

Modelul catastrofei – vârf și utilizarea lui la caracterizarea dinamicii pădurilor

R.L. Cenușă

Cenușă R.L., 2023. The cusp-catastrophe model used to characterize the forests dynamics. Bucov. For. 23(2): 137-150

Abstract. The Cusp-Catastrophe Model has demanded the attention of many ecologists and foresters, finding numerous applications in these fields as well. Its mathematical background is found in the mathematical theory of catastrophes, from the wider field of complexity analysis. Among the numerous models resulting from this theory, the Cusp-Catastrophe Model was considered to be the most appropriate for the study of forest dynamics. The model is based on two independent variables, the equation generating a discontinuous surface through the output variable, which marks the moment of manifestation of the catastrophe (disturbance).

This model was first applied on a continental scale in America, having as input variables the magnitude of disturbance and the capacity of the stand edge to buffer the disturbance effects and as output variable the proportion of pioneer/climax tree species in the composition of the new stand. Four types of disturbances were taken into account, from the fall of a tree to forest fires over large areas.

Through the study of forests in France, six types of post-disturbance dynamics, also called models, were established: the resistance model, the "Sisyphus" model, the mosaic model, the expansion model, the colonization model and the regeneration model. For each of these, the likely dynamics trajectories were established through four domains, from the pioneer stage to the climax stage.

In the last chapter we demonstrated how these models can be used at the level of forest vegetation in our country. In this respect 21 forest habitats were chosen (due to correspondences with European habitats) and the most frequent disturbances and the most likely successional models after disturbance were indicated in a table. It was considered worthwhile to present this model to Romanian specialists due to the importance of forest dynamics from the stand point of forest ecology, forest management planning and forestry education.

Keywords: mathematical catastrophe theory, forest disturbances, succesional dynamics, forest landscape.

Author Radu Leontie Cenușă (radu.cenusa@usm.ro) - "Ștefan cel Mare" University of Suceava, Faculty of Forestry, 13 Universității, 720229 Suceava, Romania.

Manuscript received October 14, 2023; revised November 28, 2023; accepted December 10 2023; online first December 20, 2023.

Introducere

În toată existența ei, pădurea a fost supusă prin binomul stațiune - perturbare (incluzând aici și intervențiile umane) unei evoluții comple-

xe, datorate atât factorilor endogeni (proce-sele interne, precum fotosinteza – respirația – transpirația, reflectate în creștere, dezvoltare, fructificație, regenerare, eliminare naturală, diferențiere structurală și spațială), cât și exogeni

(perturbări de o mare varietate, de la antropogene, la climatice, biotice, etc.). Ca urmare, dinamica pădurii nu este una lineară, ea oscilând între continuu și discontinuu, între simplu și complex, între stabil și instabil, între structurare și degradare, între spații reduse și spații extinse, între evoluții rapide și evoluții lente. Literatura de specialitate abundă în studii analitice cu caracter descriptiv, mai mult sau mai puțin cuprinzătoare, despre fenomenele dinamicii forestiere în diverse regiuni ale globului cu o diversitate extraordinară. Ca urmare, studiile recente nu caută altceva decât calea spre o abordare sintetică, holistică a complexității fenomenelor. Încercările de modelare nu sunt tocmai simple sau lipsite de dificultăți și piedici. Riscul cel mai mare nu este reprezentat de lipsa metodelor ci mai ales de omiterea de la modelare a unor situații care dețin potențialul caracterizării unor fenomene esențiale prin simplificare.

Un pas înainte spre obținerea unei imagini mai complete este făcut de metodologia investigării complexității, din care face parte și teoria catastrofelor (Gilmore 1993), la rândul său componentă a teoriei matematice a bifurcației, capabilă să explice tranzițiile bruște între două sisteme (Castrigiano și Hayes 2018). În această accepțiune, cuvântul „bifurcație” semnifică „împărțirea în două”. Teoria catastrofelor, ramură a matematicii bifurcărilor, este des utilizată în studiul dinamicii sistemelor (Arnold 1986). Un model frecvent aplicat în diverse domenii, precum fizica, biologia, chimia, medicina, economia, dinamica geologică recentă, hidrologia, care a atras și atenția ecologilor forestieri, este cel al catastrofei – vârf.

Câteva considerații matematice privind fundamentarea modelului

Teoria catastrofelor are originea în lucrarea lui René Thom, „Stabilité structurelle et morphogénèse”, apărută în 1972, și este recomandată pentru studiul sistemelor supuse schimbărilor bruște mai ales atunci când se dispune numai

de variabile calitative. În raport cu complexitatea lor (numărul de variabile și exponenții acestora), Thom (1972) clasifică modelele matematice din teoria catastrofelor în șapte clase:

A_2 : *fold (pliu)*: $x^3 + ux$;

A_3 : *cusp (vârf)*: $x^4 + ux^2 + vx$;

A_4 : *swallowtail (coadă de rândunică)*: $x^5 + ux^3 + vx^2 + wx$;

A_5 : *butterfly (fluture)*: $x^6 + tx^4 + ux^3 + vx^2 + wx$;

D_{-4} : *ombilic eliptic*: $x^2y - y^3 + ux^2 + vy + wx$;

D_{+4} : *ombilic hiperbolic*: $x^2y + y^3 + ux^2 + vy + wx$;

D_{-4} : *ombilic parabolic*: $x^2y + y^4 + uy^2 + vx^2 + wx$.

Fiecare din aceste modele au primit numele după morfologia suprafeței pe care o generează.

Bazele matematice dezvoltate în timp și numeroase aplicații sunt analizate în cuprinzătoare tratate de specialitate (Gilmore, 1993; Stewart și Poston 2012). Modelul utilizează două variabile independente (x , y) și una dependentă (z). La variații continue ale celor două variabile de intrare rezultă o variație discontinuă a variabilei de ieșire evidențiind tranziția între două stări, două sisteme. Forma grafică simplă a suprafeței de răspuns al acestui model (Yingluk și Tie Nan 2011) se prezintă în figura 1.

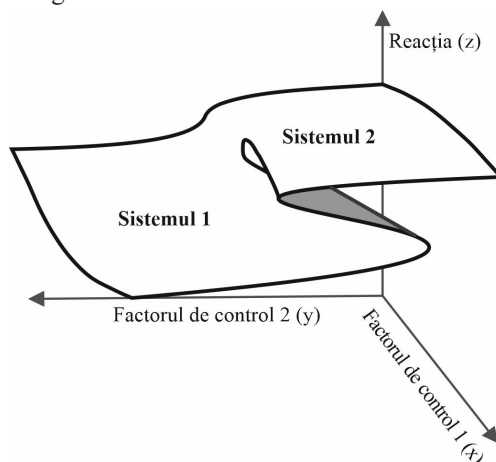


Figura 1 Forma suprafeței de răspuns la modelul catastrofei – vârf (adaptare după Yingluk și Tie Nan 2011)
Shape of the response surface to the cusp-catastrophe model (adapted from Yingluk și Tie Nan 2011)

O perturbare care se abate asupra unui sistem îi schimbă starea, de la relativ stabilă, la instabilă, trecând practic de la un sistem (sistemul 1) la altul (sistemul 2), caracterizat prin parametri de stare total diferiți. Forma canonică a ecuației de potențial a suprafeței de răspuns (figura 1) este dată de relația (Yingluk și Tie Nan 2011):

$$-V(z, x, y) = xz + \frac{1}{2}yz^2 - \frac{1}{4}z^4 \quad (1)$$

unde:

z reprezintă variabila de stare a sistemului, iar x și y sunt parametri de control. x este valoarea primei variabile de control (uneori numită factor normal sau factor de asimetrie), y este valoarea celei de-a doua variabile de control (numită uneori factorul de divizare sau factorul de bifurcație) și z valoarea de ieșire a variabilei dependente (sau variabilă de stare). Astfel fiind cunoscuți cei doi parametri, se poate prezice evoluția variabilei dependente în cazul unei schimbări bruște.

