

4. Miért jó, ha a hálózat stabil?

A stabilitás olyan, mint az intellektus: felismerni könnyű, definiálni nehéz. Abban bízva, hogy a stabilitásról egy képzetet mindenki hordoz magában, gonosz merényletet tervezek az Olvasó ellen: a hálózatok stabilitásának alapeseteit csak az 5.3.-as fejezetben fogom összefoglalni. (Ha a most következő, 4-es fejezetben az Olvasó valaha is definíciószegénynek érezné magát, hadd bízassam arra, hogy lapozzon előre az 5.3.-as fejezetre, és olvassa el. A definíciókkal gazdagodva remélem, azért visszatér megint...) A soron következő, csaknem harminc oldalon arról fogok írni, hogyan próbálják megőrizni a stabilitásukat a hálózatok. A 4.1. és 4.2. fejezetekben a hálózatokat az egyensúlyukból kibillentő és visszarendező hatások küzdelmét mutatom be. A 4.3. és 4.4. fejezet azokat az eseteket fogja tárgyalni, amikor a hálózatot érő zavar akkora lesz, hogy megváltoztatja a hálózat szerkezetét. Az egymásbaágyazott al- és főhálózatok kölcsönös stabilitásáról fog szólni a szinkronizációt tárgyaló 4.5.-ös fejezet, és végezetül a 4.6.-os fejezetben összehasonlítom azt a két alapvető stratégiát, a mérnököt és a barkácsolót, amit a földi hálózatrendszer a stabil hálózatok kikísérletezésére eddig megalkotott.

Ha egy hálózat tulajdonságai eszeveszett sebességgel össze-vissza változnak, bizonyára azt mondjuk rá, hogy instabil. Mi a helyzet akkor, ha a hálózat csendes? Ha semmi nem változik? A stabilitás mértékének megítéléséhez ilyenkor egy kísérlet kell. Ki kell billentenünk a hálózatot az eddigi helyzetéből, és meg kell vizsgálnunk, hogy mennyire változik. A hálózatpróbáló kibillentést a fizikában perturbációnak hívják. Én – azon igyekezetemben, hogy minél több értelmes magyar szó legyen ebben a könyvben – (Kekec! Csukd be a szád. Tudom, hogy azt akartad mondani: magyarnak ez a rengeteg szó, amit írok talán magyar, de hogy értelmes-e...) a perturbációt a „hálózatzavar” szóval helyettesítettem. A hálózatok közül talán nincs is olyan, amelyik a külvilágtól teljesen elszigetelt. Így hálózatzavar (ami a külvilágból érkező bármilyen hatás) adódik lépten-nyomon. A következő fejezet ezeknek a zavaroknak a fajtáit próbálja meg összefoglalni.

4.1. Hálózatzavarok: a jó és a rossz zaj

A hálózatzavarok sorozatát igen gyakran zajnak is nevezzük. Mi a különbség? A zajt sokszor a megfigyelő szempontjából értelmezzük. Ha a hálózat viselkedését nyomon követjük, a zaj a vizsgált érték ingadozásaként jelentkezik. Ugyanakkor, ha a zajt a hálózat szempontjából akarjuk értelmezni, akkor zajnak azokat a hatásokat (hálózatzavarokat) tarthatjuk, amelyek a hálózat eredeti állapotát meg akarják változtatni. Hogy a helyzet még bonyolultabb legyen, a hálózatzavarok nemcsak zajként jelentkehetnek, hanem jelek is lehetnek. Ez az elkülönítés meglehetősen antropocentrikus. Ami „jó” és „cállal bíró”, az a jel, ami bajt kever és nem kívánatos, az a zaj. Ennél azonban van egy objektívebb mérce is, ami különbséget tehet jel és zaj között. Azok a hálózatzavarok, amelyeknek azonos formái elég gyakran érik a hálózatot és elég nagyok ahhoz, hogy megzavarják a hálózat működését, egy idő után a hálózat specifikus választ kényszerít ki. (Sok esetben az a hálózat, amelyik ilyen választ nem fejleszt ki: a versenyben lemarad és kihal.) A hálózat tanult, rögzült válasza fogja kiemelni a hálózatzavarok (a zaj) tengeréből azt a néhány hálózatzavart, amelyre a hálózatunk aránytalanul nagy, vagy aránytalanul széleskörű válasszal reagál. Ezek a hálózatzavarok méltán tarthatnak igényt a „jelek” megnevezésre, hiszen a hálózattal ők már „régóta ismeretségben” vannak, és egy, már unásig újrajátszott játszmat finomítgatnak újra meg újra vele.¹ „Világos. Ha egy csinos lány lép be az osztályterembe, az egy jel – legalábbis az én hálózatom számára. Ha azonban a földrajztanár lép be a terembe, akárhányszor teszi is ezt, az csak egy zaj.” Kekecke, először is: a suliban a tanulásra kellene koncentrálnod. Másodszor is: nagyobb megértést kellene kifejlesztened a földrajztanárod iránt. A későbbi fejezetekben be fogom mutatni, hogy ilyen kapcsolatok meglétén, vagy hiányán áll, vagy bukik a társadalom stabilitása. Mindenesetre a példád nagyon hasznos volt arra, hogy bemutassam: a jel meghatározása egyértelműen függ a jelt fogadó hálózattól. Ugyanaz a csinos lány, aki neked jel, az osztálytársnőid számára minden bizonnyal zaj csupán (minél csinosabb, valószínűleg annál nagyobb zaj...). A továbbiakban a hálózat-specifikus jelekkel nem fogok foglalkozni, mert ahhoz két könyv sem lenne elég, hanem maradok azoknál a hálózatzavaroknál, amelyek minden hálózatra egyformán hatnak, azaz zajnak tekinthetők.



Belső és külső zaj. A hálózat bármely része (modulja, motívuma, eleme) zajforrás lehet a hálózat többi része számára. Ezt a zajt belső zajnak hívjuk azért, hogy megkülönböztessük a külső zajtól, amely a hálózaton kívülről érkező hálózatzavarokat jelöli (Swain és mtsai, 2002). Az Internet-en és egy nyomtatott áramkörben a belső zaj a külső zajnak akár százszorosa is lehet. Ezek a hálózatok, úgy tűnik ebből a szempontból eléggé kis hatékonyságúak, úgy is mondhatnám, hogy önkínzó. Ugyanakkor sok más hálózat esetén a kétféle zaj mértéke közel azonos (Argollo de Menezes és Barabási, 2004).

A zajok sorozatait színesek. Csak hogy néhányat említsek, van fehér, rózsaszín és barna zaj. A fehér zaj a teljesen véletlenszerűen jelentkező hálózatzavarokat jelenti. A barna zaj eredeti, angol elnevezése a Brown-mozgásból származik. Ez a hálózatzavar a

¹Azok a hálózatzavarok is válhatnak jellé, amelyek a túlélés szempontjából igen hasznos (élelem, partner, stb.) illetve káros (halálos veszedelem) hatások közel létéről tudósítanak. Ilyen esetben a hálózat adaptív válasza még arra is képes, hogy az észlelhetetlenül kicsiny hálózatzavarokat is kiemelje a zaj tengeréből és abszolút aránytalan, óriási választ adjon rájuk.

diffúziós jelenségekben figyelhető meg nagyon tisztán, és az jellemzi, hogy a hálózatzavar helye meghatározott, de mértéke nem. A fentiekkel ellentétben a rózsaszín zaj esetén (amelyet flicker zajnak, crackling zajnak vagy egy speciális esetben – amelyet az alábbi kiegészítésben fogok részletesen ismertetni – $1/f$ zajnak is hívnak) a zaj részeként éppen megérkező hálózatzavar nem lehet akármilyen. A hálózatzavarok összességének (a zajnak) ugyanis meghatározott eloszlás szerint kell alakulnia, azaz a jelenleg éppen befutó hálózatzavar nem független az előtte megérkezett hálózatzavaroktól. A rózsaszín zaj esetén annak a valószínűsége, hogy a hálózatzavar egy nagyságrenddel nagyobb legyen, éppen egy nagyságrenddel kisebb. (Ugye ismerős? Ez is éppen olyan skálafüggetlen, mint Daniel Bernoulli -1738- ezüstrubelesei a 3.2. fejezetben). Aki a zajok részletesebb (de sajnos a terjedelmi korlátok miatt még mindig meglehetősen elnagyolt) leírására kíváncsi, olvassa végig az alábbi kiegészítést.

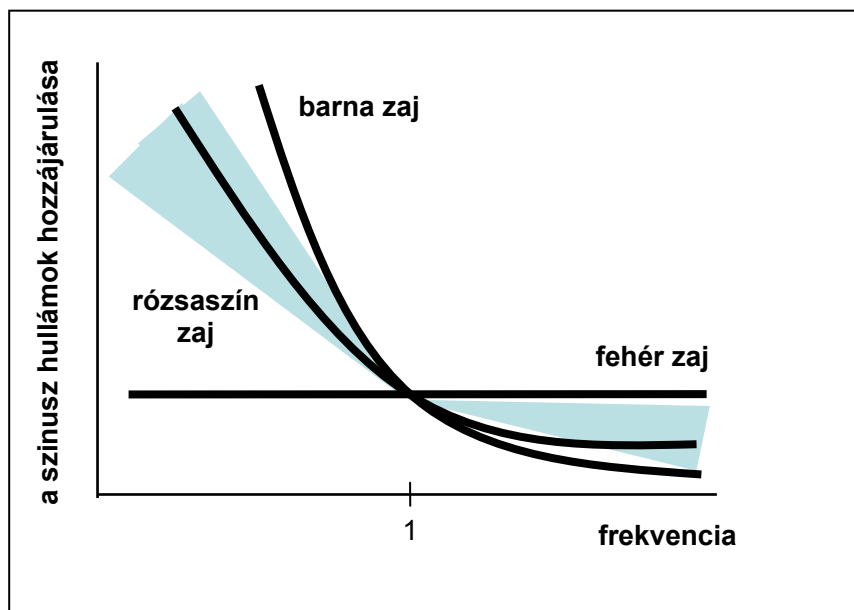


Zajtan dióhéjban. Mi a különbség a fehér, a rózsaszín és a barna zajok között?

Ahogy a fentiekben már utaltam rá, a skálafüggetlenség itt ismét beköszön. Ahhoz, hogy megértsük, hogy a skálafüggetlenség a zajok esetén pontosan hogy is értelmezhető, ismét némi matematika következik. A zajt ugyanis általában egy matematikai trükk bevezetésével szokták jellemezni: a mért érték változásait szinusz függvényekkel jellemezhető hullámok összegeként adják meg. A végső (mért) függvényalakhoz hozzájáruló sok-sok hullám a frekvenciájával jellemezhető. Az egyes zajok esetén a hullámok hozzájárulásának mértékét (amelyet spektrumsűrűségnek is szokás hívni) a frekvencia függvényében az 5. ábrán mutatom be. Miért kell ennek ennyire bonyolultnak lennie? A válasz egy része abban rejlik, hogy a zajok jellemzésének e módja a hagyományokon alapul. A zajokat ugyanis először az erősítők esetén tanulmányozták részletesen, ahol egy ilyen ábrázolás igen kézenfekvő (Johnson, 1925). Később viszont ez a meglehetősen bonyolultnak tűnő ábrázolás igen hasznosnak bizonyult a színekkel is jellemzett zajfajták elkülönítése során.

- A zaj spektrumsűrűsége (azaz az egyes szinusz hullámok hozzájárulásának a mértéke a végső függvényértékhez) éppen olyan skálafüggetlen tulajdonságokat mutat, mint ahogy azt az előző fejezetben már a hálózatok felépülése esetén megfigyelhettük. A spektrumsűrűség a $V = kT^{-\alpha}$ egyenlettel írható le, amelyik pontosan ugyanaz, mint amit a 3.2. fejezetben már láthattunk. Ebben az esetben V a zaj spektrumsűrűsége, k változatlanul egy állandó, T a frekvencia és α ugyanúgy a hatványkitevő, mint korábban. α értékei nulla és (általában) kettő között változhatnak. Ha $\alpha = 0$, fehér zajról beszélünk, ha $\alpha = 2$ barna zajunk van, ha α értéke e kettő közé esik, akkor a zaj rózsaszín. (Néha előfordul, hogy α értéke kettőnél nagyobb: ezeket a zajokat fekete zajoknak hívjuk).
- A fehér zajban ($\alpha = 0$) minden szinusz hullám egyforma arányban vesz részt. Ez azt is jelenti, hogy a fehér zaj különböző értékei egymással az időben semmilyen módon nem korrelálnak, azaz a fehér zajnak nincs emlékezete. A fehér zajban minden időtartam (rövid és hosszú) egyformán részt vesz a végső érték kialakításában, így a fehér zajhoz a rózsaszínnel vagy a barnával összehasonlítva a rövid idejű (nagy frekvenciájú) szinusz hullámok nagyobb mértékben járulnak hozzá.
- A barna zajt ($\alpha = 2$) Brown-féle zajnak is szokás hívni, mivel a diffúzióra emlékeztet annyiban, hogy az egymás után következő értékeinek nagysága nincs semmilyen összefüggésben egymással. Ugyanakkor a barna zaj „jobb” mint a fehér zaj, hiszen a barna zaj esetén az adott zaj érték „emlékszik” a közvetlenül megelőző zajérték helyzetére. Mint a diffúzió: honnan indul: meghatározott. Merre és meddig megy: véletlenszerű. A többi zajjal összehasonlítva a barna zajban a hosszú idejű (kis frekvenciájú) szinusz hullámok (összetevők) nagyobb szerepet játszanak.
- A barna és a fehér zaj kapcsolatban áll egymással. A Brown mozgás egy fehér zajjal rendelkező folyamat integráljának is felfogható. Azaz: ha egy részecske diffundál (Brown mozgást végez), a pontos helye barna zaj szerint, a sebessége viszont fehér zaj szerint változik. Ez összhangban van azzal a fenti megjegyzéssel, hogy barna zaj esetén a

megszabott kiindulópontból a részecske bármilyen irányba és bármilyen gyorsasággal mozoghat tovább.



5. ábra A zajspektrum. A különbözőfajta zajok (az ábrán fehér, barna és rózsaszín) szinusz hullámok összegeként is leírhatók. Az illusztrációként szolgáló vázlatos ábrán a különböző frekvenciájú szinusz hullámok relatív hozzájárulása látható az egyes zajtípusokhoz. A rózsaszín zaj esetén a beárnyékolt rész azt jelképezi, hogy a fehér és barna zajjal ellentétben a rózsaszín zaj nem egy kitüntetett zaj-eloszlást, hanem egy egész eloszlástartományt jelöl.

- A rózsaszín zaj (ahol α nulla és kettő között bármilyen érték lehet) a legizgalmasabb mindenfajta zaj közül, és így nem véletlen, hogy az idők folyamán rengeteg elnevezést kapott. A rózsaszín mellett hívják még színes zajnak, villogó zajnak, recsegő zajnak, Barkhausen-zajnak, $1/\tau$ vagy $1/f$ zajnak (az utóbbi kettő arra a különleges esetre utal, amikor α éppen 1, azaz a spektrumsűrűség éppen fordítottan arányos a frekvenciával). A rózsaszín zaj esetén az alacsony frekvenciájú szinusz hullámok hozzájárulása az átlagnál magasabb. Ez azt jelenti, hogy a ritkább események nagyobb mértékben járulnak hozzá a végső értékhez, mint a gyakoribb események. Ez az oka annak, hogy ezt a zajt rózsaszínnek hívjuk: itt a zajspektrum az alacsony frekvenciákból többet tartalmaz, azaz a fény analógiájára a vörös irányába tolódott el. A rózsaszín zaj skálafüggetlen, azaz ilyen zaj esetén bármilyen gyakorisággal bekövetkező esemény egyformán befolyásolja a végső értéket. Mindig van egy nullától különböző esélyünk egy nagyságrenddel nagyobb eltérésre, de ennek a valószínűsége éppen egy nagyságrenddel kisebb (Bernoulli -1738- ismét). Másként megfogalmazva ugyanezt: a rózsaszín zaj minden időskálán emlékszik a múlt eseményeire (Halley, 1996; Milotti, 2002; Sethna és mtsai, 2001).

Zaj szempontjából szinte az egész világ rózsaszín... Rózsaszín zajt találunk a kvazárok emissziójától és a napkitörésektől, a fehérjék betekeredésén, a közlekedésen és az elektromos készülékeken át az emberi megismerésig, a csoportos döntésekig és a gazdasági folyamatokig mindenütt. A széles elterjedés azt tükrözi, hogy a rózsaszín zaj a komplex viselkedés egyik jele (Gilden és mtsai, 1995; Gisiger, 2001; Halley, 1996; Lu és Hamilton, 1991; Milotti, 2002; Sethna és mtsai, 2001). Rózsaszín zajjal a mindennapi életünkben is találkozhatunk: az a zaj, amelyet egy papírlap összegyűrésekor hallhatunk, ugyancsak rózsaszín zaj. A rózsaszín zajnak még ennél is sokkal érdekesebb

(helyenként egyenesen megdöbbenő) példáit fogom felsorolni a következő fejezetben, amikor bemutatom, hogy a skálafüggetlenség és a rózsaszín zaj hogyan függ össze az önszerveződő kritikus állapottal (Bak, 1996; Bak és mtsai, 1987).² A rózsaszín zaj méltatásának befejezéseként hadd jegyezzem meg, hogy a 3.2. fejezetben felsorolt skálafüggetlen példák közül jó néhány, így a zene szinte minden válfaja is rózsaszín zajnak tekinthető. (Kekec, azért hadd tanácsoljam, hogy friss ismereteid birtokában se jegyezd meg egy Mozart koncerten, hogy „Milyen szép ez a rózsaszín zaj!”, mert a partnered még azt fogja hinni, hogy megkínáltak egy gyanús cigivel az előadás előtt.)

