

SISTEM EXPERT PENTRU ECOLOGIE ȘI PROTECȚIA MEDIULUI

Dr. ing. Florin Stănciulescu
mat. Victor Popa
ing. Adriana Zamfir
mat. Marius Mincă
ing. Dorina Cârpuș

Institutul de Cercetări în Informatică

Rezumat: Se prezintă arhitectura, baza de cunoștințe, biblioteca de modele de simulare și control, monitorul și alte elemente componente ale unui sistem expert, cu aplicații în ecologie și protecția mediului. Biblioteca de modele de simulare și control este construită folosind limbajul Mathcad 5.0 sub Windows, în timp ce baza de cunoștințe este construită cu ajutorul limbajului C'lips. Monitorul sistemului expert este construit cu ajutorul limbajului C. Aplicațiile se referă la toate tipurile de sisteme ecologice și la orice fel de mediu: acvatic, terestru, atmosferă. În articol, sunt prezentate rezultate experimentale pentru trei astfel de sisteme, care atestă utilitatea sistemului expert realizat.

Cuvinte cheie: sistem expert, sistem ecologic, mediu, control.

1. Introducere

Un sistem expert cu aplicații în ecologie și protecția mediului este necesar atât din rațiuni de ordin științific și economic, cât și pentru sănătatea populației. Vom analiza succint aceste rațiuni.

Din punct de vedere științific:

Complexitatea sistemelor, atât a celor construite de om (sisteme tehnice, industriale, agroeco-sisteme), cât și a celor naturale (sisteme de mediu înconjurător) a crescut mult, ceea ce face abordarea lor, chiar folosind mijloace computerizate, foarte dificilă și uneori chiar insurmontabilă. În aceste condiții, un *sistem expert pentru ecologie și protecția mediului* poate reduce complexitatea abordării prin sistematizarea cunoștințelor de tip expert și deducerea de noi cunoștințe din inferarea celor aflate în baza de cunoștințe.

Neliniaritatea proceselor implicate induce o serie de dificultăți (cum ar fi unele probleme de analiză numerică: erori de calcul, instabilitate numerică, ș.a.) care reclamă o atenție specială în tratarea problemelor neliniare cu ajutorul calculatoarelor. Un sistem expert poate include, în baza de cunoștințe și elemente de cunoaștere privind natura și forma neliniarităților care intervin în procesul cercetat, ca și metode specifice de abordare.

Incertitudinea datorată incompletitudinii cunoștințelor privind sistemul cercetat și/sau lipsa datelor referitoare la acest sistem. Această incertitudine are o componentă subiectivă, dar și o componentă obiectivă (am numit aici incertitudinea privind structura sistemului). Ambele incertitudini pot fi minimizate, cu ajutorul sistemului expert.

Din punct de vedere conomic:

Scăderea potențialului economic al unor zone naturale, de exemplu ecosisteme forestiere, ca urmare a intervenției antropice excesive (exploatare, poluare etc.).

Scăderea potențialului economic al unor sisteme antropizate, de exemplu: agroecosisteme, ca urmare a scăderii fertilității solului, poluării etc.

Pericolul dispariției unor specii cu valoare economică ridicată, ca urmare a intervenției antropice, vânătoare, pescuit excesiv etc.

2. Arhitectura sistemului expert

Arhitectura sistemului expert pentru modelarea, simularea și controlul sistemelor complexe, cu aplicații în ecologie și la supravegherea mediului și a proceselor industriale implicate este dată în figura 1.

Modulele componente ale sistemului expert au următoarele funcțiuni:

1. Modulul "*Baza de cunoștințe și fapte*" (referitoare la mediu):

- stocarea cunoștințelor de tip expert, preluate de la modulul de achiziționare a cunoștințelor și a faptelor (din proces);
- alimentarea cu cunoștințe și fapte a motorului inferențial, la cererea acestuia;

2. Modulul "*Motor inferențial*":

- prelucrarea cunoștințelor, în scopul obținerii de noi cunoștințe din inferarea celor existente;
- sintetizarea noilor variabile de comandă, capabile să readucă variabilele de stare, care ies din intervalele de suboptimalitate, în aceste intervale.

3. Modulul de "*Achiziționare a datelor*" (de mediu):

- achiziționare de date;
- scrierea lor în formatul cerut de baza de date (pentru mediu).

4. Modulul "*Baza de date*" (referitoare la mediu):

- stocarea datelor (referitoare la mediu), furnizate de modulul de achiziționare a datelor;
- alimentarea cu date a modelelor de simulare, din biblioteca de modele.

5. Modulul "*Biblioteca de modele și algoritmi de simulare*" (pentru rezolvarea problemelor mediului):

- stocarea de modele și algoritmi (pentru rezolvarea problemelor de mediu);

- asistență la construirea de noi modele (utile în rezolvarea de probleme de mediu);
 - furnizarea de modele programului de simulare a proceselor de mediu continue și/sau cu evenimente discrete.
6. Modulele "Program(e) de simulare a proceselor de mediu continue și/sau cu evenimente discrete":
- simularea proceselor de mediu continue și/sau cu evenimente discrete;
 - afișarea rezultatelor (grafica 2D sau 3D și/sau numeric).
7. Modulul "Analizor de rezultate de simulare":
- analiza rezultatelor de simulare, în sensul de a stabili variabilele de stare, care se afla în intervalele de suboptimalitate, respectiv cele care sunt sub limita minimă, sau peste cea maximă;
 - alertarea motorului inferențial, în ultimele două cazuri.
8. Modulele în care sunt depuse "Rezultate de simulare" (continue și/sau cu evenimente discrete), respectiv noile cunoștințe inferate (ex. noile comenzi):
- stocarea de rezultate de simulare și/sau noi cunoștințe inferate;
 - fundamentarea de acțiuni pentru mediu;
 - alertarea motorului inferențial;
 - furnizarea de noi comenzi pentru simulatorul de procese de mediu, continue.
9. Modulele "Interfață utilizator-sistem expert", respectiv "Interfață utilizator-programe de simulare":
- asigură dialogul utilizator-sistem expert, respectiv utilizator-programe de simulare.
10. Modulul "Monitorul sistemului expert":
- asigură supervizarea și controlul bunei funcționări a celorlalte module ale sistemului expert;
 - asigură interacțiunea, la timpul potrivit, dintre celelalte module;