O imagine mai completă a graficii acestui model poate fi găsită într-o lucrare privind stabilitatea versanților (Siquing et al. 2006) (figura 2).

Reprezentat în spațiul tridimensional, modelul are două componente: suprafața (planul) de control (bidimensională), cele două căi de

evoluție ($A - A_1$ pentru schimbări brutale impuse de perturbare, și $B - B_1$ pentru modificări continue, lente) și suprafața de echilibru (tridimensională). Este evidențiată calea de evoluție de la un sistem la altul, la producerea catastrofei precum și setul de bifurcare cu cei doi parametri b_1 și b_2 . În prezent sunt elaborate metode de parametrizare a variabilelor modelului (Cobb 1981), precum și pachete informatice (în R) pentru utilizarea acestuia (Grassman et al. 2009).

Luând în considerare potențialul ridicat de modelare și explicare a fenomenelor complexe din diverse ecosisteme, teoria catastrofelor a atras atenția ecologilor datorită proprietăților sale de bază: i) bimodalitatea, ii) discontinuitatea (catastrofa), iii) histerezisul (răspunsul) și iv) divergența (Jones 1975). În silvologie această teorie a fost utilizată în lucrări ce au tratat fluctuațiile productivității arboretelor (Gatto și Rinaldi 1987), dinamica populațiilor de insecte (Loehle 1989; Lockwood și Lockwood 1991), comportamentul și efectele incendiilor pe teren (Hesseln et al. 1998). O sinteză a informațiilor privind modalitățile de valorificare a modelului este întreprinsă și de către Ivanova (2018).

Premisele silvologice ale utilizării modelului conceptual al catastrofei-vârf (Mcv) la studiul dinamicii pădurilor

Cu intenția de a găsi un model conceptual cuprinzător pentru exprimarea sintetică a dinamicii pădurii și pentru analizarea și clasificarea proceselor dinamicii pădurii expuse la perturbări cu diverse manifestări și cu intensități diferite, pe baza investigațiilor cu caracter ecologic pe perioade lungi și foarte lungi (de la câteva sute, la peste 3000 de ani), Frelich și Reich (1999) au considerat ca adecvat modelul conceptual al catastrofei-vârf (Mcv) și au luat în studiu trei regiuni ale Americii: zona Michiganului superior, nordul Minesottei (Statele Unite) și zona nordică a bazinului Amazonului (Venezuela), fiecare având vege-

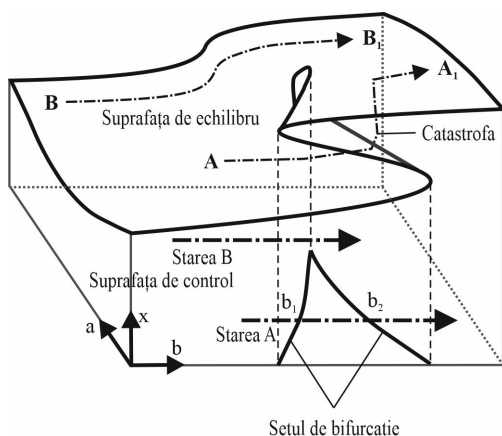


Figura 2 Componentele modelului catastrofei-vârf (adaptare după Siquing et al. 2006)
Components of the cusp-catastrophe model (adapted from Siquing et al 2006)

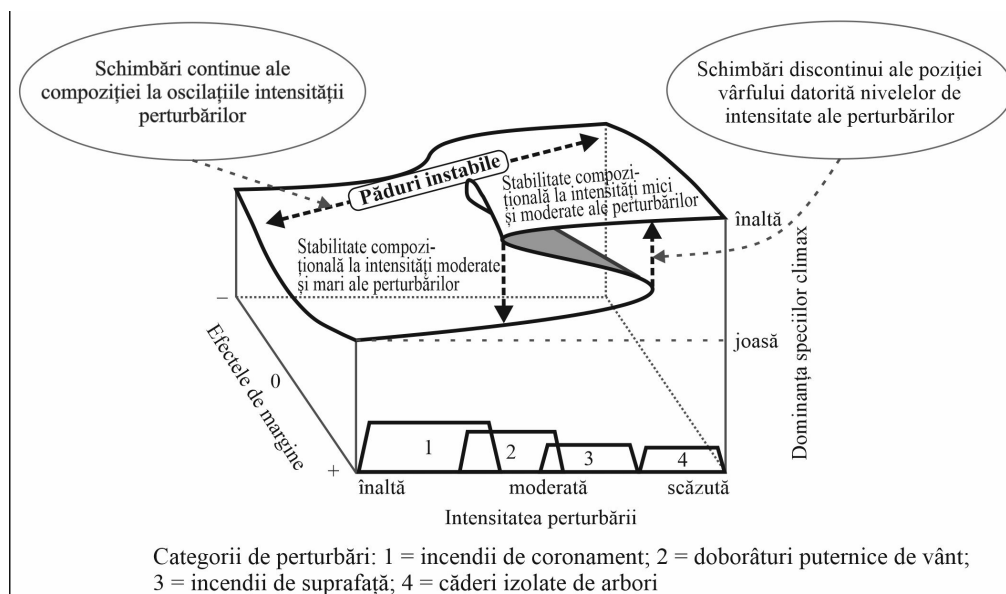


Figura 3 Suprafața de răspuns generalizată (atractorul de echilibru) la nivelul de arboret bazat pe modelul catastrofei-vârf. Efectele de margine sunt considerate puternice (+), aleatorii (0) sau minime (-) asupra tendinței de menținere a speciei dominante. Gradul de intensitate este reprezentat pentru fiecare perturbare studiată de Frelich și Reich (1999)

Generalized response surface (equilibrium attractor) at the stand level based on the cusp-catastrophe model. Edge effects are considered to be maximal (+), random (0) or minimal (-) on the tendency of the dominant species to persist. The degree of intensity is represented for each disturbance studied by Frelich and Reich (1999)

tația forestieră specifică. Acești autori introduc ca variabile independente: i) intensitatea efectelor de margine și ii) severitatea perturbării, variabila dependentă fiind desemnată prin ponderea speciilor climax (succesionale tardive) (Figura 3).

Modelul conceptual se bazează pe datele rezultate din investigațiile de teren în regiunile supuse studiului. Efectul de margine reprezintă un element important în exprimarea direcțiilor de evoluție post-perturbare, prin cortegiul de procese pe care aceasta le provoacă, fiind totodată un indicator expresiv al dinamicii peisajului forestier. Deschiderea lizierei înseamnă de fapt o transformare a regimului radiativ (fotic și termic), hidric și nutrițional, provocarea sau amplificarea unor fenomene pozitive de fructificație, germinație a semințelor, instalarea regenerării naturale, menținerea semințișurilor, reglarea amestecurilor, activarea creșterilor la arborii rămași, dar și schimbarea regimului

perturbărilor (insolații directe, insecte, doborâturi în marginea masivului în cascadă), cu influență directă asupra felului și intensității intervențiilor silviculturale. În acest cadru, efectele de margine pot fi: i) negative, dacă specia dominantă se autoconservă (schimbări minore, variația compozițională nu depășește 15%; ii) neutre, dacă se produc variații compoziționale de 20-30 % și iii) pozitive, atunci când schimbările compoziției corespund unor fluctuații majore de peste 75%. Modelarea și analiza pe spații mari a permis o clasificare a proceselor dinamice până la nivel de peisaj forestier.