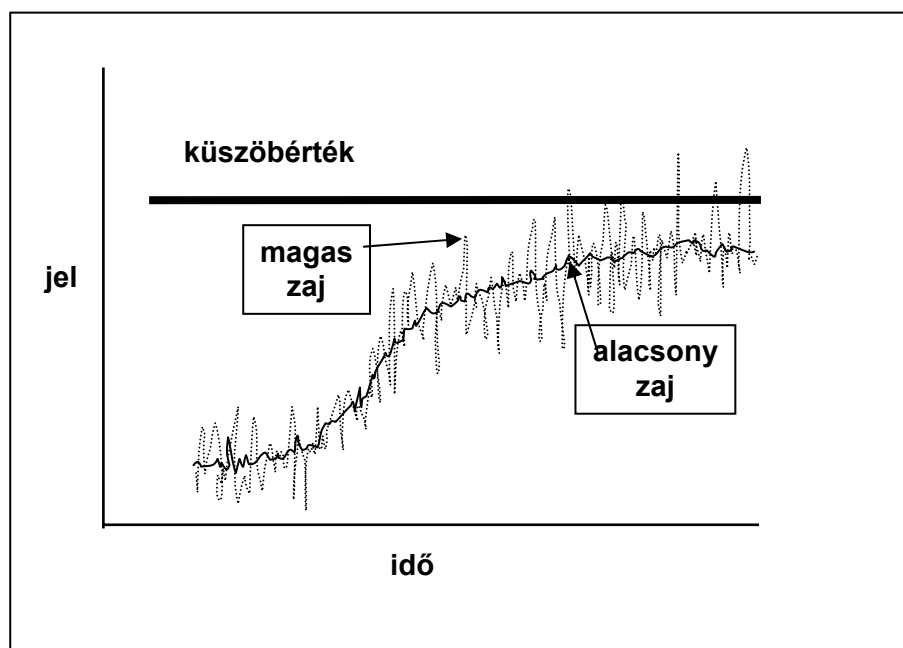
A zajt a hálózatok általában nem szeretik, a zaj rossz. Pontosítok. A zajt a hálózatok akkor nem szeretik, ha a magas és állandó zajszint megzavarja működésüket. A pontosítás azért fontos, nehogy valaki elkezdjen kiiktatni minden zajt az életéből. A legtöbb hálózat ugyanis teljesen zajmentes környezetben meghal. Zaj híján a hálózat nem hat kölcsön a környezetével. A zárt hálózatok többsége fejlődésképtelen, egy idő után szétesik, azaz meghal. A zaj azonban nemcsak a fontos környezeti hatások kényelmetlen velejárója, hanem számos olyan formája is van, ami kifejezetten hasznos lehet. Talán az egyik első, tudományosan is dokumentált hasznos zaj az volt, amikor Reynolds (1900) leírta a tengerészeknek azt a régi megfigyelését, hogy az eső szabálytalanul hulló cseppjei lecsendesítik a tenger hullámain. A hasznos zaj másik esete a véleményformálásban érhető tetten. Érdekes módon az alacsony zaj segíti a közös vélemény kialakulását, míg a nagyobb zaj a formálódó közvéleményt igen gyorsan szétzilálhatja (Kuperman és Zanette, 2001).

A jó zaj különlegesen hasznos esete a jel/zaj-rezonancia esete (stochastic resonance; Benzi és mtsai, 1981; Paulsson és mtsai, 2000). Itt a zaj lehetővé teszi az amúgy észrevehetetlenül kicsiny jelek észlelését (6. ábra). A jelenségnek az a magyarázata, hogy a jelnek (emlékszünk ugye? az ismerős hálózatzavarnak) nagyobbak kell lennie egy meghatározott küszöbértéknél, hogy a hálózat „észrevegye”, azaz a szokott választ adja rá. A legtöbb hálózat „lépcsős” válaszra szakosodott, azaz ha a jel eléri a küszöbértéket, akkor van válasz (és ez a válasz gyakorta szinte maximális), ha meg a jel nem éri el a küszöbértéket, akkor nincs semmilyen válasz. Ha a jel kevéssel a küszöbérték alatt marad, a ráakódó zaj néha-néha épphogy a küszöbérték fölé emelheti. Ha a rendszer úgy van beállítva, hogy rövid idejű küszöbfeletti értékeket is elfogad, akkor az érzékelhetetlenül csekély jel érzékelhetővé válik. A rózsaszín zaj (hogy kedvencemhez megint visszatérjek) itt is sokkal hasznosabb, mint a fehér, ugyanis a ritka (pl. nagy amplitúdójú és így a jelerősítés szempontjából különösen hasznos) események a rózsaszín zajban gyakrabban fordulnak elő (Soma és mtsai, 2003).

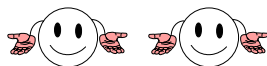
A jel/zaj-rezonancia jelenségét hívták segítségül a jégkorszakok periodicitásának megmagyarázásához (a Föld keringésének kis excentricitásai voltak itt azok az apró jelek, amelyeket a véletlenszerű klimatikus változások annyira fel tudtak erősíteni, hogy az éghajlat-eltolódás bekövetkezett). Ugyancsak ez a jelenség magyarázza a halak, tücskök, patkányok tapintásérzékelő receptorainak hihetetlen érzékenységét... „*Péter, biztos vagy te abban, hogy nem kővettél itt el valami óriási fordítási hibát? Láttál te már halakat, ahogy egymást tapogatják?*” Kekecke, köszönöm a figyelmeztetést. Sajnos a magyar

²Hadd jegyezzem meg előljáróban, hogy az előzőekben említett papírgyűrűs is az önszerveződő kritikus állapotok egyik esetének tekinthető.

nyelvnek nincs jobb közérthető szava a mechano-receptorra, ami jobban tükrözi, hogy a halakat a vízáramlásnak és nem egy másik halnak a tapogatása érdekli. Az viszont nagyon. Neked sem lenne mindegy, hogy a suhanó cápát milyen távolságból észleled. Visszatérve a jel/zaj-rezonanciára: a jelenség az ioncsatornák működésében is megfigyelhető. E nélkül nem hallanánk (Bezrukov és Vodyanov, 1995; Paulsson és mtsai, 2000; Wiesenfeld és Jaramillo, 1998) és minden bizonnyal nem szagolnánk és nem is látnánk annyira jól, mint ahogy tudunk. A halak több ételt találnak (Russell és mtsai, 1999), a csontok jobban nőnek (Tanaka és mtsai, 2003) és még a visszaemlékezés képessége is javul (Usher és Feingold, 2000) megfelelő zaj jelenlétében. A kezdeti kijelentést megfordíthatjuk tehát: a zaj az élet örömeinek forrása, a zaj nagyon fontos a hálózatok számára, a zaj jó.



6. ábra. **A jó zajok legfontosabbika: a jel/zaj-rezonancia.** Jel/zaj-rezonancia akkor alakul ki, ha egy ingerküszöb alatti jelet a zaj véletlenszerű ingadozásai löknek (néha) a küszöbérték fölé. A nagyon sematikus ábrán bemutatott esetben a hálózat a „magas zaj” segítségével észreveheti az amúgy észrevehetetlenül kicsiny jelet is.



Tanulni szeretne? Hallgasson Mozartot Schönberg

helyett... A jó zajra hozott fenti példák egyik esete, az emlékező képességünk javulása (Usher és Feingold, 2000) egy külön eszmefuttatást is megérdemel. Ez lehet a magyarázata annak, hogy miért tudunk zene mellett jobban tanulni. Kombináljunk egy kicsit. Ha a rózsaszín zaj kitüntetetten jó abban, hogy jel/zaj-rezonanciát hozzon létre (Soma és mtsai, 2003), akkor az olyan zene, amelynek rózsaszín zaj-szerű skálafüggetlen szerkezete van (Mozart, Beatles és összes társuk; Hsu és Hsu, 1991; Voss és Clarke, 1975) sokkal jobban segítheti a tanulást, mint pl. Schönberg zenéje, amely ilyen szerkezettel nem rendelkezik. Mi lehet ennek az oka? A válasza még várni kell, mert tárgyalására csak a 4.5. fejezetben kerül sor. Hangosabb zene jobban segít? Szinte biztos, hogy nem. Ha a zajt egy bizonyos határon túl növelem, attól a jelet (a tanulást) nem erősítem tovább, ezzel szemben a rendeződéshez vezető folyamatokat lerontom (ld. a véleményformálás előbb említett esetét; Kuperman és Zanette, 2001). Érdekes, hogy ha a

kognitív feladat nehézségi foka nő, akkor a zaj éppen, hogy nem segít, hanem árt (Usher és Feingold, 2000). Ez magyarázatot ad arra a sok évvel ezelőtti, megdöbbentő tapasztalatomra, hogy a minden kémiai tárgynál kiválóan bevált háttér-Bach miért vált számomra katasztrofálissá, amikor matematikából a Hilbert-terekre került a sor.

Az optimális zaj nemcsak a jel/zaj-rezonanciát segíti, hanem a hálózatok diverzitását is növeli. Ha több olyan egyforma hálózatunk van, amelyek mind jel/zaj-rezonanciát mutatnak, akkor a zaj véletlenszerűsége miatt az egyes hálózatok máskor és máskor érik el a küszöbértéket. Így a küszöbinger alatti jel esetén a hálózatok viselkedésváltása máskor és máskor fog megtörténni. A zaj ezzel és más mechanizmusokkal erősítheti a kiválasztódást, növelheti a rendszerek rátermettségét (fitness-ét), és elősegítheti a robusztus rendszerek evolúcióját is (Krakauer és Sasaki, 2002).

Összefoglalóan: az optimális zaj a megnöveli hálózatok stabilitását, rátermettségét és túlélésének esélyeit. Ahhoz, hogy egy hálózat optimális zajszintet érjen el, zajszabályozó rendszereket kell kifejlesztenie. A hálózatok nagyon ötletes megoldásokat alkalmaznak erre a célra. A hálózat néhány elemének gyakorta előforduló elrendeződéseit motívumoknak szokás hívni (Milo és mtsai, 2002). Számos motívum kiválóan alkalmas a zaj lecsökkentésére. Becskei és Serrano 2000-ben egy igen elegáns példán mutatták meg, hogy egy negatív visszacsatolással egy génátíródást szabályozó rendszer zaja hatékonyan csökkenthető. A hálózati modulok is védenek a túlzott zaj ellen, hiszen a hálózat többi részével általában csak gyenge kapcsolatok tartják össze őket, amelyek átmenetileg megszűnnek, ha igen erős zaj (hálózatzavar) érkezik. A gyenge kapcsolatok ezen, olvadó-biztosíték jellegű szerepére a 4.3.-as fejezetben még visszatérek. A következő három fejezetben azt foglalom össze, hogy mi minden történhet egy hálózattal, ha a zavar megérkezik.

4.2. Zavarpasszírozás: relaxáció az élet

Ha a hálózat eredeti állapotát megzavarjuk, a hálózat szétesztja a zavart. A változás megoszlik a hálózat több elemén: relaxáció következik be. Ahhoz hogy a hálózatzavar a hálózat elemein széteszjon, a zavarnak hálózat kölcsönhatásai mentén terjednie kell. Itt két alapesetet különböztethetünk meg: az elsőben a zavar akadálytalanul terjed tovább, a másodikban a zavar a hálózat egy vagy több pontján feltorlódik, megakad. Mi az esélye annak, hogy a zavar akadálytalanul körbejárja a hálózatot? Ahhoz hogy a választ megkapjuk, először a játékteret fogom leírni: melyek azok a lehetséges utak, amelyek mentén a zavar egyáltalán terjedni képes. Ez után fogok rátérni a fenti két alapeset ismertetésére. Végezetül pedig, elemezni fogom azt az esetet, amikor a zavar az első támadáspontján, vagy a hálózat más elemein megakad. (A 4.3. és 4.4. fejezetek is ezen utóbbi lehetőséget fogják tovább vizsgálni annak mentén, hogy mi minden történhet a hálózattal, ha a zajtorlódás egyre katasztrofálisabb.)

Első Felvonás: Zavar úr megérkezik. Zavar úr kopogtat a hálózat ajtaján, és a hálózat (aki ebben a pillanatban még nincs zavarban...) egy utazásra invitálja. Ahhoz, hogy Zavar úr körbe tudjon nézni, először is térképre van szüksége. A hálózatok egyik legfontosabb tulajdonsága a törzsháló (az angolszász irodalomban: giant component) jelenléte. A törzsháló a hálózat szinte minden elemét tartalmazza, és benne az összes elem bármely más elemtől kiindulva elérhető. A törzshálózat teszi a hálózatot hálózattá.

Ha a törzshálózat felbomlik, az eredeti hálózat kis, egymással össze nem kapcsolt csoportokká esik szét, amelyek egymással kommunikálni képtelenek. Ha a hálózat életjelenségeket mutatott (azaz egy sejt, állat, növény, vagy ember volt) a törzshálózat megszűnése egyben a halál beálltát is jelenti. Ha a törzshálózat meghal, szétesnek a komplex életfunkciók, és az egész komplex rendszer meghal a törzshálózattal együtt. Kész. Vége. *“Péter, én itt megint nem értek valamit. Mi az, hogy 'Meghalnak. Kész. Vége.'? Nem hagyhatod így a kedvenc hálózataidat! Hogy hal meg? Miért? Mit lehet ez ellen tenni? Én is egy hálózat vagyok! Tudni akarom, hogy miként élhetem túl a zavart!”* Kecec, ez nem semmi... Egész belelkesedtél! Valami örökbecsű mondást hadd idézzek ide: „...tulajdonképpen hálásnak kellene lennem, hogy számomra már régóta nyilvánvaló elmebajodat ilyen szemléletesen megjelenítetted...” Nem tudod, ki mondta ezt és kiről? Kérdésedre visszatérve: ne aggódj, a következő két fejezet számos ötletet fog neked adni, hogyan véd meg magad Zavar úr látogatása során. Most hagyjuk a halált, és vizsgáljuk meg a törzsháló életének másik végét. Hogyan születik a törzsháló? A kicsi törzshálóca családjában a vajúrást nem ismerik. A törzsháló egyszer csak lesz. Kipotyog. Ha a kapcsolatok száma egy hálózatban folyamatosan nő, akkor egy idő után elérünk egy „perkolációs küszöböt”, ami után a törzsháló hirtelen megszületik. Tulajdonképpen minden hálózat, amelyik megérdemli a hálózat nevet, rendelkezik egy törzshálóval. Így elvben a „tisztességes hálózatokban” minden lehetőség adott Zavar Úr számára, hogy megkezdje a körutazását: vannak ugyanis utak. Itt jön a második kérdés: ha Zavar úr elindul, vajon meddig jut el?

Második Felvonás: Zavar úr körbehajtatna. Zavar úr (a törzsháló térképével hadonászva) egyre ingerültebben érdeklődik a hálózat bejárásának lehetőségei felől. Ahhoz, hogy felmérhessük Zavar úr sétakocsikázásának lehetőségeit, érdemes más vizsgált példákhoz fordulnunk, és a hírek, a fertőzések, az információk, vagy éppen Empátia (akit az osztály csak Empinek hív) szerelmes levelei terjedését megvizsgálunk mondjuk a történelemóra alatt (*„Atyavilág. Ez hátborzongató! Honnan tud ez erről? Olvassa a gondolataimat?”*). Ahhoz hogy Zavar úr dühe elpárologjon, elég gyorsan el kell jutnia a hálózat távoli pontjaiba is. Ehhez hosszú távú kapcsolatok kellene a hálózaton belül. Tömörebben: kisvilágság kell. A rácsoktól Zavar úr nagyon ideges szokott lenni. Példaként a gyémánt egy szép példája a rácsnak. Meglehetősen stabil példája. Látszólag. Ugyanis ha Zavar úr tényleg begurul, a gyémántrács akkor sem engedi őt körbejárni, hanem ehelyett: inkább hasad. Zavar úr győzött és a gyémánt halott.

A skálafüggetlenség is újra itt van. Ha a hálózat skálafüggetlen, Zavar úr még akkor is könnyen körbe tudja járni, ha a körbejutás minden egyes lépése rendkívül nehéz (May és Lloyd, 2001). Ugyanakkor a véges hálózatokban egy perkolációs küszöb található (Dorogovtsev és Mendes, 2002), ami azt jelenti, hogy Zavar úr továbbengedésének egy minimális értéke alatt Zavar úr az útjának egyik vagy másik pontján törvényszerűen megreked. A fentiekkel egyezően annak a valószínűsége, hogy Zavar úr kocsija végleg elakadjon, a duplán (fokszám- és kapcsolaterősség-szerinti eloszlásában egyaránt) skálafüggetlen hálózatokban sokkal kisebb, mint a random hálózatokban (Toroczkai és Bassler, 2004). Más szavakkal, a skálafüggetlen hálózatok gyors relaxációra képesek. Megint más szóval: a skálafüggetlen hálózatok stabilak. Ez megmagyarázza azokat a korábbi feltételezéseket és észleleteket, amelyek szerint a skálafüggetlen topológia igen fontos eleme a hálózatok stabilitásának (Fox és Hill, 2001; Barabási, 2003).

A gyors relaxáció (zavarterjedés) egy igen fontos eleme annak, hogy hogyan vezet az önszerveződő rendszerek egyre növekvő komplexitása a stabilitásuk növekedéséhez. A 7. fejezetben fogok erre mutatni egy igen szép példát, amikor azt írom le, hogy a komplex génhálózatok „önmaguktól” képesek stabilitásukat kifejleszteni és megőrizni (de Visser és mtsai, 2003). Ha a skálafüggetlenség az önszerveződés eredményeként létrejön (amire a 3.2. fejezet tanulsága szerint igen gyakran van példa), ez “automatikusan” a hálózat stabilizációjához vezet.