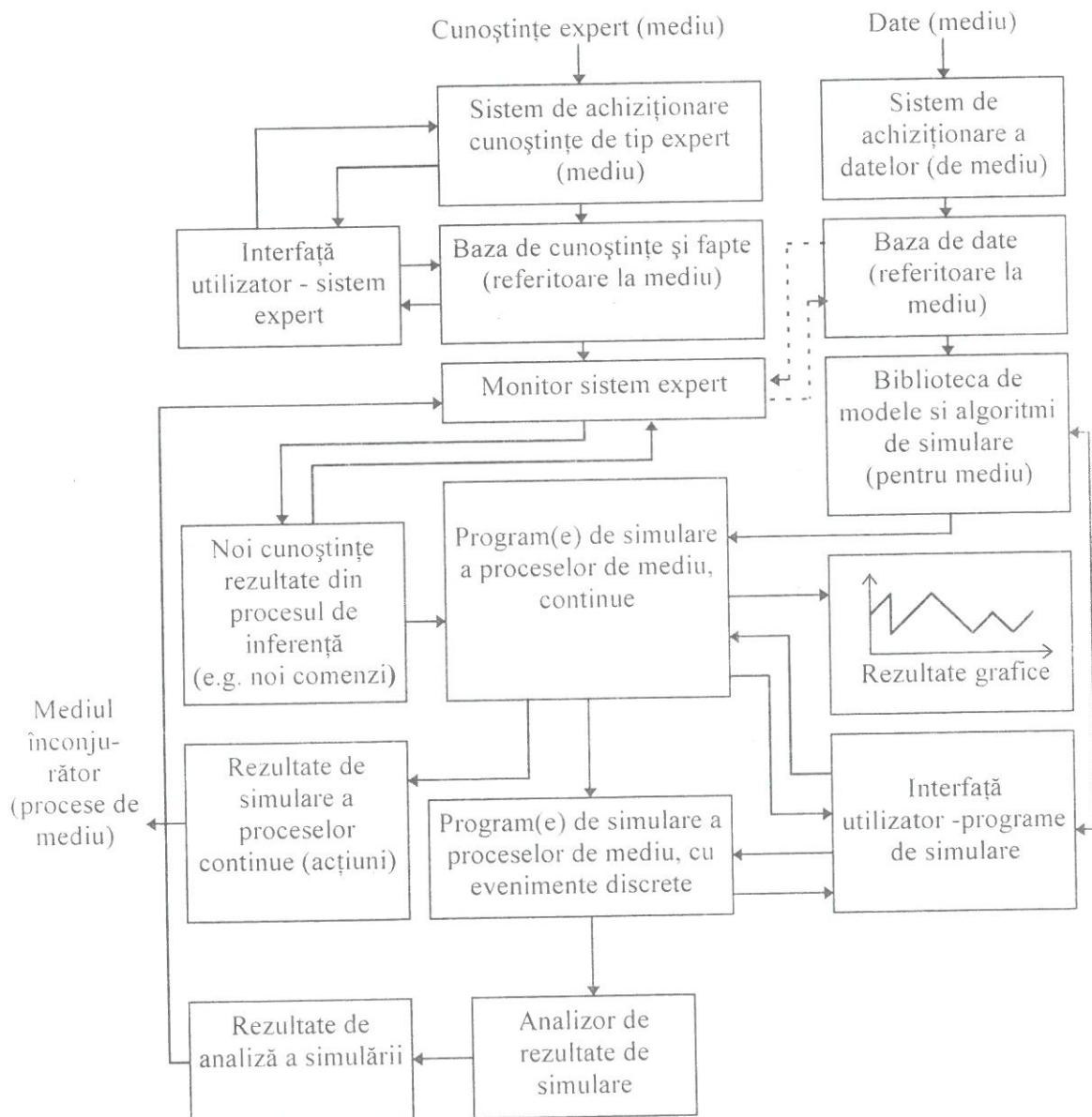


Figura 1. Arhitectura sistemului expert

- asigură încărcarea secvențială a anumitor segmente din baza de cunoștințe.

3. Biblioteca de modele de simulare și control

Biblioteca de modele de simulare și de control este una dintre componentele sistemului expert pentru ecologie și protecția mediului.

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

- mediul înconjurător este un sistem mare, complex care include mediul acvatic, mediul terestru și mediul atmosferic, fiecare din acestea având particularitățile sale: această complexitate poate fi mai ușor stăpânită cu ajutorul modelelor de simulare și control;
- dacă unele probleme de mediu privesc o anumită componentă a acestuia (de pildă, eutrofizarea unui lac), altele implică mai multe componente ale acestuia (exemplu: ploaia acidă, rezultată din poluarea atmosferei cu efectele ei nocive asupra pădurilor); de aici, nevoia unei biblioteci de modele de simulare și control cât mai completă.

Biblioteca de modele de simulare și 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, putem da:

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

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

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) și un modul conținând formule de calcul, utile în simulare (calculul debitului de apă pe un canal, relația pradă-prădător).

Ambele module permit crearea de noi modele de simulare și/sau control sau îmbogățirea modelelor existente cu noi submodele, atunci când utilizatorul consideră necesar acest lucru.

Modelele de simulare și control, submodelele și formulele de calcul, incluse în bibliotecă, sunt izvorâte din necesitatea de a putea rezolva, prin simulare, problemele complexe ale mediului. Modelele aflate în bibliotecă se încadrează în următoarele tipuri de modele:

Modele de simulare continuă/discretă a proceselor care au loc în sistemele ecologice și/sau în mediu, și care exprimă atât influența factorilor abiotici asupra biocenozelor (un exemplu este procesul de fotosinteză), cât și interacțiunea dintre specii și dintre acestea și mediu (de exemplu relația pradă-prădător). Aceste modele sunt prezentate sub formă de ecuații diferențiale neliniare și/sau ecuații 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. Prezentăm forma continuă a modelului:

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

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

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

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

Modelului de simulare (1)-(3) i se atașează restricțiile (de apartenență la intervale dorite de expert)

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

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

unde: (1) reprezintă ecuațiile de stare ale modelului, A_i , B_i - matricile de stare, respectiv de comanda; 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-discret:

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

$$v_i = v_i = \sum_{j=1, j \neq i}^n g_{ij}(x_j(t)) \quad (2')$$

$$x_i(0) = x_{i0}, \quad (3')$$

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

cu aceleași restricții.

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

$$X = \begin{matrix} & 0 & 1 & 2 & \dots & k & \dots & k_f \\ \begin{matrix} X_1 \\ X_2 \\ \dots \\ X_n \end{matrix} & \begin{bmatrix} X_{10} & X_{11} & X_{12} & \dots & X_{1k} & \dots & X_{1k_f} \\ X_{20} & X_{21} & X_{22} & \dots & X_{2k} & \dots & X_{2k_f} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ X_{n0} & X_{n1} & X_{n2} & \dots & X_{nk} & \dots & X_{nk_f} \end{bmatrix} \end{matrix}$$

Modele de simulare cu evenimente discrete, care descriu procese specifice, ca de exemplu ieșirea mărimilor de stare ale sistemului (proceselor) ecologic(e) din limitele intervalelor de suboptimalitate, recomandate de către expert. Aceste modele sunt reprezentate cu ajutorul sistemelor de ecuații diferențiale booleene astfel:

$$X_i'(k) = \begin{cases} 1, & \text{dacă } x_i \in [x_{i \min}, x_{i \max}] \\ 0, & \text{dacă } x_i \notin [x_{i \min}, x_{i \max}] \end{cases} \quad (6)$$

($i=1, 2, \dots, n; k=0, 1, 2, \dots, k_f$)

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

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

Cu ajutorul mărimilor de stare cu evenimente discrete, $X_i(k)$, se construiește modelul procesului cu evenimente discrete. Acesta este un model diferential 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 $\overline{X_i}(k)$

$$Y_i(k) = \begin{cases} 1, & \text{procesul de simulare continua (nu se} \\ & \text{semnaleaza aparitia unui eveniment discret)} \\ 0, & \text{procesul de simulare este oprit si se alerteaza} \\ & \text{modulul de control (eveniment discret aparut)} \end{cases}$$

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

Modele de control

Model de control bazat pe cunoștințe

Modelul de control bazat pe cunoștințe este compus din reguli euristice de comportare, control și decizie, derivate din cunoașterea de tip expert.

(a) Reguli euristice de comportare

$$\langle \text{Dacă } C_{i1}(k) \circ C_{i2}(k) \circ \dots \circ C_{im}(k), \text{ Atunci } x_i(k) \rangle \quad (bf)$$

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

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

(b) Reguli euristice de control

Aceste reguli au forma standard:

$$\langle \text{Dacă } C_i(k) \wedge u_j(k+1) \leftarrow u_j(k) + \Delta u_j(k),$$

Atunci $x_i(k+1) > (bf)$

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

citește: 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) Reguli euristice de decizie

Aceste reguli au una din formele standard:

$$\langle \text{Dacă } x_i(k) < x_{i1}, \text{ Atunci } u_j(k+1) \leftarrow u_j(k) + \Delta u_j(k) \rangle (bf)$$

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

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

$$\langle \text{Dacă } x_i(k) > x_{i2}, \text{ Atunci } u_j(k+1) \leftarrow u_j(k) - \Delta u_j(k) \rangle (bf)$$

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

citește: 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 aceste reguli, bf reprezintă coeficientul de încredere sau de (in)certitudine (în sens fuzzy sau probabilistic) acordat regulii respective.

