



**Universitatea Babeș-Bolyai,
Cluj-Napoca, România
Facultatea de Fizică**

Káptalan Erna-Katalin

Rezumatul tezei de doctorat

Studiul analitic și computațional al unor fenomene colective biologice și sociale

ÎNDRUMĂTOR ȘTIINȚIFIC: Prof. Dr. NÉDA ZOLTÁN

REFERENȚI ȘTIINȚIFICI : C.P. I GHEORGHIU EUGEN

Prof. Dr. SZABÓ LÓRÁND

Conf. Dr. BURDA IOAN

Cluj-Napoca

2011

CUVINTE CHEIE:

Fenomene colective, forme de comportament colectiv, sincronizarea indusă prin optimizare, modelul bloc-resort, trafic rutier, rețele aleatorii.

CUPRINS

Introducere	1
Structura tezei	2
Scurtă prezentare a Părții I	3
Prezentarea Părții II	4
Sincronizarea emergentă	4
Utilizarea modelului bloc-resort pentru comportamentul colectiv în traficul rutier	12
Utilizarea rețelelor pentru abordarea sistemelor complexe.....	15
Concluzii.....	20
Bibliografie selectivă	21

Introducere

Comportamentul colectiv este un domeniu de cercetare în plin avânt, cu multe implicații interesante și posibilități de aplicație practică. Are un autentic caracter de inter- și transdisciplinaritate, căci comportamentul colectiv este relevant pentru toate domeniile științifice: economie și științe sociale, biologie, ecologie, fizică, chimie și chiar și tehnică. Scopul prezentei teze este de a oferi o imagine unificatoare asupra acestui subiect atât de vast, fără a avea însă pretenția de a descrie în mod exhaustiv problematica sa. După o scurtă prezentare istorică și bibliografică a domeniului, vom prezenta câteva contribuții personale ce pun în evidență caracterul său interdisciplinar. Vom utiliza modele și metode clasice de fizică statistică și computațională pentru a modela și a înțelege fenomenele colective din biologie, sociologie și fizică.

Cea mai bine cunoscută formă de comportament colectiv în biologie este sincronizarea spontană. De aceea, majoritatea studiilor noastre se concentrează pe acest fenomen, pe care îl regăsim de asemenea în sistemele sociale și fizice. Contribuția noastră la acest domeniu constă în realizarea unor studii numerice și experimentale pentru o nouă paradigmă de sincronizare, bazată pe o dinamică de optimizare. Această nouă abordare ar putea explica diverse fenomene de sincronizare într-un mod foarte elegant.

În cadrul celui de-al doilea studiu, am luat în considerare un model fizic simplu pentru a aborda un fenomen colectiv complex din viața cotidiană actuală: traficul rutier. Acesta poate fi modelat cu ajutorul câtorva modele bazate pe agenți, însă abordarea noastră în acest caz este alta: pentru înțelegerea comportamentului colectiv în acest sistem, am ales familia generală de modele bloc-resort cu aderare-alunecare.

În fine, am inclus și câteva studii în domeniul rețelelor sociale, domeniu aflat în plină dezvoltare. Rețelele sociale sunt guvernate în general de structura lor subiacentă de rețea. De aceea, comportamentul colectiv în astfel de sisteme este guvernat și de topologia rețelelor respective. În prezenta teză includem și un exemplu de studiu al rețelelor, investigând o rețea socială amplă, și anume rețeaua de mobilitate studentescă Erasmus (RME) și modelând-o cu rețele aleatorii. Prin investigarea acestei rețele, mapăm și modelăm relațiile de colaborare profesională ale cadrelor universitare și modul în care acestea se reflectă în mobilitatea studenților.

Fenomenele colective pot fi privite din perspectiva teoriei conectivității: putem identifica interacțiuni și conexiuni între componentele sistemului, influențarea reciprocă și interacțiunea dintre sistem și mediul său, analogii și principii de bază care guvernează diferitele fenomene.

Ca profesor de fizică ce-și practică profesia la nivel liceal, am avut ocazia să constat că domeniul de studiu ales pentru teză s-a dovedit a fi foarte util și revelator pentru mine. Pe parcursul studiilor mele doctorale, am descoperit cât este de important să-mi îndemn elevii să observe și să caute în mod deliberat conexiuni între fenomene aparent îndepărtate. Fenomenele naturale, viața economică și socială sunt realități complexe. Pentru a le putea pătrunde, generațiile tinere trebuie să fie capabile să perceapă esența unui fenomen, și prin analogie să identifice relațiile de cauzalitate și principiile de bază care le guvernează. Abordarea transdisciplinară a fenomenelor colective poate contribui la îmbunătățirea capacităților cognitive ale copiilor, la creșterea interesului lor pentru investigarea naturii și la stimularea creativității lor native.

Structura tezei

Teza este organizată în două părți. Prima conține un studiu bibliografic al fenomenelor colective și al principalelor forme de fenomene colective. Cea de-a doua parte tratează modelarea fenomenelor colective și prezintă contribuțiile originale legate de trei subiecte:

1. Sincronizarea într-o nouă perspectivă
Contribuțiile noastre au fost publicate în *Journal of Physics*, *International Journal of Bifurcation and Chaos*, *Fizikai Szemle* și au fost prezentate la patru congrese științifice.
2. Utilizarea modelelor bloc-resort pentru descrierea diverselor fenomene colective, cu accent pe traficul rutier.
Contribuțiile noastre au fost publicate în *Journal of Control Engineering and Applied Informatics* și au fost prezentate la un congres științific.
3. Importanța rețelelor în înțelegerea comportamentului colectiv în sistemele sociale.
Studiul nostru asupra acestui subiect a fost publicat în *Physica A*.

Teza conține 53 de figuri și o bibliografie compusă din 101 de referințe.

Scurtă prezentare a Părții I

Partea I conține o scurtă introducere despre fenomenele colective în sociologie, biologie și fizică și o încercare de identificare a principalelor forme de fenomene colective.

O mulțime care se confruntă cu o situație neobișnuită (de stres sau de anxietate) se comportă ca o gloată. Acest comportament de turmă a fost numit de către sociologi comportament colectiv. În aceste situații, membrii grupului vor acționa într-un mod cu totul diferit de cel în care ar fi acționat individual [1] și nu-și vor folosi capacitățile cognitive complexe. Grupul asigură anonimatul individului, deci dispare responsabilitatea individuală. Ideile și emoțiile se răspândesc prin grup ca o epidemie, ducând la emergența „sufletului colectiv”, sub imperiul căruia mulțimea va acționa spontan, într-un mod unitar. Revoltele, răzmerițele, acțiunile de linșare, mișcări de drept civil sau revoltele studențești, panica în caz de calamitate naturală, epidemiile sociale, mișcările religioase sau naționaliste, teroarea, propaganda, zvonurile, bârfele, moda, teribilismele, senzațiile media sau o simplă schimbare a opiniei publice sunt exemple de comportamente colective din domeniul sociologiei [1-3].

Pe de altă parte, în multe cazuri unele viețuitoare (colonii de bacterii, colonii de furnici, roiuri de albine sau cârduri de păsări, cirezile de ungulate) par a fi ghidate de o „inteligență ascunsă”. S-a dovedit însă că această ordine apare drept rezultat al unor interacțiuni simple dintre componentele sistemului. Asemănarea dintre acțiunile unui grup de animale sociale și ale unui grup de oameni aflat în situații speciale este ușor de acceptat, dar natura ne oferă o mulțime de alte exemple asemănătoare. Activitatea ritmică diurnă a viețuitoarelor, sincronizarea sclipirilor emise de unele specii de licurici, aspectul specific al mușuroiului sau al fagurelui, fractalii ca elemente repetitive în structura plantelor și modelele specifice de pe blana unor mamifere (dungile zebrei, petele jaguarului) sunt doar câteva exemple de comportament colectiv din domeniul biologiei [4-7].

Comportamentul colectiv presupune deci un sistem format din multe elemente între care există o oarecare interacțiune, și care, ca întreg, reprezintă mai mult decât simpla sumă a părților, producând efecte asupra mediului înconjurător la o scară mai înaltă decât efectul pe care l-ar putea produce un singur component. Fizica a descoperit și a studiat astfel de fenomene cu mult înainte de apariția conceptului de comportament colectiv [8, 9]. Astfel, fiecare fenomen colectiv a fost etichetat de către oamenii de știință și au apărut diferitele modele. Problemele care vizează mai multe corpuri aflate în interacțiune (many-body problem), formarea structurilor spațio-temporale în materiale granulare supuse vibrațiilor, formarea digitației (scurgerilor filiforme), formarea avalanșelor și a vârtejurilor, segregarea, transformările de fază, magnetizarea, cristalizarea și sincronizarea sunt exemple de fenomene colective.

