

nyezeti problémákat! Egyet kell értenünk abban, hogy amerre csak nézünk, komoly, kezelendő környezeti anomáliák, nehézségek sorát látjuk.

Napjainkban szédületes ütemben folyik környezetünk átalakulása. Az alig követhető, napi szintű változás mellett a legnehezebb problémákat a környezetünk jövője oldaláról felmerülő kérdések vetik fel. A természeti erőforrások végesek és nem hosszú időn belül egészen biztosan beszűkülnek. A klíma nagy valószínűséggel meg fog változni. Ez magával hozza majd, hogy az elszaporodott emberiség jelentős része a tengerek által elöntött, vagy éppen az elsivatagosodott területekről, a valóban élehetetlen régiókból a szerencsésebb környezetű vidékek felé fog vándorolni.

Az előbb említett példák, de a legnagyobb környezeti problémák elemzése világosan utal arra, hogy az elmúlt évtizedekben nemcsak a világgazdaság globalizálódott, hanem az átalakulás során előhívott környezeti problémák zöme is. Nyilvánvaló, ezen környezeti veszélyeket csak nemzetközi erőfeszítésekkel lehetne kezelni.

Ugyanakkor a mai világban nincsenek az emberi törekvéseket összefogó erők. Még szervezetek is alig vannak az egy-egy kérdésben egységes álláspontok kialakításához. Ráadásul, az emberiség mély morális válságon megy keresztül. Kortársaink többségének morális színvonala alacsony, ami még a globálisan célszerű és végrehajtható javaslatok megvalósítását is majdnem lehetetlenné teszi. Nekünk úgy tűnik, hogy a társadalom minden szereplője – néhány kivétellel – úgy tesz, mintha csak rövid távú érdeke lenne. Az

egyének többsége csak az anyagi javakat akarja megszerezni és nekik a hosszú távú célok, erkölcsi megfontolások semmit nem számítanak. Az olyan kérdések, mint az emberiség jövője, a környezet, a Föld további sorsa a legtöbb emberben fel sem merül, élik világukat és csak igen távoli, zavaró rossznak tartják a józan kérdések felvetését.

Mindezek ellenére e sorok írói a Föld jövője szempontjából optimisták és vallják, hogy a Föld élhető marad a következő évszázadban is! Ennek alapja az, hogy hiszünk a tudomány hihetetlen erejében és hatékonyságában. A tudomány szinte minden probléma megoldásához segítségül hívható. Ha tömegesen leszünk képesek ezt felismerni, és a segítséget elfogadni, akkor még kiépíthető egy vékony palló, amelyen átmehetünk, hogy a jövő generációk környezete is élhető maradjon! Ehhez azonban már most óriási elszántságra és munkára van szükség.

Irodalom

1. D. H. Meadows, D. L. J. Randers, D. Meadows: *A növekedés határjai – Harminc év múltán*. Kossuth Kiadó, Budapest, 2005.
2. Rakonczai J.: *Globális környezeti kihívásaink*. Universitas Szeged Kiadó, Szeged (2008) 19–163.
3. M. Szabó, Á. Kiss: Effects of renewable energy resources on the landscape. *Hungarian Geographical Bulletin* 63/1 (2014) 5–16. DOI: 10.15201/hungeobull.63.1.1.
4. Vajda Gy.: Energiaellátás ma és holnap – *Magyarország az energifordulón* sorozatban, MTA Társadalomtudományi Központ, (2004) 177–236.
5. Szabó M.: A bioszféra sokfélesége – az élővilág változatossága és veszélyeztetettsége. *Földrajzi Közlemények* 132/4 (2008) 441–449.
6. E. O. Wilson: *Az élet jövője*. Akkord Kiadó Kft. (2006) 288.

