

5. A gyenge kapcsolatok stabilizálják a komplex rendszereket

5.1. A gyenge kapcsolatok stabilizálják a komplex rendszereket

Az eddigiekben már számos példát hoztam a gyenge kapcsolatok stabilizáló erejére. Granovetter (1973) klasszikus munkája adta az első példát erre a társadalmi hálózatok terén (2. fejezet). A gyenge kapcsolatok szükségesek a kisvilághoz, skálafüggetlenségük párhuzamosan keletkezik a fokszám eloszlás skálafüggetlenségével, és döntő szerepük van az egymásbaágyazottság kialakulásában (3. fejezet). A gyenge kapcsolatok lecsökkentik a zajt, segítik a relaxációt, gátat vetnek a kaszkádvárnak és stabilizálják az alhálózatok szinkronját (4. fejezet). A 2. Táblázatban foglaltam össze a gyenge kapcsolatok fenti, gazdag szerepkörét.

2. Táblázat. A gyenge kapcsolatok és a hálózatok: előzetes összefoglalás

Sok gyenge kapcsolat	Kevés gyenge kapcsolat
A hosszú távú kapcsolatok kisvilághoz vezetnek, a modulok sűrűn kötődnek egymáshoz.	Az elemek közötti átlagos távolság nagy, a modulok kevésbé kötődnek egymáshoz.
Az alhálózatok szinkronizáltak, kevés fluktuáció tapasztalható.	Az alhálózatok vagy túl mereven szinkronizáltak, ami erős fluktuációkhoz vezet, vagy egymástól függetlenek.
A hálózat kommunikációja jó, a relaxáció akadálymentes, gyors.	A hálózat kommunikációja gátolt, a relaxáció zavart, relaxációs lavinák képződése valószínű.
A zaj gyorsan széteszik, felszívódik a hálózatban.	A hálózat zajos. A zaj a hálózat egyes részeiben felhalmozódhat.
A hálózat integrált , egészként viselkedik.	A hálózat részekre szabdalt , moduljai, alhálózatai halmazaként működik.
A hálózat szétesztja a zavarokat, a hibák izoláltak maradnak, a hálózat stabil .	A zavarok tartósan fennmaradnak, a hálózat hibaérzékeny, a hálózat instabil .

Az előző fejezetekre épülve a 2. táblázat összegezte a gyenge kapcsolatok eddigi szerepkörét, és számos olyan tulajdonságukra mutatott rá, amelyek arra engednek következtetni, hogy a gyenge kapcsolatok fontosak a hálózatok stabilizálásában. A hálózatok felépítési szabályainak általánossága (3. fejezet) és a hálózatokkal kapcsolatos tulajdonságok kiterjesztésének megalapozottsága (lásd pl. a 4.3. fejezetben bemutatott fázisátmeneteket, amelyek a sejtekre és a majomcsordákra egyformán igaznak bizonyultak) ad erőt és biztatást arra, hogy a gyenge kapcsolatok stabilizáló erejét a lehető legáltalánosabban fogalmazzam meg:



A tudományos tisztesség kedvéért a könyv legfontosabb mondanivalóját egy kétséget támasztó vidorka mögött találja az Olvasó. A hátralévő lapokon azt kívánom bizonyítani: **A gyenge kapcsolatok stabilizálják az összes komplex rendszert** (Csermely, 2004; 2005).

A kijelentés értelmezéséhez még nagyon hiányzanak a definíciók. Mikor hívok egy kapcsolatot gyengének, mikor nevezek egy rendszert stabilnak, miért beszélek komplex rendszerekről az eddig megszokott hálózatok helyett, és ha már ezt teszem, mi a definíciója a komplexitásnak? A fejezet hátralévő részében egy indító definíciót adok ezekre a fogalmakra, és a fenti kijelentés erős és gyenge oldalait járom körül. A kijelentést a fenti, általános értelmében (pl. matematikailag) bebizonyítani ma még nem vagyok képes¹. De a könyv végeztével remélem az Olvasó is egyet fog érteni velem abban, hogy ez az egyszerű mondat a világ megdöbbenően sok jelenségét képes megmagyarázni nekünk. A definíciók előtt hadd tegyek néhány megjegyzést a fenti kijelentéssel kapcsolatban.