Diversele discipline științifice au descoperit comportamentul colectiv în multe situații. Le-au dat un nume, le-au studiat și au încercat să le modeleze. De aceea deținem acum o multitudine de expresii aparținând conceptului-umbrelă de comportament colectiv: comportament de turmă, autoorganizare, generarea și dinamica rețelelor, sisteme colective adaptive, generare de trasee și de structuri spațio-temporale, sincronizare, autoorganizare critică, automat celular, avalanșe, clusterizare, transformări de fază ș.a.m.d. Mințile luminate au observat analogiile dintre fenomene similare studiate de discipline diferite și au încercat să găsească corelații între ele și să identifice principiile generale care le ghidează. Ca urmare, a luat ființă un nou domeniu interdisciplinar de studiu care se ocupă de fenomenele colective și modelarea lor. Pentru descrierea fenomenelor similare din diferite domenii de studiu care au la bază același mecanism se pot folosi astfel modele elaborate de oricare dintre discipline. Ca urmare, o grupare a fenomenelor colective poate fi făcută chiar pe baza dinamicii lor și a modelelor care le descriu. Astfel, se pot considera două grupuri mari, și anume: (1)

fenomenele legate de sincronizare, respectiv (2) fenomenele legate de autoorganizare și generare de structuri spațio-temporale (generare de trasee, segregare, avalanșe, automat celular, stare critică de autoorganizare ș.a.m.d.). Proprietăți ale unor sisteme complexe ca structura de rețea, apariția unor distribuții independente de scală sau posibilitatea producerii unei transformări de fază se află în strânsă legătură cu fenomenele colective, dar ar fi greu de introdus în una dintre cele două categorii, deoarece apar în cazul fenomenelor din ambele grupe. Aceste proprietăți pot fi considerate și o dovadă a complexității unui sistem.

Dată fiind marea varietate a fenomenelor colective și a modelelor utilizate pentru descrierea lor, în prezenta lucrare am ales să abordăm câteva exemple reprezentative de fenomene și modele.

Prezentarea părții II

Partea II conține contribuțiile originale în trei domenii diferite: modelarea sincronizării, modelarea unor fenomene complexe prin modele bloc-resort și utilizarea rețelelor pentru abordarea sistemelor complexe.

Sincronizarea emergentă

Una dintre cele mai cunoscute forme de comportament colectiv întâlnit la organismele vii este sincronizarea emergentă, și anume cazul în care un număr mare de oscilatoare ajung să efectueze o activitate ritmică corelată, fără contribuția vreunui dirijor. Găsim multe exemple pentru astfel de activități atât în lumea organismelor vii, cât și în cazul entităților neînsuflețite (ritmul circadian al organismelor vii, sincronizarea a două pendule, a tuburilor de orgă, a sclipirilor emise de unele specii de licurici, sincronizarea oscilatoarelor cuantice, emergența aplauzelor ritmice sau sincronizarea mersului pietonal) [10, 11].

Într-un sistem de oscilatoare, sincronizarea apare ca rezultat al interacțiunilor dintre componentele sistemului. Pentru a afla condițiile în care apare sincronizarea, trebuie să apelăm la modele ale fenomenului. În funcție de modul de interacțiune care face posibilă apariția sincronizării, putem vorbi de trei categorii de modele: modele de oscilatoare cuplate prin fază, modele de oscilatoare cuplate prin puls și modele de oscilatoare stohastice cuplate prin optimizare.

Modelul *oscilatoarelor cuplate prin fază* a fost propus de Kuramoto și Nishikawa în 1987 și consideră oscilatoare cu frecvențe proprii diferite, cuplate global. Între oscilatoarele sistemului acționează forțe care micșorează în mod continuu diferențele de fază dintre oscilatoare, până la apariția fenomenului de sincronizare [12].

Modelul *oscilatoarelor cuplate prin puls* (sau *al oscilatoarelor acumulare-declanșare*) a fost introdus de Ch. Peskin și îmbunătățit de Strogatz și alții. Acest model redă două caracteristici ale oscilatoarelor biologice: acționează în mod pulsant (după emiterea pulsului, au o perioadă mai lungă de inactivitate) și interacțiunea dintre ele nu este continuă (emiterea pulsului de către un oscilator va activa oscilatoarele care sunt aproape de propria lor etapă de emisie) [13].

Sincronizarea *oscilatoarelor stohastice cu mai multe moduri de oscilație* se produce printr-un proces de *optimizare*. Modelul introdus de Z. Neda și colaboratorii săi consideră oscilatoare de tip acumulare-declanșare cu perioade proprii diferite și fluctuante. Uimitor este faptul că aceste oscilatoare se pot sincroniza deși între ele nu există interacțiuni directe [14, 15].

Acest model diferă mult de celelalte prin faptul că un oscilator poate avea mai multe moduri de oscilație. Se consideră că perioada unui astfel de oscilator are trei secvențe consecutive $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow A \rightarrow \dots$. În secvențele A și B oscilatorul este inactiv, iar în secvența C emite un semnal.

Prima secvență (A) este partea aleatoare a perioadei oscilatorului, durata ei (τ_A) fiind o variabilă aleatoare (stohastică) cu valoarea medie τ^* . A doua secvență (B) este partea cea mai lungă a perioadei și durata acesteia poate avea mai multe valori (τ_{BI} sau $\tau_{BII} = 2 \cdot \tau_{BI}$ în cazul cel mai simplu, al oscilatoarelor cu două moduri de oscilație) (Figura 1). Oscilatoarele „lucrează” pentru a menține intensitatea totală a semnalului la o valoare optimă (f^*). La finele secvenței A, fiecare oscilator compară valoarea rezultată totală f a sistemului cu nivelul optim f^* și decide între cele două moduri de oscilație în consecință. Dacă intensitatea totală a semnalului nu este destul de înaltă ($f < f^*$), va alege modul B_I sau va opta pentru modul

B_{II} de oscilație dacă semnalul total este prea mare ($f > f^*$). Optimizarea intensității totale se realizează printr-o continuă alternare a modurilor de oscilație, proces care va conduce în mod implicit sistemul spre sincronizare.

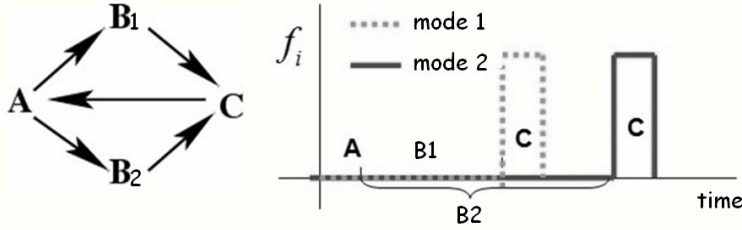


Figura 1. Dinamica posibilă a oscilatoarelor stohastice cu două moduri de oscilație

În mod surprinzător, chiar dacă nu există nici o interacțiune care ar reduce diferența de frecvență dintre oscilatoare, sincronizarea sistemului se produce pentru un interval destul de larg al nivelului de intensitate optimă f^* . Sincronizarea apare ca un efect secundar al procesului de optimizare.

În urma simulărilor pe computer, Z. Nédá și R. Sumi [16] au ajuns la concluzia că în cazul unui sistem de oscilatoare cuplate global sincronizarea apare pentru un interval al intensității f^* optime dacă stohasticitatea τ^* a sistemului este fixă. Pe măsură ce crește numărul de oscilatoare din sistem, apariția și dispariția fenomenului de sincronizare se produc din ce în ce mai brusc, asemănător unei tranziții de fază. Pentru valori date ale f^* și τ^* , gradul de sincronizare al sistemului crește direct proporțional cu creșterea numărului de componente N . În cazul în care oscilatoarele sunt cuplate local, într-o topologie 1D, gradul de sincronizare a sistemului nu depinde de numărul de oscilatoare, dar reprezentarea lui grafică va avea o formă de scară, numărul treptelor depinzând de numărul vecinilor care interacționează.

Modelul de sincronizare indusă prin optimizare descrie adecvat mai multe fenomene de sincronizare, dar fiecare caz este diferit. Prin urmare, am căutat aplicații ale modelului care să prezinte interes pentru cazul oscilatoarelor biologice. Am identificat două astfel de direcții de studiu: oscilatoarele stohastice aranjate într-o topologie de tip CNN (rețele neuronale celulare), respectiv oscilatoarele stohastice cu acumulare-declanșare care pot emite semnale de diferite lungimi. Pentru ambele direcții s-a realizat un studiu teoretic și computațional care a fost verificat și confirmat ulterior printr-un dispozitiv experimental.

1. Mai întâi, am considerat oscilatoare stohastice cu două moduri, cuplate local, aranjate în nodurile unei rețele 2D [17], deoarece acest aranjament este realist în special pentru oscilatoarele biologice.

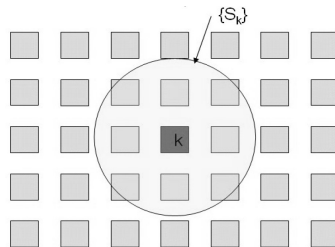


Figura 2. Topologia interacțiunii dintre oscilatoarele luate în considerare. Aici, $\{S_k\}$ reprezintă vecinătatea oscilatorului k .

După cum se vede în Figura 2, oscilatorul k „simte” prezența vecinilor S mai apropiați, detectând suma pulsurilor emise de cea mai apropiată vecinătate a sa.

Dinamica sistemului este similară cu cazul prezentat în secțiunea anterioară. Scopul studiului a fost să se afle dacă acest sistem se va comporta la fel ca sistemul de oscilatoare cuplate global. Mai precis, am urmărit să aflăm dacă îmbunătățirea periodicității este sau nu caracteristică oscilatoarelor cuplate într-o arhitectură de tip rețea neuronală celulară.

