.
10. BOSSEL, H.: Dynamics of Forest Dieback: Systems Analysis and Simulation. In: Ecological Modelling, 1986.
11. PARKER, R.A.: Simulation of an Aquatic Ecosystem. In: Biometrics, vol.24, 1968, pp.803-822.
12. PARK, R.A. & all: A Generalized Model for Simulating Lake Ecosystems. In: Simulation, vol. 23, no. 2, pp. 33-50, August 1974.
13. CARMICHAEL, G.R. : The Current State and Future Directions in Simulating Tropospheric Chemistry and Transport. In: Proceedings of the International Seminary "Modelling and Simulation of Complex Environmental Problems", Schloss Dagstuhl, Saarbrucken, 1995.
14. SCHMIDT, F.: Model Based Interpretation of Environmental Data. In: Computational Systems Analysis, (A. Sydow, ed.), Elsevier Science Publishers, Amsterdam, 1995.
15. CARMICHAEL, G.R., KORN, G.A., SYDOW, A. (eds): Modelling and Simulation of Complex Environmental Problems. Proceedings of the International Seminary, Schloss Dagstuhl, Saarbrucken, 1995 (in Press).
16. ALEM, L., EDORA - An Expert System for Assistance in Biological Modelling. Research Report, INRIA, Octobre, 1988.
17. ROSSI, G.: Modelistica Ecologica dei Laghi. Istituto Dell Ambiente & Centro Comune di Ricerca-Commissione Delle Comunita Europee, 1992.
18. JONES, D.D.: Catastrophe Theory Applied to Ecological Systems. In: Simulation, pp. 1-14, July 1977.
19. NAKAMORI, Y., SAWARAGI, Y.: Methodology and Systems for Environmental Decision Support. In: Proceedings IFAC Symposium on Large Scale Systems, pp. 13-24 London, 1995.