Decocq (2005) ia în considerare la fundamentarea căilor de dinamică aceeași variabilă de ieșire (z), proporția speciilor climax, precum și nivelul intensității perturbărilor pentru variabila y, pe care o denumeste factorul normal, exprimată prin proporția de biomasă rămasă intactă după manifestarea catastrofei;

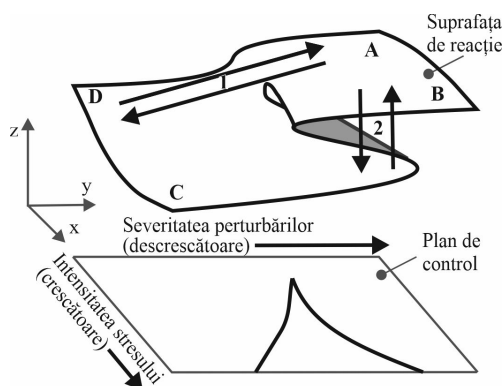


Figura 4 Reprezentarea grafică a modelului catastrofa-vârf (suprafața Riemann-Hugoniot).
Graphical representation of the cusp-catastrophe model (Riemann-Hugoniot surface).

variabila independentă x , numită factor de bifurcare, este exprimată prin nivelele de tamponare a stresului (productivitatea pădurii), în care capacitatea de reconstrucție este implicită. În figura 4 sunt expuse modalitățile de adaptare ale modelului la dinamica pădurilor europene.

Astfel, ecuația suprafeței de reacție este:

$$z^3 - yz - x = 0 \quad (2)$$

unde:

z : valoarea de ieșire (proporția speciilor climax), y : factor normal (severitatea perturbărilor = proporția de biomasă rămasă intactă) și x : factor de bifurcare (intensitatea stresului). Partea superioară a vârfului (zona valorilor ridicate ale z), atinsă pentru nivele scăzute de perturbare (pe axă valori mari ale lui y), corespunde unei dominanțe a speciilor climax (pentru valori mici ale x : zona A) sau speciilor paraclimax (pentru valori mari ale x : zona B). Partea inferioară a vârfului (zona valorilor scăzute ale z), pentru nivele semnificative de perturbare (valori scăzute ale y), corespunde unei absențe sau unei reprezentări nesemnificative ale speciilor climax, legată de lipsa unei structuri efective a pădurii (valori x ridicate: zona C) sau dominanța speciilor pioniere (valori scăzute ale x : zona D). Tranziția dintre cele două zone și/sau tamponarea se poate

face continuu, gradual (intervenția speciilor post-pioniere care caracterizează etapele tranzitorii instabile - săgețile 1) sau discontinuu și abrupt (aproape absența etapelor tranzitorii: săgețile 2), (Decocq 2005).

Modelul propus are avantajul de a defini cu ajutorul parametrilor patru domenii de stare pentru pădurile europene (figura 4):

A. nivele reduse de perturbare (cantitate ridicată de biomasă post-perturbare) pe stațiuni de productivitate relativ scăzută, având ca efect dominarea și menținerea speciilor climax;

B. combinația dintre o intensitate redusă a perturbării și o capacitate ridicată de escaladare a stresului, având ca rezultată dominanța și alternanța speciilor paraclimax;

C. caracterizat prin valori mari ale intensității perturbărilor în condiții staționale capabile să tamponeze stresul la nivel moderat, fapt ce are drept efect instalarea speciilor pioniere și a amestecurilor cu rare exemplare din specii climax;

D. domeniu ce corespunde unor intensități mari ale perturbărilor, combinate cu o capacitate redusă de tamponare, ce se traduce prin dominarea exclusivă a speciilor pioniere.

Utilizarea modelului conceptual al catastrofei - vârf la clasificarea traiectoriilor dinamicii forestiere

Pe baza exemplelor din regiunile studiate, este posibilă aplicarea modelului conceptual și a teoriilor privind evoluția pădurii, posibilitățile de înlocuire a unei specii cu alta stând sub imperiul interferențelor factuale dintre magnitudinea și frecvența (intervalele de recurență) perturbărilor (Frelich și Reich, 1999) (figura 5). Astfel, modelul conceptual al catastrofei-vârf a servit la explicarea unor tipuri de succesiuni (Frelich și Reich, 1999) în pădurile temperate ale Americii de Nord (figura 6).

Pentru pădurile ce predomină în aceste regiuni, cele mai frecvente perturbări sunt incendiile de coronament, care pot fi urmate de doborâturile produse de furtuni. În această

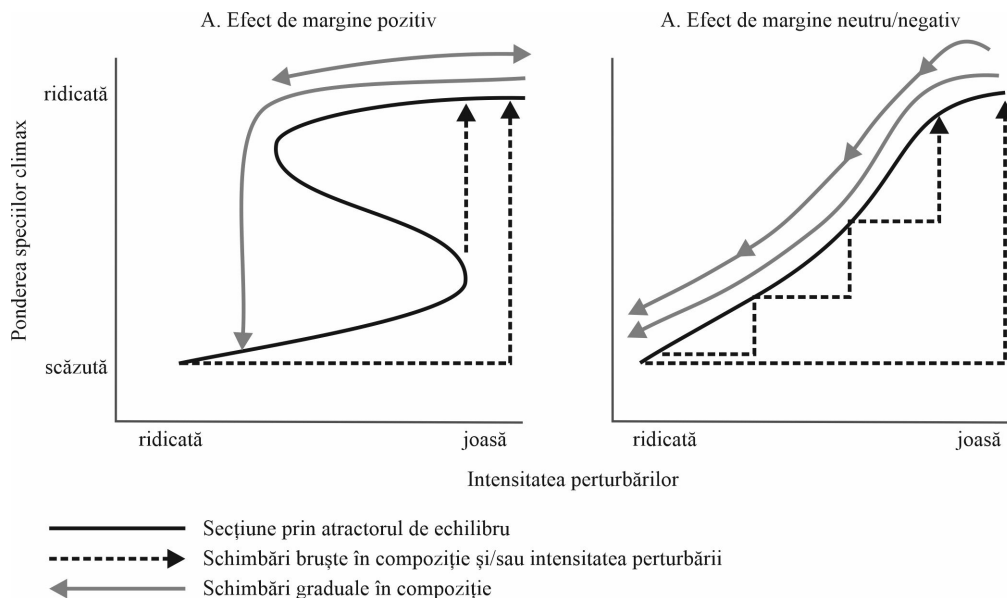


Figura 5 Schimbarea formei atractorului de echilibru funcție de severitatea perturbărilor și efectele de margine (adaptat după Frelich și Reich 1999)

Change in equilibrium attractor shape as a function of disturbance severity and edge effects (adapted from Frelich and Reich 1999)