S-au realizat simulări pe computer pentru diferite numere de vecini ($S=8, 12$ și 20) și pentru diferite dimensiuni ale sistemului ($N=L \times L$). După cum se poate vedea în Figura 3, pentru un număr mic de vecini, îmbunătățirea periodicității nu este consistentă, însă în cazul unui număr mai mare de vecini, îmbunătățirea periodicității este evidentă pentru un interval mai larg al valorii f^* . Periodicitatea sistemului crește direct proporțional cu numărul de componente, la fel ca în cazul oscilatoarelor cuplate global.

Reprezentând nivelul de periodicitate ca funcție de intensitatea dorită (optimă) a semnalului (f^*), în cazul unui sistem bidimensional se observă aceleași „trepte” ca în cazul unui sistem aranjat în rețea unidimensională, iar numărul de trepte crește direct proporțional cu numărul de vecini care interacționează.

2. În cadrul celei de-a doua direcții de studiu al fenomenului de sincronizare, am construit o alternativă a modelului de oscilator stohastic cu două moduri prezentat anterior. Oscilatoarele stohastice cu două moduri prezentate anterior sunt capabile să emită semnale cu lungime a pulsului fixă și identică. Cele două moduri au perioade inactive diferite. Este util să studiem și o altă versiune a modelului de oscilator cu două moduri (modelul sau tipul II), la care partea „stinsă” sau inactivă a perioadei este invariabilă, cele două modele distingându-se prin lungimea semnalului emis.

Perioada oscilatoarelor de tip II are aceleași trei secvențe ca și modelul I, emițând semnal doar în secvența C. În modelul original, modurile de oscilație erau definite prin durata secvenței inactive. La modelul II, durata secvenței B este fixă, iar cele două moduri se vor diferenția prin durata secvenței active C. Figura 4 prezintă diferența dintre modelul II și modelul I (tipul I este modelul original al oscilatorului stohastic cu două moduri).

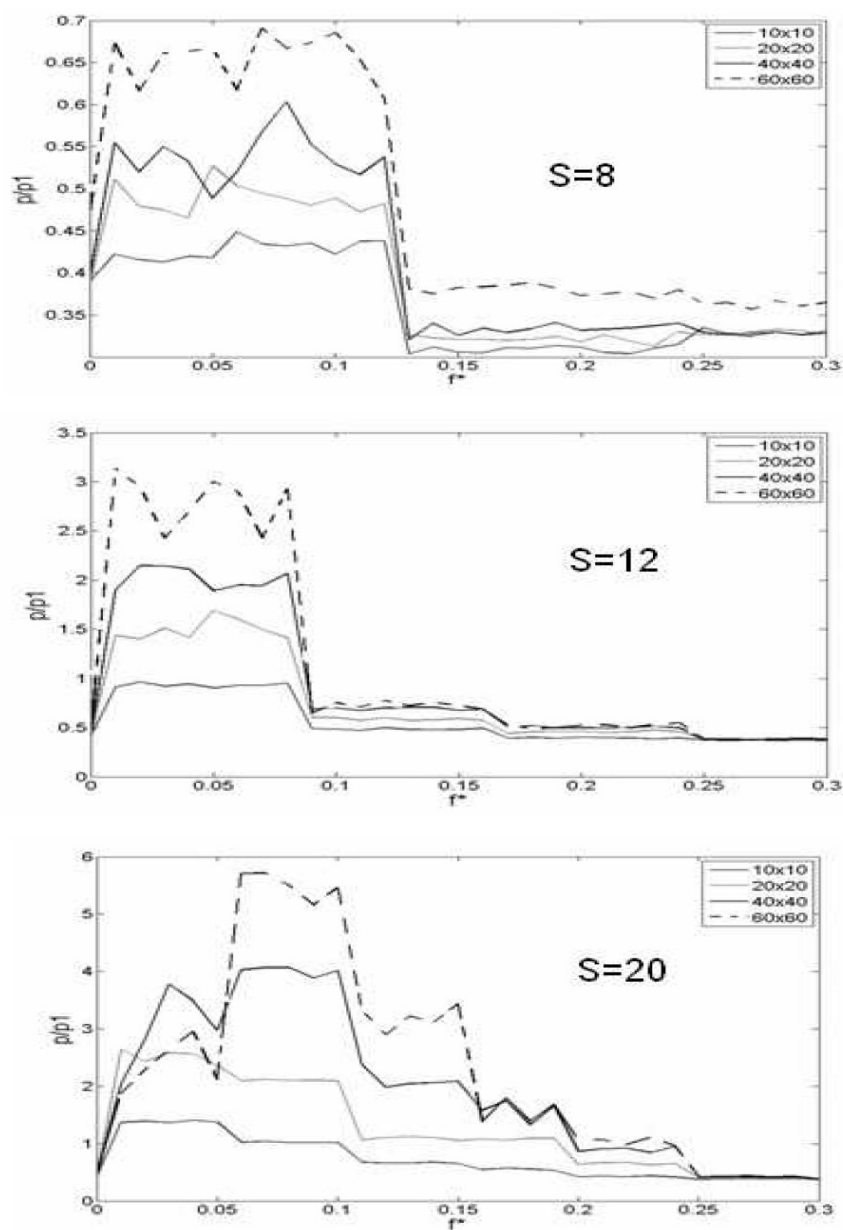


Figura 3. Periodicitatea sistemului cuplat local ca funcție a valorii optime f^* . Rezultatele corespunzătoare unor vecinătăți diferite ca număr de interacțiuni (cuantificator S) și unor dimensiuni diferite ale rețelei, după cum indică legenda ($\tau^* = 0,2$ pentru toate cazurile) [17].

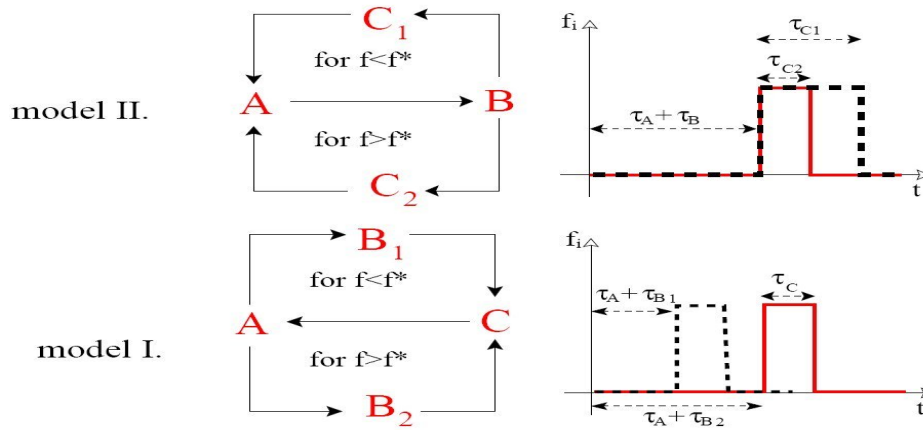


Figura 4. Reprezentare a dinamicii celor două modele diferite de oscilatoare multimod și a semnalelor lor rezultate ca funcție de timp [18].

Datorită acestei mici diferențe, dinamica de optimizare a modelului II va fi și ea diferită. Când un oscilator detectează o intensitate rezultată mai slabă ($f < f^*$) decât valoarea f^* optimă, va opta pentru modul C_1 , emițând un semnal mai lung, pentru a crește nivelul total de intensitate obținută. Când nivelul de intensitate dat de sistem este mai mare decât valoarea optimă ($f > f^*$), oscilatorul va funcționa în modul mai scurt (va emite un semnal scurt), pentru a scădea intensitatea medie a pulsului.

Simularea pe computer a unui sistem format din oscilatoare de tip II arată că, pentru valori f^* prea mici sau prea mari, nu se produce sincronizare, însă la o valoare τ^* fixă a stohasticității, se va produce sincronizare pe un interval finit al intensității f^* optime (Figura 5). Este interesant de remarcat că, pentru un nivel de stohasticitate fix al sistemului, parametrul de ordine depinde de valoarea f^* optimă: intervalul care permite realizarea sincronizării se restrânge pentru niveluri mai înalte ale stohasticității τ^* (cu cât este mai stohastic sistemul, cu atât pragul său de sensibilitate este mai ridicat).

Nivelul de sincronizare ca funcție de f^* a fost de asemenea studiat pentru cazul cuplării globale și locale (Figura 6. a, b). O observare atentă a Figurii 6 conduce la concluzia că cuplajul global este cel mai bun pentru obținerea sincronicității.

Simulările pe computer au demonstrat, de asemenea, că, pentru valori fixe ale lui τ^* și f^* , dar pentru numere N diferite de elemente, nivelul de sincronicitate crește monoton cu numărul de componente ale sistemului, la fel ca în cazul modelului I. Luând în considerare tot mai multe componente, apariția sau dispariția sincronizării se produce tot mai brusc, conform așteptărilor pentru o tranziție de fază. Așadar, sensibilitatea la valoarea de prag crește și ea odată cu creșterea numărului de oscilatoare din sistem. Este important de observat faptul că, la fel ca în cazul modelului I, nivelul de sincronizare (p) al ansamblului este mai bun decât nivelul de sincronizare al unei componente izolate (p_1) care funcționează în modul de lungă durată, deci un număr mai mare de oscilatoare în sistem înseamnă o periodicitate mai bună.

