

O incursiune în controlabilitate: evoluția motivelor de rețea în rețele complexe aleatorii



Student doctorand: Bogdan-Eduard-Mădălin Mursa

Conducător științific: Prof. Univ. Dr. Anca M. Andreica

Facultatea de Matematică și Informatică
Universitatea Babeș-Bolyai, Cluj Napoca, România

Rezumatul tezei de doctorat

Cuvinte cheie: rețele complexe, rețele dinamice, generator rețea, rețele motif, topologie

2023

Abstract

Această teză explorează caracteristicile comune existente în sisteme complexe cum ar fi galaxiile, lanțurile trofice sau comunitățile sociale, sisteme ce sunt alimentate de o cantitate imensă de interacțiuni existente între entitățile parte din sistem. Uneltele științifice tradiționale s-au concentrat pe analiza componentelor mai mici ale sistemelor pentru a înțelege dinamica sistemelor ca și un tot, însă această abordare poate duce la pierderea viziunii de ansamblu a dinamicii sistemelor studiate. Pentru a îmbunătăți aceste proceduri, studiul nostru folosește Teoria Rețelelor Complexe ca un cadru capabil să examineze corelațiile dintre tiparele de interconexiuni, sau motivele de rețea, și alte componente de dimensiuni variabile prezente în topologia rețelelor complexe modelate după sistemele reale. Studiul nostru sugerează că motivele de rețea ar putea fi o variabilă cheie pentru înțelegerea evoluției și dinamicii sistemelor complexe. Bazându-ne pe dovezi empirice, am dezvoltat un nou model care poate genera rețele aleatorii ce evoluează motive cu o precizie și acuratețe ridicată. Acest model ar putea să aibă un impact semnificativ asupra analizei motivelor de rețea, oferind cercetătorilor o înțelegere mai bună a modului în care apar tiparele de conexiuni în sistemele complexe reale.

Cuprins

Cuprins	iii
1 Introducere	1
1.1 Motivație	2
1.2 Structura tezei	5
1.3 Contribuții originale	7
2 Aspecte teoretice	9
3 Accelerarea paralelă a enumerării subgrafurilor în procesul de detectare a motivelor de rețea	11
4 Puncte de articulație și comunități izolate: Catalizatori pentru evoluția motivelor de rețea	13
5 Descifrarea corelației dintre proprietățile topologice la nivel micro și propagarea motivelor în topologiile de rețea	14
6 Predicția existenței motivelor de rețea în rețele complexe	15
7 Investigarea dovezilor empirice privind convergența dinamică dintre straturile rețelelor complexe	16
8 Generarea de rețele complexe aleatorii cu motive de rețea folosind un model bazat pe algoritmi evolutivi	18
9 Concluzii	19
Referințe	24

Lista publicațiilor

Clasificările au fost alese în conformitate cu clasificarea revistelor, conform clasificării din 2018 publicată de UEFISCDI. Similar, clasificarea conferințelor se bazează pe baza de date CORE, iar rangul folosit este cel activ în perioada de publicare. De exemplu, în cazul publicațiilor realizate în 2019, s-a folosit clasificarea din 2018 (CORE2018).

Publicații indexate în Web of Science - Journals Citation Index Expanded

[28] **Mursa, B.E.M.**, Andreica, A. (2023): Generating Random Complex Networks with Network Motifs using Evolutionary Algorithm-based Null Model.
(SUBMITTED) (IF=8.139 on publication year 2023)

[33] **Mursa, B.E.M.**, Andreica, A., Dioșan, L. (2021): Network motifs: A key variable in the equation of dynamic flow between macro and micro layers in complex networks. Knowledge-Based Systems, 213:106648
doi: <https://doi.org/10.1016/j.knosys.2020.10664> (IF=8.66 on publication year 2021)
Clasificare **A**, **8** puncte

[25] Mester, A., Pop, A., **Mursa, B.E.M.**, Greblă, H., Dioșan, L., Chira, C. (2021). Network analysis based on important node selection and community detection. Mathematics, 9(18):2294
doi: <https://doi.org/10.3390/math9182294> (IF=2.592 on publication year 2021)
Clasificare **A**, **2** puncte

Publicații indexate în Web of Science - Conference Proceedings Citation Index

- [29] **Mursa, B.E.M.**, Andreica, A., and Dioșan, L. (2018): Parallel acceleration of subgraph enumeration in the process of network motif detection. In 2018 20th International Symposium on Symbolic and Numeric Algorithms for Scientific Computing (SYNASC), pages 191–198. Institute of Electrical and Electronics Engineers
doi: 10.1109/SYNASC.2018.0003 (**Index used = CORE2018**)
Clasificare C, 2 puncte
- [32] **Mursa, B.E.M.**, Andreica, A., Dioșan, L. (2019): Study of connection between articulation puncte and network motifs in complex networks. In Proceedings of the 27th European Conference on Information Systems (ECIS), 127. AIS eLibrary
https://aisel.aisnet.org/ecis2019_rp/127 (**Index used = CORE2018**)
Clasificare A, 8 puncte
- [30] **Mursa, B.E.M.**, Andreica, A., Dioșan, L. (2019): An empirical analysis of the correlation between the motifs frequency and the topological properties of complex networks. In Procedia Computer Science, 23rd International Conference on Knowledge-Based and Intelligent Information & Engineering Systems (KES), volume 159, pages 333–341. Elsevier BV
doi: 10.1016/j.procs.2019.09.188 (**Index used = CORE2018**)
Clasificare B, 4 puncte
- [31] **Mursa, B.E.M.**, Andreica, A., Dioșan, L. (2019): Mining network motif discovery by learning techniques. In Proceedings of the Hybrid Artificial Intelligent Systems 16th International Conference (HAIS), pages 73–84, Cham. Springer International Publishing
doi: 10.1007/978-3-030-29859-3_7 (**Index used = CORE2018**)
Clasificare C, 2 puncte

Publicații indexate în BDI (journals and conference proceedings indexed by international databases)

- [27] **Mursa, B.E.M.** (2023): Examining the social behavior of ant colonies using Complex Networks. In Proceedings of the Studia Universitatis Babeș-Bolyai Informatica,

volume 67, pages 49–64.

Clasificare D, 1 punct

Scorul publicațiilor: 27 puncte.

Capitolul 1

Introducere

Ce au în comun o galaxie, un lanț trofic, o comunitate socială sau alte sisteme complexe? Cu toate că sunt diferite, aceste structuri împărtășesc caracteristici comune printr-o dinamică alimentată de o cantitate imensă de interacțiuni existente între entitățile parte din sistem. Știind că pentru fiecare acțiune există o reacție egală și opusă, interacțiunile sunt cele care dau viață sistemelor aparent statice la prima vedere.

Fiind înconjurat de o cantitate imensă de stimuli, creierul nostru a observat că filtrarea informațiilor sau acordarea atenției doar anumitor interacțiuni poate fi mai mult decât suficient pentru a asigura eficacitatea activităților sale zilnice [2, 24]. Mai mult, prin utilizarea abstractizării, creierul nostru poate reutiliza informațiile asociate tiparelor observate în sisteme specifice în sisteme noi întâlnite ulterior [41].