KRITIKUS DINAMIKA EGY NAGY EMBERI KONNEKTOMON

Ódor Géza

MTA-EK, Műszaki Fizikai és Anyagtudományi Kutatóintézet

Kritikusság és Griffiths-fázisok hálózati modelleknél

Elméleti és kísérleti kutatások arra utalnak, hogy az agy többnyire egy aktív és inaktív fázist elválasztó kritikus állapot környékén működik [1]. A kritikus rendszerek optimális számítási képességekkel rendelkeznek, így ez az állapot hasznos az idegrendszer számára. Miután a kritikusság eléréséhez bizonyos kontrollparamétereket hangolni kell, felmerül a kérdés, hogy miként is történik ez. A probléma jól ismert

a statisztikus fizikában, és helyfüggetlen kölcsönhatású rendszerek esetében az úgynevezett önszerveződő kritikusság (SOC) elméletét vezették be [2]. Az SOC-s modellekben egy lassú és egy gyors folyamat versengésével a rendszer magát hangolja egy kritikus fázisátalakulási pont köré. A kritikus pont környékén a fizikai mennyiségek hatványfüggvény-viselkedést mutatnak, és ha ilyent figyelnek meg, sokan – a fenti ver-

A cikk az Eötvös Loránd Fizikai Társulat szegedi Vándorgyűlésén, 2016. augusztus 26-án elhangzott előadás alapján készült.

Köszönöm C. C. Hilgetag, R. Juhász és M. A. Muñoz megjegyzéseit, W. Cota ábráját, Ódor Gergely konnektom-adatbázis felfedezését és dekódolását, az OCP projekt segítőkészségét, valamint NIIF HPC szuperszámítógépes támogatását. A kutatást az OTKA (K109577) támogatta.



Ódor Géza 1984-ben villamosmérnöki diplomát szerzett a BME-n. Azóta a KFKI területén levő, különböző nevre átkeresztelt MTA kutatóintézetek kutatója. Fizikusi MSc-t 1993-ban Chicagóban, PhD-t 1996-ban az ELTE-n kapott. 2004 óta az MTA doktora. Kétszer 1 évig CERN kutatói ösztöndíjas volt. Jelenleg az MTA-EK MFA tudományos tanácsadója, több nemzetközi projekt tagja. Fő kutatási területe a nemegyensúlyi rendszerek statisztikus fizikája a rendezetlen és univerzális viselkedések vizsgálatára.

sengő folyamatok azonosítása nélkül is – egyből SOC mechanizmusról beszélnek. Az önhangolást újabb evolúciós adaptáció eredményének is tulajdonítják.

A valódi rendszerek azonban általában erősen inhomogének, és először meg kellene győződnünk arról, hogy a homogén modellek alkalmazhatók-e rájuk. A heterogenitást a statisztikus fizikában rendezetlenségnek is szoktuk hívni, amikor ezekhez hasonlítjuk rendszereinket. Viszonylag gyenge és lokalizált rendezetlenség esetén ritka régió (RR) effektusokról szoktunk beszélni, amelyek azután elkenhetik a fázisátalakulást [3]. A ritka régiók – relevanciájuk szerint – különböző hatásúak lehetnek. Szakadós fázisátmenetet folytonossá tudnak tenni, úgynevezett Griffiths-fázisokat (GP) kelthetnek [4], vagy akár teljesen el is tüntethetnek egy fázisátalakulást. A GP lényege úgy foglalható össze, hogy a rendszer egyik globális állapotában lehetnek olyan RR-ek, amelyek ellenkező fázisban vannak, de járulékkuk mérhető. Ezek a nagy RR-ek lassan igazodnak a globális állapothoz és hatványfüggvény vagy még lassabb dinamikát okoznak – a kontrollparaméterek egy kiterjedt tartományában a kritikus pont környékén – a rendparaméterben. A GP-ben lassan bomló autokorrelációkat, ezáltal villanásos viselkedést is meg lehet figyelni [5]. Az agy gyorsmemóriájának egy lehetséges magyarázata is lehet a GP-s viselkedés [6]. Ezen felül a GP-ben a szuszceptibilitás divergál, így erős a stimulusokra való érzékenység, ami az információfeldolgozás szempontjából hasznos tulajdonság.