A gyenge kapcsolatok búja-baja 1.: a gyenge kapcsolatok. A gyenge kapcsolatok olyanok, mint a boton lógó répa a szamár orra előtt: mindig látjuk őket, és sohase tudjuk őket utolérni. A tudományt az erős kölcsönhatások vizsgálatára találták ki. Az erős kölcsönhatásokat mindig meg lehet mérni. Az erős kölcsönhatásokat mindig egyformán lehet megmérni. Az erős kölcsönhatásokból kevés van. Az erős kölcsönhatásokat listába lehet gyűjteni, el lehet nevezni, meg lehet ismerni. Az erős kölcsönhatások tudományosak, izgalmasak. Az erős kölcsönhatások a barátaink. Ezzel szemben a gyenge kapcsolatok soha nem lehet megmérni. A gyenge kapcsolatok mindig mást mutatnak. A gyenge kapcsolatokból tömérdek van. A gyenge kapcsolatok nem lehet listázni, elnevezni, megismerni, számon tartani. A gyenge kapcsolatok nem tudományosak, ragacosak, reménytelenek. A gyenge kapcsolatok az ellenségeink. Az erős kölcsönhatás jó. A gyenge kapcsolat rossz

A gyenge kapcsolatok búja-baja 2.: stabilizálják. Nagy baj van a stabilizálással is. A nem egyensúlyi rendszerek vizsgálata általában nem egyszerű. Ahhoz, hogy megtudjuk, hogy egy egyensúlyi rendszer stabil-e, bele kell rúgni egyet, és utána mérni kell a zajt. A „kutatók” többsége azonban zajt nem mér. Az ilyenfajta kutató éppen hogy harcol a zaj ellen. A zaj nem a mérés tárgya. A zaj: baj. Rendben. Tegyük kerülőutat.

¹Ha az Olvasónak bármi jó ötlete van ezzel kapcsolatban, várom a jelentkezését a bevezetés végén adott email címen!

Ha a zajmérés néhány „kutató” számára hasonlatos az ágytálazáshoz, akkor nézzük meg, hogy mit okoz a nagyobb zaj. Ha az egyedi rendszer zajos, akkor két ilyen rendszer eltérően fog viselkedni. Zaj nélkül egyformák, zajjal különbözni fognak. No persze nem mindegyik és nem mindenhol. A rengeteg stabilizáló mechanizmus (azok a fránya gyenge kapcsolatok!) miatt a legtöbb még így, zajosan is egyforma marad. De több lesz a kivétel. Ó, nagyszerű! Vegyük számba a kivételeket! Megette ezt is a fene. Az „igazi kutató” kivételt nem mér. Az „igazi kutató” Francis Bacon (1620) tanácsát: “aki a természet kivételeit ismeri, jobban le fogja tudni írni a szokásait is” mellőzve csak az átlagot méri. Ha kivételt lát, szégyelli magát. Biztos elszúrtam a kísérletet, azért más. Minden gyümölcslegynek hat lába van, a piros szemecskéje meg a fején nő. Hogy a fenébe kerül ez ide, aminek öt lába van, és a hatodik helyett egy piros szemecske meredezik az állat fenekén? *Björk*. A kivétel agyonnyomva, a jegyzőkönyvbe csak az átlag kerül. A kivétel olyan a kutatónak, mint szülőlánynak az ikerterhesség. Nem kerül a kirakatba. A cikk címe nem tartalmazza, a kivonata se, a szövege is alig. A könyv szerzőjének könyvtárakat kellett áttúrnia ahhoz, hogy pár icipici kivételt összegyűjtsön.

A könyv egyik nagyon fontos mondanivalója az, hogy változnunk kell! Hölgyeim, uraim! A furcsa: megjegyzendő, fontos. Az átlag kérem egyedül a buta kutatónak és a kispolgárnak szemrevaló. A furcsa sokszor különleges. A furcsa olyan, ami nélkül a világ nem lenne annyira szép és gazdag, amilyen. A furcsa sok esetben a túlélés záloga, és nélküle nem lehet elképzelni az egész stabilitását. Mi, kicsi szürkék hölgyeim és uraim, attól maradhatunk kicsi szürkék, hogy vannak közöttünk nagyok. Vannak riktóak, uram bocsá’: bűdösek, vagy bármi más módon érthetetlenek és elfogadhatatlanok. Érinthetetlen testvéreink közös stabilitásunk zálogai. Jó. De mit lehet tenni azért, hogy megmaradjon az átlag? Hogy ne csak furcsákból álljon a világ? Hogyan legyen itt rend és stabilitás? Erre valók a gyenge kapcsolatok. Erre való a könyv, amit írtam, és amit az Olvasó – remélem – olvas tovább

A gyenge kapcsolatok búja-baja 3.: az összes. Mivel nem tudom jelenleg még bizonyítani a kijelentés általánosságát, „az összes” meglehetősen vékony lábakon áll a kijelentés közepén. Igényesebb Olvasó kérem, helyettesítse be a „sok” szót „az összes” helyett.