Cu toate că este neobișnuit pentru modul în care creierul nostru era obișnuit să perceapă lumea, omenirea a evoluat un cadru științific bazat pe o abordare analitică, ce constă în împărțirea problemei în probleme mai mici - *divide et impera* [11]. Odată cu popularizarea statisticii, aceasta abordare este destul de obișnuită acum și anume să generalizăm statistic o caracteristică globală unui sistem prin analiza componentelor sale cele mai atomice. Cu toate că o astfel de abordare este mai simplu de urmărit și mai confortabilă pentru generalizarea demonstrațiilor, nu este neapărat exactă, deoarece analizând individual componente mai mici ale unui sistem, există pericolul de a pierde imaginea de ansamblu.

Fără nicio intenție de a neglija beneficiile aduse de o astfel de metodologie analitică, care a sporit semnificativ procesul de înțelegere a lumii, literatura evidențiază necesitatea unor cadre mai robuste capabile să înțeleagă haosul aparent așa cum este și să nu-l ordoneze forțat. Înțelegând importanța modelelor și modul în care creierul nostru percepe lumea din jurul nostru, se ridică o întrebare intrigantă: pot tiparele să fie o variabilă lipsă în înțelegerea evoluției sistemelor complexe și a dinamicii lor? Prin "dinamică", înțelegem

comportamentul matematic non-liniar al unui sistem complex pe o anumită perioadă de timp [14]. Lucrarea noastră își propune să reprezinte un studiu empiric al corelațiilor dintre proprietățile acestor modele și alte componente de diferite scale ¹ găsite în sistemele complexe - o perspectivă telescopică asupra structurilor analizate. Intenționăm să folosim aceste dovezi empirice ca bază pentru un nou model ce poate genera rețele aleatorii cu o concentrare specifică de motive.

1.1 Motivație

Considerăm Teoria Rețelelor Complexe un cadru suficient de robust pentru a servi drept instrument pentru cercetarea pe care intenționăm să o efectuăm. Mecanismul abordat de aceasta teorie este de a encoda entitățile și interacțiunile dintre ele ca structuri topologice reprezentate sub formă de grafuri, compuse din noduri și muchii. Ceea ce face aceste obiecte matematice atât de puternice este că ele încapsulează în topologia lor informații contextuale din sistemul real modelat. Asta înseamnă că fiecare muchie va avea o semnificație și poate fi explicată prin înțelegerea unei dinamici din lumea reală [8]. Metaforic vorbind, putem spune că fiecare rețea complexă are o poveste.

Aplicabilitatea interdisciplinară a teoriei rețelelor o face un set de unelte elegant, aducând concepte din fizică, matematică, informatică, biologie și multe altele. Statistica este utilizată ca un mecanism pentru cuantificarea proprietăților spațiilor topologice, deoarece poate oferi abordarea analitică pentru studiul componentelor esențiale ale rețelelor: nodurile. Studiul acestor componente fundamentale a formulat numeroase proprietăți la nivel micro, din care putem aminti câteva: gradul nodurilor, coeficientul de clusterizare [44], gradul de asortativitate [36] sau exponentul "power-law" [6]. Proprietățile fundamentale ale Teoriei Stabilității sistemelor dinamice [9, 18] au fost utilizate ca argument pentru a susține concentrarea studiului asupra proprietăților la nivel micro în rețelele complexe. Acest argument afirmă că o dinamică declanșată într-un sistem complex de o anumită perturbație la nivel macroscale va converge în cele din urmă către cele mai mici componente structurale, encodând în aceste componente la nivel micro rezultatele dinamicii la nivel macro [4, 15]. Prin urmare, știind că acțiunea la nivel global persistă la nivel local a fost un argument robust pentru continuarea cercetării bazate pe microscop în rețelele complexe.

Aplicând acest principiu de convergență într-o paradigmă de "inginerie inversă", studiile au fost extinse la o analiză la nivel macroscale. În acest tip de analiză, proprietățile la nivel micro sunt corelate cu dinamica rețelelor la nivel macroscale. Literatura ne arată cum multe

¹scale (micro, meso, macro)

din rețelele din lumea reală pot fi caracterizate de faimoasa teorie a celor șase grade de separare [5], cunoscute și sub denumirea de rețele "small-world". Aceste rețele au tendința de a forma grupuri bine interconectate cu distanțe scurte între oricare două noduri ale rețelei, ceea ce le face structuri robuste fără niciun compromis în performanța fluxului de informații între membrii săi [38]. Alte rețele remarcabile studiate în literatură sunt rețelele de tip "sparse", rețelele din lumea reală ce sunt guvernate de o distribuție de tip "power-law" [40] sau rețelele aleatorii - structuri generate artificial folosind teoria probabilității pentru a ajuta la studiul rețelelor din lumea reală [34]. Toate aceste proprietăți cuantifică relația nodurilor cu vecinii lor, așa cum poate fi observat în principiul analitic al *divide et impera*.

Deși cadru analitic acceptat [19, 20, 23, 42] poate fi considerat fiabil și a oferit răspunsuri la multe întrebări propuse de cercetători, putem spune că ceva lipsește în imaginea de ansamblu. Considerăm că convergența de la straturile macro la micro ² și impactul său în straturile intermediare (meso) sunt subiecte insuficient studiate, care necesită o mai mare accentuare în cadrul analitic actual al rețelelor complexe. Motivați de existența aplicațiilor care studiază importanța structurilor la nivel mesoscală în contexte orientate către domenii specifice (biologie, ecologie sau sociologie) [1, 26, 39, 47] în raport cu celelalte straturi ale rețelei, macro și, respectiv, micro, considerăm structurile la nivel mesoscală ca fiind punți între straturilor macro și microscală, o cheia lipsă în rezolvarea ecuației convergenței dinamice de la straturile macro la micro. O astfel de abordare ar putea duce la un cadru universal ce ar putea implica o înțelegere mai precisă a dinamicii rețelelor complexe reale.

Atenția noastră este îndreptată către îmbunătățirea abordărilor existente de înțelegere a rețelelor complexe, renunțând la o metodă analitică simplistă, încercând să observăm aceste spații topologice în întreaga lor complexitate și frumusețe.

Literatura curentă ne prezintă diverse structuri la nivel mesoscală, cum ar fi comunitățile - grupuri de noduri care sunt mai dens conectate decât restul rețelei [10], modele de tip "bloc" - clase funcționale grupate ale entităților dintr-o rețea complexă [17], sau modulele - componente asemănătoare comunităților cu roluri contextuale specifice [16]. Aceste structuri sunt larg studiate în aplicații care abordează probleme din domenii precum biologia, fizica sau științele sociale [3, 12, 13, 21, 35, 43], dar de cele mai multe ori sunt prezentate ca componente independente și necorelate de proprietățile componentelor găsite la alte scale.

Wharrie et al. [46] au studiat cum prezența triunghiurilor este un factor esențial în evoluția comunităților - atrăgând atenția asupra existenței unei relații între structurile rețelelor. Plecând de la rezultatele lor valoroase, lucrarea noastră intenționează să urmeze un prin-

²strat (*micro, meso, macro*) - nivelul de segmentare structural al rețelelor

cipiu similar prin prezentarea unui studiu empiric care propune o cercetare mai detaliată a corelațiilor dintre toate straturile unei rețele complexe - macro, meso și micro.

Ca și un prim pas în urmărirea acestui obiectiv, ne dorim să realizăm o cercetare concentrată asupra studiului proprietăților numite motive de rețea (*network motifs*) - tipare de interconexiuni care pot apărea în număr semnificativ mai mare în rețele complexe reale decât în rețele aleatorii care au aceeași distribuție a gradelelor nodurilor ca și rețelele originale. Având în vedere natura existenței lor, motivele de rețea vor avea întotdeauna în spate un raționamentul contextual adus de dinamica rețelei.