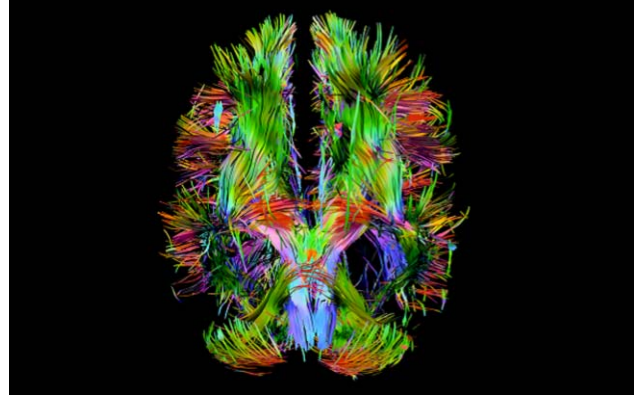
Ezáltal valós (neurális) rendszerek modellezésénél nagyon fontos szempont a heterogenitások figyelembevétele. Korábban a kontakt folyamat (CP) [7] hálózati dinamikájának tanulmányozása folytán az a hipotézis született [8], hogy a rendezetlenség csak véges gráf (topologikus) dimenzió D esetén okozhat GP-t. Itt D az euklideszi dimenzió általánosítása gráfcsomópont-távolságok esetére az alábbi relációban:

$$N_r \sim r^D,$$

ahol N_r azon j csomópontok száma, amelyek $r = d(i, j)$ lépésnél közelebb vannak egy tetszőleges i kezdőponthoz. Fenti hipotézisünk számos más terjedési modell esetén alátámasztást nyert [9], sőt véges méretű, skálamentes hálózatok esetén is találhatóunk hatványfüggvény-dinamikákat, véges időablakokban [10].

Konnektomok, modellek és módszerek

Napjainkban emberi konnektomokat (agyhálózati gráfokat) körülbelül 1 mm^3 -es felbontású, súlyozott diffúziós, funkcionális vagy strukturális MRI képek alapján lehet generálni. Az Open Connectome projekt (OCP) honlapjáról [11] DTI [12] módszerrel meghatározott gráfokat töltöttünk le (1. ábra) és topológiai szempontból analizáltuk. A DTI módszer lényege, hogy a vízmolekulák anizotróp áramlásából (a diffúziós tenzorból) következtet az axonkötegek pályájára,



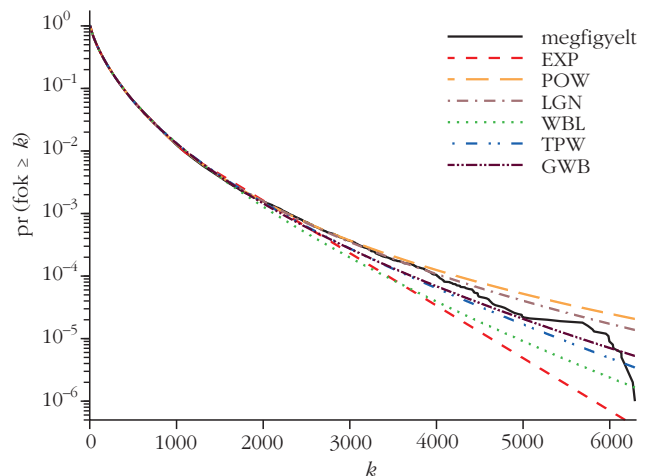
1. ábra. Agyhálózati konnektomkép DTI módszerrel [11].

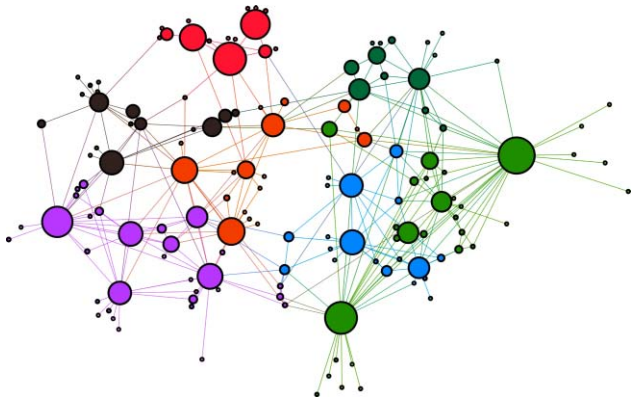
és állít elő egy térképet, amely megmutatja, hogy melyik terület melyikkel van összekötve. Ez – megfelelő szűrő és korrekciós algoritmusok alkalmazása után – egy irányítatlan, de súlyozott kapcsolati hálózatot eredményez.