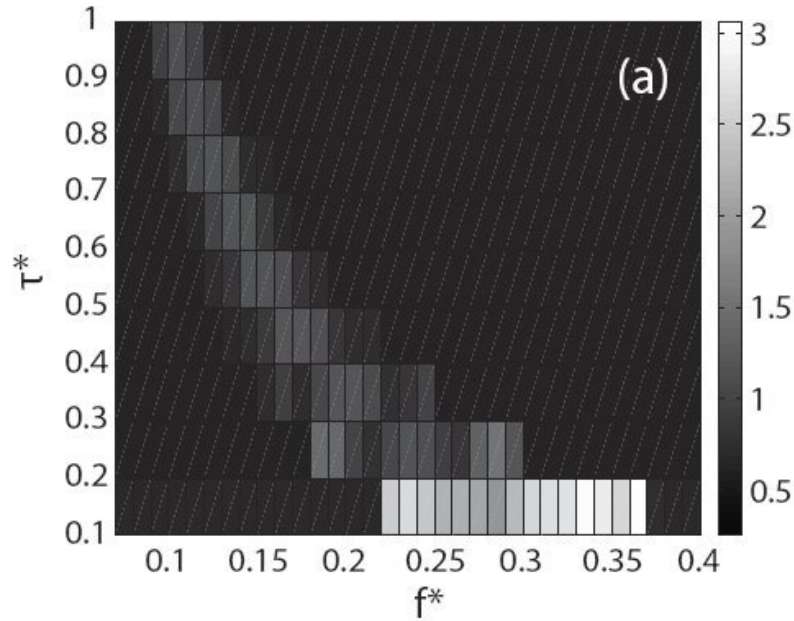


Figura 5. Nivelul de sincronizare a sistemului în funcție de τ^* și f^* . Valoarea parametrului de ordine este reprezentată prin diferite nuanțe de gri. Nuanța de gri cea mai deschisă corespunde parametrului de

ordine $\frac{p}{p_1}$ cel mai ridicat. [19]

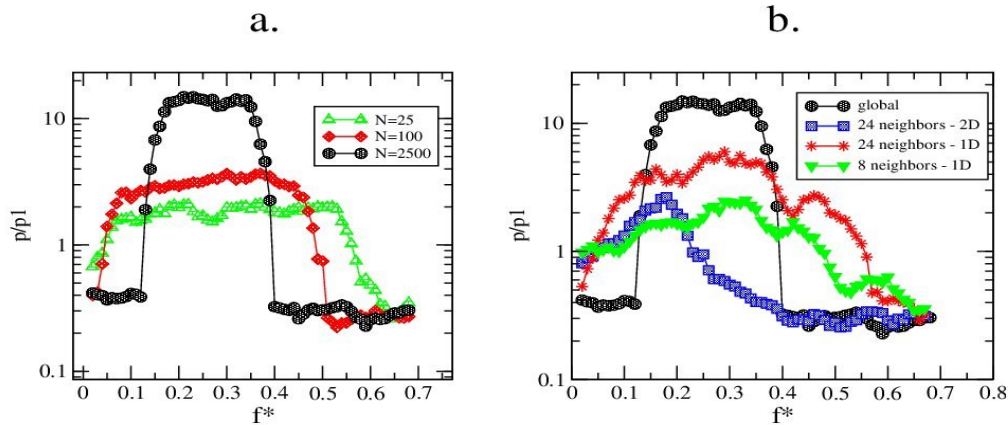


Figura 6. Nivelul de sincronizare ca funcție de f^* :

- (a) pentru oscilatoarele de model II cuplate global (25, 100 și 2500 de componente) și
- (b) pentru 2500 de oscilatoare cuplate global și 2500 de oscilatoare cuplate local, aranjate într-o rețea unidimensională sau bidimensională [20].

3. Pentru a obține o confirmare practică a rezultatelor obținute prin simulări pe calculator, am realizat și studii experimentale. Colegii mei, Sz. Boda și A. Tunyagi, au realizat o configurație de licurici electronici programabili, pe care am avut posibilitatea de a o utiliza.

„Licuricii electronici” (Figura 7) sunt circuite integrate cu schemă simplă de circuit. Fiecare dintre ei dispune de un *microcontroller* (programat să funcționeze ca oscilator de model I sau de model II), un fotorezistor (care detectează lumina din sistem) și un LED (o diodă care emite lumină ca rezultat al acțiunii oscilatorului).

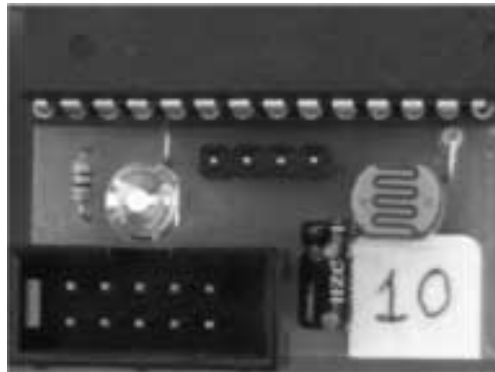


Figura 7. Imagine cu licuricii electronici și schița principalelor componente electronice [17].

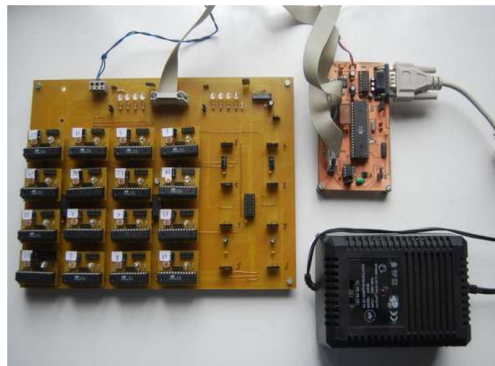


Figura 8. Placă de circuite cu licuricii electronici și interfața computerului [17, 18]

Licuricii electronici sunt plasați pe o placă de circuite (Figura 8) conectată la un computer, acesta fiind capabil să colecteze date cum sunt intensitatea luminii emise de sistem și starea componentelor, salvând toate informațiile relevante într-un fișier.

Am comparat sistemele formate din oscilatoare de model I, respectiv II. Rezultatele pentru $N=9$, 16 și 22 de oscilatoare în sistem pot fi văzute în Figura 9.

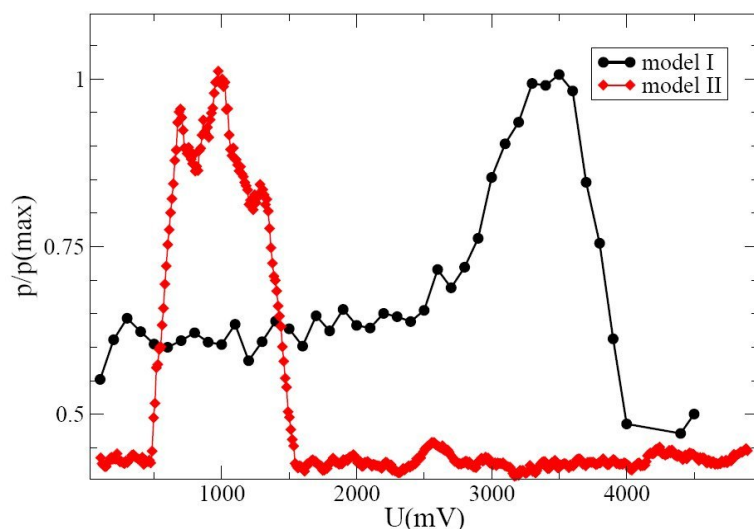


Figura 9. Rezultatele experimentale obținute pentru 16 licurici electronici cuplați, atât pentru modelul I, cât și pentru modelul II (parametrii pentru modelul I: $\tau_{B2} = 2 \cdot \tau_{B1} = 1536, \tau_C = 384$; parametrii pentru modelul II: $\tau_{C1} = 2 \cdot \tau_{C2} = 384, \tau_B = 768$) [20].

Rezultatele experimentale au confirmat toate predicțiile majore ale simulărilor numerice. Ambele curbe prezintă o tendință similară calitativ. În ambele cazuri există un interval al tensiunii de referință U (corespunzător valorii de intensitate optimă f^*) pentru care nivelul de sincronizare crește semnificativ. Nivelul de sincronizare crește monoton cu numărul de oscilatoare din sistem. Conform așteptărilor, în cazul modelului II, intervalul nivelului rezultat la care se produce sincronizarea este deplasat spre valorile inferioare ale parametrului f^* .

Sistemele studiate oferă de asemenea posibilități vaste de aplicație tehnică. Sistemele de acest tip ar putea fi utile și în scopuri de detectare, deoarece un astfel de sistem imperfect de oscilatoare cuplate cu două moduri poate funcționa ca oscilator fiabil cu perioadă stabilă. Acest comportament este, evident tolerant la defecțiuni, ceea ce permite construirea de oscilatoare cu perioade foarte stabile formate din componente imperfecte.

Utilizarea modelului bloc-resort pentru modelarea comportamentului colectiv din traficul rutier

Modelul bloc-resort sau modelul Burridge-Knopoff a fost folosit la origine pentru modelarea cutremurelor. Plăcile tectonice implicate în producerea cutremurelor sunt modelate prin două suprafețe conectate printr-un șir de blocuri. Blocurile sunt conectate prin resorturi între ele și la suprafața superioară. Placa superioară este mișcată cu o viteză constantă, iar blocurile alunecă pe suprafața inferioară denivelată producând frecare. Drept rezultat al forțelor de frecare stohastice, blocurile vor aluneca în avalanșe, ca urmare a mișcării suprafeței superioare. Avalanșele generate de alunecarea blocurilor corespund cutremurelor. Energia disipată în timpul avalanșelor va avea o distribuție de putere, astfel încât acest model simplu, unidimensional, reproduce cu succes legea empirică Gutenberg-Richter.