Model de control fuzzy

Un model de control fuzzy se formalizează astfel:

$$f: F(X) \times F(U) \rightarrow F(X),$$

$$g: F(X) \rightarrow F(Y),$$

unde X, U, Y reprezintă mulțimea stărilor, a comenzilor și, respectiv, a ieșirilor.

Gradul de apartenență $\mu_i(u)$ al unui element (mărimii de stare, parametru etc.) la o (sub)mulțime fuzzy, poate fi exprimat numeric, dacă universul de discurs este discret (adică un vector care depinde de pasul de discretizare), sau continuu (cu ajutorul unei funcții). Cel mai uzual caz, este cel al funcției de apartenență trapezoidală, reprezentată în figura 2.

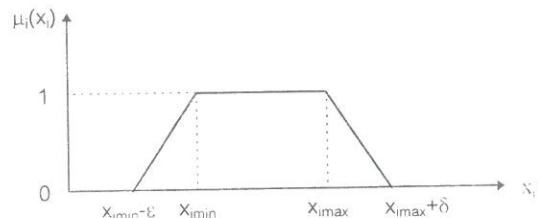


Figura 2. Reprezentarea trapezoidală a funcției de apartenență

Din figura 2 se poate deduce:

$$\mu_i(x_i) = \begin{cases} 1, & \text{dacă } x_i \in [x_{i \min}, x_{i \max}], \\ 0, & \text{dacă } x_i < x_{i \min} - \varepsilon, \text{ sau } x_i > x_{i \max} + \delta, \\ \frac{1}{\varepsilon} x_i - \frac{x_{i \min} - \varepsilon}{\varepsilon}, & \text{dacă } x_i \in [x_{i \min} - \varepsilon, x_{i \min}], \\ -\frac{1}{\delta} x_i + \frac{x_{i \max} + \delta}{\delta}, & \text{dacă } x_i \in [x_{i \max}, x_{i \max} + \delta] \end{cases} \quad (8)$$

Problema controlului variabilelor de stare $x_i(k)$, $i=1, 2, \dots, n$; $k=0, 1, \dots, k_f$, este aceea de a menține aceste variabile în intervalele de (sub)optimalitate

$[x_{\min}, x_{\max}]$. Variabilele de stare $x_i(k)$ aparțin unuia sau altuia din intervalele din tabloul 1, ca și diferența $dx_i(k) = x_i(k) - x_i(k-1)$.

Variabilele de stare x_i aparțin mulțimii calitative:

$$\chi = \{VS, S, O, L, VL\},$$

în timp ce derivatele dx_i aparțin mulțimii calitative:

$$d\chi = \{-L, -S, Z, S, L\}.$$

Formula de calcul a noilor variabile de control $u_i(k+1)$, capabile să readucă variabilele de stare $x_i(k)$ în intervalele de (sub)optimalitate este:

$$u_i(k+1) = u_i(k) + K_{ui} \Delta u_i(k) \quad (9)$$

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

În formula (15) $\Delta u_i(k)$ este un increment (sau decrement), o creștere (sau o diminuare) a variabilei de comandă, care poate fi calculată cu ajutorul formulei de calcul:

$$\Delta u_i(k) = \frac{\sum_{i=1}^n \mu_i(x_i) u_i(k)}{\sum_{i=1}^n \mu_i(x_i)} \quad (10)$$

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

Formula de calcul (10) este expresia matematică a defuzificării prin metoda centrelor de greutate sau a ponderării variabilelor de comandă $u_i(k)$, cu ajutorul gradului funcției de apartenență $\mu_i(x_i)$.

Termenii K_{ui} sunt coeficienți de calcul experimentali, în mod normal furnizați de către expert (vezi tabloul 1):

Tabloul 1

dx_i / x_i	VS	S	O	L	VL
-L	K_{ui}^{11}	K_{ui}^{12}	0	K_{ui}^{14}	K_{ui}^{15}
-S	K_{ui}^{21}	K_{ui}^{22}	0	K_{ui}^{24}	K_{ui}^{25}
Z	K_{ui}^{31}	K_{ui}^{32}	0	K_{ui}^{34}	K_{ui}^{35}
S	K_{ui}^{41}	K_{ui}^{42}	0	K_{ui}^{44}	K_{ui}^{45}
L	K_{ui}^{51}	K_{ui}^{52}	0	K_{ui}^{54}	K_{ui}^{55}

Combinând cunoștințele din tabloul 1 cu relațiile de calcul (9) - (10), rezultă un set de reguli bazate pe cunoștințe fuzzy, utile în controlul sistemelor complexe și anume:

< Dacă $(x_i(k)$ este χ_i) și $(dx_i(k)$ este $d\chi_i$),

Atunci noua regulă de control este:

$$u_i(k+1) = u_i(k) + K_{ui} \Delta u_i(k) > \quad (11)$$

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

Subliniem faptul că numărul de reguli de control fuzzy este 25 n (n este numărul de variabile de stare, iar 25 reprezintă numărul de valori K_{ui}).

Teorema de compatibilitate între modelul matematic (de simulare) și modelul (de control) fuzzy

Modelul matematic de simulare a procesului (controlat) și modelul fuzzy (de control) nu sunt apriori, compatibile. Compatibilitatea este probată cu ajutorul unei teoreme de compatibilitate.

Teorema de compatibilitate: Modelul de control fuzzy (8)-(11) este compatibil cu modelul matematic

de simulare a procesului controlat (1-5), dacă, utilizând un motor inferențial, putem infera - pornind de la regulile euristice fuzzy (11) - noile variabile de control capabile să readucă variabilele de stare în interiorul intervalelor de (sub)optimalitate; aceasta aserțiune se transpune în următoarea condiție:

$$\begin{aligned} x_{i \min} - \Omega_i(k) &\leq \\ \sum_{j=0}^{k-1} A_i^{k-j-1} B_i u_i + \sum_{i=0}^{k-2} \sum_{j=0}^{k-1-i-2} A_i^{k-j-2} K_{ui} \Delta u_i &\leq \\ &\leq x_{i \max} + \Omega_i(k) \end{aligned} \quad (12)$$

$$\text{unde: } \Omega_i(k) = A_i^k x_{i0} + \sum_{j=0}^{k-1} A_i^{k-j-1} (f_{ij} + v_{ij})$$

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

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

Interfața cu utilizatorul este asigurată printr-un program realizat în Visual C++, aceasta primind toate informațiile despre modelele aflate în bibliotecă și putând la rândul ei opera modificări în modele și/sau realiza noi modele.

Biblioteca de modele de simulare și control primește intrări de la baza de date și oferă intrări (modele și algoritmi) programului de simulare.

Structura ierarhizată pe 5 niveluri a bibliotecii: Modelul global de simulare și control al mediului înconjurător, Modele de simulare și control specifice celor 3 tipuri de mediu și ecologie, Modele operaționale de simulare și control pentru mediu, Submodele de simulare și control pentru asistarea utilizatorului în construirea de noi modele, Formule de calcul utile în probleme de mediu) permite accesul (secvențial) la oricare din modelele aflate în bibliotecă, îmbunătățirea unui model existent, crearea de noi modele, efectuarea de experimente de simulare și control, pentru asistarea deciziei în probleme de mediu înconjurător (sisteme naturale, sisteme ecologice etc.).