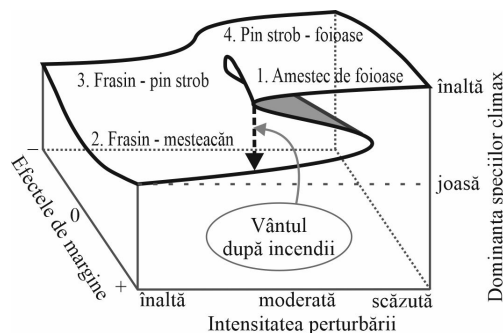


Figura 6 Modelul catastrofei-vârf aplicat la pădurile din zona temperată a Statelor Unite (adaptat după Frelich și Reich 1999)

The cusp-catastrophe model applied to temperate forests in the United States (adapted from Frelich and Reich 1999)

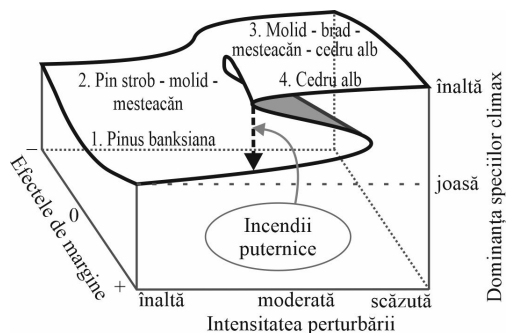


Figura 7 Modelul catastrofei-vârf aplicat la pădurile din zona nordică a Statelor Unite (adaptat după Frelich și Reich 1999)

The cusp-catastrophe model applied to forests in the northern United States (adapted from Frelich and Reich 1999)

configurație perturbatoare, pădurile relativ stabile, constituite din specii climax de diverse amestecuri (*Tsuga canadensis*, *Acer saccharicum*, *Acer rubrum*, *Tilia americana*, *Betula alleghaniensis*), sunt direcționate prin efectul de regenerare activat de aceste perturbări de severitate ridicată, către apariția pionierelor reprezentate de specii de foioase moi (*Populus*

tremuloides, *Betula papyrifera*). Concomitent cu închiderea unui masiv compus din specii diferite de situația pre-catastrofă, se face tranziția prin faza amestecului de specii intermediare/specii pioniere (*Pinus strobus*/*Populus tremuloides*) spre o nouă fază de climax, care poate să dețină compoziții schimbate în raport cu faza inițială de climax.

Pădurile din zona Marilor Lacuri au un comportament echivalent (figura 7). Sub imperiul celor două forțe, magnitudinea perturbării și nivelul de activare al potențialului latent al marginii de masiv, în condiții staționale complet schimbate, configurația speciilor implicate este alta.

În mod firesc, predominanța rășinoaselor, prin capacitatea ridicată de combustie, favorizează propagarea incendiilor ca perturbare dominantă. Pe terenul denudat se instalează ca pionieră pinul banksian (*Pinus banksiana*). Postpionier (faza 2) sunt arborele reprezentate prin pinul strob (*Pinus strobus*), molidul negru (*Picea mariana*) și mesteacănul de hârtie (*Betula papyrifera*), care îndeplinesc rolul funcțional de specii intermediare, făcând tranziția continuă spre faza 3, de climax, constituită dintr-un amestec de molid negru și mesteacăn, îmbogățit cu bradul mirositor (*Abies balsamea*) și cedrul alb (*Thuja canadensis*). Aceste specii constituie mozaicuri spațiale de diverse mărimi, cu o dinamică internă lentă, determinată de nivelul moderat – redus al perturbărilor și efectul practic insesizabil al marginii de masiv.

Pentru regiunile nord-amazoniene, dată fiind marea diversitate a speciilor din categoriile funcționale, este dată o numai o schemă generală a modelului catastrofei-vârf (figura 8), dar destul de ilustrativă.

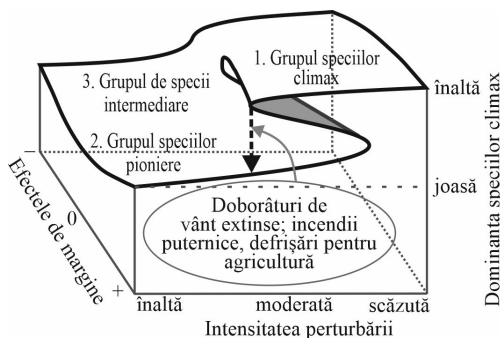


Figura 8 Modelul catastrofei-vârf aplicat la pădurile din zona nordică a Amazonului (adaptat după Frelich și Reich 1999)
The cusp-catastrophe model applied to forests in the northern Amazon (adapted from Frelich and Reich 1999)

Pentru aceste păduri dinamica este mult accelerată datorită favorabilității condițiilor staționale și diversificării regimului perturbărilor. Cu toate acestea traiectoria dinamică este relativ lineară: climax – pionier – intermediar (postpionier) – climax.

Marginea de masiv este un element de bază nu numai pentru startul direcției viitoarelor păduri ci și pentru configurarea structurii peisajului forestier al unei anumite regiuni (Frelich 2016) (figura 9).

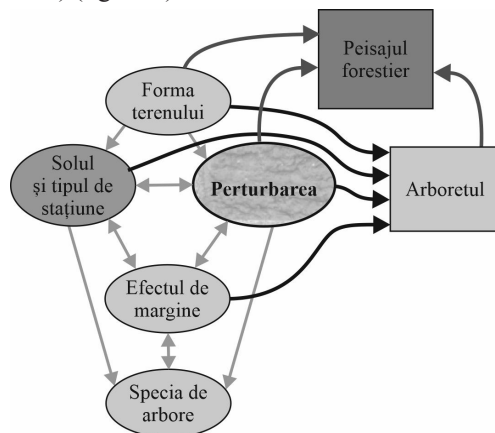


Figura 9 Rolul efectului de margine în procesele de tamponare a efectului perturbărilor, construcția arboretelor și a peisajului forestier (adaptat după Frelich 2016)
The role of edge effect in disturbance buffering processes, stand construction and forest landscape (adapted from Frelich 2016)

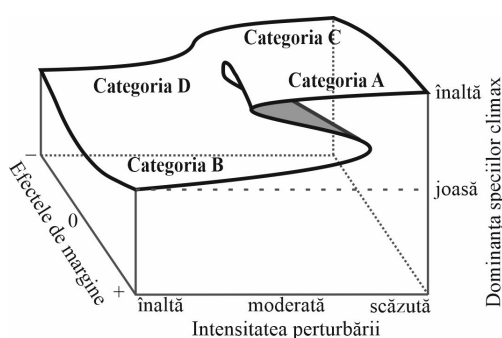


Figura 10 Clasificarea dinamicii peisajului forestier cu ajutorul suprafeței de echilibru a modelului catastrofei-vârf (adaptat după Frelich și Reich 1999)
Classifying forest landscape dynamics using the equilibrium surface of the cusp-catastrophe model (adapted from Frelich and Reich 1999)

Tabel 1 Caracteristicile de dinamică și clasificarea peisajelor forestiere (adaptat după Frelich și Reich 1999)
Dynamics characteristics and classification of forest landscapes (adapted from Frelich and Reich 1999)