OK, a kisvilágság és a skálafüggetlenség mind-mind segítik Zavar úr utazási vágyának kielégítését. Mi van, ha Zavar úr mégis megreked? Első körben még sokkalta dühösebb lesz, mint amilyen eddig volt. A fizikában erre azt mondják: feszültség keletkezik. *„Eddig nem úgy tudtam, hogy a szüleim fizikusok, de nálunk otthon ezt ugyanígy mondják...”* Juszt sem hozol zavarba Keckecke: folytatom. A feszültség egy addig nem látott szintet ér el, ha a hálózat-zavar folyamatos. (Képzeljük el, ha Zavar úr után sorban a neje, fél tucat Zavar-gyerek, a nagy és a népes család más tagjai sorra kopogtatnak a hálózat ajtaján... Rádadásul mind-mind külön akar utazni a többitől...) Ahogy a Zavar-család minden egyes tagja a hálózatban elakad, a feszültség érthetően nőni kezd. A humanizált példát folytatva ebből egy ideig még nem lesz komoly botrány, mert mint említettem, a Zavar-család tagjai egyedül utaztak, így nem nyilvánvaló, hogy a hálózatban összetalálkoznak valaha. Sajnos azonban minden hálózatnak vannak gyenge pontjai. Így van esélye annak, hogy a Zavar-család egyre több tagja a hálózat azonos helyén (régijében) torlódjon fel. Ha ez megtörténik, igen hamar elérkezik az a pillanat, amikor a kicsiny és nagyobb Zavarok egymást hergelve az asztalra csapnak. Ilyenkor egy hirtelen relaxáció következik be, amely igen gyakran lavinaszerűen terjedő jelenségekhez vezet. (A Zavar-család tagjai laskává aprítják a kocsma teljes bútorzatát, majd a beragadt kocsikat a deszkákkal megtámogatva szélrózsa minden irányába eliramodnak a színről.) Ezt a jelenséget Per Bak az önszerveződő kritikus állapot jelenségének nevezte el (Bak és mtsai, 1987; Bak és Paczuski, 1995; Bak, 1996). *“Ez a Per Bak ugye egy pszichológus volt, aki a hiperaktív családokról írta a könyveit?”* Keckecke!!! Kezdesz az agyamra menni. Hol jár az eszed? Figyelj tovább! Ha a kritikus állapot, a hirtelen relaxáció beáll, a hálózat-zavarok a hálózat nagyobb részébe végre szabadon juthatnak el, és egy rövid időre a hálózat közel egésze újra kapcsolatba kerül egymással. Hálórégés történik. Ez a hálórégés skálafüggetlen statisztikát mutat mind térben (kiterjedésében) mind időben (előfordulásának valószínűségében; Bak és mtsai, 1987; Bak és Paczuski, 1995; Bak, 1996). A hálórégés skálafüggetlen megnyilvánulási formáira számos példát fogok hozni a következő bekezdésekben.



A hálórégések a fluktuáció-disszipáció tétel áthágásai. A fluktuáció-disszipáció tétele a statisztikus fizika fontos összefüggése. A tétel azt mondja ki, hogy egy fluktuáció (Zavar úr vagy családtagjai egyike) a rendszerben széteszlik (disszipálódik), ahogy a rendszer az egyensúlyba visszatér. E tétel egyik jól ismert példája a Stokes-Einstein összefüggés a diffúzió és a viszkozitás között. (Itt a Brown-mozgás alakítja Zavar úr szerepét, amelyet a viszkozitás formájában megjelenő ellenállás disszipál.) Heterogén vagy lassan relaxáló, üvegszerű anyagok nem biztos, hogy akár hosszú távon is felveszik az egyensúlyi helyzetet, és így nem tartoznak a fluktuáció-disszipáció tétel hatálya alá. Az ilyen rendszerekben a relaxáció úgy valósul meg, hogy Zavar urat a rendszer leggyorsabban relaxáló részébe (a leggyengébb

láncszemhez...) irányítják (Grigera és Israeloff, 1999). A fluktuáció-disszipáció tétel áthágásának mértéke skálafüggetlen statisztikát mutat (Bonn és Kegel, 2003), amely összefüggésben áll a hálóröngések skálafüggetlen sajátosságaival, hiszen a legtöbbször e rendszerek is hálóröngéseket produkálnak. A fluktuációs-disszipáció tételtől való eltérés mértéke a metastabilitás egyik fontos mércéje lehet (Bonn és Kegel, 2003) és talán összefüggésben áll a rendszer komplexitásával is (a komplexitás definíciójára az 5.4. fejezetben térek vissza).

A hálóröngéseknek rendkívül sok formája ismeretes. A földröngések, a fölcuszamlások, az erdőtüzek, az anyagtörések, a vulkánkitörések, a lavinák, a fehérjeröngések, a mágnesesség terjedése (a Barkhauser-hatás), a kvazárkitörések, a napkitörések, a csapok csöpögése, az eső és még sok-sok más példa, amelyeket az előző fejezetben említettem (mint pl. az a szaggatott hang, amit egy papírdarab összegyűrése során hallhatunk) a késleltetett/gátolt relaxációjú jelenségekhez tartozik, és mutatja az önszerveződő kritikus állapot minden ismérvét (Alessandro és mtsai, 1990; Bak, 1996; Bazant, 2004; Cote és Meisel, 1991; Gilden és mtsai, 1995; Gisiger, 2001; Halley, 1996; Lu és Hamilton, 1991; Malamud és mtsai, 1998; Milotti, 2002; Penna és mtsai, 1995; Sethna és mtsai, 2001; Turcotte, 1999).



Pánikröngés. Az önszerveződő kritikus állapot megismerésének egyik friss és igen érdekes eredménye Magyarországról (Helbing és mtsai, 2000) és a Fülöp-szigetéről (Saloma és mtsai, 2003) származik. Nem kívánom egyikünknek sem, hogy ezt élőben megtapasztalja, de biztos, hogy akármelyikünk egy birkanyáj egyik tagjává változna egy pillanat alatt, ha egy igazi katasztrófa kellős közepén találna magát (a birkaszellemet a tudományban „allelomimetikus tendenciának” szokás hívni). Régebb óta ismert, hogy a legfontosabb döntéseinket az érzelmeinkre hallgatva hozzuk meg (Damasio, 1994; Rolls, 1999). Az érzelmeiket igazgató ősi agyterület minden bizonnyal teljesen átveszi az uralmat akkor, ha pánik vesz erőt rajtunk. Nem vesszük észre az alternatív vészkijáratot, a továbbhaladást gátló íveket formálunk a maradék kijárat előtt, és ezzel kiválóan elzárjuk az immár egyedüli menekülési utat, majd legázoljuk egymást, hogy a magunk-alkotta akadályon valahogy mégiscsak keresztüljussunk. Vicsok Tamással és munkatársaival (Helbing és mtsai, 2000) ellentétben Saloma és mtsai (2003) egereket vizsgáltak, nem embereket. A fentiek alapján ebben az esetben ez nem is volt akkora különbség... Azért egy különbség bizonyosan akadt. Néhányunkkal ellentétben az egerek utálnak úszni. A Fülöp-szigeteken az derült ki, hogy az egerek a számukra kárpadrént funkcionáló uszodát skálafüggetlen csoportokban hagyták el. *“Péter, a pánikódat látom, de hol van itt a rengés?”* Az egérpánik pontosan úgy viselkedik, mint egy kvazár. (Na, ez a válasz felért egy balegyenessel ugye?!) A feszültség mindkettőben folyamatosan növekedik, mivel egyik rendszer sem képes az akadálymentes relaxációra. Ezek az egerek tényleg pontosan ugyanolyanok, mint mi vagyunk. A rettegő egérszemek minden bizonnyal az egérvénsegeket figyelik... Ugrik? Nem ugrik? Aztán... hirtelen egy szuperegér a halálmegvető kiugrásra szánja el magát. (Olyan ez, mint a viccbeli kisindián, meg a nagy: Uff! Nem ufom!) A szuperegér után aztán egy egérsz corda ugrik. Azonnali relaxáció. Kicsit nedves ugyan, de tökéletes pánikröngés.



Villámröngés. Egy sor más hálózatra igaz lehet az, hogy a relaxációja akadályozott, emiatt benne a feszültség folyamatosan nő és lavinaszerűen csillapodik. Az egyik ilyen a villámlás és a dörgés. Itt a különböző hőmérsékletű, rosszul keveredő légtömegek közötti ismétlődő érintkezések sztatikus elektromosságot csiholnak, nő a feszültség... a végét meg tudjuk (Nabukodonozor tudna erről mesélni...). Érdekes lenne megvizsgálni a villámlások egymásutániságának és mértékének eloszlásait. Van egy tippem... *“Ha most fogadást akársz velem kötni arra, hogy kicsoda, előre mondom: veszíteni fogsz!”* Fogadás itt már nem lenne fair. Annál is kevésbé, mert a nagyon alacsony elektromágneses sugárzás 1/t zaja tulajdonképpen a

villámláskor bekövetkező kisülésekből fakad (Magnasco, 2000), azaz a skálafüggetlen eloszlás szinte bizonyítottan tekinthető.

A vulkánkitörések, a földcsuszamlások, a pánikrengés hála Istennek nem részei a mindennapi tapasztalatainknak. A fehérjerengések túl kicsik, a naprengések túl távoliak hogy könnyedén észleljük őket. (Ahogy a csillagászok szokták mondani, az utóbbit csak kétszer lehet szabad szemmel megfigyelni: egyszer a jobb szemmel, aztán még egyszer a maradék ballal...) Mindazonáltal van egy olyan rengés az életünkben, amit minden percben átélünk, néha többször is. Ez a tüdőrengés. Magyarul lélegzetvételnek szokás nevezni... Ha beszívjuk a levegőt, a tüdők kis hólyagocskáik pontosan olyan skálafüggetlen lavinákat képezve nyílnak ki a beáramló levegő előtt, ahogy az összes eddigi példa is mutatta (Barabási és mtsai, 1996; Suki és mtsai, 1994).³ Néhány, a lélegzetvételhez hasonlóan élet-közeli hálórengést az alábbiakban sorolok fel.



Tikrengés. Az önszerveződő kritikus állapot még annál is gyakoribb lehet, mint ezek után hinnénk. Peterson és Leckman (1998) jöttek rá arra, hogy a tik-ek (ezek nem csirkék, kedves Kekecem, hanem azok a rövid mozgások, amelyeket némely embertársunk akarata ellenére vissza-visszatérően produkál) skálafüggetlen statisztikát mutatnak. A tikrengés arra utalhat, hogy ezekben az emberekben a feszültség nem tud akadálytalanul szétszórni, hanem fokozatosan felgyűlik, és egy idő után lavinaszerűen kitör. (Ha a kedves Olvasó egy pszichológus, és a fenti mondat után a könyvet nagy ívben a tűzhelyre dobja, akkor hadd jegyezzem meg – most már csak a többieknek... –, hogy ez a válasz esetleg a feszültség eloszlásának gátoltságából fakadt... Esetleg nem akarja megbeszélni valakivel ezt a problémát? Az email címünk a bevezető végén található...)



Pletykarengés. Ha egy gyakorló pletykás hall egy jó sztorit, feszültség keletkezik benne. „Kinek mondhatom tovább? Kinek mondhatom tovább??” A pletyka pontosan ugyanaz ilyenkor, mint Zavar úr volt nemrég. Ez az a külső hatás, aminek tovább kell terjednie a hálózaton belül. Minél több történet éri a példabeli pletykafélszünköt, a feszültség annál magasabbra hág, és nincs mese, fel kell kapni a telefont... (Érdemes lenne megvizsgálni a két pletykátovábbítás közötti időszakok megoszlását...)

Az összes eddigi eseményekben a rengések valószínűsége és mértéke egyaránt rózsaszín zajként viselkedik (Milotti, 2002; Sethna és mtsai, 2001). Mit jelent ez? Egy óriáslavinának nem nulla a valószínűsége, hanem csak pontosan egy nagyságrenddel kevesebb, mint a nálánál egy nagyságrenddel kisebb lavina valószínűsége volt. Az eső és a földrengés esetén egészen világos ez az összefüggés. Csak néha (hála Istennek, nagyon néha) következik be egy pusztító erejű esőzés vagy földrengés. De hadd figyelmeztessenek arra, hogy ez az összefüggés minden említett jelenségre igaz. Azaz... Azaz legközelebb, amikor össze tetszik gyúrni a cukorkás papírt a moziban, tessék felkészülni lelkiükben arra, hogy nem nulla valószínűséggel a keletkező zajtól a teremben mindenki megsüketül. „Péter, ez iszonyú nagy hülyeségnek hangzik,” Kekec, profi vagy. Ez valóban egy iszonyú nagy hülyeség volt. Csak teszteltek... Ahogy a 3.2. fejezetben már említettem, a skálafüggetlen eloszlásoknak a valóságban szinte mindig van egy exponenciális lecsengésük. Így a cukorkás papír zaja sem hallatszik az égig –

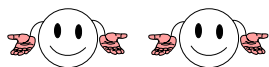
³A lélegzetvétel „fordítottja”, a köhögés is önszerveződő kritikus jelenség lehet.

semmilyen körülmények között. De azért ne gyűrögessük azt a papírt ennek ellenére sem. A továbbiakban hadd mutassam be néhány példán, hogy hogyan kísérnek a hálórögések minket a születésünktől a sírig.



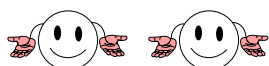
Szemezésrögés. Egy lány és egy fiú utazik a buszon.

Rápillantanak egymásra. Tetszenek. Kölcsönösen. De egy másodperc után – az illetnek engedelmeskedve – mégis elkapják a szemük. „Muszáj, hogy lássam újra!” Nő a nem-nézés feszültsége, és egyszer csak kitör: egymásra néznek megint. Milyen lehet szemezés-szünetek hosszának megoszlása? A leplezetlen egymásba-feledkezés hossza vajon mit követ? Skálafüggetlen eloszlást, ugye?



Udvarlásrögés. Tételezzük fel, hogy a fenti pár

összeismerkedett. „A szerelem széppé tesz.” (Ne rázd a fejed, Kekec. Tudom, hogy a könyv végére takaros kis közhelygyűjteményt tudsz majd összeállítani a leírt sorokból. VAN mentségem. Nem helykitöltés miatt kerülnek ezek ide, hanem azért, hogy új értelmet adjunk nekik.) Ha a kedves Olvasó hosszasan nézett egy szerelmes lányt vagy fiút udvarlás közben, minden bizonnyal egyetért a fenti állítással. Miért van ez? Nem változott meg egyiküknek sem a szeme vagy haja. A hirtelen-jött szépség nyilván sok elemből tevődik össze (a tetszeni vágyás mindig előhozza a legelőnyösebb oldalt), de ezek között a sok-sok kedves, véletlen, játékos mozdulat is bizonyára ott sorakozik. Mitől lesznek a mozdulataink olyan aranyosan idétlenek, ha szerelmesek vagyunk? Bizony-bizony. A feszültség. Szeretnénk olyanokat tenni, amit még nem merünk. (Vagy a mozgólépcső közepén talán nem ildomos...) Mivel a feszültség levezetetlen marad, váratlan időpontokban fura kis pótcselekvésekben kitör. Hirtelenjött gondolattal megsimogatjuk a másik haját. Vagy ugrunk egy picit balra. Magunk se tudjuk hogyan és miért. Mi történik éppen? Relaxáció. Udvarlásrögés formájában érkező relaxáció. És a statisztika? Bizonyára skálafüggetlen. Mindannyiunk életéből lehetne mondani példát arra, amikor a szerelem valami elképesztően nagy marhaságra is rávitt bennünket... No persze ekkora marhaságok ritkán adódnak. Szerencsére... De érdemes figyelni! Mert ugye mindnél lehet később még egy nagyságrenddel nagyobb...



Szexrögés. A fenti történet tovább is folytatható. Képzeld el,

hogy az udvarló pár elhagyta a mozgólépcsőt és végre egy kényelmes lakásba ért (vagy egy kevésbé kényelmes erdei tisztásra, hajóra, úrállomásra, bevonult a Big Sister show házába, ahová éppen ízlése és lehetőségei vonzották). Folyamatos – azaz inkább talán úgy mondhatnám ritmikus – energia bevitel, egyre növekedő feszültség, és végén egyszer csak: BANG! A relaxáció úgy jön, mint egy lavina, mint egy vulkánkitörés. Ismerős? Az evolúció úgy tűnik kitalált egy öngerjesztő folyamatot, amivel a skálafüggetlen statisztikát egy igen örömteli módon gyakorolni lehet. Ez sokszor jó és néha még jobb. Lehet még annál is jobb? Ha tényleg skálafüggetlen, akkor a boldog párunknak mindig lesz esélye arra, hogy egy nagyságrenddel nagyobb örömet éljen át – bár ez az esély éppen egy nagyságrenddel kevesebb. Az is megeshetik persze, hogy a skála itt is exponenciálisan lecseng. De: biztos ez? Amíg ezt a tudomány kideríti, a párunk helyzete olyan, mint a los angelesieké: soha nem tudhatják, mikor jön el a „Really Big One”. (Megeshetik persze, hogy a hasonlat nem volt a legszerencsésebb, mert a kétféle várakozás érzelmi háttere meglehetősen különböző...) *“Péter, biztos vagy te benne, hogy ezt a kéziratot ki fogják nyomtatni? Ezt a részt valahogy nem merném kinyomtatni a falújságra az osztályban... A földrajztanárom valószínűleg infarktust kapna tőle. És – tanácsaidat megfogadva – kezdek törődni az öreg egészségével.”*



Bébiréngés. Valamivel több, mint kilenc hónap eltelt. Egy nagyon helyes kölyköt látok cumival a szájában. Ahogy a 3. fejezet bevezetésében már utaltam rá, a kiskölykök a cumit nagyon gyakran annak a rengeteg feszültségnek a levezetésére használhatják, ami az új és idegen világból folyamatosan éri őket. A cumi (simogatás, gügyögés) nyújtotta relaxáció híján a feszültség egyre nő, és bébiréngés következik be. A bébiréngés lehet picike sírás csupán, de torkaszakadtából való üvöltésbe is átcsaphat. A cumizás és a bömbölés egyaránt skálafüggetlen lehet (persze akkor, ha a kiskölyök épp nem alszik).