Învățând de la înțelepciunea naturii, considerăm rețelele motiv ca fiind candidați ideali pentru o analiză transversală a dinamicii existente între straturile topologiilor rețelelor. Această teză propune o analiză experimentală a corelației dintre proprietățile componentelor la nivel micro și existența motivelelor de rețea, respectiv, existența motivelelor de rețea și proprietățile structurilor la nivel macro. Rezultatele obținute vor evidenția modul în care existența acestor structuri la nivel mesoscală poate contribui la discretizarea tipurilor de rețele în unele cu o sursă de informații mai complexă. Acest experiment intenționează să valideze empiric convergența fluxurilor dinamice între toate straturile rețelelor complexe, având motivele de rețea ca o punte în convergența dinamică de la straturile macro la micro.

Prin introducerea studiului motivele de rețea ca posibile componente care facilitează mecanismul de convergență, intenționăm să consolidăm concluziile existente despre dinamica straturilor micro, meso și macro, analizate anterior prin perspectiva structurilor modulare precum triunghiurile [46].

Aplicat în domenii în care conexiunile între structuri sau componente joacă un rol esențial, acest studiu poate contribui la o mai bună înțelegere a adaptării moleculare, auto-asamblării, adaptării celulare bazate pe proteine sau interacțiunilor sociale.

Using the results of the experiments focused on describing the convergence mechanism, as this thesis's final resolution, we propose a network generator model to generate random networks that contain motifs. Such a model would be an original contribution to the models existing in the literature that currently do not explicitly consider the evolution of network motifs in the random networks they generate. Considering the uncommonness of real-world networks evolving network motifs, such a model would be a valuable tool for generating synthetic networks for experiments that need large network samples with motifs, improving the quality of the studies and their applications.

Utilizând rezultatele experimentelor concentrate pe descrierea mecanismului de convergență, ca un scop final al acestei teze, ne dorim să propunem un model generator de rețele ce este capabil să genereze rețele aleatorii care conțin motive. Un astfel de model ar constitui o

contribuție originală la modelele existente în literatură, care în prezent nu iau în considerare explicit evoluția motivelor de rețea în rețelele aleatorii pe care le generează.

Având în vedere raritatea rețelelor din lumea reală care evoluează motive de rețea, un astfel de model ar fi o unealtă valoroasă pentru generarea de rețele sintetice destinate experimentelor care necesită eșantioane mari de rețele cu motive, îmbunătățind calitatea studiilor și a aplicațiilor acestora.

1.2 Structura tezei

Teza este structurată în 9 capitole după cum urmează:

- **Capitolul I - Introducere** prezintă o imagine generală a teoriei rețelelor complexe și a aplicațiilor din literatură, cu un accent pe motivele de rețea. Secțiunea de Motivație conturează obiectivul principal al tezei, care constă în propunerea unui nou model capabil să genereze rețele sintetice ce conțin motive de rețea și pașii necesari pentru realizarea acestuia, evidențiind semnificația și impactul potențial în cercetarea rețelelor complexe, conducând la o înțelegere mai profundă a dinamicii lor intricate.
- **Capitolul II - Aspecte teoretice** furnizează o examinare detaliată a contextului istoric al Teoriei Rețelelor Complexe (TRC), elucidând perspectiva de scară a topologiei rețelei prin Teoria Stabilității și detaliind proprietățile distincte ale fiecărui strat la nivel micro, meso și macro. Acest capitol servește drept o temelie teoretică pentru a ajuta la înțelegerea studiilor și experimentelor din capitolele ulterioare.
- **Capitolul III - Accelerarea paralelă a enumerării subgrafurilor în procesul de detectare a motivelor de rețea** abordează provocarea performanței în identificarea motivelor de rețea, cunoscută a fi o problemă NP. În ciuda existenței mai multor algoritmi care încearcă să rezolve această problemă, nu există o abordare perfectă în ceea ce privește performanța temporală. Capitolul propune o remodelare a algoritmului ESU, ce utilizează programarea paralelă pentru a optimiza performanța de execuție.
- **Capitolul IV - Puncte de articulație și comunități izolate: Catalizatori pentru evoluția motivelor de rețea** raportează rezultatele unui studiu de cercetare ce vizează investigarea relației potențiale dintre punctele de articulație și motivele de rețea în rețele complexe. Analiza s-a desfășurat pe diverse rețele din lumea reală pentru a determina coexistența acestor două proprietăți și pentru a aduce în prim-plan caracteristicile topologice care pot contribui la dezvoltarea și evoluția motivelor de rețea.

- **Capitolul V - Descifrarea corelației dintre proprietățile topologice la nivel micro și propagarea motivelor în topologiile de rețea** se bazează pe cercetarea anterioară prezentată în Capitolul IV, care a stabilit o corelație puternică între punctele de articulație și motivele de rețea la nivel mesoscală. Studiul actual extinde această cercetare investigând relația dintre alte proprietățile topologice la nivel micro și apariția motivelor. Prin utilizarea proprietăților rețelei, studiul își propune să obțină perspectivă asupra mecanismelor care stau la baza apariției motivelor și modul în care dinamica rețelei se propagă prin structurile sale.
- **Capitolul VI - Predicția existenței motivelor de rețea în rețele complexe** descrie o abordare inovatoare pentru a prezice existența motivelor de rețea în rețelele complexe folosind modele de Inteligență Artificială (IA). Această metodă folosește proprietățile topologice identificate în Capitolele IV și V ca facilitatori pentru evoluția motivelor de rețea și antrenează modelele de IA pentru a determina dacă o rețea complexă dată conține motive. Scopul acestei abordări este de a servi ca o etapă de preprocesare pentru a salva timp în detectarea motivelor, cunoscută a fi o problemă NP-completă, folosind modelul propus de IA pentru prezicere.
- **Capitolul VII - Investigarea dovezilor empirice privind convergența dinamică dintre straturile rețelelor complexe** prezintă un cadru analitic care unifică descoperirile din capitolele anterioare prin demonstrarea existenței convergenței dinamice între straturile rețelelor complexe. Cadrul propus arată că existența motivelor de rețea este direct legată de o varietate de proprietăți la nivel micro și macro, furnizând dovezi ale unei convergențe macro-meso-micro. Scopul final al acestui demers este de a propune un model capabil să genereze rețele sintetice cu motive de rețea într-un mod controlabil, iar acest cadru propus vizează facilitarea atingerii acestui obiectiv.
- **Capitolul VIII - Generarea de rețele complexe aleatorii cu motive de rețea folosind un model bazat pe algoritmi evolutivi** propune un nou model ce generează rețele aleatorii ce conțin motive bazat pe o serie de proprietăți la nivel micro. Capitolul se bazează pe rezultatele anterioare ce au stabilit o corelație între motivele de rețea și diverse proprietăți ale topologiei la nivel micro și macro al rețelei. Modelul propus, și obiectivul final al acestei teze, își propun să faciliteze studiile de specialitate ale motivelor de rețea oferind o modalitate de generare a rețelelor sintetice în scopuri experimentale.

- **Capitolul IX - Concluzii** rezumă descoperirile și contribuțiile capitolelor anterioare, evidențiind originalitatea lor și beneficiile potențiale pentru comunitatea de cercetare. De asemenea, identifică arii pentru viitoare cercetări menite să îmbunătățească modelul propus.