Caracteristica	Categoriile de dinamică			
	A	B	C	D
Cauza dominantă a formării deschiderii	Interacțiunea dintre specii	Interacțiunea dintre specii, incendii variabile	Ochiuri prin căderi de arbori	Perturbări de diverse extinderi și intensități
Mărimea ochiului	Redusă (1-100 ha)	Variabilă	Foarte redusă (sub 1 ha)	Variabilă (majoritatea mari)
Efectul de margine (în absența episoadelor de perturbare)	Pozitiv	Negativ	Neutru / negativ	Neutru/negativ
Efectul de margine activat prin perturbare severă	Negativ	Pozitiv	Neutru/negativ	Neutru/negativ
Rolul perturbărilor puternice	Destabilizator la toate scările spațiale; schimbă speciile existente; inițiază episoade de succesiune	Stabilizator la toate scările spațiale dacă intervalul este mai mic decât longevitatea; perpetuarea speciilor existente; inhibarea celor invadatoare; creează ochiuri de vârste diferite	Destabilizator; înlocuiește speciile existente; inițiază episoade ale succesiunii	Perpetuează instabilitatea
Rolul perturbărilor moderate și reduse	Perpetuează condițiile existente, crearea ochiurilor de vârste diverse	Minor	Perpetuează condițiile existente, crearea ochiurilor de vârste diverse	Perpetuează instabilitatea
Cauza dominantă a episoadelor succesionale la scara arboretului	Perturbări severe întâmplătoare (doborâturi de vânt, incendii)	Incendii probabile	Perturbări severe precum incendiul de coronament	Perturbări de orice mărime și severitate
Cauza dominantă a episoadelor succesionale la nivel de peisaj forestier	Schimbări în regimul perturbărilor/ climatului	Schimbări în regimul perturbărilor/ climatului	Perturbări severe sau schimbarea regimului perturbărilor	Perturbări la scară extinsă
Stabilitatea marginii de masiv (aprox. 0,01-1,0 ha)	Ridicată (mai mulți arbori bătrâni)	Ridicată	Scăzută (1-2 arbori bătrâni)	Scăzută
Stabilitatea arboretului (aprox. 1-10 ha)	Ridicată	Ridicată	Scăzută - moderată	Scăzută
Stabilitatea peisajului forestier (aprox. 10-1000 ha)	Ridicată	Ridicată	Moderată - ridicată	Variabilă
Caracteristicile peisajului forestier	Ochiuri rare cu păduri în stadii succesionale timpurii în matrice cu mozaic de păduri stabile, în stadii succesionale târzii	Ochiuri rare de păduri în stadii climax în matrice de păduri în stadii pioniere	Ochiuri rare de păduri în stadii pioniere într-o matrice de mozaic în schimbare	Mozaic de specii pioniere și specii climax

Pe același model al catastrofei-vârf cu variabilele neschimbate, s-au clasificat și tipurile de peisaj forestier (Frelich și Reich 1999), evidențiindu-se 4 tipuri de peisaje forestiere (numite categorii dinamice), fiecare din ele cu însușiri caracteristice (figura 10, tabelul 1).

Este evidențiată importanța interferenței dintre cele trei variabile ale modelului, precum și a importanței lor în dinamica pădurii și a complexului de păduri în spațiul peisajului forestier. Fiecare element luat în parte reprezintă o cărămidă la construcția unui peisaj: magnitudinea perturbărilor și mărimea suprafețelor afectate, rolul jucat de marginea de masiv în redresarea ecosistemului, natura speciilor forestiere. Modelul poate fi valorificat cu eficiență la evaluarea dinamicii pădurilor din România.

Exploatând modelul conceptual al catastrofei-vârf, Decocq (2005) reușește să fundamenteze pentru pădurile europene, 6 tipuri de modele de dinamici forestiere, descriind traiectoriile probabile pentru evoluția pădurilor. Dacă se poate determina modelul de dinamică, prin intermediul potențialului ecologic al speciilor forestiere (Otto, H.J., 1994), există posibilitatea de prognoză a evoluției succesionale a pădurilor.

i) Modelul „rezistență” prezintă mai degrabă o „statică” decât o dinamică a pădurii, fiind întâlnit mai ales în condiții ecologice modeste, cu un stres ecologic ridicat. Populațiile speciilor lemnoase (nu neaparat arbori) sunt relativ stabile, incidența unei perturbări fiind ocazională. (figura 11).

În condiții de echilibru relativ, o anumită comunitate se poate cantona mai multe secole în stadiul de climax, fiind conservat ecosistemul și probând o stabilitate ridicată în spațiu și timp. Sunt date ca exemple (Decocq 2005) pentru condițiile alpine din masivele montane ale Franței „microsilvele” de sălcii pitice (*Salix herbacea*, *Salix reticulata*), „nanosilvele” constituite din *Pinus pumila*. Pentru stâncăriile de la diferite altitudini se exemplifică cu *Taxus baccata* și *Juniperus phoenicea*. Pentru regiuni de limită, controlate de

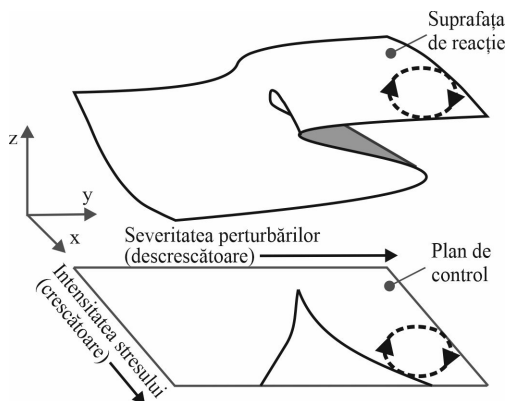


Figura 11 Reprezentarea grafică cu ajutorul suprafeței de reacție și a planului de control a traiectoriei dinamice prin modelul „rezistență” (traiectoria dinamică probabilă, reprezentată cu linie întreruptă). (adaptat după Decocq 2005)
Graphical representation with the help of the reaction surface and the control plane of the dynamic trajectory through the "resistance" model (probable dynamic trajectory, represented with broken line) (adapted from Decocq 2005).

vânt și insolație, constituie un exemplu asociațiile de *Fagus sylvatica*. În aceste condiții, fenomenele dinamice lente sunt controlate de factorii ecologici care frânează creșterea, rezumându-se la eliminarea naturală.

ii) Modelul „Sisif” (al „eternei reînnoieri”). Traiectoriile dinamice ale acestui model sunt influențate de perturbări cu o probabilitate și intensitate ridicată, care evită atingerea climaxului potențial (figura 12). Stresul ecologic este la un nivel moderat iar maturizarea ecosistemelor rămâne la stadii mai mult sau mai puțin precoci. Pădurea este construită din stadii diferite, având o diversitate ridicată. Primul exemplu care se dă este o contribuție românească (Coldea 1991). Suprafețele aluviale crude din zona montană rezultate ca urmare a inundațiilor, au o schemă normală de evoluție de la tufărișuri de salcie roșie (*Salix purpurea*) și salcie albă (*Salix elaeagnos*), la arborete postpioniere de anini (*Alnus incana*/*Alnus glutinosa*) și până la stadiul matur format din velniș (*Ulmus laevis*) și fag (*Fagus sylvatica*), însă această evoluție este tăiată la nivelul stadiului intermediar de o perturbare majoră (inundație/eroziune) și reluată de la