A gyenge kapcsolatok búja-baja 4.: komplex rendszert. Baj van a komplex rendszerrel is. Tételezzük fel, hogy az Olvasó beletörődő, empatikus alkat. Maguk kérem engem mindenre rávesznek – mondja. Eljutottam odáig, hogy megszerettem a furcsát. Eljutottam odáig is, hogy átlátom: az egyensúlyát veszített rendszer komplex, de ma már leírható. De azt mondják még meg nekem kérem: *mit* stabilizálunk? *Minek* a zaját mérjük? *Miben* keresünk itt furcsát, kivételeket? Baj van megint. Ahhoz, hogy a rendszer elemei közötti gyenge kapcsolatokból az egész rendszer stabilitását vizsgálni tudjunk, egy szinttel magasabbra kell lendülnünk, és meg kell találnunk az *egész* rendszer stabilizálódó tulajdonságait. Ja. Ez egyszerűnek tűnik. Ha a rendszer elemei az emberek, a nagymagas szint a társadalom, a tulajdonság a társadalmi stabilitás. Van polgárháború vagy nincs? Tüntetnek vagy sem? Ha az elemek kémiai kötések, a nagymagas szint a molekula, a tulajdonság az alak. Tekeredik még a fehérje vagy már stabil? Van enzimaktivitása, vagy nincs? Ugye megmondtam? Egyszerű. És ha az elemek a szavak? Mit stabilizál a nagymagas szint, a mondat? Ugye, hogy nem is olyan egyszerű? Nehéz rájönni, hogy a mondat a jelentést, az értelmet stabilizálja. És ha az elemek a Föld

összes lakói? A tudomány a popperi fordulat óta deduktív, analitikus gondolkodásra szoktatott. Az elemi logikai kapcsolatokat kereső agyunk nagyon nehezen veszi be az újabb fordulatot, és sokszor nagyon nehezen találja meg a holisztikus, szintetikus gondolkodást igénylő, nagymagas szintet, és annak ködbevesző, stabilizálandó tulajdonságait.

A gyenge kapcsolatok búja-baja 5.: pont. Az Olvasó észrevehette, hogy az előző bekezdésekben indító kijelentés minden elemét megkérdőjeleztem. Egy kivételével. A mondat végén a pont kimaradt. Világ életemben a teljességre törekvő ember voltam, így ezt sem hagyhatom ki. A feladatot befejezve, hadd mondjam el, hogy nem teljesen vagyok biztos abban, hogy a fenti kijelentés végén a pont a legmegfelelőbb írásjel. Hadd javasoljak inkább egy „óhajtójelet”. Remélem a 13. fejezet végére az Olvasó egyet fog velem érteni abban, hogy az átmeneti óhajtójel addigra egészen pontszerűvé változott.

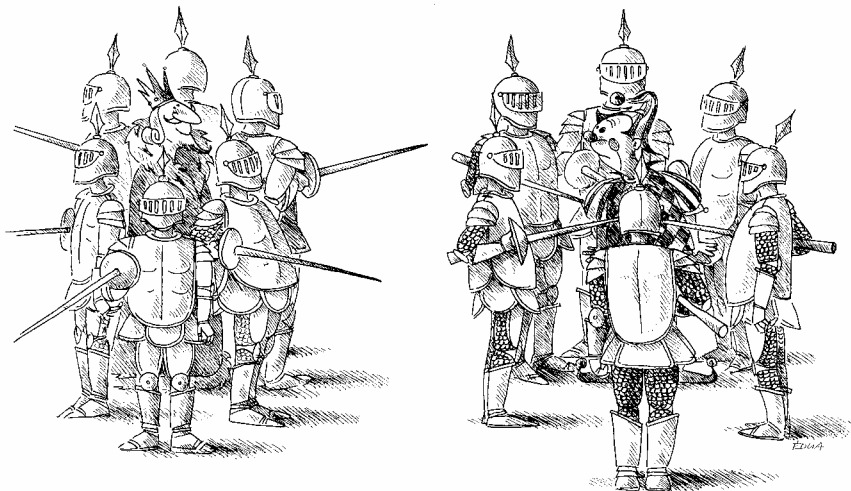
„Kedves Péter, ha a kedvenc kijelentésed még sokkalta gyengébb, mint azok a kapcsolatok, amelyekről szól, miért nem hagyod itt ezt a könyvet, és mász egyet úszni inkább helyette?” Kekec, ne keseredj el. A kutató alaptulajdonsága a kételkedés. Nincs olyan kijelentés a világon, amelyik maradéktalanul igaz lenne. Továbbmegyek. Csak az a kutató a jó kutató, aki el tudja viselni az általa vizsgált világ, és az erről a világról alkotott saját kijelentései kétértelműségét. Tehát, nem baj, ha a fenti kijelentés „ezer sebből vérzik”, hiszen ez természetes. A válasz végén hadd szögezzem le, hogy néhány percen belül *valóban* elmegek úszni. De előtte még juszt is befejezem ezt a részt, és felsorolom a fenti kijelentés erős oldalait.