Növekedésréngés. Hadd tegyek még egyetlenegy lépést. A kiskölyök növekedni kezdett és egyre nagyobb kölyök lesz belőle. A fiatal szervezet sejtjei vidáman osztódnak. Lehet az is, hogy nem olyan vidáman, de az biztos, hogy nem egyszerre. A többi már ismert... Feszültség keletkezik és a növekedés folyamatos helyett ugrásszerű lesz (Lampl és mtsai, 1992). Az egyenlőtlen növekedés túlmutat az önszerveződő kritikus állapot jelenségén, mivel itt a feszültség nem egyenletesen nő, hanem egy sokdimenziós mintázat szerint. Emiatt a növekedésréngések szinte biztos, hogy nem skálafüggetlenek, hanem inkább multifraktál jellegű mutatnak, azaz csak több, más-más kitevővel rendelkező skálafüggetlen eloszlás eredőjeként írhatóak le. A multifraktál jellegre a szívverés elemzése során, a 8.2. fejezetben még vissza fogok térni. Valóban későbbi tanulmányok (pl. Thalange és mtsai, 1996) kimutatták, hogy az ugrásszerű növekedés szabályai igen bonyolultak. Az egyenlőtlen növekedés nagyon általános az élővilágban. A növények ezt használják fel az alakjuk megváltoztatására, vagy a magvaik kaptatulására. Talán a legismertebb példaként az egyenlőtlen növekedésnek könyvtárnyi irodalma van a közgazdaságtan terén (pl. Feenstra, 1996). Az Olvasó megnyugodhat. Itt abbahagyom. Bár bevallom, rendkívül nagy a kísértés, hogy megírjam a Buddenbrook ház újabb változatát, rámutatva az élet minden pillanatában előkerülő rengésekre, de visszafogom magam. (Kockáztatva ezzel azt, hogy egy fokozatosan növekedő feszültség keletkezik bennem, ami írásréngésben tör ki...)

Az önszerveződő kritikus állapot beálltakor a hálózat kölcsönhatás-rendszere átalakul. Ebben a lavinaszerű átrendeződésben a gyenge kapcsolatok szakadnak fel először. (Emlékszünk? A leggyengébb láncszem.) A hálózatréngés során a gyenge kapcsolatok újraképződnek és segítik a hálózat fokozatos stabilizálódását. Azaz más szavakkal: „Nem minden rendszer recseg. Néhányuk a külső erőkre jó pár, egyformán kicsiny eseménnyel válaszol (ilyen például a kukoricaszemek felpattanása melegítés hatására). Mások a feszültséget egyetlen eseménnyel vezetik le (mint például a kréta, amikor eltörik). Egyszerűen fogalmazva a recsegés éppen e két határeset között van: amikor a rendszer részei között lévő kölcsönhatások erősebbek, mint a kukoricaszemekben, de gyengébbek, mint a krétában: a bekövetkező esemény skálafüggetlen lehet. A recsegés átmenetet képez a törés és a pattogás között.” (Sethna és mtsai, 2001). Azaz más szavakkal: az önszerveződő kritikus állapot kialakulásához gyenge kapcsolatok szükségesek.

A gyenge kapcsolatok nemcsak a lavinaszerű relaxációhoz szükségesek, ami akkor következik be, ha a Zavar család tagjai a hálózat különböző pontjain megakadnak, hanem kellene ahhoz is, hogy Zavar úr – eredeti szándéka szerint – körbeutazhassa a hálózatot. Ezt az összefüggést már röviden említettem akkor, amikor a kisvilágság Zavar urat segítő szerepéről írtam. A hosszú távú kapcsolatok, amelyek a hálózat távoli részei közötti utat zárják rövidre (itt a „távoli” jelző vagy a hálózatban felismerhető

szabályos rácsban elfoglalt helyre, vagy pl. arra utal, hogy a hálózat két eleme egy-egy különböző modul része a hálózaton belül) általában gyenge kapcsolatok. Ezek a kölcsönhatások lecsökkentik a legnagyobb csomópontokra jutó terhelést (Ghim és mtsai, 2004), és így segítik azt, hogy Zavar úr ne találkozzon családjának kisebb-nagyobb tagjaival a túlterhelt csomópontokon.



Kultúrrengések. A gyenge kapcsolatok szerepe a Zavar család utazásaiban magyarázza az innovációk néha meglepetésszerűen gyors terjedését a társadalmon belül. Ahogy ezeket a sorokat írom kb. a 40. évfordulóját ünnepeljük az 1964-es Beatles-rengésnek az USA-ban. Miért mutatja az innováció az önszerveződő kritikus állapot jegyeit? Az innovációnak el kell érnie a korábbiakban már említett perkolációs küszöböt (Ryan és Gross, 1943), ahhoz, hogy az addig elszigetelt használat hirtelen általános alkalmazásba csapjon át. Az innováció elfogadása kooperatív jelenség, ami eleve magában hordozza a lavinák kialakulásának esélyét (Watts, 2002). (Emlékezzünk csak a Pareto-törvényre, ahol a skálafüggetlenség a folyamatosan egymásra rakódó események összegzéséből származott.) A kultúrrengés önszerveződő kritikus állapotát a cserépedény stílusok megváltozására, és magának az önszerveződő kritikus állapot nézetrendszerének a terjedésére bizonyítani is lehetett (Bentley és Maschner, 2000; 2001). Ahogy már azt a 3.4. fejezetben említettem, az innovációk igen gyakran a társadalom egy olyan moduljából törnek elő, amely a társadalom törzshálózatához csak gyenge kapcsolatokkal kötődik.⁴ Ha az innováció (és ide be lehet írni szabadon azt, hogy OK, segíték: rockzene, Zavar úr, vagy bármi hasonló) leküzdötte ezt az akadályt – ahogy a Beatles leküzdötte az óceánt 1964-ben – egy szabadjegyet kap, és elindulhat hódító útjára, amerre lát.



Az innovációk schumpeteri torlódása. Az innováció kitörése a kezdeti elszigeteltségből – a kooperációval és a perkolációs küszöb meghaladásával együtt – magyarázatot adhat az innovációk schumpeteri torlódására is, ahol Schumpeter (1947) az innovációk lavinaszerűen előtörő sorozatát figyelte meg. A társadalmon végigsöprő innováció könnyen elérheti a társadalom olyan tagjait, akik az addigi ötlethez hozzá tudnak tenni még valamit. Az elért emberek száma valószínűleg skálafüggetlen statisztikát követ. Ugyanakkor az innovatív fejlesztési folyamat maga is elemi lépések egymásra rakódásából áll, ami szintén önmagában hordozza a skálafüggetlen statisztika kialakulását. Mindkét eset természetszerűen vezethet a torlódás kialakulásához, mint ahogy azt a 3.2. fejezetben Bernoulli (1738) kapcsán már bemutattam. Ha valaki sorozatban nyer, vagy veszít, pontosan ugyanazt a torlódást éli át, mint amit Schumpeter 1947-es híres művében leírt.

Összefoglalva: ha stabil hálózatot szeretnénk (nem egy mellékes kívánság, különben – mint említettem – könnyen meghalhatunk...) fontos, hogy a hálózatban a relaxáció zavartalan legyen. Ehhez Zavar úrnak gyorsan el kell jutnia a hálózat legtávolabbi pontjaira is: hosszú távú kapcsolatokra, kisvilágságra van tehát szükség. A skálafüggetlenség is nagyon sokat segít Zavar úr hatékony szétporciózásában. Ha Zavar úr egész családjával érkezik és a hálózatunk képtelen őket mindenhová szabadon eljuttatni, előbb vagy utóbb lavinák keletkeznek (emlékezzünk csak: ez a Zavar család könnyen dühbe gurul). A lavinához az kell, hogy Zavarék folyamatosan érkezzenek, a látogatásukból fakadó feszültség folyamatosan nőjön és legyen lehetőség a hirtelen, lavinaszerű relaxációra.

⁴Az ötletért köszönettel tartozom Gaál Viktornak.

Van még itt egy nagyon fontos üzenet. Ha a legutolsó mondatot egy kicsit átalakítom: és Zavar úr családja helyett az energia szót helyettesítem be, akkor felismerhetővé válik egy igen általános jelentés is. Az energia folyamatos bevitele nélkül nincs élet. A folyamatosan érkező energia viszi előre az élőlényt, biztosítja folyamatos továbbélését, önszerveződését. Energia nélkül nem szabadulnánk az entrópia-csapdából, és nem lennénk képesek a rendezetlenség felől a rendeződés irányába haladni. Ugyanakkor minden csomag megérkező energia egy-egy újabb tagja a Zavar családnak. Mindet, egytől egyig mindet disszipálnunk kell. A relaxáció szükséges az élethez. Továbbmegyek: ha élő szervezetként muszáj állandóan energiát szereznünk ahhoz, hogy fennmaradjunk, de ennek az energiának minden csomagja létünkben fenyeget minket, akkor kimondható, hogy a folyamatos relaxációért vívott küzdelem az élet maga.

4.3. Hálózatkatasztrófák

Kecec! A szexrengés óta gyanúsán csendben vagy. Ideje megszakitnod az álmodozásaidat! Ébresztő! Kérdés következik. Mi történik, ha Zavar úr (és bájos családja) nemcsak átmenetileg, hanem véglegesen és reménytelenül elakad a hálózaton belül? Látom, még mindig nagyon messze jársz... Íme a válasz: ha a relaxáció teljesen reménytelenné válik, akkor a hálózat néhány elemén akkora energia halmozódik fel (emlékszünk: a Zavar úr dühe), hogy a szerencsétlen elemet alkotó alhálózat szétesik. Következésképp az adott elem meghal, kiég.

Lássunk egy példát. 1996. augusztus 10.-én egy oregoni elektromos vezeték hibája az USA és Kanada több államában az energiaszolgáltatás teljes leállításához vezetett. Mi történt? A rendkívüli hőség és a légkondicionálók működéséből fakadó rendkívüli áramfelhasználás ahhoz vezetett, hogy délután 3:40 tájban a Keeler és Alston elosztóállomásokat összekötő 500 kV-os távvezeték annyira behajlott, hogy hozzáért egy fához, és azonnal leégett. A kiesés miatt keletkező frekvenciaingadozások szinte azonnal kiégették 13 energiatermelő egységet a szomszédos McNary gáton. Ezeknek az alhálózatoknak a kiesése annyira túlterhelte az Oregon Dél-Kaliforniával összekötő fővezetékét, hogy az is leégett. Ez egy olyan kiterjedt láncreakcióhoz vezetett el, amelyben Nevadától Új Mexikón keresztül Arizonáig szinte minden nagyobb távvezeték leégett, vagy megsérült. Ennek az óriási kiesésnek a következményeként az USA teljes nyugati részében megszűnt az energiaellátás, amely az ország 11 államában több mint négymillió embert hagyott tartósan energiaszolgáltatás nélkül (O'Donnell, 2003). A nemzeti méretű katasztrófát egy egészen apró kezdeti zavar váltotta ki. Mindazonáltal ez a kezdeti zavar 13 energiatermelő egységet tönkretett, ami azonnal felnagyította az okozott kárt. Az ilyen eseménysort kaszkádvárnak fogom hívni. Ez az eseménysor a hálózatok hibáinak egyik igen jellemző esete. Hasonló kaszkádvart figyeltek meg a gazdaságban, a földrengések utóregéseinél és számos más helyen (Bak, 1996; Moreno és mtsai, 2002). A leginkább képszerű példát a legtöbbször már kiskorában megtapasztalta: elég volt egy picit poccintás, és a dőléskaszád a hosszú munkával felépített dominósorton egy pillanat alatt végigsöpört.



Áramrengés. „Péter, ez a kaszkádzavar engem az előző fejezet zavarba ejtően széleskörű „rengéseire” emlékeztet. Nem felejtettél el esetleg valamit?” Őszintén gratulálok, Kecec! Ez szép volt. Valóban, a kaszkádzavart felfoghatjuk az önszerveződő kritikus állapot egy speciális esetének (Carreras és mtsai, 2004). A folyamatosan emelkedő feszültség a rendszerre az elemek sorozatos kiesése miatt egyre jobban ránehezedő terhelés. (A folyamatos energia bevétel az áramhálózat esetén elég kézenfekvő...) A relaxáció furcsamód a rendszer egyre újabb hibái formájában jelentkezik.

Nem túl jó hírek ezek. Ha nem vagyunk képesek olyan hálózatokat tervezni, amelyek ellenállnak a kaszkádzavarnak, akkor nekiállhatunk jégraktárakat gyűjteni minden forróbb nyári napon, vagy néhány éven belül meg kell fontolnunk, hogy átköltözzünk-e Szibériába. A helyzet a valóságban még ennél is rosszabb. Még kaszkádszerűnek sem kell lennie a zavarnak ahhoz, hogy a hálózatunk igen katasztrofális helyzetbe kerüljön. Ahogy korábban említettem, a skálafüggetlen hálózatok meglehetősen érzéketlenek a véletlenszerű hiba támadásaival szemben (ezért maradtak fenn a véletlenszerű hibákkal terhelt evolúciós folyamatban). Ugyanakkor a random hálózatoknál sokkal érzékenyebbek arra, ha egy csomópontjukat éri (adott esetben célzott, pl. terrorista) támadás (Albert és mtsai, 2002). Éppen ez az, ami a helyzetet rosszról nagyon rosszra és nagyon rosszról egyenesen katasztrofálissá változtatta 1996 augusztusában, ahogy a helyi zavar végül is az Oregon-Dél Kalifornia fővezeték leégéséhez elvezetett, amely aztán sikeresen kikapcsolta az áramszolgáltatásból fél Amerikát. A skálafüggetlen hálózatok a kaszkádzavar hatásait is felnagyítják, hiszen a zavar addig terjed elemről elemre, amíg eléri egy csomópontot. A kaszkádzavar tehát könnyen elvezethet ahhoz, hogy a hálózat törzshálózata általában bevezetés nélkül, hirtelen széteszen, és ezzel az egész hálózat tulajdonképpen megszűnjön (Moreno és mtsai, 2002).



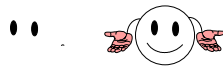
A skálafüggetlen rendszerek hiba- és támadástűrése. Ahogy már a 3.2. fejezetben leírtam, a random gráfokkal összehasonlítva a skálafüggetlen hálózatok igen jó stabilitást mutatnak, ha véletlenszerű hibák sokasága éri őket, de eléggé védtelenek a csomópontjaikat érő, célzott támadással szemben (Albert és mtsai, 2000; Bollobás, 2001). Az alábbiakban ezt a hiba- és támadástűrést fogom elemezni egy kicsit részletesebben.

- **Első kivétel: Amikor a véletlen hiba is nagyon rossz.** A néha-néha jelentkező véletlen hibákkal szemben, a véletlen hibák folyamatos láncolata a hálózat működésében igen nagy károkhöz vezet (Dorogovtsev és Mendes, 2001). Más szóval: az öregedés alaposan tönkreteszi a hálózatokat. Nem gyorsan, de igen hatékonyan. A 7.3. fejezetben fogok erre néhány részletesebb példát bemutatni.
- **Második kivétel: Amikor a támadás sem olyan rossz.** Az összeválogatódás (asszortativitás) segít a támadások elviselésében. Az összeválogatódott hálózatokban a csomópontok csomópontokkal, az elágazások elágazásokkal és a majdnem egyedülálló elemek ugyancsak majdnem egyedülálló elemekkel vannak leginkább összekötve. A magas összeválogatódás a társadalmi hálózatokat jellemzi. (Ennek egyik lehetséges okára a 13. fejezet szintézisében térek majd vissza.) Ezekben a hálózatokban az egyik csomópont sérülése esetén a feladatát könnyen át tudja venni a másik. A legösszeválogatódottabb hálózatokban tízszer annyi csomópontot kell ahhoz eltávolítani, hogy a hálózatot megöljük, semmint ugyanannak a hálózatnak a legkevesébé összeválogatódott változatában (Newman, 2003a).
- **Harmadik kivétel: amikor nincs skálafüggetlenség.** Nem minden hálózat skálafüggetlen. Utolsó megjegyzésként hadd hívjam fel a figyelmet arra, hogy a skálafüggetlen hálózatokról

csak azért esik ennyi szó ebben a könyvben... “mert beléjük szeretettel.” De nagy marha vagy te, Keckecke! ...mert a természetben önszerveződésük és hibatűrésük miatt oly nagy számban fordulnak elő. Ugyanakkor a hálózatoknak még egy óriási (jelenleg fel nem mérhetően óriási) világról szinte semmint sem tudunk. Ezek néhány példjaként építhetőek olyan hálózatok, amelyek egyszerre ellenállóak a véletlen hibáknak és a tervszerű támadásoknak. Ezek a hálózatok egyetlen eddig tárgyalt hálózathoz sem hasonlítanak (Valente és mtsai, 2004; Paul és mtsai, 2004; Shargel és mtsai, 2003).