1.3 Contribuții originale

Pe parcursul acestei teze ce își propune să propună un model capabil să genereze rețele aleatorii cu motive de rețea, s-au desfășurat mai multe studii teoretice și experimentale. Aceste studii nu numai că au validat întrebările și ipotezele de cercetare, ci au condus și la mai multe contribuții originale în literatură printr-o metodologie axată pe adunarea de dovezi empirice bazate pe semnificație statistică:

- Comparații detaliate între algoritmi de ultimă generație pentru extragerea motivelor de rețea în ceea ce privește performanța și scalabilitatea. [29].
- Propunerea unui nou model paralel ce folosește programarea paralelă și distribuită pentru a îmbunătăți semnificativ timpul de execuție al unui algoritm existent utilizat pentru extragerea motivelor de rețea [29]. Acest model paralel va fi utilizat ca instrument principal pentru detectarea motivelor în experimentele descrise în capitolele IV, V, VI, VII și VIII.
- Demonstrarea empirică a proprietății punctelor de articulație de a apărea cu o probabilitate mai mare în rețelele din lumea reală decât în rețelele randomizate [32].
- Demonstrarea că punctele de articulație, prin faptul că unesc comunitățile izolate, au tendința de a dezvolta motive de rețea în acestea. [32].
- Demonstrarea comportamentului altruist al furnicilor în rețelele sociale, folosind măsuri de centralitate și alte proprietăți ale rețelelor complexe. [27].
- Demonstrarea performanței fluxului de informații în coloniile de furnici, ca rute scurte optime ce există între oricare două furnici, și validarea caracteristicilor de rețea de tip "small-world" ce apar în urma interacțiunilor sociale dintre acestea [27].
- Descoperirea suprapunerii structurală între nodurile populare detectate de diferitele măsurători de centralitate la nivel de rețea, respectiv nivel de comunitate. [25].

- Realizarea unui studiu cuprinzător asupra unui set mare de proprietăți la nivel micro, respectiv macro, care a relevat o corelație semnificativă între Coeficientul Local de Clusterizare și Gradul de Asortativitate și existența motivelor de rețea, ajungând la concluzia că topologiile de rețea care evoluează valori mari pentru aceste două proprietăți vor avea tendința de a conține motive de rețea [30]. Rezultatele obținute au servit drept fundament pentru experimentele descrise în Capitolele VI, VII și VIII.
- Propunerea unui model de clasificare care poate prezice dacă o rețea conține sau nu motive de rețea pe baza proprietăților sale topologice. Această abordare servește ca o etapă de preprocesare pentru soluțiile de ultimă generație utilizate pentru detectarea motivelor, economisind timp. [31].
- Formalizarea unui cadru analitic care poate dovedi că convergența unei dinamici specifice între straturile rețelei duce la materializarea motivelor de rețea. Acest studiu a fost însoțit de un experiment care a validat posibilitatea de a controla evoluția motivelor de rețea în rețele aleatorii [33] și servește ca dovadă empirică pentru modelul propus în Capitoul VIII.
- Propunerea unei arhitecturi de model bazat pe Algoritmi Evolutivi care generează rețele aleatorii cu motive folosind o serie de parametri, inclusiv cele două proprietăți topologice identificate ca cele mai impactante factori declanșatori ai convergenței între straturile rețelei care se stabilizează în motive de rețea: Coeficientul de Clusterizare și Gradul de Asortativitate [28].

Capitolul 2

Aspecte teoretice

Acest capitol acoperă toate conceptele teoretice care vor fi utilizate în capitolele următoare, parcurgând istoria Teoriei Rețelelor Complexe așa cum a apărut din Teoria Grafurilor.

Examinarea topologiei unei rețele se realizează pe o varietate de scale - micro, meso și macro. Proprietățile micro cuantifică măsurătorile care reprezintă caracteristicile celor mai fundamentale componente ale rețelei, noduri sau muchii. În teoria grafurilor și a rețelelor, aceste proprietăți variază în complexitate, de la metrici care dezvăluie o simplă contare la metrici mai complicate care calculează diferite distribuții [7, 8, 22, 36, 37, 44] (de exemplu, gradul nodului, coeficientul local de clusterizare, gradul de asortativitate, etc.).

On the other hand, mesoscale properties are focused on studying complex network samples of nodes with the interactions between them. The studies revealed that specific groups of nodes interact in distinctive ways that lead to remarkable properties. Mesoscale structures like communities or network motifs are used in applications from various fields to extrapolate theories about real-world complex network dynamics. Especially in social sciences, communities are represented in the literature as the fundamental and important structures in the evolution of a social system [35, 43]. Finally, macroscale properties describe the behavior of a network as a whole trying to identify and classify the network's topologies under categories with common microscale properties.

Pe de altă parte, proprietățile la scară meso se concentrează asupra studiului structurilor existente între noduri și a interacțiunilor dintre acestea. Studiile au relevat că grupuri specifice de noduri interacționează în moduri distinctive, conducând la proprietăți remarcabile. Structuri la scară meso, cum ar fi comunitățile sau motivele de rețea, sunt utilizate în aplicații din diverse domenii pentru a extrapola teorii despre dinamica rețelelor complexe din lumea reală. În special în științele sociale, comunitățile sunt reprezentate în literatură ca structuri fundamentale și importante în evoluția unui sistem social [35, 43]. În cele din urmă,

proprietățile la scară macro descriu comportamentul unei rețele ca întreg, încercând să identifice și să clasifice topologiile rețelei în categorii cu proprietăți comune la scară micro.

Perspectiva de analiză a rețelelor complexe la nivel de scară va fi utilizată ca o bază teoretică pentru toate experimentele care vor fi prezentate în capitolele următoare.

Capitolul 3

Accelerarea paralelă a enumerării subgrafurilor în procesul de detectare a motivelor de rețea

Motivele de rețea atrag un mare interes în multe domenii, deoarece reprezintă un candidat perfect pentru accelerarea cercetărilor aplicate în înțelegerea dinamicii rețelelor complexe. Una dintre cele mai mari probleme ridicate în procesul de identificare a acestor motive este performanța. Pornind de la împărțirea rețelei inițiale în subgrafuri până la clusterizarea subgrafurilor, fiecare algoritm utilizat abordează o problemă NP. Prin urmare, chiar dacă există mulți algoritmi care încearcă să rezolve extragerea motivelor de rețea, deocamdată nu există o abordare perfectă din perspectiva performanței temporale, ci doar soluții care sunt mai rapide decât altele.

În acest capitol, descriem o remodelare a unuia dintre cei mai competitivi algoritmi pentru enumerarea subgrafurilor găsiți în literatură, numit ESU [45]. În abordarea propusă, o rețea dată poate fi procesată folosind programare paralelă, fie cu un model bazat pe procese, fie cu unul hibrid (bazat pe procese și bazat pe fire de execuție). În cele din urmă, modelele existente și cele propuse sunt comparate folosind grafuri de referință, dezvăluind rezultate competitive.

Rezultatele au fost publicate în articolul [29] și reprezintă o contribuție originală la algoritmi existenți utilizați pentru extragerea motivelor de rețea, îmbunătățind semnificativ timpul de așteptare în timpul rulării, fără a afecta precizia rezultatelor.