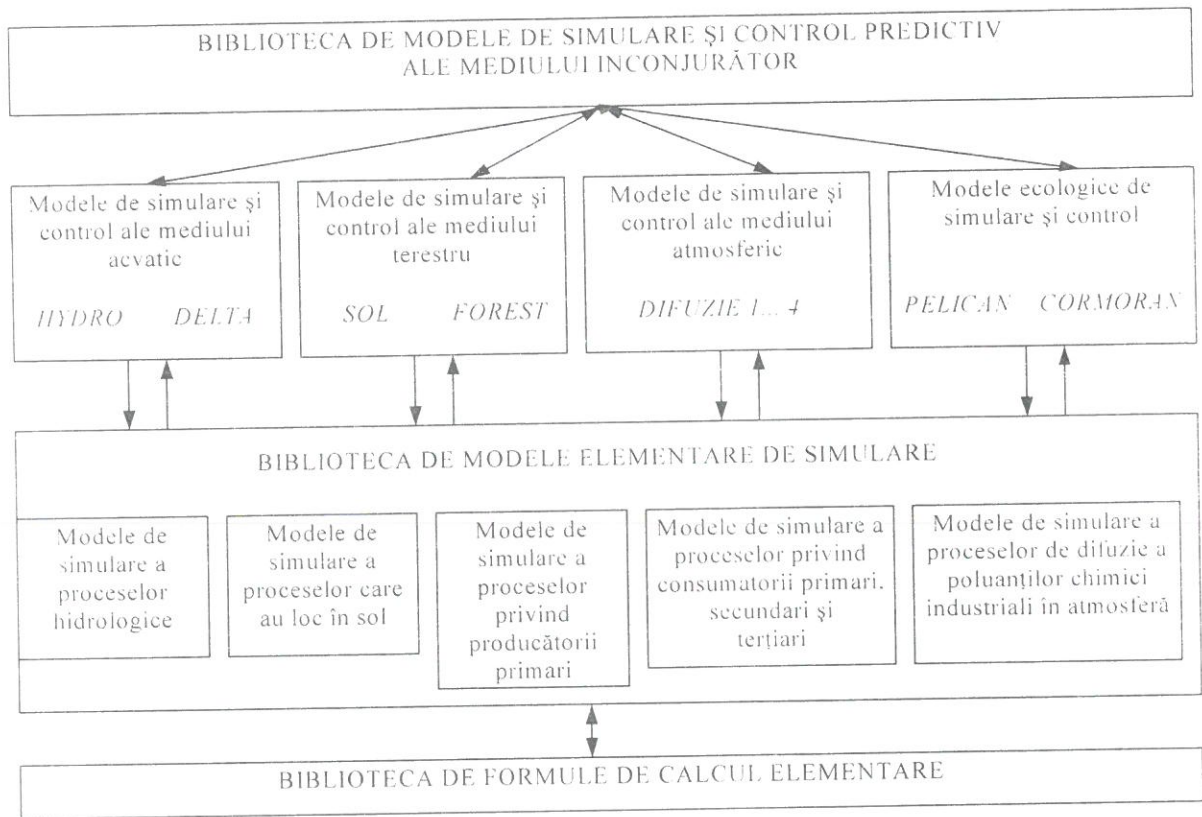


Figura 3. Biblioteca de modele de simulare și control

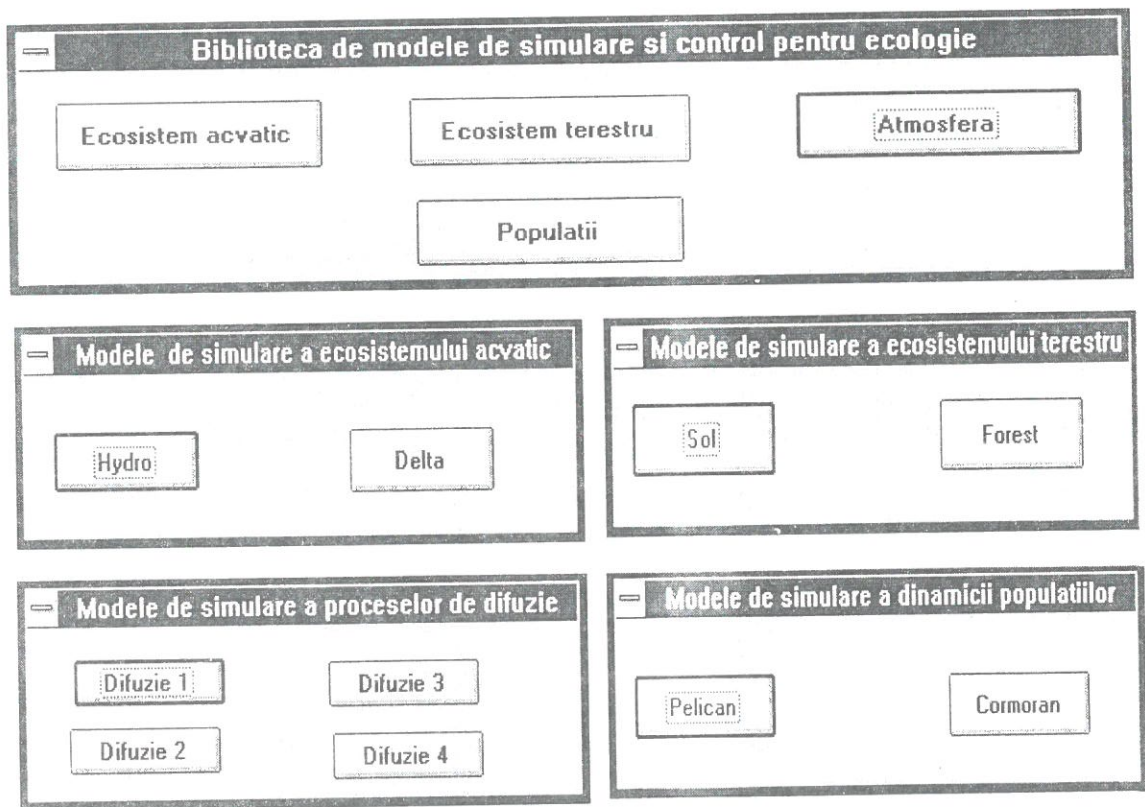


Figura 4. Butoane de comandă ale bibliotecii de modele de simulare și protecția mediului

Schema generală a bibliotecii de modele de simulare și control pentru ecologie și protecția mediului este dată în figura 3, iar butoanele de comandă ale bibliotecii, în figura 4.

4. Baza de cunoștințe și fapte

Una din problemele principale ce trebuie rezolvate în cadrul dezvoltării unui sistem expert este legată de mărimea bazei de cunoștințe. O bază de cunoștințe mare este greu de întreținut, iar memoria internă, oricât ar fi de mare, nu este suficientă pentru a lucra cu întreaga bază încărcată în memorie. Dacă se acceptă soluția ca bază de cunoștințe să rămână în timpul procesului de inferență în memoria externă, atunci performanțele sistemului vor fi reduse din cauza citirilor repetate ale memoriei externe. Multe expert system shells (nuclee de sistem expert) permit partiționarea bazei de cunoștințe numai în mod static, în scopul unei ușoare întrețineri a acesteia, dar nu permit încărcarea dinamică a fiecărei partiții, în timpul procesului de inferență, baza fiind văzută ca un monolit. O astfel de abordare ușurează munca de întreținere a bazei de cunoștințe, dar performanțele sistemului nu sunt satisfăcătoare. Abordarea noastră presupune o bază de cunoștințe partitionată astfel încât fiecare partiție este încărcată în memoria centrală, de către monitorul sistemului.