Grație evoluției spectaculoase a computerelor și a metodelor de simulare pe calculator, acest model mecanic simplu s-a dovedit util și în descrierea altor diverse fenomene fizice. Vopseaua sau noroiul se usucă de obicei formând mici „insule” poligonale specifice. Tiparele formate prin uscarea acestor materiale granulare pot fi reproduse cu ajutorul modelului bloc-resort [21]. Structurile de nanosfere și nanotuburi au o gamă largă de aplicabilitate în tehnica

actuală. Aceste componente minuscule nu pot fi asamblate manual: se utilizează autoasamblarea indusă de capilaritate, o tehnică inovatoare și inteligentă bazată pe principiile comportamentului colectiv. Mecanismul poate fi modelat și prin modelul bloc-resort [22]. Deși procesul de magnetizare a materialului feromagnetic este un fenomen destul de complex, un model simplu bloc-resort pune în evidență treptele de tip avalanșă ale acestei tranziții de fază induse de dezordine [23]. Modelul bloc-resort poate fi utilizat de asemenea la punerea în evidență a generării regiunilor geografice. [17]

În continuare, vom prezenta o aplicație interesantă a modelului bloc-resort: simularea traficului rutier pe o șosea cu o singură bandă [24, 25]. Acesta poate fi modelat și cu ajutorul câtorva modele bazate pe agenți, însă abordarea noastră în acest caz este alta: pentru înțelegerea comportamentului colectiv în acest sistem, am ales familia generală de modele bloc-resort cu aderare-alunecare.

În modelul nostru, blocurile reprezintă autovehiculele dintr-un șir, iar resorturile modelează interacțiunile de păstrare a distanței dintre autovehicule. Resorturile din model sunt nerealistice, transmițând forțe unidirecționale: mașina din față are un efect asupra celei din spatele ei, însă nu există forță de reacție (Figura 10).

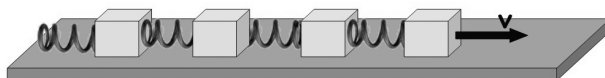


Figura 10. Lanțul bloc-resort considerat pentru modelarea traficului rutier idealizat, care se desfășoară pe o singură bandă.

Inerția conducătorilor auto este modelată cu ajutorul forțelor de frecare statică F_s și frecare dinamică F_d existente între mașini și solul de dedesubt, unde $F_s > F_d$. Raportul dintre forțele de frecare dinamică și statică $\frac{F_d}{F_s} = f$ are aceeași valoare ($f=0,6$) pentru toate simulările. Aceste „forțe de frecare” au o distribuție normală, cu o valoare medie (F_m) și o deviație standard (σ) fixe. În cazul deplasării unuia dintre blocuri într-o locație nouă se generează o nouă forță de frecare statică, iar forța de frecare dinamică aferentă se actualizează. Diferențele dintre atitudinile la volan și fluctuațiile acestora în timp sunt incluse amândouă în forțele de frecare, astfel încât deviația standard a forțelor de frecare devine unul dintre cei mai importanți parametri care guvernează simulările noastre.

Blocurile sunt etichetate în conformitate cu numărul lor de ordine, j , iar ordinea lor rămâne neschimbată în simulare. La început, „mașinile” sunt poziționate pe banda de circulație la aceeași distanță l_0 una de alta, prin urmare toate resorturile sunt în echilibru. La început, pozițiile blocurilor sunt exprimate ca $x_j(0) = -j \cdot l_0$, iar distanța pe care au parcurs-o în secvența temporală precedentă este $d_j(0) = 0$ pentru toate mașinile. Simulările se fac cu pași discreți. În fiecare secvență temporală (pas) se actualizează poziția fiecărui bloc, se generează noi forțe de frecare dacă blocul s-a deplasat în secvența temporală anterioară și se calculează forța totală ce acționează asupra fiecărui bloc. În fine, se determină deplasarea corespunzătoare a fiecărei mașini.

Înainte de a accepta noile valori pentru deplasare, trebuie verificat dacă aceste valori îndeplinesc cerințele noastre:

trebuie să fie pozitive (mașinile se pot mișca doar în față), altfel lăsăm coordonata neschimbată;

distanța dintre două blocuri nu poate fi mai mică decât valoarea minimă $d_{\min}$ (șoferii trebuie să păstreze o distanță minimă până la mașina din față, altfel distanța va fi considerată $d_{\min} = 0,3$);

șoferii trebuie să respecte o limită de viteză, astfel că deplasarea dintr-o secvență nu poate depăși $d_{\max}$. În simulare s-a ales valoarea limită a acestei mărimi: $d_{\max} = 1$.

După actualizarea poziției fiecărui bloc, $j \in \{1, 2, 3, \dots, N\}$, cu respectarea regulilor formulate anterior, după colectarea datelor relevante pentru dinamica sistemului, se actualizează timpul: $t \rightarrow t + 1$; simularea continuă prin actualizarea forțelor de frecare, dacă este cazul, și așa mai departe.

O parte dintre parametri au fost fixați la începutul simulării, astfel încât au rămas numai trei parametri liberi: numărul de mașini, N , „pasul” primului vehicul din șir, d_0 , și nivelul de dezordine corespunzător frecării statice, σ . Prin alegerea unor valori diferite pentru parametrii liberi, este important să aflăm cum afectează acești parametri comportamentul și proprietățile sistemului. S-au studiat mărimile caracteristice pentru întregul sistem, cât și cele ce caracterizează un singur component al sistemului.

Mai întâi s-a studiat distribuția cumulativă a timpilor de oprire $P_>(s)$ (probabilitatea ca o mașină să staționeze mai mult decât o valoare de staționare s dată) pentru diversele mașini dintr-un lanț. Am observat că există o mașină din șir pentru care funcția de distribuție cumulativă devine logaritmică. Aceasta înseamnă că, în limita valorilor s ridicate pentru mașina aflată în poziție critică – și pentru toate mașinile din spatele ei – funcția de distribuție a timpilor de oprire $g(s)$ este o lege de putere de tip C/x (Figura 11.)

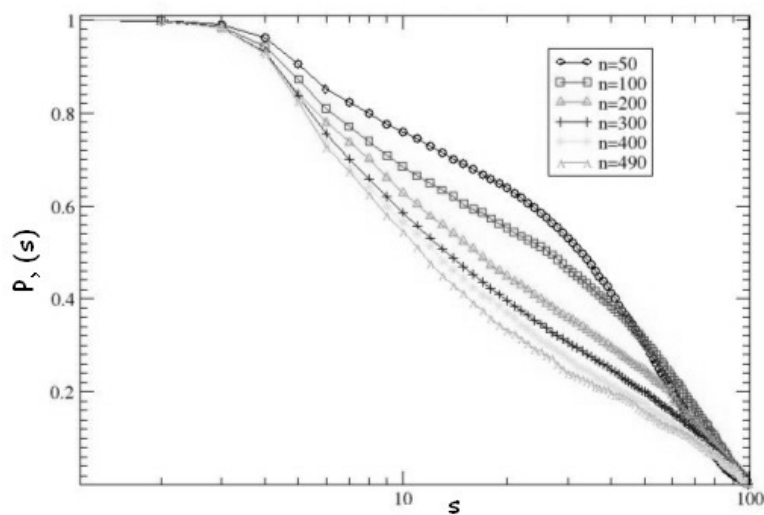


Figura 11. Funcțiile de distribuție cumulativă a timpilor de oprire pentru diverse poziții (n) ale mașinii pe o scară normală-log ($N = 500$ vehicule, viteza de deplasare a suprafeței superioare fixată la $v = d_0 = 0,3$ și dezordinea în frecarea statică $\sigma = 2$).

Ca un al doilea pas s-a ales mașina din poziția $n=300$. Distribuția cumulativă a timpilor de oprire a fost reprezentată mai întâi pentru nivelul de dezordine fixat, pentru diferite dimensiuni ale pasului de deplasare și apoi pentru o valoare fixă a pasului de deplasare, ca funcție de fluctuația s a atitudinilor la volan. Concluzia noastră a fost că, pentru un nivel fix de dezordine, există o valoare critică a pasului de deplasare (viteza de deplasare), pentru care funcția de distribuție va deveni o lege de putere de tip C/x . Prin urmare, există o „viteză a deplasării” foarte indezirabilă, pentru care mașina din poziția n se va afla într-o stare critică, reprezentată de timpi de oprire foarte fluctuanți. Pentru un pas de deplasare fix am obținut o valoare critică a dezordinii ($\sigma \approx 1,7$), pentru care mașina are o distribuție cumulativă logaritmică a timpilor de oprire, așadar o distribuție de tip lege de putere pentru timpii de oprire $g(s) = C/x$. Acesta este un comportament de tipul tranziției de fază, similar cu cel obținut pentru modelul bloc-resort aplicat modelului zgomotului Barkausen. Dat fiind că tranziția de fază este indusă de dezordine, o numim tranziție de fază indusă de dezordine.