Mai mult, considerăm rezultatele propuse în acest capitol ca fiind complementare cu toate celelalte experimente pe care le-am condus, deoarece algoritmul propus a reprezentat o unealtă indispensabilă pe care am utilizat-o pentru a extrage motivele din rețelele pe care

le-am studiat în cadrul experimentelor din aceasta lucrare.

Capitolul 4

Puncte de articulație și comunități izolate: Catalizatori pentru evoluția motivelor de rețea

Rețelele complexe sunt mecanisme puternice pe care le putem utiliza pentru a modela rețelele din lumea reală ca spații topologice. Frumusețea acestor structuri este oferită de gradul infinit de analiză pe care suntem autorizați să îl facem folosindu-le. Biologic, este aproape imposibil pentru mintea umană să înțeleagă comportamentul acestor sisteme, dar atunci când sunt modelate ca rețele complexe, diverse proprietăți ale topologiei rețelei pot dezvălui informații prețioase. Pornind de la cele două proprietăți-cheie ale participanților într-o rețea complexă și relațiile dintre aceștia, putem deduce proprietăți suplimentare care reflectă comportamente specifice pentru entități sau grupuri de entități.

Exemple ale acestor proprietăți notabile includ entități care creează punți unice între două sau mai multe comunități (cunoscute sub numele de puncte de articulație) sau apariția unor modele de interconexiuni între entități (cunoscute sub numele de motive de rețea).

În acest capitol este prezentat un studiu asupra coexistenței acestor două proprietăți, punctele de articulație și motivele de rețea, și modul în care apariția lor este corelată, folosind rezultate obținute în analiza unei varietăți de rețele din lumea reală.

Rezultatele acestui experiment au fost publicate în articolul [32] și reprezintă un prim pas în proiectul nostru de cercetare care intenționează să demonstreze că meso-structurile precum motivele de rețea sunt componente cheie care facilitează propagarea dinamică între straturile rețelei.

Capitolul 5

Descifrarea corelației dintre proprietățile topologice la nivel micro și propagarea motivelor în topologiile de rețea

Bazându-ne pe dovezi găsite în studiile noastre anterioare prezentate în Capitolul 4, care au relevat o corelație semnificativă între existența punctelor de articulație și componente de nivel meso precum motivele de rețea, în acest capitol vom extinde acest studiu prin prezentarea unei cercetări analitice între un set consistent de proprietăți topologice la nivel micro din Teoria Grafurilor și a Rețelelor Complex, și apariția motivelor. Scopul acestui studiu este de a folosi proprietățile rețelei pentru a oferi o înțelegere mai bună a modului în care și de ce apar motivele de rețea, învățând cum se propagă dinamica unei rețele prin structurile sale.

Rezultatele prezentate în acest capitol au fost publicate în articolul [30]. Ele reprezintă o contribuție originală în înțelegerea indicatorilor de nivel micro pentru existența motivelor de rețea. Cu aceste rezultate, putem uni coexistența diverselor structuri de nivel micro și meso, respectiv motivele de rețea, și să continuăm să studiem coexistența motivelor de rețea cu proprietățile de nivel macro care ne vor conduce la ultimul pas pentru a prezenta o imagine completă a fenomenelor de convergență care au loc în topologiile rețelelor.

Capitolul 6

Predicția existenței motivelor de rețea în rețele complexe

Proprietățile rețelelor complexe reprezintă un set puternic de instrumente ce pot fi folosite pentru a studia comportamentul complex al acestor sisteme de interconexiuni. Aceste proprietăți pot varia de la metrice simpliste (numărul de muchii și noduri) la proprietăți care reflectă informații complexe despre conexiunile dintre entitățile din rețea (grad de asortativitate, densitate sau coeficient de clusterizare). O proprietate topologică cu implicații valoroase asupra dinamicii rețelelor este reprezentată de motivele de rețea - tipare de interconexiuni găsite în rețelele din lumea reală. Știind că una dintre cele mai mari probleme cu descoperirea motivelor de rețea este natura sa algoritmică NP-completă, în acest capitol prezentăm o metodă de a detecta dacă o rețea are sau nu tendința de a genera motive prin utilizarea proprietăților sale topologice în timpul antrenării diverselor modele de clasificare. Această abordare dorește să servească ca o etapă de prelucrare prealabilă pentru soluțiile de ultimă oră utilizate în detecția motivelor în rețele complexe.

Rezultatele și modelul propus au fost publicate în articolul [31] și reprezintă o contribuție originală la optimizarea proceselor utilizate pentru extragerea motivelor de rețea. Similar cu îmbunătățirile prezentate în Capitolul 3, rezultatele descrise în acest capitol reprezintă o lucrare complementară în cadrul cercetării noastre principale, facilitând timpul de așteptare implicat în experimentele noastre pentru extragerea motivelor.

Capitolul 7

Investigarea dovezilor empirice privind convergența dinamică dintre straturile rețelelor complexe

După cum este adesea descris în narațiunea acestei teze, Teoria Rețelelor Complexe reprezintă un instrument puternic pentru a modela sistemele din lumea reală sub forma de grafuri cu caracteristici topologice non-triviale. Statice prin definiție, rețelele complexe sunt limitate a fi reflexia sau instantaneul sistemelor dinamice pe care le codifică într-un moment dat. În mod sincer, studiile arată că rețeaua păstrează caracteristicile fluxului dinamic între diversele structuri evolute la diferite scale: micro, meso și macro, respectiv.

Având în vedere că componente micro vor ajunge să încapsuleze orice stare de stabilitate inițiată de o perturbație la nivel macro, cel mai popular cadru folosit pentru analizarea rețelelor complexe asociază într-un mod de inversare a ingineriei proprietățile componentelor la scară mică cu caracteristicile globale ale rețelei. Cu toate că principiul convergenței este larg acceptat, considerăm că tranziția de la micro la macro nu este suficient de studiată, iar evidențierea unui strat intermediar este necesară pentru a exemplifica mai bine mecanismul de convergență. Studiul nostru intenționează să îmbunătățească abordările existente de înțelegere a frumuseții dinamicii rețelelor prin "îmbrățișarea" haosului pe care îl evoluează și nu prin ordonarea sa folosind mecanisme analitice inflexibile. Formulăm o serie de întrebări de cercetare care doresc să demonstreze că existența unei structuri la scară meso, în special motive de rețea, este legată de o varietate de proprietăți la scară micro, respectiv la scară macro - întărind astfel dovada convergenței macro-meso-micro.

Abordarea noastră ar putea oferi o îmbunătățire semnificativă în modelele utilizate pentru a înțelege auto-asamblarea moleculară, adaptarea celulară bazată pe proteine, interacțiunile

sociale și multe alte domenii, în care conexiunile între structuri sau componente joacă un rol esențial. Cercetarea prezentată în acest capitol a fost publicată în articolul [33] și conturează un cadru analitic comprehensiv și original, având ca obiectiv final propunerea unui model ce poate generate rețele ce evolueaza motivelor de rețea în topologiile lor. Acest cadru analitic se bazează pe principiul cauzalizării proprietăților topologice, care susțin existența motivelor. Rezultatele acestei analize reprezintă o contribuție semnificativă în domeniul științei rețelelor și oferă o resursă valoroasă pentru cercetările viitoare.