Precíz módszerrel kimutattuk, hogy a fokszámoszlás nyújtott exponenciális alakú [13], tehát a skálamentesség strukturális esetben ki van zárva (2. ábra). Megmutattuk, annak ellenére, hogy a kisvilág együttható nagyon nagy, a D gráfdimenzió kisebb 4-nél. Tehát ezek a hálózatok alapvetően a beágyazó $D=3$ tér rövid távú kapcsolataival írhatók le, és a hosszú élek nem olyanok, hogy alapvetően tudják befolyásolni két pont topologikus távolságát. Azt is megmutattuk, hogy ezek a hálózatok robusztusak: a fenti eredmények még 20%-nyi (irányított) él eltávolítása után sem változnak. Ez azért fontos eredmény, mert arra utal, hogy állításaink túlnyomó része akkor is igaz marad, ha kiderül, hogy a konnektomok meghatározása pontatlan.

Az egyik ilyen, úgynevezett *KKI-18*-as jelű, konnektomon végeztem dinamikus modellszimulációkat. Ez a hálózat egy $N = 836\,733$ csomópontszámú, összefüggő, óriás komponenssel rendelkezik, amelyet 41 523 931 irányítatlan, de súlyozott él köt össze. Az élsúlyok eloszlása igen inhomogén, $w_{ij}=1$ és $w_{ij}=854$ között változik. Egy hálózat analizáló algoritmus 144

2. ábra. A *KKI-18*-as gráf fokszámoszlása és különböző, legjobban illeszkedő modellek becslései [13].





3. ábra. A KKI-18-as konnektom moduljai. A karikák mérete a csomópontok számával arányos. Köszönettel W. Cota-nak.

modult azonosított, amelyek közül a legkisebb 8, a legnagyobb 35 202 csomópontot tartalmaz (3. ábra). Fontos megjegyezni, hogy a csomópontok önmagukban 10^4 - 10^5 neuronból állhatnak, kiadván ezzel az emberi agy körülbelül 10^{11} idegsejtjét.

A valósághoz jobban hasonlító agyhálózat vizsgálata érdekében az élek 20%-át véletlenszerűen eltávolítottam úgy, hogy a gráf a neuromérésekhez hasonló mértékben lett irányított. Később kiderült, hogy a szimulációk ezen csonkítás nélkül is kvalitatívan egyező eredményekhez vezetnek.

Egy két állapotú ($x_i = 0$ vagy 1) terjedési modellt alkalmaztam a neuroaktivitás leírására. Ebben az úgynevezett küszöbmodellben a csomópont bejövő éleinek súlyozott aktivitásösszege hasonlítódik össze egy küszöbértékkel:

$$\sum_j x_j w_{ij} > K. \quad (1)$$

A feltétel teljesülése esetén egy inaktív csomópont λ valószínűséggel aktiválódhat. Az aktív csomópontok a következő időlépésben ν valószínűséggel inaktíválódnak. Az egyszerűség kedvéért agykutató kollegáktól [14] kölcsönzött stochasztikus sejtautomata-algoritmust használtam, amelyben az összes lehetséges csomópont szinkronfrissítése történik egymásra következő Monte Carlo-lépések (MCs) között.

A dinamikus szimulációkat egy véletlen csomópont aktiválásával kezdtem és a kialakuló folyamatot addig követtem, amíg az aktivitás fennmaradt, de legfeljebb 10^5 MCs időlépésig. Mértem a

$$\rho(t) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i$$

átlagos aktivitást, a $P(t)$ túlélési valószínűséget és a kialakuló

$$s = \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T x_i$$

aktivitási lavina méretét (itt T a lavina időhossza). A méréseket minden egyes λ , ν és K kontrollparaméter esetén 10^5 - 10^7 független futásra átlagoltam.

Egy esetleges kritikus fázisátalakulási pontban a mért átlagok skálaviselkedést mutatnak, például a túlélési valószínűség aszimptotikusan

$$P(t) \propto t^{-\delta} \quad (2)$$

alakú, ahol δ az úgynevezett túlélési exponens. Ez skálarelációval kapcsolható össze a kísérletekben mért $\tau_i = 1 + \delta$ lavinaidőhossz exponenssel. Kritikuság esetén az aktív helyek száma

$$N(t) \propto t^\eta \quad (3)$$

módon, az η exponenssel jellemezhetően változik, ami a lavina méretet leíró exponenshez a

$$\tau = \frac{1 + \eta + 2\delta}{1 + \eta + \delta} \quad (4)$$

skálarelációval köthető. A skálázási korrekciók figyelembe vételéhez mértem a skálaexponensek effektív értékeit is, például:

$$\delta_{\text{eff}}(t) = -\frac{\ln P(t) - \ln P(t')}{\ln t - \ln t'}, \quad (5)$$

$t - t' = 8$ -as differenciát használva.