Hol akad meg Zavar úr? Hogyan viselkednek ilyen körülmények között régi kedvenceink, Zavar úr és családja? Milyen hibákat generálnak? Véletlenszerűeket? Nagy valószínűséggel nem. Elméletileg persze a Zavar-család tagjai bárhol megakadhatnak a körutazásukban. A gyakorlatban azonban ez nem igaz. Megdöbbenően keveset tanulmányozták eddig ezt a kérdést. Zavar úr ott akadhat el, ahol a hálózat forgalma amúgy is feltorlódik. Ez elképzelhető azokon a helyeken, ahol a leggyengébb (legkisebb áteresztőképességű) kapcsolatok csoportosulnak, és a hálózat nem kínál alternatív útvonalat. Ugyanakkor megjósolható, hogy Zavar úr előszeretettel fog elakadni a csomópontokon, ahol a legnagyobb forgalom összpontosul, és gyakran forgalmi dugót okoz. Bizony. Zavar úr úgy viselkedik, mint egy terrorista. Addig jár körbe a hálózatban, amíg egy csomópontra nem akad, és ott támad igazán. Kiszolgáltatottak vagyunk tehát? Szerencsére nem. A helyzet azért annyira nem reménytelen, mint ahogy eddig lefestettem. A törzshálózat elég ellenálló ugyanis. Pl. a World Wide Web még akkor is megőrizné a törzshálóját, ha *minden* olyan elemét kiütnénk, amelyik öt vagy annál több kapcsolódási ponttal rendelkezik (Albert és Barabási, 2002).



A sejtjeink bölcsessége: hogyan segítik a vacak enzimek a kiválókat? A sejtes élet zavartalanságát egy kiterjedt enzimhálózat működése biztosítja. Minél merevebb egy enzim, annál stabilabb. Ugyanakkor minél merevebb egy enzim, annál rosszabb enzimaktivitással is rendelkezik (Shoichet és mtsai, 1995). Ha Zavar úr kedvenc elakadási helyeinek egyike tényleg a leggyengébb (leglassabb) enzimekkel esik egybe, akkor a sejtjeink nagyon bölcssek. Zavar úr ugyanis így a legstabilabb fehérjéket találja telibe, és így nagy kárt nem okoz. Ez a gyönyörű kettősség úgy is megfogalmazható, hogy kétféle fehérjét őrzünk a sejtjeinkben: a teljesítménybajnokokat, akik gyorsan szétterítik a bajt, de esendőek és gyengék, valamint a lustákat, akik magukra vonják a bajt, de kemény fiúk és ebbe nem pusztulnak bele. A lusták mentik meg a teljesítmény bajnokait, és teszik lehetővé a bajnokok sejtet segítő életét.

A kaszkádzavarhoz visszatérve megállapíthatjuk, hogy kevés mocskosabb dologgal találkozunk eddig ebben a könyvben. Pénzt, időt, fáradságot nem kímélve felépítünk egy gyönyörű hálózatot, megbízunk benne, és tessék: beüt egy ilyen kaszkádszerű mocskok, és az évekig építgetett kedvenc hálózatunk a szemünk láttára olvad szét (néha a szó szoros értelmében...) pár másodperc alatt. Ne hagyjuk. Építsünk biztosabb hálózatokat. Gondolkodjunk. Ha az Oregon-Dél Kalifornia fővezeték leégése ekkora galibát okozott, akkor kerül, amibe kerül, építsünk mellé még egyet. Kisegítőnek. Tulajdonképpen miért nem duplazzuk meg az összes érzékenyebb távvezetékét? Nagyon izgalmas pillanat volt, amikor arra bukkantam, hogy ez a nagyszerű ötlet nem csak a csillagászati költségek miatt nyilvánvaló marhaság. Duncan Watts (2002) igen érdekes modellje szerint, ha a hálózatunkat túlzottan össze-vissza kötögetjük, az a kaszkádzavar kárait nemhogy mérsékli, hanem éppen kiszámíthatatlanná teszi.

A Watts-féle modell egy olyan esetet ír le, amikor a hálózat minden elemének aktuális állapota az elem összes szomszédjának átlagos állapotától függ. Ez a leírás jól illik bármely dominószerű kaszkádterjedéshez, ahol a szomszédok hatása a legfontosabb. Ha elkezdem kiépíteni a hálózat összeköttetéseinek a számát, egy idő után elérek egy kritikus állapotot, a törzshálózat kialakulását, amivel a kaszkádzavar egyáltalán lehetővé válhat. Ez az az eset, amiről eddig írtam, ahol a kaszkádzavar kiterjedése skálafüggetlen statisztikát követ. Legtöbbször kis területre terjednek ki, de néha beüt a katasztrófa, és az egész hálózat odalesz. Ha az összeköttetések számát ezek után még tovább növelem, egy idő után minden elemnek rengeteg szomszédja lesz, így a szomszédok által közvetített hatások „felhígulnak” és a kaszkádszerű hibaterjedés mértéke csökkenni kezd. Ugyanakkor igen közel ehhez a második kritikus ponthoz egy megdöbbenően érdekes, kétszűcsű kaszkádeloszlás figyelhető meg. Ez azt jelenti, hogy ezen a ponton a katasztrófálisan nagy kaszkádok esélye rendkívüli mértékben megnő. Egy ilyen rendszerben Zavar úr családjának akár száz tagja az égegyadta világon semmilyen hatást nem fog okozni. Ekkor Zavar Jánoska, a mesebeli legkisebb fiú kopogtat a hálózat ajtaján, hogy szerencsét próbáljon. Belép: és erre egy óriási, mindent végigpusztító kaszkád söpör végig az egész hálózaton... (Watts, 2002). A „túlkapcsolt” hálózatok instabilitása igen általános jelenség, a táplálékhálózatokra, a kereskedelmi hálózatokra és az áramhálózatokra egyaránt igaz (Fink, 1991; May, 1973; Siljak 1978). A párhuzamos fővezetékek kiépítésére szőtt terveinket tehát a kukába dobhatjuk. Nagy szerencsénkre az áramhálózatok skálafüggetlen felépítésük, így legalább a kaszkádzavarok Watts-féle teljes kiszámíthatatlanságától nem kell tartanunk (Barabási és Albert, 1999).

Nincs más, mint feladni? Szorongásunkban párperceként ránézni a villanykörtére, hogy ég-e még? Soha. A baj itt is megoldható. Ahogy már az előzőekben is említettem: a foksám-eloszlás változatossága már önmagában segít a kaszkádzavar leküzdésében (Watts, 2002). A skálafüggetlen hálózatok biztonságosabbak. A másik nagy találmány a kaszkádzavar ellen a modulrendszer kiépítése volt. (Tulajdonképpen éppen a moduláris struktúra kiépítésével kezdték el az USA-ban kivédeni a hasonló zavarokat az 1996-os katasztrófa után; O'Donnell, 2003). A kaszkádzavarok ugyanis megállíthatók a modulhatárokon. „*Sejtem... Odaér a kaszkádzavar a modulhatárhoz, a fejére csap, és felüvölt: FRANCBA! Otthon hagytam az útvelem...*” Keckeckém, tévedsz. Ezek a modulok már mind az Únió tagjai. Sokkal drasztikusabb dolog történik. Odaér a kaszkádzavar a modulhatárhoz, erre a híd a határfolyón a fejére csap, és felüvölt: FRANCBA! És ezzel pik-pak összeomlik. Vajon miért? Már meg sem merem kérdezni! „*Csak nem skálafüggetlenség?*” Nem, a másik: gyenge kapcsolatok. A modulok közötti kölcsönhatások ugyanis gyengék. Ezek a modulközi kapcsolatok úgy viselkednek, mint az olvadó-biztosíték. Ha egy zavar éppen rajtuk összpontosul: leégnek. „*Péter, számomra úgy tűnik, hogy napszúrást kaptál, ahogy gazdag fantáziával az 1996-os rendkívüli meleg augusztusba képzelted magad. Pár sorral ezelőtt azon keseregtél, hogy micsoda katasztrófa volt az Oregon-Dél Kalifornia fővezeték leégése, és terveket szóttél arra, hogy hogyan fogod megduplázni szinte az egész rendszert. Most meg azt javasolod, hogy készakarva építsünk be olyan elemeket, amelyek direkt tönkremennek? Megbuggyantál?*” Tudom. Ez a 67. olyan pont, amikor az Olvasó a könyvet a kukába dobja.⁵ VAN magyarázatom. Az Oregon-Dél Kalifornia

⁵De tulajdonképpen ez nem is olyan rossz hír. Mert ez azt jelenti, hogy az Olvasó eddig már 66-szor halászta ki a könyvet a szemétből... KÖSZÖNÖM! Ha esetleg a könyv közben egy kicsit koszos lett

távvezeték leégése során nem az volt a baj, hogy a távvezeték leégett. Hanem az volt a baj, hogy *amikor* leégett, akkor még számos más fővezeték összekötötte a két áramhálózatot. Ha a hálózat két modulja között *minden* összeköttetés egyszerre szűnik meg, azaz a modulok egymástól tényleg elszigetelhetők, akkor a legnagyobb katasztrófa is csak egy adott modulon belül fog pusztítást okozni. A többi modul pedig úgy tervezhető, hogy ilyen esetekben önfenntartásra álljon át.



A gyenge kapcsolatok megszelídítik a töréseket. A legtöbb szilárd anyag töréseit az anyagok heterogenitása határozza meg. A heterogén anyagokban az első törések a mikroszkopikus fázishatárokon jönnek létre. Ezek a törések az őket generáló feszültségtől függően lassan vagy gyorsan egyre nagyobb és nagyobb törésekké állnak össze, amely végül az anyag kettétöréséhez vezet. A fázishatárokon a kölcsönhatások gyengék, és így a törések irányítására alkalmasak. Emlékszünk a gyémántra? A tökéletes kristályokban nincsenek gyenge kapcsolatok, nincsenek modulok, így ha már nem tudnak ellenállni a károsító hatásnak, viharos gyorsasággal és megjósolhatatlanul törnek el (Bazant, 2004; Sornette, 2002).



A hálóvédelem egyéb trükkjei. Csodálom, hogy csendben vagy, Kecec! Idáig a legnyilvánvalóbb megoldásról még nem is beszéltem. Ha meg akarsz védeni a hálózatodat: Növeld meg az áteresztőképességét minden helyen! Valóban, a hálózat kapacitásának növelése számottevően lecsökkenti a kaszkádzavarok méretét (Lee és mtsai, 2004). A kapacitásnövelés azonban iszonyatosan drága lehet. Motter (2004) egy másik megoldást javasolt: Ha védeni akarsz a hálózatodat, rombold le. Látom szólni akarsz, Kecec. Hadd vágjak a szavadba: Motter (2004) nem a hálózat teljes lerombolását javasolta, csak azt, hogy távolítsuk el az igen kis kapacitású, vagy nagy túlterheléssel működő elemeket és kapcsolatokat. Számításai szerint ezzel a célzott pusztítással védeni tudjuk a hálózat egészének működését. Motter (2004) eredményeiről az embernek óhatatlanul a fák évente megújuló önpusztítása jut az eszébe. Lehet hogy a levélhullás a kaszkádzavarok elkerülésének egyik eszköze?

Összefoglalásképpen: ha az Olvasó látja, hogy Zavar úr és családja közeleg, és be kíván kopogtatni hozzá, készüljön fel a legrosszabbakra. A látogatás eredményeképpen kaszkádzavar támadhat, és (szerencsére azért elég ritkán) az egész hálózatot tönkretelheti (morbid példában ez a T. Olvasó halálát jelentené). A skálafüggetlen fokszám-eloszlás sokat segít a kaszkádzavar következményeinek kivédésben. Sajnos a Zavar-család tagjai azonban olyanok, mint egy terrorista-csoport és a skálafüggetlen hálózatoknak épp a legfontosabb csomópontjainál fogják a legtöbb kárt okozni. Zavarékát a modulokkal lehet sarokba szorítani. Ha ügyes elrendezésben telerakjuk a hálózatunkat különféle biztosítékokkal (azaz altruizmusunkat félretéve elszigeteljük magunkat a zavartól, ha az a még elviselhető határokon túlhalad) akkor legalább a hálózat részeit meg tudjuk menteni, amelyekből a hálózat később újraépíthető.

4.4. Hálóváltások

Nagy örömmre az előző fejezet lezárása azért nem hagyott bennünket a teljes kétségbeesésben. Ha Zavar úr és kedves családja betoppan, nem kell azonnal egy új hálózat építésébe kezdenünk. Mi van azonban akkor, ha Zavar úr nemcsak a családját,

volna, érdemes talán egy újat venni. Ha tényleg így történik, biztos vagyok benne, hogy a kiadó mindkettőnk – a tisztelt Olvasót, és az Írót egyaránt – imádni fogja.

hanem kedves barátait is magával hozza? A kisebb és nagyobb Zavarhaverokat, az egész hangos, lökdösődő, kötözködő bandát, a népszerű Zavarklub törzsközönységét. És ezek mind éppen nálunk akarnak házibulit. Ez lenne az a pillanat, amikor feladjuk?

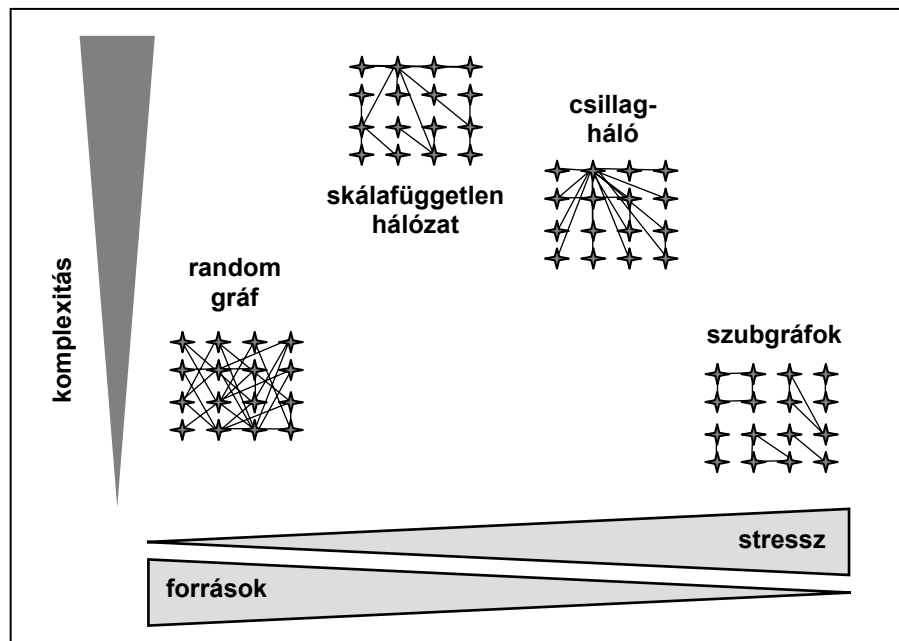


Miért rosszabb a több Zavar, mint a kevesebb? Csodálom, hogy Keckecke hallgat. Micsoda hülye kérdés? Kérdezhetné – joggal. Ennek ellenére nem találtam meggyőző tudományos választ arra, hogy a hálózat szempontjából miért rosszabb az, ha a több Zavar egymás után hamar érkezik. A hálózatok minden bizonnyal egy meghatározott relaxációs idővel rendelkeznek. Ha a Zavarklub következő tagja ezen belül toppan be, hálózat még az előző Zavar utaztatásával van elfoglalva, és a Zavarok gyorsabban és hatékonyabban torlódnak fel.

Van egy jó hírem: akárhány Zavar jöhet, egy jó hálózat – és hadd hívjam meg az Olvasót ebbe a klubba – soha nem adja fel. Van egy végső eszköz arra, hogy megvédjük magunk: a hálózátás. A hálózatok egy egész sor igen izgalmas átalakuláson mehetnek keresztül, amelyeket topológiai fázisátmeneteknek lehet elnevezni. Ezeket az átalakulásokat Vicsek Tamás és munkatársai írták le először (Derényi és mtsai, 2003; Palla és mtsai, 2004). Ha a hálózat „magas hőmérsékletű” (energiagazdag) környezetben él, akármilyen kölcsönhatásokat képes kialakítani. A hálózatunk kapcsolatai véletlenszerűek lesznek, és egy Erdős-Rényi-féle random gráf alakul ki (Erdős és Rényi, 1959; 1960). Ha fokozatosan csökkentjük hőmérsékletet, a hálózat kompaktabbá válik, és elérjük a korábban már említett csillaghálót, ahol a legtöbb elem egyetlenegy elemmel áll összeköttetésben (7. ábra). A csillagháló a társadalmi hálózatokban a diktatúrákra emlékeztet, az energiahálózatokban pedig a Bose-Einstein kondenzációra, amelyben a különböző energiaszintek egy azonos energiává kondenzálnak az abszolút nulla fokhoz igen közeli hőmérsékleten (Bianconi és Barabási, 2001a). Ha a hálózat még ennél is alacsonyabb hőmérsékletre kerül, a hálózat kompaktsága még tovább nő, ami csak úgy valósulhat meg, hogy az eredeti hálózat kicsiny, de egymással teljesen összekötött szubgráfokká esik szét. Ilyenkor az eredeti hálózat törzshálójá természetesen megszűnik, azaz ha a hálózatunk egy élőlény volt, az élőlény meghal.⁶

„Péter, egy hálózati elrendezés nekem nagyon hiányzik a fenti listádból. Egész fejezeteket írtál tele a skálafüggetlenség dicséretéről, most meg kihagyod?” Nem, Keckecke, a skálafüggetlenség itt is előkerül. A skálafüggetlenség ezekben a modellekben a random gráfokból a csillagháló fele történő átmenetek határfelületén helyezkedik el.

⁶Ha a hőmérsékletet (Zavar úr látogatásainak számát) még tovább csökkentjük a Derényi és mtsai (2003) által leírt fizikai modellben, a szubgráfok előbb-utóbb ismét egyetlen, teljesen összekötött hálózattá egyesülnek. Ennek a zavartalan, teljes hálózatnak a jelentősége és értelme a biológiai és a társadalmi hálózatok terén jelenleg még nem ismert. Nagy valószínűséggel ennyire zavartalan állapot a valós körülmények között soha nem fordulhat elő. Így csak a fantáziám szaladhat el (alaposan)... Ha a szubgráfok a biológiai rendszerek halálát jelentik, vajon mi az a valószínűtlenül nyugodt, teljesen összekötött állapot, ami a halál után jön?