A gyenge kapcsolatok öröme, 1.: a gyenge kapcsolatok. A gyenge kapcsolatok emberpróbálóan nehezek ugyan, de gyönyörűek. Mindenhol megtalálhatók. Ahol van erős kölcsönhatás, ott van gyenge is. A gyenge kapcsolat nélkül, az erős sem lehet erős. Nincs odakint, az űrben Mércé. (A Hubble teleszkóp másra való...) Mi, itt egymáshoz kell, hogy mérjük magunk. A hálózatok elemei csak bizonyos gráfokban egyformák. A valóságban mindig különböznek. Erős kölcsönhatás és gyenge kapcsolat egyformán van közöttük. Ráadásul a hálózatok nem statikusak. Kölcsönhatások képződnek, és tűnnek el bennük lépten-nyomon. A gyenge kapcsolat rövid idejű, kis valószínűségű kapcsolatot is jelent. Ez még tovább növeli a gyenge kapcsolatok számát. A közvetett kölcsönhatásokat is gyenge kapcsolatoknak szoktuk tekinteni (leginkább az ökoszisztémák esetén). Végül, de nem utolsósorban, a hosszú távú és a modulok közötti kapcsolatok is gyengék. A gyenge kapcsolatok nem az erős kölcsönhatások utáni maradék. A gyenge kapcsolatok általánosak, a hálózatok legfontosabb pontjain találhatóak, a gyenge kapcsolatok fontosak.

A gyenge kapcsolatok öröme 2.: stabilizálják. Az összes hálózat, amit egyáltalán vizsgálni tudunk, úgy-ahogy stabil. A rendkívül instabil hálózatok ugyanis vizsgálhatatlanok. A módszereink időbeli felbontása alapvetően meghatározza az instabilitás azon szintjét, amit még észlelni, vagy vizsgálni vagyunk képesek. Továbbmegyek. Már az a tény, hogy egy *hálózatot* vizsgálunk, a stabilitást feltételezi. A hálózatban ugyanis több elem egyszerre kapcsolódik egymáshoz. Pillanatszerűen, a pusztán véletlen szeszélyeként egy ilyen rendszer nem alakulhat ki. A hálózatok

stabilitása nem a semmiből születik. A gyenge kapcsolatoknak a stabilitást nem megteremteni, hanem fenntartani kell.

A gyenge kapcsolatok zárszáva. A gyenge kapcsolat nem mindenható: a gyenge kapcsolatok stabilizáló ereje káros is lehet. Ha a rendszer túlstabilizált, akkor nem fejlődik, nem mozog.



Az előbb azon örvendeztem, hogy a gyenge kapcsolat mindenütt jelen van. Ahol erős kölcsönhatás van, kell lennie gyengének is. A kijelentés megfordítható. Ahol gyenge kapcsolat van, kell lennie erősnek is. Ha eltávolítom az erős kölcsönhatásokat, a gyengék lesznek az erősek: a rendszer meg stabilitás híján szétesik. Módjával kell zsarnokot ölni uraim, mert utána jöhet az anarchia. Olyan ez, mint egy jó leves. A harmonikus ízt csak a különböző erősségű kölcsönhatások kellő vegyítésével lehet kikeverni.