A küszöbmodellt vizsgálva az derült ki, hogy a kontrollparaméterek semmilyen kombinációja esetén sem alakul ki kritikus viselkedés, hanem a nagy súlyú

$$W_i = \sum_j w_{ij}$$

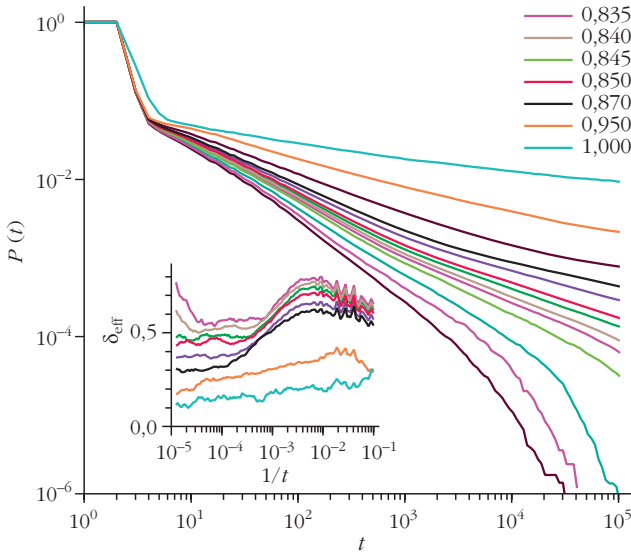
csomópontok („hub”-ok) pillanatok alatt felaktivizálódnak és tartósan dominálják a rendszert, vagy ha nem sikerül őket aktivizálni, a terjedés exponenciálisan rövid idő alatt kihal. Ez a szcenárió nem túl életszerű, mert a kisebb súlyú csomópontok szinte semmilyen szerepet nem tudnak játszani a folyamatban. Egy valós neurális hálózat esetén azt várjuk, hogy az összes neuronnak van valami szerepe. Ezért módosítottam a modellt, egy csomópontfüggő küszöb feltételezésével, ami gyakorlatban a bejövő súlyok normálását jelentette:

$$w'_{ij} = \frac{w_{ij}}{W_i}$$

Ez a neuronok (vagy tartományok) homeosztázikus adaptációs érzékenységével indokolható feltételezés, amelyre valóban vannak is jelek.

Variábilisküszöb-modell eredmények

A kontrollparaméterek olyan tartományát vizsgáltam, ahol $\lambda \approx 1$, ami hatékony jelterjedést biztosít, ugyanakkor fázisátmenet csak $K < 0,5$ esetén fordult elő. Ezért $K = 0,25$ -ot rögzítettem és a ν vagy λ értékének variálásával kerestem a kritikus pontot, illetve annak környezetét. Mint a 4. ábrából kikövetkeztethető, ez $\nu = 0,95$ és $\lambda = 0,88(2)$ körül van. Felette a $P(t)$ gör-