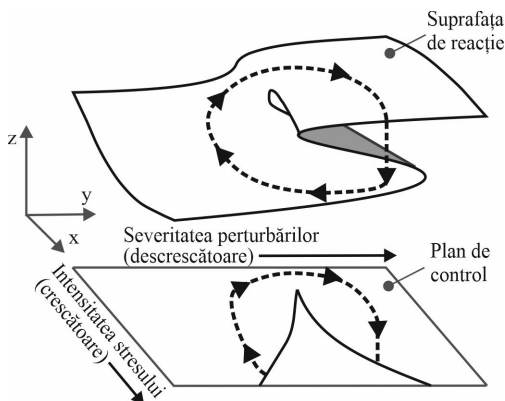


Figura 12 Reprezentarea grafică cu ajutorul suprafeței de reacție și a planului de control a traiectoriei dinamice prin modelul „Sisif” (traiectoria dinamică probabilă, reprezentată cu linie întreruptă) (adaptat după Decocq 2005)
Graphical representation with the help of the reaction surface and the control plane of the dynamic trajectory using the "Sisyphus" model (probable dynamic trajectory, represented with broken line) (adapted from Decocq 2005)

stadiul de teren nud. Alte exemple de dinamici asemănătoare sunt arboretele pioniere de scoruș (*Sorbus aucuparia*) și mesteacăn (*Betula pendula*) care (în lipsa perturbărilor majore) ar evolua linear către o arboretă postpionieră de ulm (*Ulmus glabra*) în amestec cu paltin de munte (*Acer pseudoplatanus*). Situații similare pot fi întâlnite și pe culoarele de avalanșă, sau pe alunecările de teren. Alteleori, când efectul distrugător asupra biomasei arborescente nu este total, pot rezulta mozaicuri complexe din specii pioniere-post pioniere-climax.

iii) Modelul „mozaic” Ecosistemele forestiere ce pot fi încadrate în acest model (figura 13) se caracterizează prin dominanța unei specii cu o deosebită capacitate competitivă, care va bloca temporar regenerarea altor specii, introducând discontinuități în structura claselor de vârstă.

De asemenea, moartea unui arbore reprezintă cel mai frecvent o perturbare locală. Se presupune că în cadrul acestui model pot intra în joc fenomene complexe precum allelopatia. O perturbare intensă poate schimba stabilitatea speciei dominante cu alte compoziții. În acest

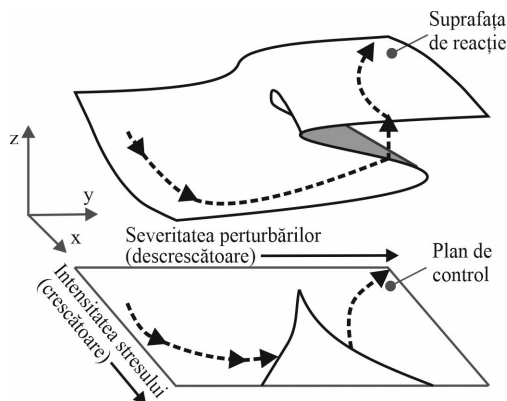


Figura 13 Reprezentarea grafică cu ajutorul suprafeței de reacție și a planului de control a traiectoriei dinamice prin modelul „mozaic”. (traiectoria dinamică probabilă, reprezentată cu linie întreruptă) (adaptat după Decocq 2005)
Graphical representation using the reaction surface and the control plane of the dynamic trajectory through the "mosaic" model. (Probable dynamic trajectory, shown with broken line) (adapted from Decocq 2005)

sens, Decocq (2005) face apel la noțiunea de „stare metastabilă”.

iv) Modelul „colonizare”. Acest model vizează ecosistemele care evoluează linear în cadrul unei succesiuni primare clasice: teren nud – ierburi – subarbuști – arbuști – pădure pionieră – pădure postpionieră (intermediară) – pădure climax (figura 14).

Alcătuirea unui mediu ecologic nou activează intensitatea și selectivitatea tensiunilor ecologice, care încep să se dilueze pe măsura progresului succesiunii. Modelul este aplicabil în cazul succesiunilor primare, progresive, endogene, pe durate de secole, chiar milenii, desfășurate pe câmpurile de lave vulcanice și fronturile ghețarilor.

v) Modelul „expansiune”. Succesiunile mai mult sau mai puțin lineare și complete, se produc mai accelerat. Se aplică în cazul pădurilor secundare, printr-o expansiune centrifugă a masivului, adică recolonizarea pădurii (Figura 15). Este cel mai răspândit model în toate pădurile globului. Și în acest caz, construirea unui nou mediu deja influențat de factori biotici, care au capacitatea de a diminua

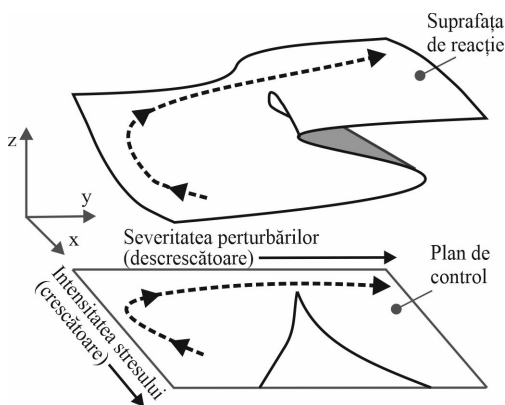


Figura 14 Reprezentarea grafică cu ajutorul suprafeței de reacție și a planului de control a traiectoriei dinamice prin modelul „colonizare”. (traiectoria dinamică probabilă, reprezentată cu linie întreruptă) (adaptat după Decocq 2005)
Graphical representation using the reaction surface and the control plane of the dynamic trajectory by the "colonization" model (probable dynamic trajectory, represented with broken line) (adapted from Decocq 2005)

mai repede stresul, și progresul succesiunii sunt evidențiate prin atingerea compoziției de echilibru (climax). Efectele de vecinătate sunt de o importanță vitală, prin prezența diasporilor. Deși aparent sunt lineare, pot interveni schimbări radicale, care să accelereze ritmul succesiunii. Un mod distinct de expansiune este recolonizarea prin nuclee.

vi) Modelul „regenerare”. Este considerat de către autor, cel mai cunoscut, mai complex și mai frecvent model de dinamică forestieră, de schimbare și supraviețuire a ecosistemelor silvestre. În aceste cazuri succesiunea este centripetă, elucidându-se întreg ciclul silvogenetic, al cărui durată depinde de longevitatea speciilor climax. (figura 16).

Speciile pioniere se instalează în breșele din coronamentul existent al speciilor climax ca urmare a unei perturbări de intensitate/mărime variabilă. Mărimea ochiurilor joacă un rol major, imprimând traiectorii diferite: în ochiurile mari, recolonizarea se va face după modelul „expansiune”, iar în ochiurile mici, după modelul „rezistență”.