Studiul prezentat anterior a fost efectuat în anul 2009 și a reprezentat doar primul pas în aplicarea modelului bloc-resort la modelarea traficului rutier. Studiul mai nou realizat de F. Járαι-Szabó et al. [26] este mai exact și mai detaliat, și confirmă, parțial concluzia noastră / iar unele dintre părțile sale confirmă concluzia noastră cea mai importantă: pentru fiecare mașină din șir există un nivel de dezordine critic la care starea mașinii respective este critică. Se poate identifica o tranziție de fază indusă de dezordine ca funcție de diferențele dintre atitudinile la volan. Pentru niveluri reduse de dezordine, opririle sunt necorelate și nu se manifestă niciun comportament colectiv. Pentru valori ridicate ale dezordinii, apar opriri corelate și comportament colectiv.

În concluzie, modelul simplu, mecanic, de bloc-resort poate fi adaptat cu succes pentru modelarea traficului pe o bandă. Desigur, traficul rutier poate fi modelat și prin alte instrumente (modele bazate pe agenți, dinamica fluidelor), însă exemplul nostru arată că, în anumite cazuri, o vastă gamă de fenomene complexe și destul de diferite pot fi abordate prin utilizarea unor modele foarte simple, pedagogice.

Utilizarea rețelelor pentru abordarea sistemelor complexe

Rețelele sunt coloana vertebrală, scheletul de susținere al sistemelor complexe, deci abordarea din perspectiva rețelei este foarte utilă în studiul fenomenelor colective. Modelul rețelei oferă o reprezentare vizuală a topologiei de interacțiune relevante și a ierarhiei (importanței) elementelor constitutive, furnizează informații prețioase despre legile dinamice ce guvernează evoluția temporală a sistemului și permite o descriere statistică a întregului, chiar dacă avem doar o cunoaștere parțială asupra acestuia [27].

Aici prezentăm și analizăm o rețea reală, și anume rețeaua de mobilitate studențească Erasmus (ESM). În anul 2003 conținea 2333 de universități și 134330 studenți (care călătoreau de la o universitate la alta în cadrul acestui proiect). Nodurile acestei rețele sunt universitățile, iar conexiunile rețelei sunt mobilitățile.

Analiza s-a realizat nu în ideea de a exploata programul ca atare, ci de a cerceta această rețea reală complexă, de a o descrie cu ajutorul unor instrumente matematice, de a construi modele computaționale ale ei și, în final, de a evalua calitatea modelelor construite prin compararea acestora cu valorile corespunzătoare calculate din setul de date reale.

Baza de date ESM este uriașă, așa că va trebui să ignorăm o parte din ea atunci când facem o reprezentare grafică. În cazul graficului ESM ponderat, putem alege să reprezentăm universitățile care au avut cel puțin 15 mobilități (Figura 12) sau putem opta pentru reprezentarea exclusiv a nodurilor proeminente ale graficului neponderat (universități cu cel puțin 55 de conexiuni, după cum se vede în Figura 13).

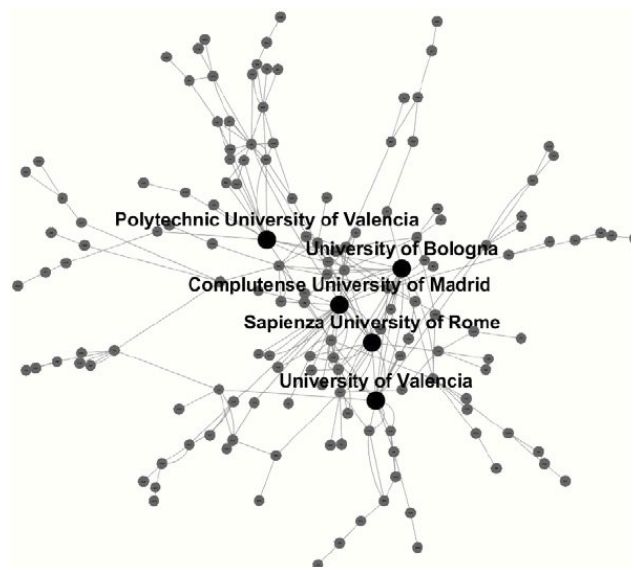


Figura 12. O parte a rețelei ESM ponderate (include 149 de universități, cu cel puțin 15 mobilități în anul 2003) [28].

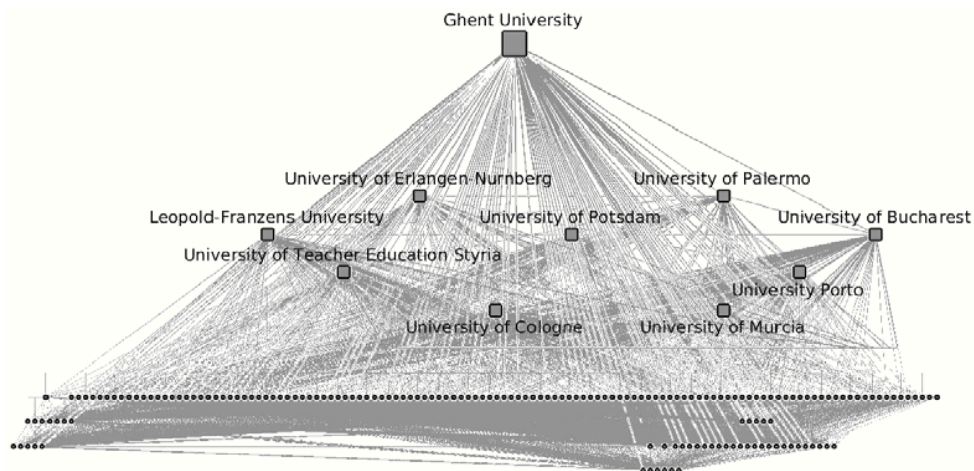


Figura 13. O parte a rețelei ESM nedirecționată și neponderată (conținând elementele cu cel puțin 55 de conexiuni, într-o reprezentare ierarhică) [28].

Prezența acestor noduri cu importanță sporită în ambele reprezentări grafice sugerează o rețea complexă. Ne așteptam deci să obținem o distribuție după grad de tip lege de putere, un coeficient ridicat de clusterizare, o distanță medie mică și conexiuni preferențiale.

Mai întâi a fost analizată rețeaua nedirecționată și neponderată (rețeaua conexiunilor profesionale dintre universități). După cum ne așteptam, rețeaua s-a dovedit a fi puternic conectată. Coeficientul său de clusterizare globală este 0,183, coeficientul de clusterizare locală este 0,292 și distanța medie dintre noduri (2,91) este scurtă, conform așteptărilor. Spre surprinderea noastră, nu am găsit conexiune preferențială, iar distribuția după grad a nodurilor de rețea s-a găsit a fi una exponențială și nu una de tip lege de putere, după cum ne-am așteptat.

În Figura 14 este reprezentată funcția de grad-rang $r(k)$. De vreme ce datele noastre se înscriu pe o linie dreaptă în graficul cu axe semilogaritmice, trebuie să concluzionăm că această rețea complexă nu este independentă de scală, după cum ne așteptaserăm: funcția de grad-rang este exponențială, deci distribuția după grad a nodurilor are aceeași formă. Acest rezultat poate fi explicat prin principiul entropiei maxime.

O altă caracteristică a rețelelor sociale complexe este conectarea preferențială sau combinarea asociativă. Mai întâi gradul nodurilor vecine, iar apoi coeficienții de clusterizare locală ai nodurilor au fost reprezentate grafic ca funcție de gradul nodurilor. Rezultatele au sugerat că în rețeaua noastră ESM nedirecționată și neponderată nu există conectare preferențială.

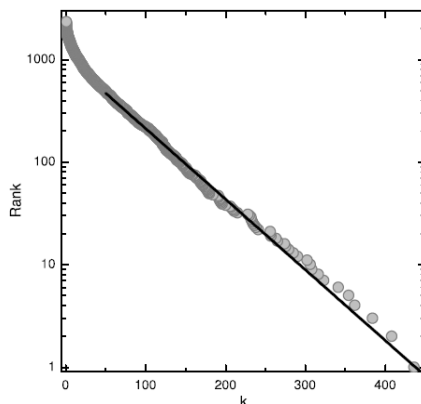


Figura 14. Reprezentarea rang-grad (pe axe semilogaritmice) pentru rețeaua ESM nedirecționată. Universitățile puternic conectate (cele cu peste 50 de conexiuni) sunt reprezentate prin cercuri pline, iar linia groasă continuă este exponențială care corespunde acestor date [28].

Se poate obține un model reușit pentru graficul nostru de tip rețea ESM neponderată și nedirecționată prin utilizarea modelului cu configurație simplă. După construirea rețelei-model, trebuie s-o comparăm cu rețeaua ESM reală. Pentru coeficientul de clusterizare globală, coeficientul mediu de clusterizare locală și distanța medie între două noduri (calculată pentru cea mai mare componentă), valorile pentru rețeaua ESM reală și pentru rețeaua-model au fost foarte apropiate, drept pentru care am conchis că modelul nostru, obținut prin metoda configurației simple, cu alocare aleatorie a conexiunilor, descrie bine rețeaua noastră reală, deci poate fi utilizat în continuarea studiului.