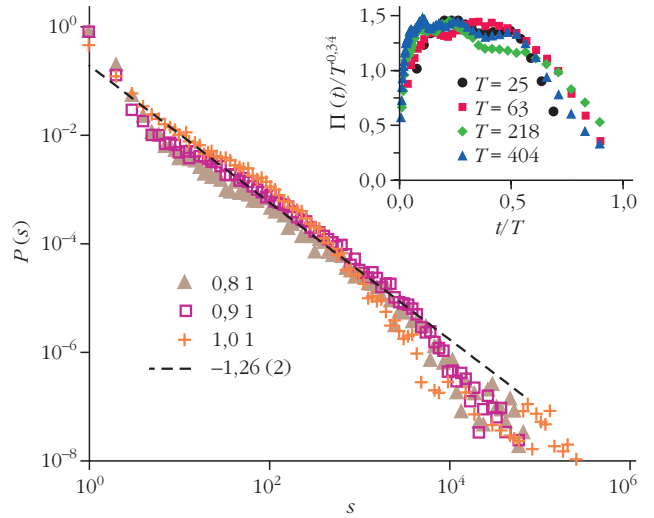
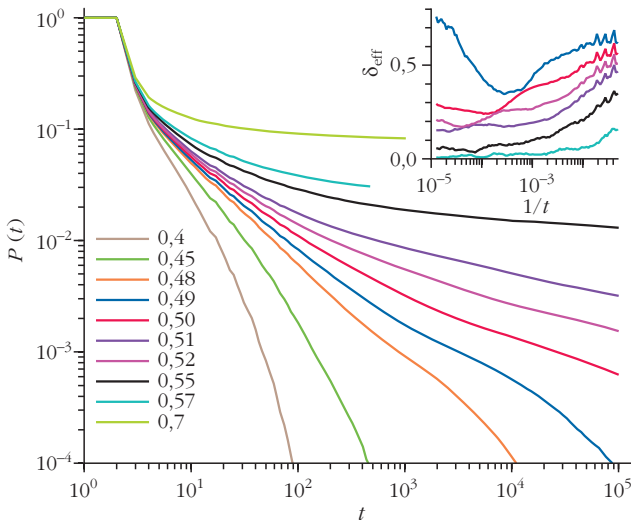


4. ábra. Túlélési valószínűség $K = 0,25$, $v = 0,95$ és $\lambda = 0,8, 0,81, 0,82, 0,83, 0,835, 0,84, 0,845, 0,85, 0,86, 0,87, 0,9, 0,95, 1$ (alulról felfelé). Kis ábra: effektív exponensek (5) $\lambda = 0,835$ -től $\lambda = 1$ -ig (felülről lefelé). A Griffiths-effektusok az $1/t \rightarrow 0$ limeszben konstanssá váló görbékben manifesztálódnak [17].

bék konstans értékhez tartanak, míg alatta ($0,845 < \lambda < 0,88$) változó kitevőjű hatványfüggvény-dinamikára, vagyis GP-re utalnak. A $\lambda = 1$ környékén megfigyelhető egyenes vonalak a lokális meredekségek $\ln(1/t)$ -s ábrázolásában ultra lassú kritikus dinamikára utalnak, akárcsak a 3-dimenziós CP erősen rendezetlen fixpontja [15] esetén. Fittelés $\lambda = 0,88$ -nál $P(t) \approx \ln(t^{-3,5(3)})$ aszimptotikus viselkedést eredményez.

Ebben a régióban a lavinaméret-eloszlások is hatványfüggvényfarkokkal rendelkeznek, $\tau = 1,26(2)$ körül változó exponensekkel, ami kisebb, mint amit agyi elektródás kísérleteknél mértek: $\tau \approx 1,5$ [1]. Egy hullámmoduláció is megfigyelhető a görbéken a moduláris hálózati struktúrájának köszönhetően (5. ábra). Elektró-

6. ábra. Túlélési valószínűség 30% gátló élek és $K = 0,1$, $\lambda = 0,95$, valamint $v = 0,4, 0,45, 0,49, 0,5, 0,51, 0,52, 0,55, 0,57, 0,7$ (alulról felfelé) paraméterek esetén. Kis ábra: ezen görbék lokális meredekségei fordított sorrendben [17].



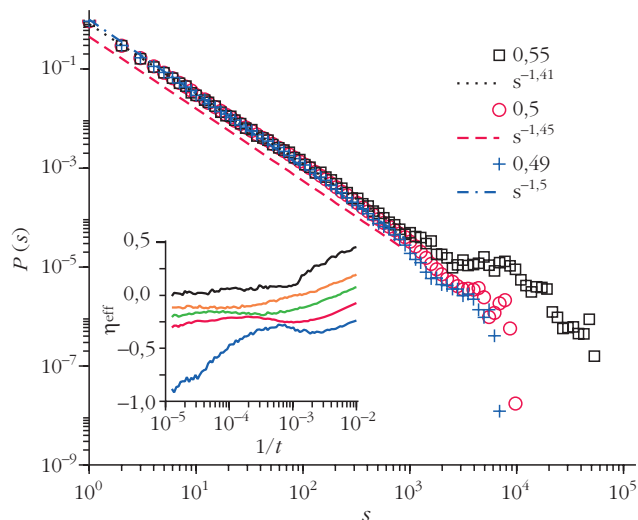
5. ábra. Lavinaméret-eloszlás $K = 0,25$, $v = 1$ és $\lambda = 1, 0,9, 0,8$ esetén. Szaggatott vonal: hatványfüggvényfit $\lambda = 0,8$ -re. Kis ábra: skálakollapszus $T = 25, 63, 218, 404$, valamint $\lambda = 0,86$, $v = 0,95$ esetén [17].