Baza de cunoștințe este compusă din trei baze de cunoștințe (mai mult sau mai puțin distincte) câte una pentru fiecare tip de sistem ecologic și anume: sisteme ecologice terestre, sisteme ecologice acvatice și sistemul atmosferei. Ele nu sunt complet disjuncte, deoarece au unele elemente comune, în special unii parametri/factori limitativi de mediu (cum ar fi temperatura aerului, intensitatea radiației solare, ș.a.) și lucrează sub controlul unui monitor al sistemului expert, care va avea în gestiune și funcționarea bazei de cunoștințe (vezi și figura 1). Baza de cunoștințe experimentală pentru ecologie și protecția mediului a fost realizată cu ajutorul produsului-program Clips, un produs de firmă care încorporează atât facilități de scriere a regulilor euristice (de comportare, de control și de decizie), ca și a faptelor din proces, cât și motorul inferențial, capabil să proceseze cunoștințele conținute în baza de cunoștințe și să infereze noi cunoștințe.

Programul Clips, utilizat în dezvoltarea sistemului expert, furnizează suport pentru modularizarea bazei de cunoștințe atât în timpul dezvoltării acesteia, cât și în timpul procesului de inferență.

Baza de cunoștințe a sistemului expert pentru ecologie și protecția mediului este compusă din reguli euristice de comportare, control și decizie, a căror formă standard a fost descrisă în capitolul 3. Cunoștințele înglobate în aceste reguli au fost preluate de la experți (ecologiști, hidrologi, chimiști, fizicieni, pedologi, agronomi, silvicultori) și transpuse în reguli cu ajutorul programului Clips.

Subliniem faptul că, achiziționarea cunoștințelor de la expert a constituit o etapă lungă și dificilă, dar care în final s-a dovedit foarte rodnică.

Pentru a da cititorului o idee asupra metodologiei de structurare, regulile din baza de cunoștințe vom lua cazul regulilor de comportare. Aceste reguli arată influența factorilor de mediu limitativi (exemplu: temperatura, radiația luminoasă, umiditatea, presiunea, pH, viteza vântului, concentrația de nutrienți etc) asupra variabilelor de stare ale ecosistemului (populații de plante și animale, exprimate cu ajutorul biomasei sau al numărului).

Există o regulă, pe care o putem denumi "regula de aur", care spune că:

< Dacă parametrii limitativi se află în intervalele preconizate de către expert,

Atunci variabilele de stare se află în intervalele de suboptimalitate >.

Pomind de la formalismul matematic al acestei reguli, se pot obține numeroase alte reguli, atunci când unul sau mai multi parametri limitativi ies din intervalele dorite de către expert, cu consecințe asupra variabilelor de stare. Trebuie precizat însă faptul că formalismul regulilor este mai apropiat de formalismul sistemelor fuzzy, decât de acela al matematicii clasice, deoarece se lucrează cu intervale.

În afară de reguli euristice, baza de cunoștințe include și fapte derivate din procesele hidrologice, hidrochimice, biochimice și fizico-chimice, care au loc în sistemele ecologice și, în general, în mediul înconjurător.

Modul cum se prezintă regulile euristice și faptele, scrise cu ajutorul programului Clips, este arătat în ferestrele din figura 5.

Experimentele realizate cu baza de cunoștințe au acoperit toate cele trei segmente ale acesteia. Un prim experiment s-a referit la un ecosistem terestru (un agroecosistem), al doilea la un sistem acvatic (o rețea de lacuri legate prin canale și șenaluri) și un ecosistem al atmosferei (difuzia unui poluant chimic industrial în atmosfera urbană). Aceste experimente sunt descrise în capitolul 6.

```
File Edit Buffer Help
:::
::: Acvaeco Expert System
::: CLIPS Version 6.0
::: To execute, merely load, reset and run.
:::
:::
::* DEFFUNCTIONS *
:::*****
(deffunction apartine (?a ?variabila ?b)
  (and (>= ?variabila ?a) (<= ?variabila ?b))
)
:::*****
::* ENGINE STATE RULES *
:::*****
::: cazul cind toti factorii de mediu se afla in Io si influenta
(defrule R1
```

```

Edit File - [ACVAECO2.CLP]
File Edit Buffer Help
;;; cazul cind toti factorii de mediu se afla in Io, cu exceptia
;;; singur care se afla I4 si Bpo si Bpr scad (acest caz cuprind
;;; I se afla in I4:

(defrule R_3014
  (test(> ?*I* 2e6))
  (test(apartine 10 ?*I* 26))
  (test(apartine 15 ?*I* 25))
  (test(apartine 750 ?*P* 770))
  (test(apartine 0.5 ?*p* 1))
  (test(apartine 0.5 ?*e* 1))
  (test(apartine 6.5 ?*pH* 7.5))
  (test(apartine 0.1 ?*u* 0.5))
  (test(apartine 0.05 ?*ro* 0.3))
  (test(apartine 0.009 ?*cx* 0.05))
  (test(apartine 9 ?*Bpo* 9))
  (test(> ?*UBpr* 0))
  =>
  (bind ?*Bpr* decrease_strong))

;;; cazul cind toti factorii de mediu se afla in Io, cu exceptia

```

```

Edit File - [FAPTI.CLP]
File Edit Buffer Help
(defglobal ?*I* = 0.7e6
  ?*I* = -5
  ?*Ia* = 2
  ?*P* = 740
  ?*p* = 0.55
  ?*e* = 0.1
  ?*pH* = 5
  ?*u* = 0.1
  ?*ro* = 0.15
  ?*cx* = 0.003
  ?*delta_a* = 0
  ?*delta_f* = 0
  ?*UBpo* = 10
  ?*delta_UBpo* = 0
  ?*UBpr* = 5
  ?*delta_UBpr* = 0
  ?*UNpc* = 0
  ?*UNcm* = 0
  ?*UNcm* = 0

```

Figura 5. Ecrane reprezentând reguli din baza de cunoștințe și fapte

5. Monitorul sistemului expert

Monitorul sistemului expert are rolul de a asigura supervizarea și controlul unei bune funcționări a celorlate module ale sistemului expert, asigurând interacțiunea dintre ele la timpul potrivit.

Monitorul facilitează, în primul rând, introducerea în baza de date pentru mediu (BDMI), sub un anumit format, a datelor de intrare corespunzătoare mărimilor și factorilor ce participă la încărcarea cu date a modelelor de simulare, și permite rularea algoritmilor și a programelor de simulare existente.

De asemenea, permite rularea programelor de simulare, cu obținerea rezultatelor sub forma de grafice, respectiv date de ieșire înmagazinate într-o altă bază de date (BDM2), ce poate reprezenta sursa din care sunt culese alte date de intrare corespunzătoare altor algoritmi de simulare ce se găsesc în dependență față de cei anteriori.

În urma acestui proces, se pot constata și vizualiza mărimile ce nu se încadrează în intervalele

de suboptimalitate, furnizate de către expert. În cazul existenței acestora, se apelează la sistemul expert, prin intermediul monitorului.

Monitorul sistemului expert facilitează, de asemenea, crearea bazei inițiale de cunoștințe pentru sistemul expert, precum și extinderea acesteia, prin inserarea de noi cunoștințe, sub formă de reguli euristice de tip expert și fapte din proces. Trebuie subliniat faptul că, baza de cunoștințe este organizată pe trei module: cunoștințe privind mediul acvatic, cunoștințe privind mediul terestru și cunoștințe privind poluarea atmosferei.

Pentru a realiza un experiment de simulare bazată pe cunoștințe monitorul poate încărca un modul sau altul din baza de cunoștințe sau pe toate trei. Rezultatul procesului de inferare a cunoștințelor este sintetizarea unor noi comenzi/acțiuni capabile să asigure reintroducerea mărimilor de stare, care au ieșit din limitele prescrise de către expert, în interiorul intervalelor de suboptimalitate.