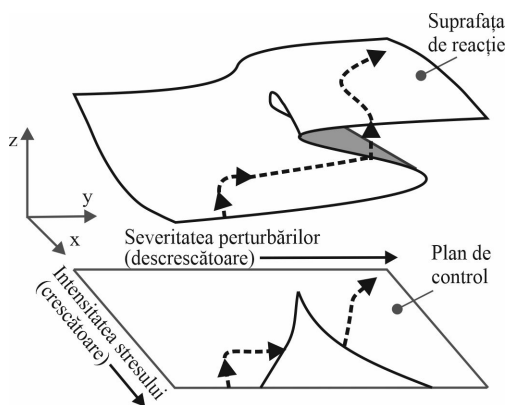


Figura 15 Reprezentarea grafică cu ajutorul suprafeței de reacție și a planului de control a traiectoriei dinamice prin modelul „expansiune”. (traiectoria dinamică probabilă, reprezentată cu linie întreruptă) (adaptat după Decocq 2005)
Graphical representation using the reaction surface and the control plane of the dynamic trajectory through the "expansion" model. (Probable dynamic trajectory, plotted with broken line) (adapted from Decocq 2005)

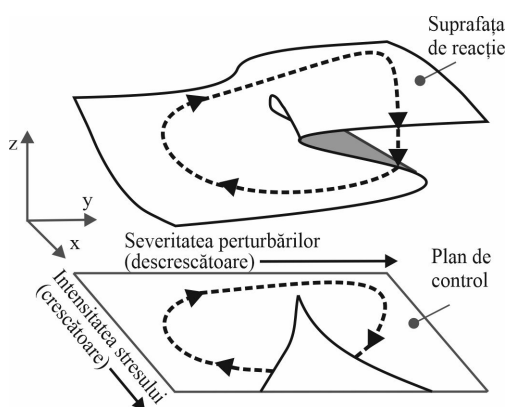


Figura 16 Reprezentarea grafică cu ajutorul suprafeței de reacție și a planului de control a traiectoriei dinamice prin modelul „regenerare”. (traiectoria dinamică probabilă, reprezentată cu linie întreruptă) (adaptat după Decocq 2005)
Graphical representation with the help of the reaction surface and the control plane of the dynamic trajectory using the "regeneration" model (probable dynamic trajectory, represented with broken line) (adapted from Decocq 2005)

Modelul catastrofei-vârf în pădurile României

Specificul zonării vegetației în țara noastră determină aplicarea cu circumspecție a acestor diverse forme ale modelului catastrofei-vârf. În primul rând, nu toate cele 6 modele pot fi validate pentru ecosistemele forestiere românești. În al doilea rând, așa cum s-a arătat, nu toate au o dinamică lineară sau discontinuă previzibilă, care să poată fi încadrată în acest model. Și nu în ultimul rând, avem o penurie de rezultate ale cercetărilor pe termen lung și foarte lung. În aceste condiții, primele tratate de tipologie forestieră (Pascovschi și Leandru 1958), respectiv de descriere a succesiunilor forestiere din România (Pașcovschi 1968), tipologie stațională forestieră (Chiriță et al 1977), pot constitui ghiduri valoroase pentru stabilirea traiectoriilor succesionale și a unui model de dinamică. Informații valoroase cu

caracter complimentar pot fi culese și din descrierea tipurilor de ecosisteme forestiere (Doniță et al. 1990).

Pentru a ilustra varietatea situațiilor în care se pot aplica modelele descrise mai sus, s-a considerat utilă folosirea clasificării și descrierii habitatelor din țara noastră (Doniță et al. 2005). Această clasificare, pe lângă informațiile deosebit de utile, prezintă două avantaje esențiale: conectarea la sistemele europene de clasificare a ecosistemelor forestiere (NATURA 2000, EMERALD, CORINE, PALEARCTIC HABITATS și EUNIS) și echivalența cu sistemele românești de clasificare a pădurilor, fapt ce a precumpănit pentru opțiunea din prezentul articol, plecându-se de la informațiile privind răspândirea lor și potențialul ecologic (Otto 1994) al principalelor specii lemnoase componente.

Table 2 Modelele Mcv (catastrofă-vârf) pentru principalele habitate forestiere din România
Mcv (cusp-catastrophe) models for the main forest habitats in Romania

Nr. crt	Tip Habitat	Cod	Perturbarea cea mai frecventă	Modelul dinamic probabil
1*	Tufărișuri sud-est carpatice de jneapăn (<i>Pinus mugo</i>) și smirdar (<i>Rhododendron myrtifolium</i>)	R3105	Avalanșe/Activitate antropică	Rezistență
2*	Tufărișuri sud-est carpatice de anin verde (<i>Alnus viridis</i>)	R3110	Avalanșe	Rezistență
3*	Tufărișuri ponto-panonice de porumbar (<i>Prunus spinosa</i>) și păducel (<i>Crataegus monogyna</i>)	R3122	Activitate antropică (pășunat)	Sisif
4*	Tufărișuri de cătină albă (<i>Hippophae rhamnoides</i>)	R3133	Antropică	Mozaic
5	Păduri sud-est carpatice de molid (<i>Picea abies</i>) fag (<i>Fagus sylvatica</i>) și brad (<i>Abies alba</i>) cu <i>Pullmonaria rubra</i>	R4101	Vânt Insecte Zăpadă Incendii	Colonizare Regenerare (în păduri naturale)
6	Păduri sud-est carpatice de fag (<i>Fagus sylvatica</i>) și brad (<i>Abies alba</i>) cu <i>Pullmonaria rubra</i>	R4104	Vânt Insecte	Colonizare Mozaic
7	Păduri sud-est carpatice de fag (<i>Fagus sylvatica</i>) și brad (<i>Abies alba</i>) cu <i>Hieracium rotundatum</i>	R4106	Vânt Insecte	Colonizare Mozaic
8	Păduri sud-est carpatice de fag (<i>Fagus sylvatica</i>) cu <i>Festuca drymea</i>	R4110	Furtuni	Colonizare Mozaic
9*	Păduri sud-est carpatice de frasin (<i>Fraxinus excelsior</i>) ulm (<i>Ulmus glabra</i>) cu <i>Lunaria rediviva</i>	R4117	Secete	Rezistență

continuare pe pagina următoare

continuare Tabel 2

Nr. crt	Tip Habitat	Cod	Perturbarea cea mai frecventă	Modelul dinamic probabil
10	Păduri dacice de fag (<i>Fagus sylvatica</i>) și carpen (<i>Carpinus betulus</i>) cu <i>Dentaria bulbifera</i>	R4118	Furtuni	Mozaic Colonizare
11	Păduri dacice de fag (<i>Fagus sylvatica</i>) și carpen (<i>Carpinus betulus</i>) cu <i>Carex pilosa</i>	R4119	Furtuni	Mozaic Colonizare
12	Păduri geto-dacice de gorun (<i>Quercus petraea</i>) cu <i>Dentaria bulbifera</i>	R4128	Izolate, de diverse cauze	Mozaic
13	Păduri dacice de gorun (<i>Quercus petraea</i>) și fag (<i>Fagus sylvatica</i>) cu <i>Festuca drymea</i>	R4129	Izolate, din cauze diverse	Mozaic
14*	Păduri dacice de gorun (<i>Quercus petraea</i>) și stejar pedunculat (<i>Quercus robur</i>) cu <i>Acer tataricum</i>	R4138	izolate	Mozaic
15*	Păduri getice de stejar pedunculat (<i>Quercus robur</i>) și gorun (<i>Quercus petraea</i>) cu <i>Carex praecox</i>	R4139	Secetă	Mozaic
16*	Păduri dacice de stejar pedunculat (<i>Quercus robur</i>) cu <i>Molinia coerulea</i>	R4144	Secetă	Mozaic
17*	Păduri danubian-balcanice de cer (<i>Quercus cerris</i>) cu <i>Festuca heterophylla</i>	R4150	Secetă	Mozaic
18*	Păduri danubian-balcanice de cer (<i>Quercus cerris</i>) și gărnită (<i>Quercus frainetto</i>) cu <i>Crocus flavus</i>	R4153	Secetă	Mozaic
19*	Răriști sud-est carpatice de molid (<i>Picea abies</i>) cu zămbbru (<i>Pinus cembra</i>) cu <i>Rhododendron myrtifolium</i>	R4202	Vânt. zăpadă	Rezistență
20	Păduri sud-est carpatice de molid (<i>Picea abies</i>) cu <i>Oxalis acetosella</i>	R4205	Vânt, zăpadă insecte, incendii	Mozaic Expansiune
21	Păduri sud-est carpatice de molid (<i>Picea abies</i>) și brad (<i>Abies alba</i>) cu <i>Hieracium rotundatum</i>	R4206	Vânt, insecte, pășunat	Regenerare
22	Păduri sud-est carpatice de molid (<i>Picea abies</i>) și brad (<i>Abies alba</i>) cu <i>Hilocomium splendens</i>	R4207	Vânt, insecte, pășunat	Mozaic Regenerare
23	Păduri sud-est carpatice de molid (<i>Picea abies</i>) și brad (<i>Abies alba</i>) cu <i>Pullmonaria rubra</i>	R4211	Vânt, insecte, pășunat	Mozaic Regenerare
24*	Păduri sud-est carpatice de anin alb (<i>Alnus incana</i>) cu <i>Telekia speciosa</i>	R4401	Inundații	Rezistență
25*	Păduri danubian-panonice mixte cu stejar pedunculat (<i>Quercus robur</i>), frasini (<i>Fraxinus sp.</i>) și ulmi (<i>Ulmus sp.</i>) cu <i>Festuca gigantea</i>	R4404	Inundații urmate de depuneri de aluvioni	Rezistență Mozaic
26*	Păduri danubian-panonice de plop alb (<i>Populus alba</i>) cu <i>Rubus caesius</i>	R4406	Inundații	Mozaic
27*	Tufărișuri de răchită roșie (<i>Salix pupurea</i>)	R4418	Inundații	Sisif