Capitolul 8

Generarea de rețele complexe aleatorii cu motive de rețea folosind un model bazat pe algoritmi evolutivi

După cum s-a discutat în capitolul anterior, existența motivelor de rețea este atribuită în principal comportamentului aparent haotic al atomilor din sistemele pe care rețelele le modelează, comportament care apare sub formă de tipare ce vor fi codificate în rețea. Motivele nu au fost formalizate ca structuri datorită rarității lor, ci au fost explicate doar prin apariția lor contextuală în rețele. Seria de experimente descrise în capitolele anterioare face parte din obiectivul de a explica dinamica motivelor de rețea și a demonstrat o corelație între prezența motivelor de rețea și diverse proprietăți la scară micro și macro ale topologiei rețelei. Acest capitol introduce o nouă arhitectură de model care utilizează Algoritmi Evolutivi (AE) pentru a genera rețele aleatorii ce conțin motive. Arhitectura propusă este caracterizată de un set de parametri, inclusiv Coeficientul de Clusterizare și Gradul de Asortativitate, care au fost identificați ca factori cheie în declanșarea convergenței între straturile de rețea, conducând la apariția motivelor de rețea. Un astfel de model are potențialul de a îmbunătăți semnificativ studiul motivelor de rețea prin generarea unui număr oricând de rețele sintetice care pot servi ca material experimental pentru comunitatea de cercetători.

Acest capitol prezintă rezultatele cercetării noastre prezentate în [28], care se încheie cu propunerea unui model care controlează evoluția rețelelor sintetice cu motive folosind algoritmi evolutivi. Această propunere reprezintă scopul final a eforturilor noastre extinse de cercetare descrise pe parcursul acestei teze.

Capitolul 9

Concluzii

Căutarea soluțiilor pentru provocările vieții necesită curiozitate și disponibilitatea de a explora teritorii neumblate. Un astfel de efort poate fi în același timp frumos și solicitant, iar descoperirea soluțiilor poate aduce o satisfacție deosebită. Parcurusul acestei teze reflectă astfel de atitudini, iar autorul se consideră norocos că a putut să se angajeze în căutarea de noi cunoștințe - un vis pe care și l-a hrănit încă din copilărie. Deși obiectivul principal era bine definit, descoperirile neașteptate pe parcurs au contribuit la creșterea personală și profesională a autorului. După cum spune o vorbă, "cu cât devii mai înțelept, cu atât ai mai multe întrebări," și menținerea concentrării pe obiectivele prezentate a reprezentat o provocare logistică depășită cu ajutorul îndrumării supervisorului și mentorilor - cărora autorul le recunoșcător.

În concluzie, această teză marchează începutul unei noi etape de cercetare. A fost o călătorie împlinitoare, și suntem încântați să prezentăm rezultatele sub forma unei povești captivante. Ca entuziast al rețelelor, credem cu tărie că fiecare rețea are o poveste de spus, iar această teză este o dovadă a acestei credințe. Prin revizuirea a mii de rețele, această lucrare a validat întrebări de cercetare, a susținut ipoteze și a demonstrat experimente. Concluziile acestei teze au contribuit la înțelegerea rețelelor complexe, iar suntem dornici să continuăm explorarea unor noi întrebări și descoperirea altor povești.

Obiectivul cercetării noastre a fost de a investiga evoluția motivelor de rețea și de a explora fezabilitatea controlării formării lor. Motivele de rețea sunt rare în sistemele din lumea reală datorită dinamicii specifice, făcându-le indicatori valoroși pentru înțelegerea rețelelor complexe. Cu toate acestea, raritatea lor a împiedicat dezvoltarea unor legi universale care să guverneze existența lor, prezentând astfel provocări semnificative în studiul lor. Cercetarea noastră a necesitat explorarea unor teritorii necunoscute, recunoscând că vor exista momente când nu vom avea acces la soluții sau răspunsuri stabilite.

Primul pas al acestui proiect de cercetare a implicat investigarea uneltelor utilizate pentru identificarea motivelor de rețea. În mod specific, am explorat diverși algoritmi utilizați în mod obișnuit pentru determinarea dacă un grup de noduri și muchii poate fi clasificat ca un motiv. Studiul nostru a relevat că algoritmiile aveau performanțe slabe datorită naturii NP-hard a problemei de extragere a motivelor. Acest lucru a reprezentat o provocare semnificativă pentru proiectul nostru de cercetare, deoarece ar fi trebuit să rulăm algoritmiile de mai multe ori, ceea ce ar fi dus la timpi de așteptare inacceptabil de lungi pentru rezultatele necesare analizei noastre. Pentru a rezolva problema performanței algoritmilor de extragere a motivelor, a fost dezvoltat un proces fiabil și eficient înainte de a efectua analiza dorită. O versiune paralelizată a algoritmului ESU a fost introdusă și prezentată ca o soluție semnificativ îmbunătățită în comparație cu alte abordări (Capitolul 3). Dezvoltarea acestui algoritm a fost o realizare semnificativă care nu numai că a servit scopului proiectului nostru de cercetare, dar a fost beneficiat și comunității de cercetare în domeniul rețelelor complexe.

Cercetarea a continuat cu colectarea unui set diversificat de rețele din diferite domenii și dimensiuni pentru a asigura un set de date echilibrat pentru analiză. Împreună cu extragerea motivelor din aceste rețele, am colectat și proprietățile lor topologice (Capitolul 2) pentru a investiga corelații potențiale cu prezența motivelor. Algoritmii paralelizat ESU s-a dovedit a fi eficient, permițându-ne să adunăm eficient un set cuprinzător de date într-un interval surprinzător de scurt.

Urmată de principiile convergenței din Teoria Stabilității, am dezvoltat un set de întrebări de studiu pentru a ghida experimentele noastre. Aceste întrebări s-au concentrat asupra atomilor sau nodurilor sistemului, deoarece aceștia codifică dinamica care converge către ei și, în cele din urmă, se stabilizează într-o stare nouă. Am folosit această abordare pentru a formula o ipoteză care explică de ce și cum nodurile și muchiile apar sau dispar în rețelele complexe, oferind o explicație generală pentru evoluția motivelor. Conform ipotezei noastre, atunci când apare un eveniment specific într-un sistem, atomii se comportă într-un mod care creează structuri ghidate de dinamica evenimentului. Din perspectiva unui sistem modelat ca o rețea, acest lucru este codificat ca noduri care au muchii specifice, care sunt detectate ca motive de rețea.

Bazându-ne pe aspectele teoretice obținute din analiza noastră, am efectuat o serie de experimente pentru a investiga relația dintre proprietățile topologice extrase ale rețelelor și prezența motivelor. Analiza statistică complexă rezultată a oferit răspunsuri la toate întrebările noastre de cercetare, confirmând ipoteza noastră de convergență. Descoperirile noastre au relevat că un set de proprietăți topologice prezintă o corelație puternică cu existența motivelor în rețea.

Am început prin investigarea corelației dintre prezența Punctelor de Articulație (*AP*) într-o rețea și existența motivelor de rețea. Nodurile *AP* reprezintă punți critice între două sau mai multe comunități și joacă un rol semnificativ în facilitarea fluxului de informații între ele. Prin intermediul unei serii de experimente prezentate în Capitolul 4, am demonstrat că nodurile *AP* au o proprietate de controlabilitate, care le permite să propage dinamici specifice către comunitățile pe care le controlează, izolându-le de celelalte. Acest lucru duce la o evoluție rapidă a motivelor în acele rețele. Descoperirile noastre au implicații importante, în special în rețelele sociale, unde nodurile *AP* sunt adesea persoane influente care pot induce ideologii în comunitățile pe care le conduc. Acest lucru are o aplicație periculoasă, în special în rețelele sociale, unde nodurile *AP* sunt de obicei persoane influente și pot induce ideologii în comunitățile pe care le conduc.