dás kísérleteknél és kritikus agymodelleknél fix T időre átlagolt lavinaméretük univerzális viselkedését skálakollapszussal szokták jellemezni [16]. Az 5. ábrán látható egy ilyen analízis is, amelyet $T = 25, 63, 218, 404$ időkre $\Pi(t)/T^{0,34}$ vertikális skálázással kaptam. Ezek az eredmények jól egyeznek a [16] cikkben említett kísérletekkel, sőt aszimmetrikus skálaformát mutatnak, amelyeket a [16]-beli modell nem tud reprodukálni.

Az eredeti, irányítatlan gráfot használva is hasonló GP-s dinamikát mutatnak a szimulációk, de ugyanazoknál a paramétereknél valamivel nagyobb az $\ln[P(\ln t)]$ és az $\ln[P(\ln s)]$ görbék meredeksége, vagyis a lavinák térben és időben is kisebbek az erősebb kötöttség esetén.

Azonban az igazi agyhálózatokban gátló mechanizmusok versengenek az ingerlőkkel. Ez a GP szempontjából azért is érdekes, mert emiatt a rendszer effektívgráf-dimenziója fragmentációs szétesés nélkül csökken. Ezt úgy modelleztem, hogy az élsúlyok bizonyos százalékát – a futások előtt – véletlenszerűen negatívra váltottam a konnektomban: $w'_{ij} = -w'_{ij}$. Ez spinüvegszerű extra heterogenitásokat és várhatóan erősebb RR effektusokat eredményez.

A 6. ábra mutatja a túlélési valószínűségeket, ha a linkek 30%-át gátlóvá tesszük $K = 0,1$ és $\lambda = 0,95$ paramétereknél. A kritikus pontot a lassú fejlődés és az oszcillációk miatt nehéz pontosan meghatározni, de $v = 0,57$ fölött a jelek perzisztens aktivitást mutatnak. Ez alatt és $v = 0,5$ felett a túlélési exponens folytonosan változik a $0 < \delta < 0,5$ tartományban. A lavinaméret-eloszlások hatványfüggvényfarkat mutatnak (7. ábra) $\tau \approx 1,5$ körüli exponenssel, ami közel van az agykutatás kísérleti értékeihez [1]. Ugyanakkor v -t mozgatva némi változást is láthatunk a GP-ben. Ez jobban látható az η -n, ami τ -hoz a (4) skálarelációval kötődik. 20% gátló él esetén ugyanezeket a τ -kat, míg 10%-os esetben $\tau \approx 1,3$ értékeket kapunk a kritikus pont környékén. Nagyobb küszöbértékeknél ($K = 0,2, 0,25$) a kritikus pont kisebb v -nél található, de a GP továbbra is jól látható.



7. ábra. Lavinaméret-eloszlás 30% gátló él és $K = 0,1$, $\nu = 0,95$, valamint $\lambda = 0,49, 0,5, 0,55$ esetén. Szaggatott vonal: hatványfüggvény-fittelés. Kis ábra: effektív η exponensek $\lambda = 0,49, 0,5, 0,51, 0,51, 0,55$ -ra (alulról felfelé) [17].