O mobilitate este, în general, unidirecțională. Un student IESE dintr-o universitate și INTRĂ în alta. Asta înseamnă că rețeaua noastră poate fi considerată și o rețea direcționată: există posibilitatea de a considera graficul ESM ca fiind format numai din conexiuni de INTRARE sau numai din conexiuni de IEȘIRE.

Analizând baza de date a rețelei ESM reale, putem constata că 2/3 dintre conexiunile sale sunt unidirecționale (doar INTRARE sau IEȘIRE), iar 1/3 dintre conexiuni sunt bidirecționale. Conexiunile rețelei-model nedirecționate și neponderate au fost considerate bidirecționale cu o probabilitate de 2/3 și li s-a alocat o direcție aleatorie cu o probabilitate de 1/3. Rețeaua-model rezultată a fost comparată cu cea reală prin reprezentarea grafică a rangului universităților ca funcție de conexiunile tip INTRARE și IEȘIRE pe care le au.

Rezultatele din Figura 15 arată că modelul este similar cu rețeaua reală. Valorile corespunzătoare rețelei reale direcționate sunt foarte apropiate de cele corespunzătoare graficului direcționat aleatoriu.

Dacă ne interesează structura și soliditatea conexiunilor ESM existente, va fi important să considerăm rețeaua ESM ca un grafic ponderat (soliditatea sau ponderea alocată unei conexiuni este dată de numărul de studenți care o creează). Studenții care participă la proiect au trebuit mai întâi să fie alocați universității lor de origine. E foarte probabil că orice caz de deplasare de la o universitate va fi legat de numărul de conexiuni de IEȘIRE ale universității. Pentru a găsi această corelație, folosind baza de date reale, am reprezentat numărul de studenți care părăsesc universitatea (S_{OUT}) ca funcție a conexiunilor de IEȘIRE (k_{OUT}) ale universității respective. Rezultatul de pe axele log-log sugerează o lege de putere, scalarea făcându-se cu exponentul 1,17. Utilizând această corelație, studenții au fost alocați universităților lor de origine, astfel încât fiecare nod al rețelei noastre model să aibă un număr de conexiuni de IEȘIRE și un număr (mai mare sau egal) de studenți alocați.

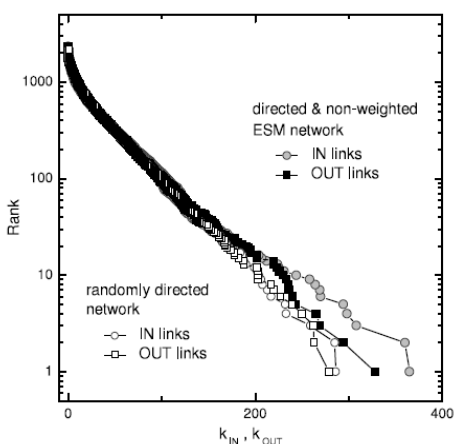


Figura 15. Rangul universităților ca funcție de gradul lor de INTRARE sau IEȘIRE pentru rețeaua ESM direcționată și neponderată (simboluri pline), respectiv pentru rețeaua-model direcționată aleatoriu (simboluri goale).

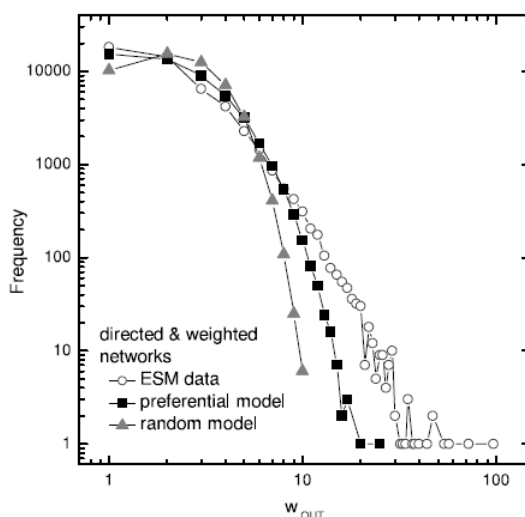


Figura 16. Compararea distribuției ponderii pentru rețelele direcționate și ponderate: rețeaua ESM (cercuri goale), versiunea direcționată a rețelei obținute pe baza modelului de configurație, cu generare de ponderi aleatorii (triunghiuri pline), respectiv preferențială (pătrate pline).

În continuare, fiecare conexiune de IEȘIRE trebuia să fie populată de studenți: acest lucru se poate realiza aleatoriu, într-un mod necorelat, sau într-un mod preferențial. Construirea rețelei-model s-a realizat în ambele moduri, iar rezultatele au fost comparate cu rețeaua reală. În Figura 16 este reprezentată distribuția nodurilor după pondere pentru rețeaua ESM reală, ponderată și direcționată (cercurile goale) și pentru ambele rețele-model: cea obținută prin conexiuni preferențiale (pătrate pline), respectiv cea obținută prin conexiuni aleatorii (triunghiuri pline). După cum se vede, rețeaua-model obținută prin conectare preferențială descrie mult mai bine rețeaua noastră ESM reală decât modelul construit prin alocare aleatorie a ponderii. Aceasta înseamnă că în rețeaua direcționată și ponderată există conectare preferențială.

În acest capitol am considerat și am studiat prin metode de fizică statistică o rețea complexă, cu foarte multe elemente. Studiul realizat ne poate convinge că sistemele complexe pot fi abordate printr-o perspectivă de rețea. Studiile asupra rețelelor și teoria rețelelor aleatorii ne pot oferi informații prețioase despre legile dinamice care guvernează evoluția temporală a unui sistem complex.

Sperăm că exemplele prezentate au convins cititorul de importanța alegerii unui model potrivit atunci când se studiază fenomenele colective. Pe scurt spus, având în vedere că „fenomenele colective” reprezintă un concept ce acoperă un domeniu foarte vast, se pot utiliza o varietate largă de modele pentru cercetarea acestor procese. Modelele respective sunt tot atâtea instrumente aflate la dispoziția cercetătorului: misiunea sa constă în alegerea instrumentului potrivit și în folosirea lui corectă.

Concluzii

În timpul secolului XX, omenirea a cunoscut o dezvoltare foarte accelerată și, în consecință, a descoperit noi limite ale creșterii. Liniile de producție automate au ajuns să preia complet muncile de rutină, fiind necesară doar programarea și supravegherea lor; o serie de rețele cu fir sau fără fir ne furnizează energie, informație și posibilități de deplasare; rețelele de carburanți, de electricitate sau de transport sunt toate uriașe și impresionante, însă și-au dovedit uneori și vulnerabilitatea. O mică defecțiune a unui șurub, a unei curele sau a unui rulment poate opri întreaga linie de producție sau un eveniment neașteptat produs într-un nod important de rețea o poate bloca temporar. Pentru a fi repusă în funcțiune, este nevoie de o intervenție exterioară, ea neputându-se „vindeca” așa cum o face un organism viu...

Cu toate echipamentele și mașinăriile noastre sofisticate, trebuie să recunoaștem că sistemele naturale alcătuite dintr-un număr mare de componente simple sunt mult mai fiabile și tolerante la defecțiuni: ele pot „simți” mediul mult mai bine, pot reacționa mult mai rapid la modificările ambianței, își pot reveni, se pot vindeca pe ele însele într-un timp scurt și sunt capabile chiar și să se autoorganizeze (fără niciun control centralizat).

De fapt, trebuie să admitem că natura este perfectă. Ajutat de toate cunoștințele și progresul tehnologic acumulate până acum, omul secolului XXI încearcă din nou să înțeleagă mecanismele care asigură perfecțiunea naturii. Cercetătorii de vârf din robotică încearcă să implementeze în domeniul lor soluțiile ingenioase oferite de natură, pentru a îmbunătăți robustețea, fiabilitatea și nivelul de autoreglare al produselor lor. Scopul lor nu este să obțină mașini mari și sofisticate, dotate cu diverși senzori, controlate și comandate de un computer central. Era roboților umanoizi cu ochi roșii rămâne de domeniul benzilor desenate.

Robotul de nouă generație va fi mai degrabă un sistem format din entități mici și simple, care interacționează între ele și cu mediul exterior, îndeplinindu-și sarcinile pe baza principiului comportamentului colectiv. Ridicarea unui obiect greu nu se mai realizează neapărat cu ajutorul unei macarale: acțiunea poate fi la fel de bine realizată de un „mușuroi de roboți”, după modelul activității furnicilor. Ideea de a folosi conceptele și mecanismele comportamentului colectiv pentru a dezvolta tehnici inspirate din biologie este genială, însă implementarea ei necesită nu doar cunoștințe și facilități tehnice: este nevoie și de reconfigurarea viziunii noastre asupra sistemelor de producție. Aranjarea ierarhică și coordonarea centrală ar trebui înlocuite treptat de proprietățile de cooperare, de reacție, de auto-reconfigurare și autoasamblare ale componentelor. De fapt, toate aceste concepte își au originile în comportamentul colectiv [29].

În concluzie, comportamentul colectiv reprezintă un domeniu de cercetare cu totul nou și o adevărată sursă de inspirație, deoarece ne oferă posibilitatea de a pătrunde în misterul uimitorului nostru univers, punându-ne la dispoziție o cheie de identificare a unor soluții revoluționare la anumite probleme practice și tehnice încă nerezolvate.