Celelalte două proprietăți topologice strâns asociate cu prezența motivelor de rețea au fost coeficientul de asortativitate (ρ) și coeficientul local de clusterizare (CC_l), datorită capacității lor de a codifica comportamente specifice ale rețelei. ρ este o măsură care indică dacă nodurile dintr-o rețea au mai multe șanse să fie conectate la alte noduri cu același grad, ceea ce este comparabil cu oamenii dintr-o comunitate care au mai multe șanse să aibă prieteni care sunt la fel de populari. Acest comportament specific explică apariția anumitor motive în procesul de formare a legăturilor între nodurile cu același grad. Coeficientul local de clusterizare (CC_l) este o altă proprietate topologică strâns corelată cu existența motivelor de rețea. Indică tendința nodurilor dintr-o rețea de a forma grupuri strâns interconectate sau cluster. Acest comportament furnizează un mediu favorabil pentru evoluția motivelor între nodurile din același cluster, în special dacă au tendința de a se conecta cu noduri de grade similare, urmând principiile de atașare preferențială ale lui ρ .

După obținerea rezultatelor analizei, am propus un cadru de analiza care confirmă proprietățile de convergență din Teoria Stabilității în rețelele complexe, realizând astfel obiectivul nostru inițial de a înțelege evoluția motivelor de rețea în astfel de rețele (Capitolul 7). Mai mult, pe baza acestor rezultate, am sugerat o nouă unealtă care simplifică extragerea motivelor ca o etapă de preprocesare. Extractia proprietăților topologice din rețelele complexe este semnificativ mai rapidă decât extragerea motivelor, chiar și cu utilizarea paralelizării. Deoarece anumite proprietăți topologice și valorile lor au arătat că indică prezența motivelor în rețele, propunem antrenarea unei serii de modele bazate pe inteligență artificială care pot prezice prezența sau absența motivelor într-o rețea pe baza proprietăților sale topologice. Astfel, este posibil să se determine de la început dacă rețeaua merită procesată folosind modelul antrenat bazat pe inteligență artificială ca sistem de recomandare. De menționat că unul dintre modelele antrenate a obținut performanțe remarcabile, detectând

prezența sau absența motivelor cu o precizie de peste 95% (Capitolul 5).

În ciuda rezultatelor promițătoare obținute din analizele noastre anterioare, s-a născut un nou obiectiv mai înalt. Am identificat o lacună de cercetare în literatura actuală de ultimă oră, mai precis absența unui model care să poată genera rețele conținând motive. În timp ce modelele nule existente vizează generarea anumitor tipuri de rețele folosind metode stocastice pentru a adăuga legături între noduri până când se îndeplinește o proprietate dorită, niciunul nu abordează provocarea de a crea rețele care să conțină motive. Am considerat că abordarea algoritmică utilizată de majoritatea modelelor din literatură, care vizează simularea unui comportament sintetic, intră în contradicție cu mediul natural necesar pentru existența motivelor. Ca rezultat, am dezvoltat o nouă arhitectură de model nul bazată pe un Algoritm Evolutiv (EA) care poate evolua rețele pentru a replica dinamica continuă a unui sistem real și care poate genera rețele complexe conținând motive. Componenta EA a avut ca scop optimizarea proprietăților ρ și CC_l simultan și elaborarea unui mecanism mai realist pentru adăugarea de muchii la rețea, un factor crucial pentru existența motivelor. Am controlat modelul nul propus folosind un set de parametri bazat pe o funcție de fitness inovatoare, pe care am introdus-o pentru prima dată în literatură. Experimentul descris în Capitolul 8 a arătat că arhitectura propusă a fost fiabilă, generând rețele cu motive puternice. Această contribuție reprezintă o adăugare importantă la literatura de specialitate, cu implicații potențiale pentru viitoarele cercetări în acest domeniu.

În studiile viitoare, luăm în considerare analiza dinamică de coexistență între motivele de rețea și alte structuri topologice de scară meso, cum ar fi comunitățile sau lanțurile. Această explorare are potențialul de a dezvălui comportamente subtile în evoluția controlabilității motivelor de rețea. Valorificarea acestor structuri ar putea îmbunătăți precizia modelului existent introdus în Capitolul 8, permițând proiectarea unui mecanism pentru reglarea dimensiunii motivelor și nu doar a existenței lor. În plus, planificăm să explorăm diverse arhitecturi de modele, cum ar fi modelele stocastice de blocuri sau modelele generative profunde, și să efectuăm analize comparative. Această abordare promite să deschidă noi căi pentru controlul evoluției motivelor în rețelele generate.

În concluzie, deși recunoaștem că niciun lucru nu poate fi considerat complet terminat, suntem încrezători că cercetarea noastră a contribuit semnificativ la domeniul analizei rețelelor complexe. Pe parcursul acestei călătorii, am propus o serie de rezultate inovatoare față de starea actuală a artei și am deschis noi direcții de cercetare, luând în considerare sugestia de îmbunătățire la sfârșitul fiecărui capitol, cu speranța de a inspira tinerii cercetători să continue să spargă barierele cunoașterii. Privind înapoi la realizările noastre, suntem mândri de completitudinea tezei și suntem entuziasmați să vedem cum rezultatul va impacta

cercetarea viitoare în această zonă.

Referințe

- [1] Albert, I. and Albert, R. (2005). Conserved network motifs allow protein-protein interaction prediction. *Bioinformatics (Oxford, England)*, 20:3346–3352.
- [2] Alho, K. (1992). Selective attention in auditory processing as reflected by event-related brain potentials. *Psychophysiology*, 29(3):247–263.
- [3] Altay, Y., Cao, S., Che, H., Abdelmohsen, L., and Hest, J. (2019). Adaptive polymeric assemblies for applications in biomimicry and nanomedicine. *Biomacromolecules*, 20(11):4053–4064.
- [4] Angulo, M., Liu, Y.-Y., and Slotine, J.-J. (2014). Network motifs emerge from interconnections that favor stability. *Nature Physics*, 11:848–852.
- [5] Bakhshandeh, R., Samadi, M., Azimifar, Z., and Schaeffer, J. (2011). Degrees of separation in social networks. In *Proceedings of the 4th Annual Symposium on Combinatorial Search, SoCS 2011*, pages 18–23. Association for Computing Machinery.
- [6] Barabási, A.-L. (2009). Scale-free networks: A decade and beyond. *Science*, 325(5939):412–413.
- [7] Barabási, A.-L. and Albert, R. (1999). Emergence of scaling in networks. *Science*, 286(5439):509–512.
- [8] Barabási, A.-L. and Pósfai, M. (2016). *Network science (pages 21–29)*. Cambridge University Press, Cambridge.
- [9] Barbu, V. (2016). *Stability Theory (pages 123–159)*. Springer, Cham.
- [10] Chakraborty, T., Srinivasan, S., Ganguly, N., Bhowmick, S., and Mukherjee, A. (2013). Constant communities in complex networks. *Scientific reports*, 3:1825.
- [11] Cormen, T., Leiserson, C., Rivest, R., and Stein, C. (2001). *Introduction To Algorithms (pages 65–97)*. The MIT Press.
- [12] Deritei, D., Rozum, J., Regan, E., and Albert, R. (2019). A feedback loop of conditionally stable circuits drives the cell cycle from checkpoint to checkpoint. *Scientific Reports*, 9:16430.
- [13] Findlay, M., Freitas, D., Mobed-Miremadi, M., and Wheeler, K. (2017). Machine learning provides predictive analysis into silver nanoparticle protein corona formation from physicochemical properties. *Environmental Science: Nano*, 5(1):64–71.