Monitorul facilitează transferarea cunoștințelor obținute din procesul de inferare, ca noi date de intrare pentru modelele de simulare, din biblioteca de modele, cu rezultatul încadrării mărimilor de stare în intervalele dorite de către expert. Pentru realizarea acestui deziderat, monitorul dispune de interfețe, dat fiind faptul că simulatorul de proces este realizat sub Mathcad 5.0, iar procesarea cunoștințelor este realizată cu ajutorul produsului Clips.

Așadar monitorul sistemului expert are două părți:

- o parte care asigură gestiunea proceselor de simulare, bazate pe utilizarea modelelor din biblioteca de modele;
- o parte care asigură gestiunea proceselor de inferență, bazate pe reguli din baza de cunoștințe și fapte din proces.

Monitorul este realizat în MSVC, iar legăturile între componentele sistemului expert sunt dependente de mediul în care acestea au fost construite (sistemul de obținere a noilor date prin inferarea celor existente în Clips, respectiv biblioteca modelelor și algoritmilor de simulare în Mathcad).

6. Aplicații

Studiu de caz privind modelarea și simularea unui ecosistem forestier

În cadrul acestui experiment, s-a folosit modelul *FOREST* pentru a simula comportamentul unor mărimi de stare ale solului și pădurii, ca și relația sol-plantă. Modelul de simulare include 23 de mărimi de stare și tot atâtea ecuații de stare cu timp discret. O mențiune aparte merită acele variabile de stare, care caracterizează biomasa lemnoasă, biomasa coronamentului, biomasa rădăcinilor, biomasa și/sau numărul de exemplare ale unor specii, care pe lângă valoare ecologică au și valoare economică. Mărimile de comandă, care reflectă acțiuni antropice sunt în număr de 4:

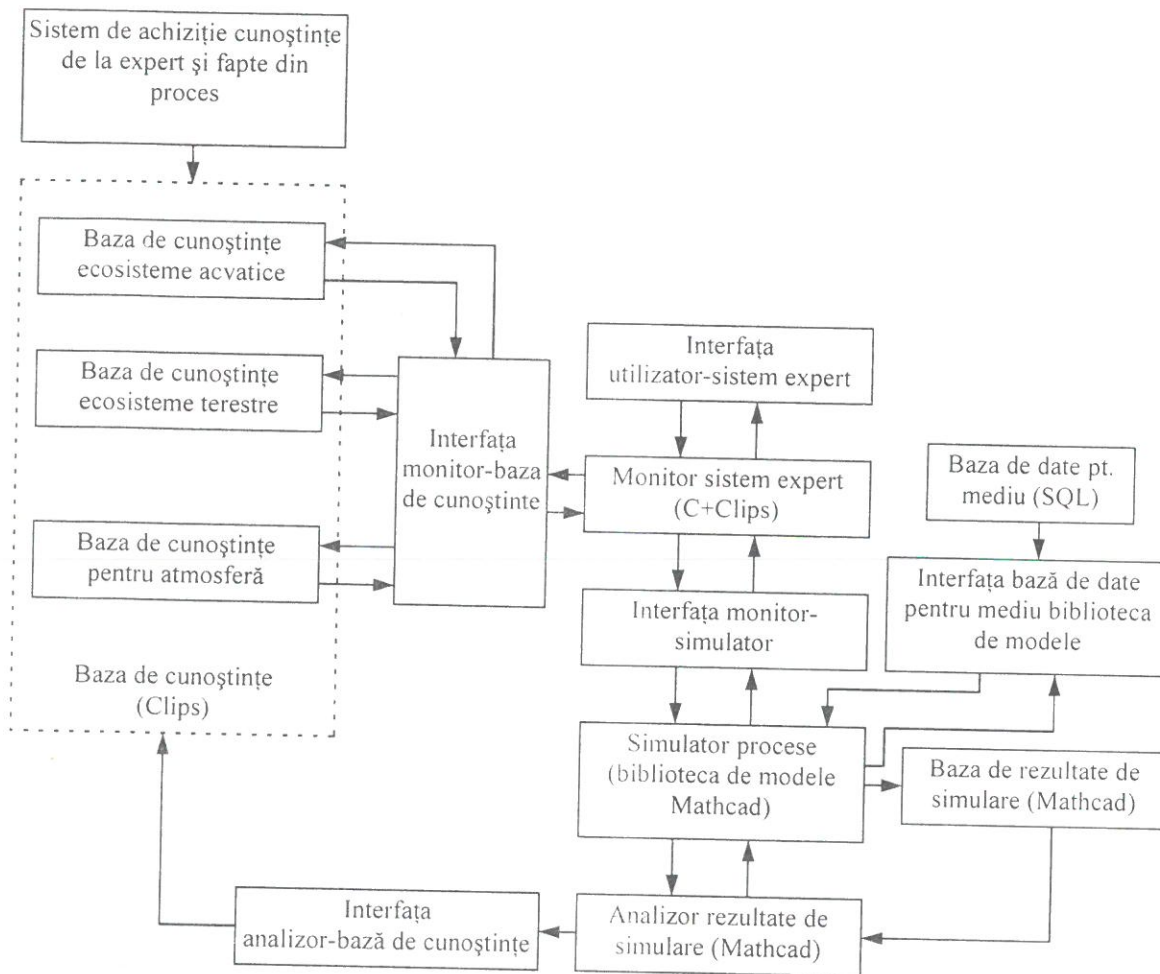


Figura 6. Schema de principiu a monitorului sistem expert

exploatarea biomasei lemnoase, replantarea, combaterea dăunătorilor și vânătoarea.

Biomasa lemnoasă este direct influențată de mărimile de stare ale solului și de factorii abiotici, climaterici și meteorologici, cum sunt: temperatura aerului și a solului, umiditatea aerului și a solului, cantitatea de humus din sol, intensitatea radiației solare, presiunea aerului, viteza vântului, concentrația de nutrienți în soluția de sol, concentrația de macro- și microdescompunatori din sol, pH, ș.a.

În baza de cunoștințe, care include 116 reguli euristice și 18 fapte, există o regulă care, atunci când este respectată asigură starea biomasei lemnoase, în intervalul de suboptimalitate dorit de către expert. Această regulă scrisă în limbajul Clips, are forma:

```
(defrule ba7 ""
(test (aparține_or 100 500 ?*I* 100 500))
(test (aparține_or -14 15 ?*Ta* 25 35))
(test (aparține_or -10 15 ?*Ts* 25 35))
(test (aparține_or 5 50 ?*p* 75 125))
(test (aparține_or 20 50 ?*e* 75 135))
(test (aparține_or 4 5 ?*pH* 8 11))
(test (aparține_or 3 4 ?*H* 8 12))
(test (aparține_or 10 50 ?*Ua* 60 80))
(test (aparține_or 2 30 ?*Us* 50 80))
(test (aparține_or 0.01 0.04 ?*P* 0.05 0.1))
```

```
(test (aparține_or 0.05 0.15 ?*N* 0.25 0.4))
(test (aparține_or 10 30 ?*Bd* 50 100))
(test (aparține_or 5 10 ?*BMD* 20 50))
(test (aparține_or 500 750 ?*BIC* 1500 2500))
(test (aparține_or 500 1000 ?*BIS* 2000 3000))
(test (aparține_or 250 500 ?*BIR* 1000 2000))
(test (aparține_or 5 20 ?*BVC* 40 80))
(test (aparține_or 100 500 ?*NP* 1000 1500))
=>
```

```
(bind ?*B* increase_slowly)
(bind ?*Bb* stationary)
(bind ?*Br* increase_slowly)
(bind ?*L* increase)
(bind ?*S* increase_slowly))
```

Examinând rezultatele obținute prin simulare, se constată că biomasa lemnoasă scade sub limita inferioară a intervalului de variație, dorit de către expert (a se vedea și figura 7). În această situație, s-a apelat la un algoritm de control, bazat pe modelul matematico- euristic. Algoritmul respectiv folosește regulile euristice (de comportare, de control și decizie) preluate de la expert, și aflate în baza de cunoștințe Clips, pentru a sintetiza o comandă/acțiune, capabilă să readucă biomasa lemnoasă B_i în interiorul intervalului $[B_{\min}, B_{\max}]$.