Bibliografie selectivă

1. J. Ginneken, *Collective behavior and public opinion. Rapid shifts in Opinion and Communication* (Lawrence Erlbau Associates, New Jersey, 2003)
2. L. C. Warren, *Two views of dissolution: an examination of collective behavior theory and critical theory on the subject of mass social behavior*, Ph.D. thesis, University Simon Fraser, Burnaby, Canada (1976)
3. E. Káptalan, L. Szabó, C. Szász, Z. Nédá, "Collective Behavior - A General Survey", in *Journal of Computer Science and Control Systems*, vol. 4(1), pp. 53–60 (2011)
4. I. D. Couzin, J. Krause, "Self-organization and collective behaviour in vertebrates", in *Advances in the Study of Behaviour*, vol. 32, pp. 1–75 (2003)
5. D. J. T. Sumpter, "The principle of collective animal behaviour", in *Philosophical Transactions of The Royal Society B*, vol. 361(2), pp. 5–22 (2006)
6. E. Bonabeau, G. Theraulaz, "Swarm Smarts (behaviour of social insects as model for complex systems)", in *Scientific American*, (March), pp. 72–79 (2000)
7. S. Camazine, "Patterns in nature", in *Natural History*, vol. 112(5), pp. 34–41 (2003)
8. I. S. Aranson, L. S. Tsimring, "Patterns and collective behavior in granular media: Theoretical concepts", in *Reviews of Modern Physics*, vol. 78(April-June), pp. 641–692 (2006)
9. C. Castellano, S. Fortunato, V. Loreto, "Statistical physics of social dynamics", in *Reviews of modern physics*, vol. 81(2/ april-june 2009), pp. 591–646 (2009)
10. S. Strogatz, I. Stewart, "Coupled oscillators and biological synchronization", in *Scientific American*, (December), pp. 102–109 (1993)
11. S. Strogatz, *Sync. The emerging science of spontaneous order* (Penguin Books, London, 2004)
12. Y. Kuramoto, J. Nishikawa, "Statistical macrodynamics of large dynamical systems", in *J. Stat. Phys.*, vol. 49, pp. 569–605 (1987)
13. R. Mirollo, S. Strogatz, "Synchronization of pulse-coupled biological oscillators", in *Journal on applied mathematics*, vol. 50, pp. 1645–1662 (1990) 21
14. Z. Nédá, A. Nikitin, T. Vicsek, "Synchronization of two-mode stochastic oscillators: a new model for rhythmic applause and much more", in *Physica A*, vol. 321, pp. 238–247 (2003)
15. Z. Nédá, E. Ravasz, Y. Brechet, T. Vicsek, A. L. Barabási, "Physics of rhythmic applause", in *Phys Rev. E*, vol. 61, pp. 6987–6992 (2000)
16. R. Sumi, Z. Nédá, "Synchronization of multimode pulse coupled Stochastic Oscillators", in *Journal of optoelectronic and advanced Materials*, vol. 10(9), pp. 2455–2460 (2008)
17. G. Máté, E. A. Horváth, **E. Káptalan**, A. Tunyagi, Z. Nédá, T. Roska, "Periodicity enhancement of two-mode stochastic oscillators in a CNN Type architecture", in *IEEE Proceedings of the 2010 12th International Workshop on Cellular Nanoscale Networks and Their Applications (CNNA)*, vol. 5430275(IEEE Catalog Number: CFP10CNNART) (2010)
18. **E. Káptalan**, Z. Sárkózi, A. Tunyagi, S. Boda, Z. Nédá, "Synchronization of flashing electronic oscillators", in *Joint Conference Third International Workshop of Nonlinear Dynamics and Synchronization and Sixteenth International Symposium on Theoretical Electrical Engineering*, 1569423423
19. S. Horvát, E. Horváth, G. Máté, **E. Káptalan**, Z. Nédá, "Unexpected synchronization", in *Journal of Physics, Conference Series*, vol. 182(012026) (2009)

20. **E. Káptalan**, Z. Sárközi, Z. Nédá, S. Boda, A. Tunyagi, “Optimization induced collective behaviour in a system of flashing oscillators”, in *International Journal of Bifurcation and Chaos* (2011)
21. Z. Nédá, K. T. Leung, L. Józsa, M. Ravasz, “Spiral cracks in drying precipitates”, in *Physical Review Letters*, vol. 88 (2002)
22. N. Chakrapani, B. Wei, A. Carrillo, P. M. Ajayan, R. S. Kane, “Capillarity-driven assembly of two-dimensional cellular carbon nanotube foams”, in *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America (PNAS)*, vol. 101(12), pp. 4009–4012 (2004)
23. K. Kovács, Z. Nédá, “Disorder-driven phase transition in a spring-block type magnetization model”, in *Phys Lett A*, vol. 361, pp. 18–23 (2007)
24. Z. Nédá, F. Járαι-Szabó, **E. Káptalan**, R. Mahnke, “Spring-block models and highway traffic”, in *Control Engineering and Applied Informatics*, vol. 11(4), pp. 3–10 (2009)
25. Z. Nédá, F. Járαι-Szabó, **E. Káptalan**, “Spring-block models for complex phenomena - proceedings of CSCS 17, (17th International Conference on Control Systems and Computer Science), IAFA 10”, in , vol. 3, pp. 78–81 (2009)
26. F. Járαι-Szabó, B. Sándor, Z. Nédá, “Spring-block model for a single-lane highway traffic”, in *Central European Journal of Physics*, vol. 9(4), pp. 1002–1009 (2011)
27. A. L. Barabási, *Behálózva* (Pallas-Akadémia Kiadó, Csikszereda, 2008) 22
28. A. Derzsi, N. Derzsi, **E. Káptalan**, Z. Nédá, “Topology of the Erasmus student mobility network”, in *Physica A*, vol. 390, pp. 2601–2610 (2011)
29. L. Szabó, **E. Káptalan**, C. Szász, “Applications of collective behaviour concepts in flexible manufacturing systems”, in *Journal of Computer Science and Control Systems*, vol. 4(1), pp. 187–192 (2011)

Lucrări publicate

Publicații ISI

1. Sz. Horvát, E. á. Horváth, G. Máté, **E. Káptalan**, Z. Neda, “Unexpected synchronization”, *Journal of Physics*, Conference Series, vol. 182, 012026 (2009)
2. Zs. Sárközi, **E. Káptalan**, Z. Neda, Sz. Boda, A. Tunyagi, T. Roska, “Optimization induced collective behaviour in a system of flashing oscillators”, *International Journal of Bifurcation and Chaos* IJBC-D-00328R1.
3. Z. Neda, F. Járαι-Szabó, **E. Káptalan**, R. Mahnke, “Spring-block models and highway traffic”, *Journal of Control Engineering and Applied Informatics*, vol. 11, no. 4, pp. 3–10, (2009)
4. A. Derzsi, N. Derzsi, **E. Káptalan**, Z. Neda, “Topology of the Erasmus student mobility network”, *Physica A*, 390, pp. 2601–2610 (2011)

Alte publicații

5. G. Máté, E. á. Horváth, **E. Káptalan**, A. Tunyagi, Z. Neda, T. Roska, “Periodicity Enhancement of Two-Mode Stochastic Oscillators in a CNN Type architecture”, in *IEEE Proceedings of the 2010 12th International Workshop on Cellular Nanoscale Networks and Their Applications (CNNA)*, 5430275 (2010) (IEEE Catalog Number: CFP10CNN-ART, ISBN 978-1-4244-6680-1)
6. Z. Neda, **E. Káptalan**, “A sokaság ritmusa”, *Fizikai Szemle*, vol. 9, pp. 301–305 (2009)
7. L. Szabó, **E. Káptalan**, Cs. Szász, “Applications of Collective Behavior Concepts in Flexible Manufacturing Systems”, *Journal of Computer Science and Control Systems*, vol. 4, no. 1, pp. 187–192 (2011) ISSN: 1844–6043.
8. **E. Káptalan**, L. Szabó, Cs. Szász, Z. Neda, “Collective Behavior - A General Survey”, *Journal of Computer Science and Control Systems*, vol. 4, no. 1, pp. 53–60 (2011) ISSN: 1844–6043.

Lucrări prezentate la congrese științifice

9. Z. Neda, B. Molnár, V. Melinda, **E. Káptalan**, “Correlation clustering at the thermodynamic limit”, invited talk at Yalta Optimization Conference 2010, Aug. 2-4, and submitted to Optimization Letters
10. **E. Káptalan**, Zs. Sárközi, A. Tunyagi, Sz. Boda, Z. Neda, “Synchronization of Flashing Electronic Oscillators”, accepted in the proceeding Joint Conference Third International Workshop of Nonlinear Dynamics and Synchronization and Sixteenth International Symposium on Theoretical Electrical Engineering, Klagenfurt Austria, 2011, 1569423423, proceedings
11. Z. Neda, F. Járαι-Szabó, **E. Káptalan**, “Spring-block models for complex phenomena”, proceedings of CSCS 17, (17th International Conference on Control Systems and Computer Science), IAFA 10, vol. 3, pp. 78–81 (2009)
12. Z. Neda, **E. Káptalan**, “A nem várt ritmus, Fizikatanítás tartalmasan és érdekesen”, Magyarul Tanító Fizikatanárok Nemzetközi Konferenciája, 2009 aug, pp. 269–274, ISBN 978-963241150-2