7. ábra. **Háléváltások.** Az ábrán a random gráf – skálafüggetlen hálózat – csillagháló – szétesett, teljesen összekötött szubgráf átmeneteket (Derényi és mtsai, 2003; Palla és mtsai, 2004) mutatom be igen vázlatosan, ahogy a források egyre jobban elapadnak, illetve a környezeti stressz nő. Az ábrán az eredeti „hőmérsékletet” forrásgazdagsággal és stresszel helyettesíttem. A komplexitás mértéke, mind pedig az egyes hálózattípusok foksám-eloszlásai illusztrációik csupán.



A fázisátmeneteket a hatványkitevővel jellemezni lehet. Ha emlékszünk a skálafüggetlen hálózatok foksám-eloszlását leíró általános formulára ($V = kT^{-\alpha}$), a fentiekben említett fázisátmeneteket az α exponens változásaiként is leírhatók. Az exponens értéke a kezdetben 1. (Ez felel meg e teljesen véletlenszerű esetnek. Emlékszünk? Ez a fehér zaj.) Utána növekedésnek indul kb. 4-ig (ezek mind skálafüggetlen hálózatok, olyanok, mint amelyeket az 1. Táblázatban mutattam be korábban. Emlékszünk? Ezek a színes zajok.) Ahogy az exponens még tovább nő, elérjük a csillagháló esetét, ahol a magas foksámmal rendelkező elemek száma csupán egyetlenegy.

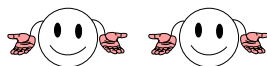
Hadd helyezzem a fenti háléváltások hajtóerejét, a hálózat hőmérsékletét (az egyes elemek rendelkezésére álló energiát) egy más kontextusba. Ha a hálózat környezetében korlátlan mennyiségű energia található, akkor a hálózatnak eleve rengeteg belső kapcsolata volt, így Zavar úr akármekkora rombolást hagy maga után, a törzshálózat valószínűleg nem szűnik meg, a hálózat életben marad. Ráadásul a hálózat tönkretett kötéseit a külső energia felhasználásával újraépíthetőek. Valószínűleg ilyenkor a Zavarok egyenletesebben is érik a hálózatot, hiszen a hálózat környezete tele van energiával, ami valahol mind-mind egy újabb Zavar. Ha az energia fogy, a hálózat karcúsodik. A kötéseit relatíve egyre fontosabbá, egyre nélkülözhetetlenebbé válnak. A Zavarok is egyre kiszámíthatatlanabbul, egyre kevésbé egyenletesen érik a hálózatot. Minden egyes Zavar egyre inkább stresszként viselkedik. (A stressz egy váratlan behatást jelent. Rengeteg energia tengerében az éppen megérkező energia ritkán váratlan. Energiaínség idején azonban meglehetősen az.) Azaz: a növekvő stressz is háléváltást okoz.

A háléváltások a hatékonyság, a parszimónia elvét követik: a csillagháló sokkal „olcsóbb” mint a random gráf, vagy a skálafüggetlen hálózat, hiszen a kiépítése kevesebb „drótot”, azaz az elemek közötti kötődést igényel. Ugyanakkor a csillagháló a másik két hálózattal azonos módon biztosítja a hálózat minden elemének, hogy a többiekkel kapcsolatban maradjon. Bentley és Maschner (2000) bemutatta, hogyan változik át a tudományos művek idézettségi hálózata a random gráf → skálafüggetlen hálózat átmenet szerint, ha a források (ami ebben az esetben a rendelkezésre álló újságok számát jelenti) beszűkültek. Hasonlóképpen, Stark és Vedres (2002) random gráf → skálafüggetlen → csillagháló átmeneteket írtak le, ahogy a cégek konzorciumai egyre nehezebb gazdasági helyzetben találták magukat. A kapcsolatok számának csökkenésével együtt járó hálózatstabilizálódást már Gardner és Ashby (1970) korai munkája is említette.

Ideje, hogy a kezdőpontunkhoz, a Zavarklub tagjainak tervezett házibulijához visszatérjünk. Mi történik, ha a hangos, lökdösődő, kötözködő banda végül megérkezik? Ha a hálózat bármely eleménél a klubtagok körutazása megakad, a szerencsétlen elem, ahogy már azt korábban említettem, azon nyomban olyan instabil lesz, hogy addigi kapcsolatainak többségét, ha nem összességét beszűnteti. A hálózat tehát meglehetősen flexibilis állapotba kerül. Ha a Zavarklub nem okozta az adott elemet jelképező alhálózat teljes szétesését (pusztulását), akkor a klubtagok által szállított energiát nagyszerűen fel lehet használni a kapcsolatok újraépítésére, ha a klub elvonult. A háléváltás kiindulópontja tehát adott. Ha az összes energia átlagosan kevés, kevesebb kapcsolat fog kiépülni, mint amennyi felbomlott: a hálózat a kompaktság, a kondenzáció felé halad. Ha az energiamennyiség tartósan megnőtt: a hálózat a random gráf irányba mozog.

Ha az Olvasó azt hiszi a Zavarklub tagjairól, hogy egy modortalan, kártevő csapat, akiket irtani kell, akkor emlékeztetnem kell arra, hogy a zajjal is így jártunk az elején... Hadd helyezzem a Zavarklub tagjait is egy újabb megvilágításba. Ha nincs Zavar úr, nem bomlik fel a hálózat egyetlen régi kötése sem. Nincs semmilyen háléváltás, de nincs semmilyen változás se a hálózaton belül. A hálózat merev, élettelen. A Zavarklub hangos, lökdösődő, kötözködő bandája egy óriási áldás tehát. Ebben az értelemben a Zavarklub az összes, a 4.1. fejezetben már leírt jó zaj mellé kerül.

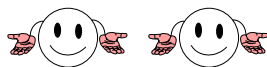
A háléváltások egészen általános jelenségnek tűnnek. Ugyanakkor Vicsek Tamásék e nagyszerű gondolata még igen új, tehát alkalmazásai is meglehetősen ritkák. Az alábbiakban két lehetséges biológiai alkalmazást fogok ismertetni, a 11.2. fejezetben pedig leírok egy harmadikat a történettudományok körében. Ahogy a duplavidorkák is jelzik: az összes példa tudományos igazolásához számos további kísérlet szükséges még.



Háléváltások 1: sejthalál

- **Random gráf fázis:** ebben az állapotban a számolatlanul rendelkezésre álló külső energia exponenciális sejtnövekedéshez vezet, a sejtekre a folyamatosan beáramló energiából és a kis belső zajból származó alacsony zaj, és az egyformaság a jellemző.

- **Skálafüggetlen fázis:** ha a sejt rendelkezésre álló források lecsökkennek (kis stressz) skálafüggetlen hálózat alakul ki. Ebbe már az energia ritkábban érkezik, és így nagyobb külső és belső zajt okoz. Néhány fehérjét (hálózat-elemet) a külső hatások már károsítanak. A javító mechanizmusok (amelyeket stresszfehérjéknek hívunk) lassan telítődni kezdenek: néhány sejtes válasz már nem a szokásos lesz, a sejtek egymástól különbözni kezdenek (a folyamat részleteit a 7.1. és 7.2. fejezetekben fogom leírni).
- **Csillagháló:** ha nagyobb stressz érkezik, a sejt erőforrásai elérhetik a kritikus szintet. A sejtnak minden erejét (ATP fogyasztását) néhány, a sejt élete szempontjából legfontosabb funkció fenntartására kell koncentrálnia.
- **Szétesés szubgráfokká:** ha a sejt erőforrásai a kritikus szint alá csökkennek (a zaj kibírhatatlanul magassá válik), és/vagy a sejtnak túl sok deviáns, diszfunkcionális eleme lesz, a sejt hálózata szétesik, és a sejt vagy apoptózis, vagy nekrozis áldozataként meghal (Sóti és mtsai, 2003).



Hálóváltások 2: etológia

- **Random gráf fázis:** a random gráf fázis ebben az esetben az állatcsoport párhuzamos együttműködésének felel meg. Ebben az együttműködési fajtában minden állat ugyanazokat a feladatokat végzi, és az állatok közötti kapcsolatok véletlenszerűen alakulnak ki.
- **Skálafüggetlen fázis:** ha a fentiéknél kevesebb élelem áll az állatok rendelkezésére, egy hirtelen átmenet figyelhető meg a kiegészítő együttműködés irányába. Ebben az együttműködési fajtában feladatmegosztás található: az állatközösség tagjai rögzített kapcsolatokba kerülnek az egymásra épülő feladatok szerint (Le Comber és mtsai, 2002; Theraulaz és mtsai, 2002).
- **Csillagháló:** ha az élelem mennyisége a kritikus szint körülivé csökken, vagy a stressz szintje számottevően megnő (pl. a környéken elszaporodnak a ragadozók), az állatközösség csillaghálóból alakul át, azaz egyértelmű függelmi viszonyok alakulnak ki, és a csoportot uralni fogja egy alfa-hím (Hemelrijk, 2002).
- **Szétesés szubgráfokká:** Ha az élelmiszerhiány vagy a veszély elviselhetetlen mértékűvé nő, az állatközösség szétesik és a szubgráfok – ebben az esetben pl. elemi családok formájában – külön-külön próbálják meg a túlélésüket biztosítani.⁷

Megdöböntő hasonlóságok, ugye? A hálóváltozások még további példáit fogom hozni a cégek és a társadalmi hálózatok esetén a 9.4. és a 11.2. fejezetekben. De maradjunk egyelőre Zavar úrnál még mindig. Megmutattam, hogy a Zavarklub hangos, lökdösődő, kötözködő tagjai hogyan segítik a hálóváltásokat. Ugyancsak bemutattam, hogyha a környezeti energia csökken: nem az összes kölcsönhatás fog újraépülni. Azt a kérdést azonban még nem jártam körbe részletesen, hogy van-e preferencia? A gyenge, vagy az erős kölcsönhatások fognak eltűnni előbb, ahogy a hálózat egyre jobban karcsúsodik?

A parszimónia elve szerint az erős kölcsönhatásoknak kellene eltűnnie, hiszen az ő kiépítésükhöz szükséges több energia. Ugyanakkor az alacsony energián a rendszer növekedő kompaktságát éppen az erős kölcsönhatások szolgálják jobban. Egy ezt alátámasztó példaként, hadd ismételjem meg azt a tapasztalatot, hogy magas szintű munkanélküliség, vagy más folyamatos stressz esetén a gyenge kapcsolatok el fognak tűnni, és a stressznek kitett embercsoport egyre fokozottabban az erős kölcsönhatásaira támaszkodik (Granovetter, 1983). Valószínű, hogy növekvő stressz esetén a fókusz

⁷Az ötletekért köszönettel tartozom Száraz Péternek.

eloszlás mellett a kötése erősség eloszlás is fázisátmenteket produkál. Ezekben az átmenetekben minden bizonnyal az erős kölcsönhatások egyre nagyobb szerepet játszanak. A hálózat, ahogy az élet viszontagságai megedzik, egyre keményebb lesz. A kötése evolváltnak, és a versenyben csak a legellenállóbbak maradnak fenn. Valószínű, hogy a hálózatok skálafüggetlen foksám és kötése erősség eloszlása egyszerre születik és egyszerre is hal meg.

4.5. Szinkronjaink

A hálózatok rengeteg trükköt találtak ki arra, hogy túléljék Zavar úr, Zavar úr kedves családja és klubtársai gyakori látogatásait. Relaxáció, a hálózat topológiája, és – ha minden kötél szakad – e topológia megváltoztatása mind-mind a törzsháló megőrzését, azaz a hálózat életben maradását szolgálja. A relaxációt a kisvilágság, a hibátűrést a skálafüggetlenség biztosítja. Egy fontosabb hálózattulajdonság maradt ki a felsorolásból: az egymásbaágyazottság. E fejezetben e hálózatjellemzőnek a Zavarokkal való összefüggéseit próbálom meg megkeresni.

Ahhoz, hogy az egymásbaágyazottság szerepét a hálózat zavaaraiban megértsük, érdemes feltenni újra a részben már érintett kérdést: miért baj az, ha Zavar úrnak utazása közben meg kell állnia? Ahogy említettem ekkor annak a hálózatelemnek, ahol Zavar úr megrekedt, tartósan nagy és szét nem oszló energiát kell elviselnie. Az adott elemben azonban egy alhálózat bújik meg. A főhálózat adott elemére tapadó energia ezt az alhálózatot fogja károsítani.



Miért nem hat az átmeneti zavar? Érdemes ezen a ponton újrafogalmazni a korábban előkerült kérdést: miért nem veszi észre az alhálózat, ha a főhálózatban rajta egy nagy energia gyorsan átsuhan? Mi változik meg azzal, ha az energia ott időzik az alhálózatban? Miért tud ekkor, és úgy tűnik csak ekkor kapcsolatba lépni vele?

Az alhálózatok úgy tűnik a válaszaikban egy eddig még kellőképpen fel nem derített „késedelemmel”, „lustasággal” bírnak. Nevezhetjük ezt akár menekülési időablaknak is. Az alhálózatok Zavar úr vendégeskedését a menekülési időablaknál rövidebb ideig még elviselik. (Zavar úr kb. olyan szívesen látott vendég lehet, mint a viccbeli anyós. “Milyen hosszú ideig akar a mama nálunk maradni?” – kérdezi a vő – “Ó! Amíg nektek jól esik!” – válaszol az anyós – “De mama! Ne tessék ezt tenni velünk! Nem mehet el, mielőtt legalább egy kávéval meg ne kínáltam volna!”) Ha Zavar úr tovább marad, mint a viccbeli Mama, akkor az alhálózat bajba kerül. A baj egyik eléggé általános eseteként az alhálózat ennek következményeként lekapcsolódik a többi alhálózattal korábban elért szinkronicitásról.

Szinkronicitás? Az meg mi? A szinkronicitást Christopher Huygens fedezte fel, amikor 1665-ben beteg volt. Ahogy Huygens az ágyban feküdt, azokat az ingaórákat nézte a falon, amelyeket nemrég készített. Ezeket az órákat ő találta fel azért, hogy elnyerje velük az angol Royal Society mesés díját, amelyet az első olyan óra megalkotásáért tűztek ki, amelyik nagy pontossággal tudja mérni az időt a tengerjáró vitorlásokon. “*Minden tiszteletem az angoloké. Nagyon sokat adtak a világnak, De azért ez már*

sok! Nem lehet egy ország ennyire a szokásai rabja, hogy azon görcsölgjön, hogy az ötórás teáját vajon még a tenger közepén is halál precízen ötkor, vagy esetleg már 4 óra 59 perckor kezdi el hörpölgetni!" Keckeckém, a helyzet nem volt azért ennyire egyszerű. Ha pontosan tudod a Greenwich-i időt (vagy bármi más pontos időt a Föld valamelyik pontján) akkor tudod azt a hosszúsági fokot is, ahol éppen vagy.⁸ Így az angol királyi tengerészet számára létfontosságú volt egy kronométer, mert csak így tudták meghatározni precízen azt, hogy hol is hagyták ott a mesés kincseket az előző útjuk során.

Térjünk vissza Huygens-hez. Beteg volt, amikor otthagytuk. Ami azt illeti, még mindig beteg, sőt! Ebben a pillanatban már éppen azt hiszi, annyira felment a láza, hogy hallucinál. Ugyanis ahogy nézegeti az órákat, azt veszi észre, hogy a korábban nem szinkronban tik-takkoló két óra, egyre inkább szinkronba kerül, és egy idő után már teljesen együtt jár. A nemjóját! Huygens teljesen izgatott lesz, és betegségét feledve kiugrik az ágyból. Átállítja az egyik órát és vár. Kis idő múlva a szinkron megint teljes lesz. Huygens ide-oda állítgatja az órákat egymáshoz képest a falon. Sok-sok kísérlet után a most már tényleg beteg Huygensben megszületik a felismerés: nem valamilyen csoda, hanem a fal maga kell ahhoz, hogy a két óra szinkronba kerüljön egymással. Ahogy a két óra külön fázisban tik-takkolt, vékony kis remegések közvetítődtek a falon át, és közelítették egymáshoz az órák oszcillátorait. Huygens nagyon boldog. Még azon melegében megírja friss felfedezését a Royal Society-nek (Huygens, 1665).

Az akadémikusok gyülekezete március 8.-i ülésén vitatja meg Huygens levelét. Idézet a jegyzőkönyvből "néhány Tag erőteljes kétségeit fejezte ki azon vonatkozásban, hogy a Huygens úr által feltalált új szerkezetű órák valaha is alkalmasak lesznek-e arra, hogy a tengerjáró vitorlásokon mutassák a pontos időt, ha egy, szinte észrevehetetlenül kicsiny hatás ennyire meg tudta változtatni a mozgásukat" (a Royal Society ülésének hiteles jegyzőkönyve, 1665. március 8.). Az ingaórákért Huygens soha nem kapta meg a Royal Society mesés díját. A konkrét cél szempontjából jogos észrevételen Huygens nagyon elkeseredett, és soha többet sem az ingaórákkal, sem a szinkronicitással nem foglalkozott (Strogatz, 2003).