În general, evoluția unor mărimi de stare este influențată de comportamentul anumitor factori ce caracterizează anumite mărimi controlabile de către om. De exemplu, în cadrul modelului *FOREST*, cantitatea de biomasă lemnoasă poate fi influențată negativ de către om, prin tăierea unui număr prea mare de arbori într-o anumită perioadă a anului, dar și pozitiv prin replantări de arbori și utilizarea de insecticide pentru combaterea dăunătorilor.

Printr-un algoritm bazat pe o simulare a unui ciclu în produsul Mathcad 5.0, folosind doar instrucțiunea de testare *IF* și operații asupra unui vector, facilitate de acest limbaj, am determinat acest factor astfel încât evoluția biomasei lemnoase să nu scadă sub pragul minim sau, în cazul în care acest lucru s-a întâmplat, să fie corectat (asa cum se vede în figura 7 - curba superioară).

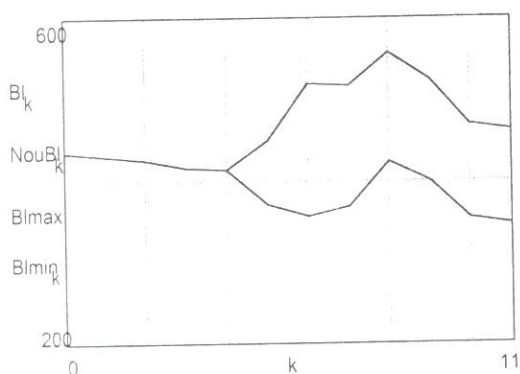


Figura 7. Evoluția biomasei lemnoase în regim natural (B_k) și în regim comandat ($nouB_k$)

Studiu de caz privind modelarea și simularea unui ecosistem acvatic

Acest experiment se referă la ecosistemul Delta Dunării. Datorită intervențiilor antropice nechibzuite, a exploatarei exagerate a resurselor naturale (pescuit, vânătoare, recoltare plante macrofite etc) și a poluării apei și a aerului, echilibrul ecologic al Deltei suferă schimbări profunde, iar existența unor specii cu valoare economică ridicată este amenințată.

Pentru realizarea experimentului s-a folosit modelul *DELTA*, descris cu ajutorul a 20 mărimi de stare: 4 mărimi de stare hidrologice - nivelul apei, adâncimea apei, volumul apei, factorul de îmborsărire a apei; 3 mărimi de stare hidrochimice - concentrația de fosfor, de azot și de oxigen dizolvat; 13 mărimi de stare biologice - concentrația de fitoplancton, zooplancton pașnic și răpitor, biomasa de plante macrofite, biomasa de pește pașnic și răpitor, numărul de pelicani adulți, subadulți și pui, cormorani adulți, subadulți și pui și detritus. Mărimile de comandă sunt de natură hidrologică (construire de canale noi, dragare, diminuarea gradului de acoperire cu vegetație etc) și/sau biologică (pescuit, vânătoare, repopulare etc)

Baza de cunoștințe a sistemului deltaic conține peste 200 de reguli euristice. Cazul când toți factorii

limitativi de mediu se afla în intervalul optim și, ca atare, influența lor asupra mărimilor de stare este optimă, este descris cu ajutorul regulii euristice:

```
(defrule R1
  (test(apartine 1.25e6 ?*I* 1.5e6))
  (test(apartine 18 ?*T* 26))
  (test(apartine 15 ?*Ta* 25))
  (test(apartine 750 ?*P* 770))
  (test(apartine 0.5 ?*p* 1))
  (test(apartine 0.5 ?*e* 1))
  (test(apartine 6.5 ?*pH* 7.5))
  (test(apartine 0.1 ?*v* 0.5))
  (test(apartine 0.05 ?*ro* 0.3))
  (test(apartine 0.009 ?*cx* 0.05))
  =>
  (bind ?*Bf* increase_strong)
  (bind ?*Bzp* increase_strong)
  (bind ?*Bzr* increase_strong)
  (bind ?*Bb* increase_strong)
  (bind ?*Bm* increase_strong)
  (bind ?*Bpo* increase_strong)
  (bind ?*Bpr* increase_strong)
  (bind ?*Bd* increase_strong))
```

Figura 8 prezintă factorul de îmborsărire a apei în unul din lacurile Deltei în regim natural și controlat (curba superioară).

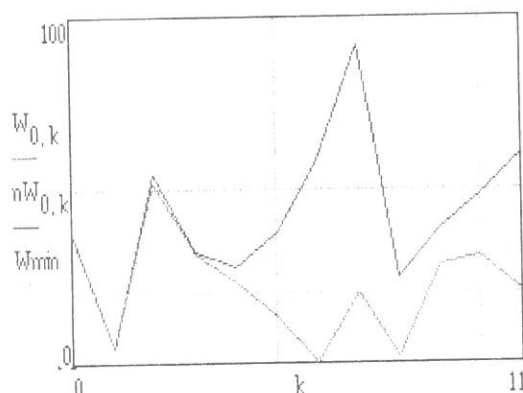


Figura 8. Evoluția factorului de îmborsărire a apei în regim natural (W_0) și controlat (nW_0)

Studiu de caz privind difuzia poluanților chimici industriali, în atmosfera orașului București

Acest experiment a fost realizat cu ajutorul modelului *DIFUZIE 1*. Menționăm faptul că, în Biblioteca de Modele a Sistemului Expert există 4 astfel de modele *DIFUZIE 1, 2, 3 și 4*, câte unul pentru fiecare gaz poluant, anume: SO_2 , acetat de etil, NO_2 și toluen. De fapt, modelul de bază este același, și anume modelul de difuzie Gaussian, diferind numai unele formule de calcul specifice și datele problemei.

Evoluția valorilor mărimilor de stare importante (concentrațiile de: dioxid de sulf, dioxid de azot, acetat de etil, toluen, înălțimea de amestec a gazelor, dispersia în spațiu a agentului poluant) pentru experimente este pusă în evidență pe parcursul unui anumit interval de timp (mergând de

la 1/2 oră până la 24 de ore). Factorii care limitează mărimile de stare sunt în număr de 9 și valorile pe care le pot lua sunt în funcție de cinci intervale care partiționează dreapta reală. Mărimile de comandă/acțiuni antropice care pot influența concentrația de gaz poluant în atmosferă sunt în număr de 4.

În concordanță cu experiența, se poate trage concluzia că acest număr este unul optim: valorile luate de acești factori în cele cinci intervale se pot interpreta astfel: valori foarte mici, mici, valori optime, valori mari, foarte mari. De exemplu, pentru factorul reprezentând temperatura de emisie a poluantului [°C] aceste intervale sunt: $(-\infty, 100)$, $[100, 125)$, $[125, 150]$, $(150, 175)$, $(175, +\infty)$

Au fost realizate un număr de 58 reguli ce acoperă situațiile reale ce pot apărea în natură. Vom prezenta mai jos o astfel de regulă:

Cazul în care toate mărimile se află în intervalul optim I_0 cu excepția unei singure mărimi de stare T , care aparține intervalului I_2 :

```
(defrule ba1_3 ""
(test (aparține 100 ?*T* 125))
(test (aparține 18 ?*Tm* 26))
(test (aparține 0.25 ?*v* 0.5))
(test (aparține 40 ?*U* 60))
(test (aparține 500 ?*I* 600))
(test (aparține 40 ?*N* 50))
(test (aparține 755 ?*p* 765))
(test (aparține 1000000 ?*S* 1000000))
(test (aparține 10 ?*Ta* 20))
=>
(bind ?*CSO2* decrease)
(bind ?*DH* decrease)
(bind ?*sigma* decrease))
```

Așa cum se observă, numele acestei reguli este <ba1_3 "">, iar compartimentarea regulii este evidentă (blocul de condiții și blocul de concluzii). Au fost luați în considerare 9 factori limitativi. Pentru toți acești factori limitativi, au fost considerate cinci intervale fuzzy. În funcție de intervalul de apartenență, corespunzător fiecărui factor, vom avea concluzii asupra unor mărimi importante.