- [14] Forrester, J. (1989). The beginning of system dynamics. *McKinsey Quarterly*, 4.
- [15] Ghys, E. (2013). The lorenz attractor, a paradigm for chaos. *Progress in Mathematical Physics*, 66:1–54.
- [16] Guimerà, R. and Amaral, L. A. N. (2005). Cartography of complex networks: modules and universal roles. *Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment*, 2005(2):P02001.
- [17] Harrison, C. W., Scott, A. B., and Ronald, B. (1976). Social structure from multiple networks. i. blockmodels of roles and positions. *American Journal of Sociology*, 81(4):730–780.
- [18] Hirsch, M., Smale, S., and L Devaney, R. (2004). *Differential Equations, Dynamical Systems and an Introduction to Chaos (pages 140–142)*. Academic Press.
- [19] Hoel, E. (2018). *Agent Above, Atom Below: How Agents Causally Emerge from Their Underlying Microphysics (pages 63–76)*. Springer, Cham.
- [20] Hoel, E., Albantakis, L., and Tononi, G. (2013). Quantifying causal emergence shows that macro can beat micro. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 110(49):19790–19795.
- [21] Itzkovitz, S., Levitt, R., Kashtan, N., Milo, R., Itzkovitz, M., and Alon, U. (2005). Coarse-graining and self-dissimilarity of complex networks. *Physical review. E, Statistical, nonlinear, and soft matter physics*, 71(1):016127.
- [22] Kunegis, J., Blattner, M., and Moser, C. (2013). Preferential attachment in online networks: Measurement and explanations. In *Proceedings of the 5th Annual ACM Web Science Conference, WebSci '13*, pages 205–214. Association for Computing Machinery.
- [23] Marchiori, M. and Possamai, L. (2015). Micro-macro analysis of complex networks. *PLOS ONE*, 10(1):1–27.
- [24] Mayer, A. R., Hanlon, F., Franco, A., Teshiba, T. M., Thoma, R., Clark, V., and Cañive, J. (2008). The neural networks underlying sensory gating. *NeuroImage*, 44(1):182–189.
- [25] Mester, A., Pop, A., Mursa, B.-E.-M., Greblă, H., Dioşan, L., and Chira, C. (2021). Network analysis based on important node selection and community detection. *Mathematics*, 9(18):2294.
- [26] Milo, R., Shen-Orr, S., Itzkovitz, S., Kashtan, N., Chklovskii, D., and Alon, U. (2002). Network motifs: simple building blocks of complex networks. *Science*, 298(5594):824–827.
- [27] Mursa, B.-E.-M. (2023). Examining the social behavior of ant colonies using complex networks. In *Proceedings of the Studia Universitatis Babes-Bolyai Informatica*, volume 67, pages 49–64.
- [28] Mursa, B.-E.-M. and Andreica, A. (2023). Generating random complex networks with network motifs using evolutionary algorithm-based null model. *Swarm and Evolutionary Computation*. **SUBMITTED**.

- [29] Mursa, B.-E.-M., Andreica, A., and Dioşan, L. (2018). Parallel acceleration of subgraph enumeration in the process of network motif detection. In *2018 20th International Symposium on Symbolic and Numeric Algorithms for Scientific Computing (SYNASC)*, pages 191–198. Institute of Electrical and Electronics Engineers.
- [30] Mursa, B.-E.-M., Andreica, A., and Dioşan, L. (2019a). An empirical analysis of the correlation between the motifs frequency and the topological properties of complex networks. In *Procedia Computer Science*, volume 159, pages 333–341. Elsevier BV.
- [31] Mursa, B.-E.-M., Andreica, A., and Dioşan, L. (2019b). Mining network motif discovery by learning techniques. In *Hybrid Artificial Intelligent Systems*, pages 73–84, Cham. Springer International Publishing.
- [32] Mursa, B.-E.-M., Andreica, A., and Dioşan, L. (2019c). Study of connection between articulation points and network motifs in complex networks. In *In Proceedings of the 27th European Conference on Information Systems (ECIS)*, page 127. AIS eLibrary.
- [33] Mursa, B.-E.-M., Dioşan, L., and Andreica, A. (2021). Network motifs: A key variable in the equation of dynamic flow between macro and micro layers in complex networks. *Knowledge-Based Systems*, 213:106648.
- [34] Nasini, S., Martínez-de Albéniz, V., and Dehdarirad, T. (2017). Conditionally exponential random models for individual properties and network structures: Method and application. *Social Networks*, 48:202–212.
- [35] Nguyen, N. P., Dinh, T. N., Shen, Y., and Thai, M. T. (2014). Dynamic social community detection and its applications. *PLOS ONE*, 9(4):1–18.
- [36] Noldus, R. and Van Mieghem, P. (2015). Assortativity in complex networks. *Journal of Complex Networks* 2015, 3(4):507–542.
- [37] Raj P. M., K., Mohan, A., and Srinivasa, K. G. (2018). Basics of graph theory. In *Practical Social Network Analysis with Python*, pages 1–23. Springer International Publishing.
- [38] Ravid, G. and Rafaeli, S. (2004). Asynchronous discussion groups as small world and scale free networks. *First Monday*, 9(9).
- [39] Ricketts, S., Francis, M., Farhadi, L., Rust, M., Das, M., Ross, J., and Robertson-Anderson, R. (2019). Varying crosslinking motifs drive the mesoscale mechanics of actin-microtubule composites. *Scientific Reports*, 9:12831.
- [40] Scholz, M. (2015). Node similarity as a basic principle behind connectivity in complex networks. *Journal of Data Mining & Digital Humanities*, 2015:1–7.
- [41] Shugen, W. (2002). Framework of pattern recognition model based on the cognitive psychology. *Geo-spatial Information Science*, 5:74–78.
- [42] Sun, P. and Ma, X. (2017). Understanding controllability of complex networks from microcosmic to macrocosmic. *New Journal of Physics*, 19:013022.

-
- [43] Viswanath, B., Mislove, A., Cha, M., and Gummadi, K. P. (2009). On the evolution of user interaction in facebook. In *Proceedings of the 2nd ACM Workshop on Online Social Networks*, WOSN '09, pages 37–42. Association for Computing Machinery.
- [44] Watts, D. and Strogatz, S. (1998). Collective dynamics of 'small-world' networks. *Nature*, 393:440–442.
- [45] Wernicke, S. (2006). Efficient detection of network motifs. *Transactions on Computational Biology and Bioinformatics*, 3:347–359.
- [46] Wharrie, S., Azizi, L., and Altmann, E. G. (2019). Micro-, meso-, macroscales: The effect of triangles on communities in networks. *Physical Review E*, 100(2):022315.
- [47] Yeager-Lotem, E., Sattath, S., Kashtan, N., Itzkovitz, S., Milo, R., Pinter, R. Y., Alon, U., and Margalit, H. (2004). Network motifs in integrated cellular networks of transcription–regulation and protein–protein interaction. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 101(16):5934–5939.