Konklúziók

A kritikussághoz való közelség optimális információfeldolgozást enged meg. A neurális változatosság hatékonyabbá teszi az agyműködést, ezért a heterogenitások hatását figyelembe kell venni a modellezésnél. A rendezetlenség GP-eket okozhat, de hogy ezt jól meg is tudjuk figyelni, nagy méretű konnektomokon kiterjedt szimulációk szükségesek, amelyek világossá teszik a végesméret-effektusoktól való eltéréseket. Az OCP projekt keretében elérhető körülbelül 10^6 csomópontos gráfok – HPC számítástechnikát alkalmazva – erre alkalmasak. A legegyszerűbb küszöbmodellek, azok túlságosan erős „hub”-jai miatt, annak ellenére nem mutatnak kritikus viselkedést ezeken a hálózatokon, hogy a vizsgált konnektomok nem skálamentesek és végtelen dimenziójúak. Viszont csomópontonként változó küszöbértékek esetén egyértelműen megjelennek a Griffiths-effektusok: lassú hatványfüggvény-dinamikák kiterjedt kontrollparaméter-térben, kritikus önszerveződés nélkül is [17]. Ez persze nem zárja ki, hogy a neurális hálózatok valamilyen önhangolást is

végezzenek. Mindenesetre dinamikus hatványfüggvényeket láthatunk a kritikus pont alatt, elkerülve ezzel a szuperkritikus, epileptikus állapotot is.

Az irányítottági anizotrópia és a gátló élek hatásai nem bizonyultak releváns perturbációnak GP szempontjából. Korábban több konnektom topologikus hasonlóságát is kimutattuk [13], így a *KKI-18*-on elért eredmények univerzalitását várjuk. Ezek a gráfok robusztusaknak bizonyultak 20%-nyi véletlen (és irányított) élcsonkításra, ezért a DTI [12] mérési hibák valószínűleg érdemben nem befolyásolják eredményeinket. Kvázisztatikus érvényű vizsgálataink kiterjesztése időfüggő rendezetlenség esetére folyamatban van. Ebben a modellben ugyancsak érdekes kérdések a refraktív csomópontállapotok, vagy a plaszticitás hatásának felkutatása.

Irodalom

1. J. Beggs, D. Plenz: Neuronal avalanches in neocortical circuits. *J. Neurosci.* 23 (2003) 11167.
2. P. Bak, C. Tang, K. Wiesenfeld, *Phys. Rev. A* 38 (1988) 364.
3. T. Vojta: Rare region effects at classical, quantum and nonequilibrium phase transitions. *J. Physics A: Math. and Gen.* 39 (2006) R143.
4. R. B. Griffiths: Nonanalytic behavior above the critical point in a random Ising ferromagnet. *Phys. Rev. Lett.* 23 (1969) 17.
5. G. Ódor: Slow, bursty dynamics as a consequence of quenched network topologies. *Phys. Rev. E* 89 (2014) 042102.
6. S. Johnson, J. J. Torres, J. Marro: Robust short-term memory without synaptic learning. *PLoS ONE* 8(1) (2013) e50276.
7. T. E. Harris: Contact interactions on a lattice. *Ann. Prob.* 2 (1974) 969–988.
8. M. A. Muñoz, R. Juhász, C. Castellano, G. Ódor: Griffiths phases on complex networks. *Phys. Rev. Lett.* 105 (2010) 128701.
9. G. Ódor, R. Dickman, G. Ódor: Griffiths phases and localization in hierarchical modular networks. *Sci. Rep.* 5 (2015) 14451.
10. W. Cota, S. C. Ferreira, G. Ódor: Griffiths effects of the susceptible-infected-susceptible epidemic model on random power-law networks. *Phys. Rev. E* 93 (2016) 032322.
11. <http://www.openconnectomeproject.org>
12. B. A. Landman et al, *NeuroImage* 54 (2011) 2854–2866.
13. M. T. Gastner, G. Ódor: The topology of large Open Connectome networks for the human brain. *Sci. Rep.* 6 (2016) 27249.
14. M. Kaiser, C. C. Hilgetag: Optimal hierarchical modular topologies for producing limited sustained activation of neural networks. *Front. in Neuroinf.* 4 (2010) 8.
15. I. A. Kovács, F. Iglói, *Phys. Rev. B* 83 (2011) 174207.
16. N. Friedman et al, *Phys. Rev. Lett.* 108 (2012) 208102.
17. G. Ódor: Critical dynamics on a large human Open Connectome network. *Phys. Rev. E* 94 (2016) 062411.

Az Eötvös Társulat fönt van a **facebook** -on!



<https://www.facebook.com/pages/Eötvös-Loránd-Fizikai-Társulat/434140519998696?fref=ts>