Notă: tipurile de habitate au fost selectate pe criteriul suprafețelor pe care se întind pe teritoriul României. Au fost incluse însă habitatele marcate NR.CRT* pentru expresivitatea lor privind atât manifestarea perturbărilor cât și al modelului de dinamică succesională

Analiza efectuată pe principalele tipuri de habitate forestiere din România (tabelul 2) arată că marea varietate a pădurilor țării, se regăsește și în varietatea modelelor dinamicii succesionale. Practic, toate modelele pot fi regăsite pe acest tablou, care prezintă totuși o valoare estimativă.

Concluzii

Modelul catastrofei-vârf poate fi un instrument foarte util, mai ales în planificarea amenajistică, pentru că dacă se cunoaște unul din momentele manifestării perturbării, se pot anticipa cele mai probabile căi de evoluție ale unei păduri și funcție de țelul de gospodărire, pot fi adecvate măsurile optime de management forestier. În felul de util se dovedește acest model, în planificarea organizării teritoriului pentru evaluarea evoluției peisajelor. Totodată, modelele dinamice din această grupă comportă și o importanță didactică, ele indicând multiplele capacități ale pădurii de a reacționa la diversele perturbări, prin demonstrarea rolului marginilor de masiv în redresarea ecologică a suprafețelor în strânsă corelație cu magnitudinea perturbărilor.

Bibliografie

- Arnold V.I., 1976. Bifurcation Theory and Catastrophe Theory. Dynamical Systems, volume V, Springer Verlag Berlin, Heidelberg, 271 p.
- Castrigiano P.L.D., Hayes A.S. 2003. Catastrophe Theory. Second Edition CRC Press 284 p.
- Chiriță C., Păunescu C., Vlad I., 1977. Stațiuni forestiere vol. II. Editura Academiei Republicii Socialiste România, București, 518 p.
- Cobb L., 1981. Parameter estimation for the Cusp Catastrophe Model. Behavioral Science, 26: 75-78, <https://doi.org/10.1002/bs.3830260107>.
- Coldea G., 1991. Prodrome des associations vegetales des Carpates du sud-est (Carpates roumaines). Doc. phytosoc, 13: 317- 539.
- Decocq G., 2005. Mécanismes de la dynamique naturelle des végétations forestières de montagne: essai de synthèse et conséquences en phytosociologie. Acta Botanica Gallica, 152(4): 581-594, <https://doi.org/10.1080/12538078.2005.10515516>
- Doniță N., Chiriță C., Stănescu V., 1990. Tipuri de ecosisteme forestiere din România. Editura Tehnică Agricolă, București, 390 p.
- Doniță N., Popescu A., Paucă-Comănescu M., Mihăilescu S., Biriș I.A., 2005. Habitatele din România. Editura Tehnică Silvică, București, 442 p.
- Frelich L.E., Reich B.P., 1999. Neighborhood effects, disturbance severity, and community stability in forests. Ecosystems, 2:151-166, <https://doi.org/10.1007/s100219900066>.
- Frelich L., 2016. Forest dynamics. F 1000 Research 5: 1-10, <https://doi.org/10.12688/f1000research.7412.1>.
- Otto H.J., 1994. Waldoekologie. Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart, 391 p.
- Gatto M., Rinaldi S., 1987. Some models of catastrophic behavior in exploited forests. Vegetatio, 69: 213-222, https://doi.org/10.1007/978-94-009-4061-1_22.
- Gilmore R., 1993. Catastrophe theory for scientists and engineers. Dover Publications, New York, 666p.
- Grasman R., van der Maas H.L.J., Wagenmakers E.J., 2009. Fitting the Cusp Catastrophe in R: A cusp Package Primer. Journal of Statistical Software, 32(8): 1-27, <https://doi.org/10.18637/jss.v032.i08>
- Hesseln H., Rideout D.B., Omi P.N., 1998. Using catastrophe theory to model wildfire behavior and control. Can. J. For. Res., 28: 852-862, <https://doi.org/10.1139/x98-054>.
- Ivanova N. S., 2018. Interdisciplinary approach for sustainable forest management. International Journal of Bio-resource and Stress Management 9(2): 257-261, <https://doi.org/10.23910/IJBSM/2018.9.2.1859>.
- Jones D.D., 1975. The application of catastrophe theory to ecological systems. IASA, Research Report, June 1975, 64p.
- Lockwood J.A., Lockwood D.R., 1991. Rangeland grasshopper (Orthoptera: Acrididae) population dynamics: insights from catastrophe theory. Environ. Entomol. 20: 970-980, <https://doi.org/10.1093/ee/20.4.970>.
- Loehle C., 1989. Catastrophe theory in ecology: a critical review and an example of the butterfly catastrophe. Ecol. Model., 49: 125-152, [https://doi.org/10.1016/0304-3800\(89\)90047-1](https://doi.org/10.1016/0304-3800(89)90047-1).
- Pașcovașchi S., 1968. Succesiunea speciilor forestiere. Editura Agro-silvică, București, 318 p.
- Pașcovașchi S., Leandru V., 1958. Tipuri de pădure din Republica Populară Română. Editura agrosilvică de Stat, București, 518 p.
- Siqing Q., Jiao J., Li Z., 2006. Nonlinear evolutionary mechanisms of instability of plane – shear slope: catastrophe, bifurcation chaos and physical prediction. Rock Mechanics and Rock Engineering, 39: 59 – 76, <https://doi.org/10.1007/s00603-005-0049-4>.
- Stewart I., Poston T., 2012. Catastrophe theory and its application. dover publication, New York, 512 p.
- Thom R., 1972. Stabilité structurelle et morphogénèse. Mathematical physics monograph series 17. University of Minnesota, 362 p.
- Yingluk S., Tie Nan Z., 2011. A Scenario of Applying Cusp Catastrophe Model in Determining State of Organization. Information Technology Journal, 10 (3):585 -590, <https://doi.org/10.3923/itj.2011.585.590>.