Hála Istennek, mások nem adták fel ilyen könnyen. Steven Strogatz egy gyönyörű összefoglalását adja a legkülönbözőbb oszcillátorok szinkronizációjának „Sync” című, kiváló könyvében (Strogatz, 2003). A kémiai oszcillátorok, mint pl. a Kiss és mtsai (2002) által tanulmányozott 64 nikkkel elektród, szinkronban tudják a feszültségüket változtatni, átmenetileg szinkronizált idegsejtek segítik az emlékeink megőrzését (Fell és mtsai, 2001) és a napi ritmus (Ogle, 1866) jobb vagy rosszabb megőrzése bárki által tanulmányozható, aki egy transzkontinentális repülőút után az időeltolódással küzd éppen. A szentjánosbogarak a felvillanásaikat (Buck, 1938), a tücskök a ciripelésüket (Walker, 1969), a nézőközönség a tapsát (Néda és mtsai, 2000) a látás és hallás útján felfogott jelekkel képes szinkronizálni. Tartósan együtt élő asszonyok szinkronizálják a menstruációs ciklusukat (McClintock, 1971). A kanadai nyúl és hiúz állomány tagjai még ennél is ügyesebbek. Az ő szaporodási ciklusuk több millió négyzetkilométeren tud szinkronizálódni egyszerre (Blasius és mtsai, 1999). Végző példaként hadd hozzam

⁸A hosszúsági fok meghatározásához a Nap állásából (mondjuk délben) leolvasható helyi időt kell összehasonlítani a kronométer által mutatott (másutt) pontos idővel. A szélességi fokok pedig a nap állásának magasságából számolhatók.

London Millennium Bridge esetét. A merész tervezésű, 690 tonnás hidat 2000. június 10.-én adták át. Pár óráig. Ugyanis az ünneplő tömeg, ahogy keresztülhaladt a hídon oldalirányban néhány olyan apró, szemmel nem is látható mozdulatot tett, amely a szellőkések hatására többé-kevésbé szinkronban volt. Ennek hatására a híd lengése is szinkronba került és a hajlékony híd olyan viharos kilengéseket produkált, ami pánikot idézett elő. A hidat a megnyitás napján lezárták (Strogatz, 2003). A legutolsó példa ellenére elmondhatjuk, hogy a szinkronicitás örömet okoz. Biztonságosabbnak, stabilabbnak érezzük magunkat, ha szinkronban vagyunk. (Itt a többes szám első személy magunkon kívül a szentjánosbogarakra, a tücskökre, nyulakra, hiúzokra és még a nikkell elektródokra is utal: mint tudjuk, közeli rokonaink valamennyien...)



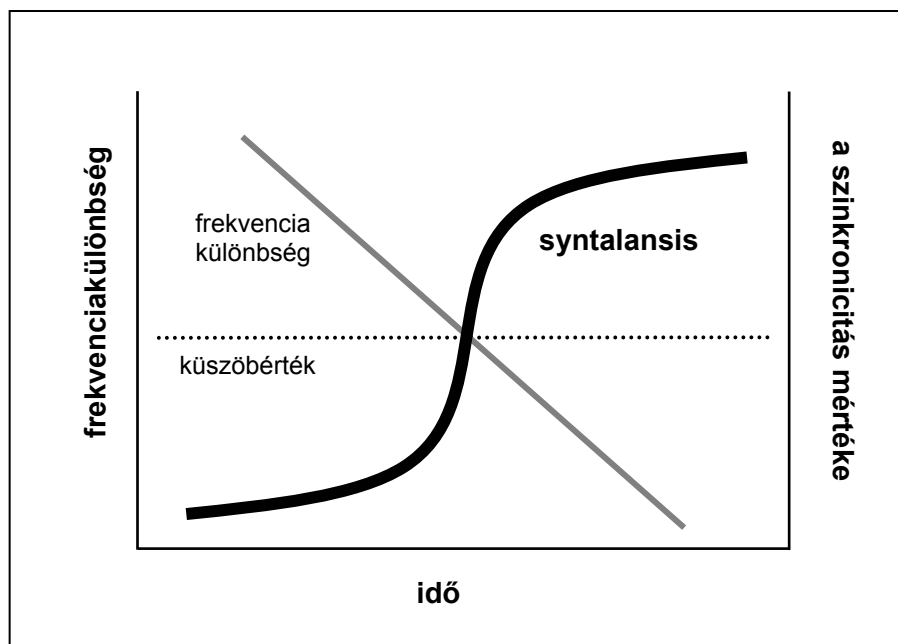
Zene és tanulás: másodsor. Egy újabb szinkronhatás?

A 4.1. fejezetben említettem, hogy a jó zene – ami itt nem minőséget, hanem pusztán azt jelzi, hogy az adott zenének skálafüggetlen, a rózsaszín zajra emlékeztető szerkezete van – segítheti a tanulási folyamatot. Akkor nem tudtam semmi magyarázatot adni a feltevésre. Ami azt illeti, most se tudok... De a helyzet nem teljesen reménytelen, mert van egy ötletem. A külső zaj skálafüggetlen szerkezete segítheti az idegsejtek szinkronizációját, ami viszont bizonyítottan segíti az emléknymok megőrzését (Fell és mtsai, 2001). Ha a legközelebb az Olvasó elfelejt valamit: kezdje el ütögetni a fejét, ahogy felejthetetlen sárga micimacink tette a rajzfilmekben: Gondolj! Gondolj! Fejvakargatás is megteszi. A mellett, hogy felélénkül a vérkeringés, a ritmikus külső zaj még a szinkronicitást is segítheti... *„Péter, figyelmeztetlek, ha ehhez még hozzátesszed, hogy a T. Olvasó tanulja meg skálafüggetlenül ütögetni a fejét, akkor ez lesz az a pont, ahol 68-adszor a kukába fogják belevágni a könyvedet...”*

A szinkronizáció hálózati tulajdonság nemcsak abból a szempontból, hogy oszcillátorok hálózatát igényli ahhoz, hogy létrejöjjön, hanem abból a szempontból is, hogy számos olyan tulajdonsága van, amely hasonlatos a hálózatok alaptulajdonságaihoz. Engedtessék meg nekem két példa a nagyon sok lehetségesből.

- A hálózatok által mutatott perkolációs küszöbhez hasonlóan az oszcillátoroknak is van fázisátmenete. Ha az egyes oszcillátorok rezgési ideje közötti különbséget csökkentjük, egy idő után megdöböntő esemény szemtanúi lehetünk: az addig különféle fázisban lévő oszcillátorok hirtelen, varázsütésszerűen szinkronba kerülnek egymással és kialakul a „syntalansis” állapota (8. ábra; Winfree, 1967). A szinkronizáció az egymásbaágyazódáson alapul. Az alhálózatok által fenntartott oszcillátorok szinkronja csak a főhálózat kapcsolatai miatt tud kialakulni. Az alhálózatok oszcillátorai ugyanakkor minden hálózati szinten fellelhetőek. A sejtek szinkronja az agyunkban a felismerést segíti elő; a szervecskék szinkronja a piócák és az orsóhalak úszásához, valamint az emésztésünket elősegítő perisztaltikus mozgásokhoz nélkülözhetetlen, és végül az élőlények is szinkronba kerülhetnek egymással, ahogyan azt korábban már bemutattam (Bressloff és Coombes, 1998; Strogatz, 2003). A szinkronizáció a modularitással is együtt jár: a szinkron sok esetben a főhálózatnak csak bizonyos részeire, moduljaira terjed ki (Winfree, 1967).
- A szinkronizáció önszerveződő kritikus állapothoz vezethet. A kb. 10.000 pacemaker sejt a szívünk szinuszcsoomójában hatékonyan modellezhető az oszcillátorok egy olyan hálózatával, ahol mindegyik elemi oszcillátor

folyamatosan növeli a membránpotenciálját, és miután elért egy küszöbértéket, kisül. Amikor az egyik oszcillátor kisül, az összes szomszédja egy kicsit depolarizáltabbá válik. Mirollo és Strogatz (1990) megmutatták, hogy az oszcillátorok ilyen elrendezése éppen olyan lavinák keletkezéséhez vezet, mint amilyeneket az önszerveződő kritikus állapot esetében a 4.3. fejezetben már megfigyelhettünk. (Érdekes módon a jelenség fordítottja is igaz: a szinkronizáció gátlása gátolja a relaxációt, és az önszerveződő kritikus állapot, valamint az ezzel együtt járó lavinák kialakulásához vezet; Ponzi és Aizawa, 2000).



8. ábra. A „syntalansis”: a szinkronicitás fázisátmenete. Az ábrán azt mutatom be, hogy egy hálózat elemi oszcillátorai egymással egy igen gyors átmenet révén is szinkronba kerülhetnek, ha az oszcillátorok eredeti rezgésidejének különbsége egy küszöbérték alá csökken. A kialakuló teljes szinkron első leírója, Winfree (1967) „syntalansis”-nak nevezte el. Az ábrán a szürke vonal a frekvenciakülönbséget, a vastag fekete vonal a szinkronicitás mértékét illusztrálja.

A szinkronizáció mértéke függ a hálózat tulajdonságaitól. Minden olyan sajátosság, amely a hálózat kapcsolatainak a számát bővíti, a szinkronizáció növekedéséhez vezet. Watts és Strogatz (1998) nagyjelentőségű munkája mutatta meg, hogy a kisvilágság igen kedvez a szinkronizáció kialakulásának. Később kiderült, hogy a kisvilágság nem csak hatékonyan, hanem *rendkívül* hatékonyan segíti az alhálózatok oszcillátorainak szinkronizációját (Barrahona és Pecora, 2002). A kisvilágság lecsökkenti a szinkronban részt vevő oszcillátorok extremitásait, és így az oszcilláció kialakulása mellett fennmaradásának is igen fontos segítője (Guclu és Korniss, 2003). A skálafüggetlenség is segít a szinkronteremtésben. Ugyanakkor a nagyon sok kapcsolatot felhalmozó csomópontok jelenléte nem szerencsés, mert az e csomópontokban lévő oszcillátorok képtelenek minden, velük kapcsolatban álló oszcillátorral egyszerre szinkronizálódni, és így könnyen túlterheltekké válhatnak (Nishikawa és mtsai, 2003).



Jung, mint a többszintű szinkron lehetséges

esete. Az egymásbaágyazódás és a szinkron kapcsolata elvezet a szinkronizáció egy eléggé közismert, de a tudományos közvélemény által (joggal) igen sok fenntartással kezelt esetéhez. Carl Jung 1969-es híres (vagy talán inkább hírhedt) esszéje nem egyértelműen az oszcillátorok szinkronicitásáról szól. A jungi értelemben vett szinkronicitás az oksági viszonyok, a „hatást eredményező állandó összekapcsoltság” ellentéte, azaz „összeköttetés, azonosság vagy jelentés által létrehozott időszakos összekapcsoltság”. A Jung által leírt sok-sok példa közül itt csak a beteljesült álmokat és imádságokat érinteném.⁹ Ha a szinkronicitást a különböző szintű hálózatok oszcillátorainak szinkronjaként értelmezzük, jó néhány jungi példa értelmezhetővé válik. Ehhez fel kell tételeznünk azt (kapaszkodj Kecec, most jön a kanyar...), hogy egy adott hálózati szint igen erős szinkronizációja képes az eggyel feljebb és lejjebb lévő szintek szinkronizációját is elősegíteni (az ilyen szinkronizációt a továbbiakban többszintű szinkronnak fogom nevezni). Így tehát a Jung által említett beteljesült álom a távoli szigeten történt katasztrófáról úgy is felfogható, mint egy szinkronterjedés a felső hálózat szintjéről az alsóra. Amikor a katasztrófa bekövetkezett, a társadalmi hálózat szintjén jó néhány ember szinkronba került (egyidejűleg megsebesült, meghalt, gyászolt, stb.). Ez a kiterjedt szinkron elősegíthette számos érzékeny személy agysejtjeinek szinkronját – ami a megfelelő álmok megjelenéséhez vezetett. (Ha a beteljesült álom *jövőidejű* eseményről szól, akkor még ilyen laza-agyú emberként is természetesen felteszem mind a két kezem, és megadom magam. Fogalmam sincs, ezen utóbbi szinkron hogyan magyarázható.) Fordítva: a beteljesült imádság esetén a kezdeti lökést az alsó szint (néhány neuron) igen intenzív szinkronja jelenti, amely elkezdhet terjedni felfele, és a felső szintek szinkronját válthatja ki. (Nagyon izgalmas lenne megmérni egy tiszta szívvel, nagy átéléssel, és egy kötelességszerűen elmondott ima közben az imádkozó személy idegsejtjeinek szinkronsintjét.) Hogy ebben az esetben mi az ima hatására szinkronba kerülő főhálózat pontos neve? Ez a kedves Olvasó hitbéli meggyőződéstől függően sokféle lehet... *“Péter, ez volt az a pont, amikor túl messze mentél! Te komolyan azt hiszed, hogy egy ilyesmi leírása után veled bármelyik kutató kollégád még a jövőben is szóba áll? Nehogy azt merd mondani, hogy megálmotad, mert akkor itt hagylak.”* Kecec, nézz körül!! Látod a három vidorkát a szövegrész elején? Olvasd el megint a bevezetést. Azt írtam, hogy a „háromvidorkás részek álmok csupán”. Ez esetben éppen jungi álmok... Aki ezen a részen nagyon felidegesítette magát, attól türelmesen elnézést kérek, és azt tanácsolom neki, hogy a könyv hátralévő részében a háromvidorkás részeket gondosan kerülje el. De azért előtte még hadd jegyezzem meg, hogy nemrég az agyi elektro-enkefalogramok (EEG-k) fokozott szinkronját sikerült kimutatni a meditáció közben (Aftanas és Golocheikine, 2001; Orme-Johnson és Waynes, 1981). Természetesen ez semmit nem bizonyít a többszintű szinkron létezéséből (senki nem tud néhány hálózati szinttel feljebb lévő EEG-t mérni...), mindazonáltal mutatja azt, hogy az intenzív tudatállapotok valóban az idegsejtek fokozott szinkronizációját idézik elő. Az utolsó megjegyzésem Mozartról szól. Kecec, szerinted tudták Mozart idegsejtjei, hogy azért vannak éppen szinkronban, mert Mozart a Requiem-en dolgozik? Továbbmegyek. Szerinted tudta Mozart, hogy a Requiem szinkronban lesz a saját halálával? A hálózatok különböző szintjei közötti kapcsolatok feltérképezése rendkívül nehéz. Leginkább az alhálózat szintjéről. Türelmesnek kell lennünk bizony a Mozart idegsejtjei által kitalált magyarázatokkal... Remélem, meggyőztelek arról Kecec, hogy neked is türelmesnek kell lenned az általam adott magyarázatokkal. Megígérem: ha valaha mondasz nekem egy példát az alsó szintről induló többszintű szinkronra – én is türelmes leszek veled. (Azért az Olvasót arra kérem, hogy napi egynél többet lehetőleg ne küldjön ezekből a példákból a bevezetés végén található email címre...)

⁹Itt szeretném megjegyezni, hogy a Jung által említett többi példa (különösen Jung igen kiterjedt kísérletezése az asztrológiával) sokkal nehezebben magyarázhatóak a többszintű szinkronnal, és sokkal nehezebben emészthetőek egy tudományos gondolkodásmódon nevelkedett ember számára (ma még...).



Első találkozásom a többszintű szinkronnal.

„Péter, ha itt a beteljesült álmaidat kezdéd el listázni, én komolyan elmegyek.” Ne aggódj, Kecec, attól tartok ez az álmom soha nem fog beteljesülni... Csak azért illesztettem be ezt a részt, hogy elmagyarázzam, miért szerethetem ennyire ezt a meglehetősen merész elméletet. Amikor négy éves voltam, fülgyulladásom volt. A roppant fájdalom közepén egy mentő ötlet támadt az agyamban: van annak értelme, hogy nekem szenvednem kell. Valaki egy szinttel feljebb valami nagyon szépet gondol ki éppen, ami bizony kemény munka, és nekem nagy fájdalmat okoz. Látom Kecec, hogy ezzel megint kiborítottalak. Hadd mondjam el neked, hogy az elképzelés sikeres volt! Amikor ezt kitaláltam, a fájdalom azon nyomban alábbhagyott. Nem csoda, hogy emlékszem az ötletre még ma is.

Idáig azt tekintettük át, hogy hogyan fejlődik ki a szinkronicitás. Kiderült, hogy a főhálózat egy sor nagyon fontos tulajdonsága, így a kisvilágság és a skálafüggetlenség mind segíti az alhálózatok szinkronjának a kialakulását. Még az egymásbaágyazottság egy igen ezoterikus példáját is megismertük a többszintű szinkron lehetőségének példáján. Az összes eddigi példában a szinkron vagy létezett, vagy nem. Felmerülhet a kérdés: van átmenet? Vannak a szinkronizációnak fokozatai? Igen, a szinkronnak alapvetően három szintje értelmezhető. A leggyengébb szinkron akkor jön létre, ha a frekvenciák válnak azonossá. Valamivel erősebb szinkron keletkezik akkor, ha a frekvencia mellett a fázis is szinkronba kerül. A szinkron akkor válik teljessé, ha az amplitúdók is azonosak lesznek. Hogyan lehet elérni a szinkron különböző szintjeit? Érdeemes visszaemlékezni Huygens-re, és a falra. Valóban, bármilyen szinkron létrejöttéhez a két oszcillátornak egymással valamilyen kölcsönhatásba kell kerülnie. Felmerülhet a kérdés: milyen erősnek kell lennie ennek a kölcsönhatásnak optimális esetben? „*Sejtem mi fog jönni megint...*” Igazad van, Kecec. Gyenge kapcsolatok jönnek megint.