La fiecare regulă, vom avea concluzii asupra mărimilor de stare care ne interesează. Astfel (în regula de mai sus), concentrația de dioxid de sulf CSO_2 scade, înălțimea de amestec DH scade și dispersia în spațiu a agentului poluant scade la rândul ei.

Așa cum se observă, comportamentul mărimilor de stare este descris de șapte calificative: decrease_strong, decrease, decrease_slowly, stationary, increase_slowly, increase, increase_strong. Pe baza acestor concluzii, au fost realizate grafice care vizualizează comportarea mărimilor de stare pe parcursul unui interval de timp mediu.

Figura 9 arată procesul de difuzie al dioxidului de sulf, în atmosfera orașului București. Reducerea concentrației de SO_2 în atmosferă se face prin

acțiuni rezultate din resimularea procesului de difuzie.

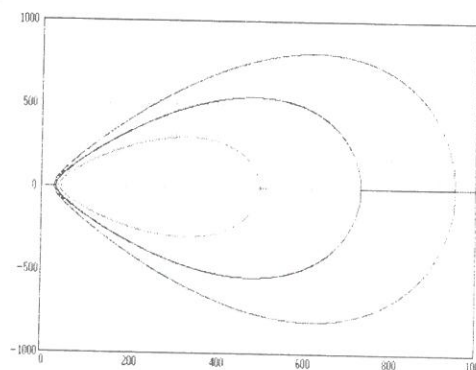


Figura 9. Procesul de difuzie al dioxidului de sulf în atmosfera orașului București

7. Concluzii

Sistemul expert prezentat în aceasta lucrare are menirea de a asista pe experții în ecologie și protecția mediului în lucrările lor. Astfel, el poate caracteriza în mod obiectiv starea actuală a sistemului cercetat, poate evalua gradul de deteriorare a echilibrului ecologic, poate să realizeze predicția, prin simulare, a unor mărimi de stare și poate evalua comenzile/acțiunile capabile să readucă aceste mărimi în interiorul intervalelor de suboptimalitate, atunci când acestea au ieșit din aceste intervale.

Sistemul expert are o arhitectură/structură modulară, cele mai importante module fiind: biblioteca de modele de simulare și control pentru ecologie și protecția mediului, simulatorul de procese, baza de cunoștințe, motorul inferențial, monitorul sistemului expert și mai multe interfețe.

Sistemul expert a fost validat cu ajutorul a trei studii de caz, de fapt trei experimente câte unul pentru fiecare din cele trei medii, acvatic, terestru și atmosfera. În plus, el a fost utilizat în rezolvarea unor probleme de cercetare aplicativă, legate de ecosisteme ca Delta Dunării, agroecosisteme și difuzia unor gaze poluante, SO_2 , NO_2 , acetat de etil și toluen în atmosfera orașului București.

Confruntat cu date experimentale, culese din teren de către ecologiști, hidrologi, fizicieni, chimiști și/sau ingineri, rezultatele de simulare și control, obținute cu ajutorul sistemului expert au arătat o concordanță satisfăcătoare.

Din punct de vedere al lărgirii ariei de cuprindere atât a bibliotecii de modele de simulare și control, cât și a bazei de cunoștințe, apreciem ca imperios necesară continuarea cercetărilor cu elaborarea modelului de simulare a unui ecosistem marin și a bazei de cunoștințe corespunzătoare, cu aplicație directă la litoralul Mării Negre.

Valorificarea rezultatelor de cercetare va putea fi făcută, în continuare, în următoarele moduri:

a) prin transfer de tehnologie, unor institute de specialitate interesate și /sau firme comerciale;

b) sub contract de asistență tehnică, la implementarea rezultatelor, între ICI și orice alt institut sau agent economic interesat;

c) prin găsirea unor parteneri străini, care să execute evaluarea, marketingul internațional și desfacerea produsului în alte țări interesate în această problemă. Menționăm că două firme una din Anglia și alta din Austria și-au oferit serviciile în acest sens.

Mulțumiri

Realizarea acestui sistem expert nu ar fi fost posibilă fără contribuția unor experți în domeniu: prof. N. Botnariuc și prof. A. Vădineanu de la Facultatea de Biologie din București, dr. Mircea Oltean și dr. Marin Falcă, de la Institutul de Biologie al Academiei și prof. Petre Găștescu și dr. Basarab Driga de la Institutul de Geografie al Academiei.

Mulțumim, de asemenea, tuturor celor care ne-au ajutat cu date care au permis testarea modelelor de simulare și control, biologi, chimiști, fizicieni, pedologi, de la ICPDD Tulcea, ICPA București, LACECA București.

Bibliografie

1. STĂNCIULESCU, F., POPA, V., ZAMFIR, A., MINCĂ, M.: Biblioteca de modele de simulare și control pentru ecologie și protecția mediului. În: Revista Română de Informatică și Automatică, vol.6, nr.4, 1996, pp. 23-36.
2. STĂNCIULESCU, F.: Simulation and Control of Environmental Systems Using a Mathematical - Heuristic Model & Algorithm. În: Environmental Software, USA (în curs de apariție).
3. NAKAMORI, Y., SAWARAGI Y.: Methodology and Systems for Environmental Decision Support. În: Preprints of LSSTA Symposium, London, vol. 1, 1995, pp. 1-11.
4. ZANNETTI, P., BREBBIA C.A. (eds): Development and Application of Computer Techniques to Environmental Studies VI. Computational Mechanics Publications, Southampton, UK, 1996.
5. BELZ, R., MERTENS, P.: Combining Knowledge-Based Systems and Simulation to Solve Rescheduling Problems. În: Decision Support Systems, 2, vol.17, 1996, pp. 141-157.
6. DONNELL, L.: Object/rule Integration in CLIPS. În: Expert Systems, 1, vol.11, 1994, pp. 29-45.
7. GISOLFI A., BALZANO W.: Constructing and Consulting the Knowledge Base of an Expert System Shell. În: Expert Systems, vol.10, no.1, 1993, pp. 29-34.
8. WILLIAMS D. & all, Design of Knowledge-Based Simulation Environment. În: Simulation, vol.67, no.2, 1996, pp. 121-135.
9. CARMICHAEL, G. R., KORN, G. A., SYDOW, A. (eds): Modelling and Simulation of Complex Environmental Problems. În: Proceedings of the International Seminary, Schloss Dagstuhl, Saarbrücken, 1995.
10. SHUKLA, J.B., HALLAM, T.G., CAPASSO V.: Mathematical Modelling of Environmental and Ecological Systems, Elsevier Science Publishers, Amsterdam, 1987.
11. VINCENT T.L & all, Applications of Optimal Control to the Modelling and Management of Ecosystems. În: Simulation, March, 1975, pp.65-72.
12. STRASKRABA, M.: Cybernetic Formulation of Control in Ecosystems. În: Ecological Modelling, 10, 1985, pp. 85-97.