Erős kölcsönhatások teljes, azaz amplitúdóra is kiterjedő szinkront fognak létrehozni. A gyenge kapcsolatok által létrehozott szinkron azonban részleges marad, és legfeljebb csak a fázis szinkronjára terjed ki (Blasius és mtsai, 1999). „*Péter, nem tudom nem megállapítani, hogy a gyenge kapcsolataid végre egyszer lemaradtak valahol.*” Kecec, töröld le a kárörvendő mosolyt az arcodról. A gyenge szinkronizáció nem okvetlenül jelent gyenge segítséget. A szinkronizáció igen sok híres modellje, mint például a félvezetőkre jellemző Josephson-hatás, a Winfree model, vagy a Kuramoto model mind-mind gyenge kapcsolatokat használ a szinkronizáció elérésére (Ariaratnam és Strogatz, 2001; Feynman és mtsai, 1965; Strogatz, 2003; Winfree, 1967). Liu és mtsai (1997) a hörcsögök belső óráját vizsgálták. Az órát alkotó 38 „órasejt” oszcillációi meglepően eltérőek voltak. Mégis: az oszcillációk közötti gyenge kapcsolatok az egész rendszer nagyfokú stabilitásához vezettek el. A csatolt oszcillátorok jel/zaj-rezonanciája (azaz az a 4.1.-es fejezetben bemutatott jelensége, ahol a zaj segíti a gyenge jel felismerését) is akkor érhető el a legjobban, ha az oszcillátorokat gyenge kapcsolatok kötik össze (Gao és mtsai, 2001; Lindner és mtsai, 1995; 1996).

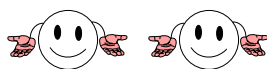
Összefoglalásként elmondható, hogy nagyon sok olyan példa van, ahol az egyedi oszcillátorokat gyenge kapcsolatok kapcsolják össze, és ezek segítik a szinkronjuk kialakulását. Van-e a gyenge kapcsolatoknak itt bármilyen kitüntetett szerepe? Már Enright (1980) viszonylag korai munkája felvetette, hogy az oszcillátorok

szinkronizálódása stabilitásuk növekedéséhez vezet. A későbbi vizsgálatok kiderítették, hogy a szinkronnak van egy szintje, ami a stabilitásnövekedés szempontjából optimális (Yao és mtsai, 2000). Ha erős kölcsönhatások teljes szinkront hoznak létre, ez kisebb stabilitást jelent, semmint ha gyenge kapcsolatok közvetítésével csak részleges szinkron keletkezik.

Miért alakul ki ez az “extra stabilitás”? A válaszért hadd menjek vissza a kiindulóponthoz, Zavar úrhoz megint. Strogatz és mtsai (1992) megmutatták. Hogy amikor az oszcillátorok frekvencia eloszlása csak egy meghatározott frekvencia intervallumra korlátozódik, a szinkronicitás felbomlása az exponenciálisnál lassabban következik be. Más szavakkal megfogalmazva ugyanezt: a részleges szinkronizáció jobban összetartja az oszcillátorokat. Ha Zavar úr egy utazó hullámnak álcázza magát, csak azok az oszcillátorok tudnak csatolva maradni, amelyek gyengén csatoltak voltak korábban (Bressloff és Coombes, 1998). Ugyanannak a jelenségnek egy harmadik példaként a fázisbeli szinkron (amely egy tipikusan gyenge kapcsolatok által kiváltott szinkronfajta) különösen ellenállónak bizonyult Zavar úr támadásaival szemben (Blasius és mtsai, 1999).

A gyengén csatolt oszcillátorok gyorsabb relaxációra képesek. Természetesen a gyengeségnek is vannak határai. Rendkívül gyenge csatolás semmilyen szinkronizációt nem képes előidézni. Ezt figyelembe véve kimondható az általános tanács: ha tényleg stabil oszcillációs szinkront, a Winfree-féle (1967) syntalansis-t szeretnéd előállítani, használj gyenge kapcsolatokat az oszcillátorok összekötése során. Adódik itt még egy tanács: ha gyors relaxációt biztosító szinkront szeretne az ember a többiekkel, nem árt, ha távol tartja magát bármilyen teljes azonosulást követelő autoritáriánus csoporttól. A 11.3. fejezetben be fogom mutatni, hogy stressz-hatás után a psziché rendeződését (a feszültség oldását) az informális csoportok sokkal jobban segítik, mint a formális csoportok (Kunovich és Hodson, 1999). Ez is erre a jelenségre vezethető vissza minden bizonnyal.

Miért szeretjük a szinkronicitást? A szinkron örömet okoz. Hogy őszinte legyek fogalmam sincs, mekkora örömet érezhetnek a nikkell elektródok, az idegsejtjeink, a szentjánosbogarak, vagy a tücskök, amikor egymással szinkronba kerülnek. Gondolom, azt is nehéz lenne korrektül megmérni, hogy a nők egy csoportjának tagjai vajon érzelmileg biztonságosabban érzik-e magukat, ha menstruációs ciklusuk szinkronba kerül. Ugyanakkor, ha a nézők ütemesen tapsolnak (Néda és mtsai, 2000), ha ezernyi ember a stadionban együtt hullámszik (Farkas és mtsai, 2002), a tömeg együtt éneklő a himnuszt, vagy ugyanabban az ütemben ütögetem a térdem a parkban, mint ahogy a kutyám fut – a saját példámon is tanúsíthatom, hogy mind-mind roppant nagy örömet okoz.



Szinkronizált nevetésrengés.

Van egy másik példám az örömteli szinkronra: a nevetés. A nevetés meglehetősen nagy örömet okozó cselekvés. Életünk megszámlálhatatlanul sok óráját töltjük el azzal, hogy olyan alkalmakat keresünk, ahol nevethetünk, vagy olyan cselekvésekben veszünk részt, amelyekkel másokat nevetésre készíthetünk (Dunbar, 2005). Ezzel nem vagyunk egyedül: még a patkányok is képesek a

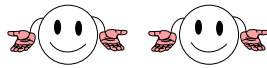
nevetésre – a patkánykacaj az ultrahang tartományba esik (Panksepp és Burgdorf, 2000). Fel szeretném vetni a gondolatot, hogy a nevetés tulajdonképpen egy szinkronizált önszerveződő kritikus állapot. Mielőtt nevetni kezdünk, általában egy sor információ ér bennünket, ami fokozódó feszültséget kelt. Gondoljunk itt például a pontosan ismétlődő bonyolult események feletti megdöbbenésünkre, ahol a csodálkozás által keltett feszültség végső soron nevetésben csillapodik, vagy a nyilvánvaló abszurditás feletti kognitív megdöbbenésünkre, ami szintén nevetésre ingerel. A nevetés maga kétségtelenül egy relaxációs jelenség. Igen érdekes lenne megvizsgálni, hogy a nevetés hossza és intenzitása vajon skálafüggetlen jelleget mutat-e. Ugyanakkor nagyon ritkán nevetünk egyedül. A nevetés ragadós. A nevetés egy igen jó példája a szinkron iránti szeretetünknek.

Kétségtelen tehát, hogy szeretjük a szinkronicitást. Miért? A nevetés-példa után elég könnyű a kérdésre megadni a választ. A nevetés segít abban minket, hogy hatékonyabb relaxációt érzünk el. Más szavakkal: a nevetés feszültségoldó. A gyors relaxáció stabilizálja a rendszert. Érdekes itt emlékeztetnem a 4.2. fejezet végső mondatára: „a folyamatos relaxációért vívott küzdelem az élet maga.” A szinkronizáció segíti a relaxációt. A relaxáció összekötődött bennünk az örömmérettel azért, hogy folyamatosan keressük ezt az életünkhöz olyannyira szükséges elemet.¹⁰

Itt az idő, hogy az Olvasó leüljön, lazuljon el, igyon egy korty kristálytiszta vizet, vegyen egy mély levegőt, és elgondolkozzon. Hát nem szép ez megint? Ahhoz, hogy élhessünk, folyamatosan energiát kell felvennünk. Ez azonban állandóan újabb és újabb feszültséget generál, amibe akár bele is pusztulhatunk. A feszültségeket folyamatosan el kell tudnunk vezetni. Nem vagyunk azonban egyedül! A többiek segítenek. Ha szinkronba tudunk kerülni embertársainkkal, ez biztonságot ad mindannyiunknak. Ha bármelyikünkben feszültség támad, a szinkron miatt az egész közösség feladata a levezetése, nem csak a szerencsétlen áldozaté. Életünk legszebb pillanatai és érzései: az öröm, a nevetés, a boldogság mind-mind a szinkronhoz és a feszültség levezetéséhez kötöttek. Ez a jutalmunk azért, ha megtanultuk az egyik legáltalánosabb törvényt, amit a természet a fennmaradás érdekében megalkotott.

“Péter! Nem gondolod, hogy ideje az általad ennyire hirdetett tanokat a gyakorlatba is átültetni, abbahagyni ezt az örökös írást MOST, és elmenni relaxálni egyet? Rám is rám férne...” Kecec, valahol nagyon megható, hogy ennyire aggódsz az egészségemért, de ez most ünneprontás volt. Én itt ülök, előttem egy pohár kristálytiszta víz, olyan a lelkem, mint a templomban, te meg lerángatsz a földre. Ne szomorodj el, semmi baj nincs, ezért tartalak. Kérdésedre visszatérve hidd el, annyi izgalmas gondolat mozog a fejemben, hogy számomra az a relaxáció, ha ezeket le tudom írni. Ha nem tehetném, abba úgy hiszem, bele is bolondulnék. Hálás köszönettel tartozom a kiadónak, és végső soron az Olvasónak, hogy ettől megmentettek.

¹⁰Mivel a relaxáció csak egy előre nem mindig kiszámítható feszültség eredményeként következik be, a szinkronkeresés biztonsági óvintézkedésnek is felfogható. „Majd, ha szükségem lesz egy gyors relaxációra, mert itt lesz a bajt okozó feszültség, akkor könnyebben fogok tudni relaxálni, hiszen szinkronban vagyok a társaimmal.” A relaxáció, az öröm és a stabilitás összefüggéseire a könyv zárófejezetében még vissza fogok térni.



Az emberi szinkron csoportjellemző

tulajdonsága. A szupravezetés, a szívverés, a perisztaltikus mozgások, és a gondolataink mind-mind a szinkronizáció által kiváltott, csoportjellemző (emergent) tulajdonságok, amelyek a főhálózat szintjén jelennek meg. Kiválóan fel tudjuk ismerni a csoportjellemző tulajdonságot, ha az őt okozó hálózat elemei molekulák vagy sejtek. Mi a csoportjellemző tulajdonság, ha rólunk van szó, emberekről? Mi történik tulajdonképpen akkor, ha az emberek szinkronba kerülnek? Ha a foci világbajnokság döntőjében a hálóba gurul a labda, az emberek százmillióból kiszakadó üvöltés-szinkron vajon azt jelenti, hogy Gaia-nak épp egy óriási vicc jutott az eszébe, amit még a Kambriumban hallott?

A legutóbbi néhány fejezetben nagyon sok jó tanácsot kaptunk, hogyan őrizhetjük meg a hálózatainkat. Megtanultunk különbséget tenni jó és rossz zaj között. Most már nagyon világosan felismerjük azt a veszélyt, amit Zavar úr megérkezése jelent, különösen, ha kedves családját, vagy a Zavarklub tagjait is magával cipeli. Tanulmányoztuk a lavinákat, a hálózatkatasztrófákat, a hálóváltásokat és végül a szinkron jelenségét. Még Gaia vicceihez is eljutottunk. Mit kezdünk ezzel a rengeteg tudással? Hogyan lehet olyan hálózatot tervezni, ami ellenáll? A következő fejezet erről fog szólni.

4.6. Hálózatstabilizálás. Mérnökök vagy barkácsolók?

A hálózattervezés és hálózatstabilizálás mérnöki feladat. A hálózatok stabilitását pl. negatív visszacsatolással érhetjük el, ami egy jellemző eleme a mérnöki rendszereknek. Valóban, az optimalizált mérnöki hálózatok (amelyek integrált visszacsatolásokkal vagy még általánosabban: magasan optimalizált toleranciával rendelkeznek) jelentős stabilitást mutatnak. A modern gépek igen magas fokú szervezettséggel rendelkeznek. Egy Boeing 777-ben százötvenezer különböző alrendszer található, amelyeket csaknem ezer különböző számítógép vezérel. Egy ilyen repülőgép végső tesztelése minden percben annyi adatot termel, mint amekkora a teljes emberi genom (Carlson és Doyle, 2002; Csete és Doyle, 2002).

Ugyanakkor bonyolult gépeink messze nem az első olyan bonyolult alkotások a Földön, amelyek „jelentős stabilitást mutatnak”. Mi magunk is egészen jó példái vagyunk az olyan bonyolult rendszereknek, amelyek meglehetősen stabilak, és némileg korábban fejlődünk ki, mint a Boeing 777. Francois Jacob (1977) az evolúciót barkácsolóként írta le “aki nem tudja kristálytisztán, mit is szeretne előállítani, de felhasznál mindent, amit a környezetében talál” és „a kezébe kerülő anyagoknak egészen váratlan funkciót is ad, hogy egy új tárgyat készítsen el”. Az evolúció nem optimalizálja előre az elkészítendő alkotást, nem készít tervrajzot sem, hanem addig illeszti egymás mellé a különböző darabokat, amíg végül is alkalmasakká nem válnak a feladat elvégzésére (Maynard-Smith és Szathmáry, 1995). Ahogy Steven Rose írta a “Lifelines” (1997) c. könyvében: “A múlt terheit mind magunkkal cipeljük.”

Melyek a mérnöki és az evolúció által összebarkácsolt rendszerek közös tulajdonságai? Csak néhányat felsorolva: modularitás, robusztusság, és ezzel egyidejűleg: kaszkádzavarok, hibalavinák (Carlson és Doyle, 2002; Csete és Doyle,

2002). Ugyanakkor a kétféle rendszerépítő stratégia között számos alapvető különbséget találhatunk:

- A mérnöki rendszer az evolvált rendszerrel ellentétben egy megadott feladatra lett optimalizálva, és a kialakítása során nem volt szükség arra, hogy minden egyes elődje szintén optimális kialakítású legyen. Arra sem volt szükség, hogy az egymás után következő változatok csak kevéssé térjenek el egymástól. A megszakított egyensúly elképzelése (Gould és Eldredge, 1993) az utóbbi feltételt enyhítette ugyan az evolúció során, és később jó néhány olyan mechanizmust is sikerült feltárni, amely az evolúciós ugrásokat magyarázni képes (Rutherford és Lindquist, 1998; továbbá a 7.1. és 7.2. fejezetek), de a folyamatosság szintje még mindig egy lényeges különbség a mérnöki és az evolvált rendszerek között.
- A mérnöki rendszerek komplikáltak, míg az evolvált rendszer komplex (Ottino, 2004). A komplikált rendszerek esetén az egyes elemek szétszedhetőek, és újra összerakhatóak megint, és az egész funkciója a részek funkciójából többé-kevésbé kikövetkeztethető. Ugyanakkor a komplex rendszerek esetén (a komplexitás fogalmának részletesebb ismertetését az 5.3. fejezetben fogom megtenni) az egész funkciója a részek funkciójának egy csoportjellemző tulajdonsága, és a legtöbb esetben nem lehetséges egyértelműen következtetni arra, hogy ez mi lehet.
- A mérnöki rendszerekkel ellentétben az evolvált rendszerek integráltak, és a részeit nem lehet külön-külön optimalizálni. Gould és Lewontin (1979) Pangloss-paradigmának hívták azt a gondolkodást, amely az integrált rendszer minden egyes részét külön-külön is optimalizálnak hiszi. Híres írásukban így fogalmaznak “az élőlények integrált egységek, nem különálló részek gyűjteményei.” Bár a mérnöki rendszerek is integráltak, e rendszerekben az egyes részek funkciója jobban körülírt és körülhatárolt, és ez a funkció általában önmagában is elég közel jár az optimumhoz.
- Az evolvált hálózatokban a végső állapotot sokkal több egyedi összeállítással lehet elérni, semmint a mérnöki rendszerekben (Changizi és mtsai, 2002), máshogy fogalmazva: az evolvált rendszerek felépítési kombinativitása (designability) nagyobb (Tiana és mtsai, 2004).
- A mérnöki tervezési folyamat eredményeként elkészült rendszer a legtöbb esetben csak néhány magasan optimalizált paraméterre stabil. Ezzel szemben az evolvált rendszer a paraméterek sokkal szélesebb skálájára optimalizált (Aldana és Cluzel, 2002).
- Végezetül a mérnöki rendszer nem szükségszerűen növekedik. Ezzel szemben az evolvált rendszernek definíciószerűen növekednie kell.



Mi történik akkor, ha egy önszerveződő (skálafüggetlen) rendszer növekedése leáll? A hálózatnövekedés leállítása vajon összefügg-e az öregedéssel és a halállal? Vajon a növekedés lefékezése vagy leállítása mekkora stresszt okoz? Elképzelhető-e hogy ez önmagában kiváltja a 4.4. fejezet hálóátalakulásait? Arra vagyunk-e ítéltetve, hogy a növekedésbe menekülünk a halál elől?¹¹

¹¹A kérdésekért köszönettel tartozom Pató Bálintnak.



Kölcsönhatás erősségbeli különbség a mérnöki és az evolvált rendszerek között. Ahogy a 3.4.-es fejezetben bemutattam, az evolvált rendszerek kötésrendszerében egy folyamatos skálán mindenfajta kötéserősséget megtalálhatunk. A mérnöki rendszereknél a megbízhatóság egy alapvető fontossággal bíró tényező. Két alkatrész vagy kölcsönhatásban van, vagy nem. Valószínűségi, elnagyolt, “majdnem” kölcsönhatások egy mérnöki rendszerben nem fordulhatnak elő. Bár a kölcsönhatás erősségét a kölcsönhatás tartóssága is megszabja, és így a mérnöki rendszerek is szép számmal tartalmaznak gyengén kölcsönható elemeket, a kötéserősségben megmutatkozó különbségek mégis sokkal kisebbek a mérnöki rendszerek, semmint az evolvált rendszerek esetén.

Bár számos példán bemutattam, hogy a mérnöki és az evolvált rendszerek különböznek egymástól, a kétfajta rendszer közötti ellentmondás csak látszólagos. A 10.5. fejezetben meg fogom mutatni, hogyan konvergál a kétféle tervezési stratégia a legmodernebb mérnöki alkotásokban.