Az erős kölcsönhatások is fontosak! Amikor befejeztem az egyik középiskolásoknak tartott hálózatos előadásomat, egy kutató diák jött oda hozzám, és megkérdezte “Péter! Csaknem egy óráig beszéltem a gyenge kapcsolatok hasznáról. Mi van az erős kölcsönhatásokkal? Azok károsak?” Dehogy! A gyenge kapcsolatok az erős kölcsönhatások nélkül nem értelmezhetők. Ha meg túl sok van belőlük, akkor túlstabilizálnak. De az erős kölcsönhatások önmagukban is fontosak. Ők definiálják a hálózatot. Ha megváltoztatod bármelyiket: a hálózat alaptulajdonságai változnak meg vele. Az erős kölcsönhatások tehát éppúgy a hálózat stabilitásának a részei, mint a gyenge kapcsolatok. A gyenge kapcsolatokban az az igazán érdekes, hogyha őket változtatod meg, akkor csak a stabilitás változik, a rendszer alaptulajdonságai nem (ez a tulajdonságuk lesz a következő részben adott definíciójuk alapja is). Ahogy a válaszomat befejeztem, fiatal barátom felsóhajtott: „De jó! Az előadásod után már kezdtem azt hinni, hogy ott kell hagynom a legjobb barátomat, hogy a stabilitásomat visszanyerjem.” Nem kell aggódni. A legjobb barátok maradhatnak. Sőt! *Muszáj* maradniuk. Legjobb barátok nélkül a felszínes ismeretségekkel nem megyünk semmire (legalábbis a hálózatstabilitás szempontjából). Ugyanakkor a felszínes ismeretségek *szintén* a stabilitásunk részei a legjobb barátok mellett. Mindkettőt egyformán fontosnak kell tartanunk. A 11. fejezetben visszatérek még erre, amikor leírom, hogy a konzervatív és a liberális értékrend

egyformán szükséges egy stabil társadalom helyes fejlődéséhez, és hogy a nők miatt maradnak egészségesebbek azáltal, hogy több gyenge kapcsolatot építenek ki, mint a férfiak.

5.2. Gyenge kapcsolatok: egy kezdő definíció

A 3.4. fejezetben megmutattam, hogy a hálózatok igen széles köre nemcsak a foksám eloszlásában, térben és időben, hanem a kötéseiről is skálafüggetlen eloszlást mutat (Almaas és mtsai, 2004; Barrat és mtsai, 2004a; Caldarelli és mtsai, 2003; Garlaschelli és mtsai, 2003b; Ghim és mtsai, 2004; Goh és mtsai, 2001; Leland és mtsai, 1994). Ha a hálózat kölcsönhatásainak erőssége egy folyamatos átmenetet képez az alig észlelhetően gyengétől a rendkívül erősig, akkor nagyon nehéz meghúzni azt a határvonalat, amin innen a kapcsolat még gyenge, és amin túl viszont már erős. A soron következő fejezeteknek a gyenge kapcsolatok stabilizáló erejére bemutatott konkrét példái sem adnak kapaszkodót. A legtöbb rendszerben az adatok nem elég specifikusak ahhoz, hogy az ember meg tudja mondani: mennyire gyenge volt a stabilizáló gyenge kapcsolat. A példák átolvasása után az az érzésem is támadt, hogy a gyenge kapcsolatok határértéke túlzottan rendszer-specifikus, és így erről általános kijelentés elvben sem tehető.

Elfogadva, hogy a gyenge kapcsolatok határpontjának számszerűsítése (pl. a Pareto-törvény példájára azt mondva, hogy minden kapcsolat, ami a legerősebb felső 20% után következik: gyengének számít) eléggé megalapozatlan lenne, a gyenge kapcsolatok leírására a továbbiakban egy funkcionális definíciót fogok alkalmazni. A konkrét definíciót Eric Berlow (1999) nagyszerűen megfogalmazta:

A gyenge kapcsolatok definíciója: egy kapcsolatot akkor nevezünk gyengének, ha hozzáadása vagy elvétele nem befolyásolja statisztikailag kimutatható mértékben a hálózat külső paramétereinek átlagértékét.

Tisztában vagyok azzal, hogy mint általában minden funkcionális definíció, ez a definíció is erőteljesen függ az adott rendszertől. A definícióhoz szükségünk van valamilyen hálózati tulajdonságra, amit mérni tudunk, képeseknek kell lennünk arra, hogy a hálózatból elvegyünk, vagy ahhoz hozzátegyünk egy gyenge kapcsolatot, mindezt sokszor meg kell tudni ismételnünk és (ez a legnehezebb!) mindezen események közben biztosítanunk kell, hogy a hálózat összes többi tulajdonsága állandó maradjon. Hölgyeim és Uraim! Kezdhetem a körbejárást az üres kalappal? Lehet adakozni, a mutató véget ért. A kísérletező kutató szomorú életét látták, amikor definíciókat kérnek tőle számon.



Vajon minden kapcsolat gyenge? Megjegyzések egy „gyanús” definíció kapcsán. „Péter, Eric Berlow (1999) ugye ökoszisztémákat vizsgált? Ha a hálózatból elhagysz egy ‘erős’ kölcsönhatást, és a hálózatod egy picike hálózat volt, mint ezek a rendszerek általában, semmi csoda nincs abban, hogy a rendszer alapértékei ‘statisztikailag kimutatható módon’ megváltoznak. Mi van azonban akkor, ha egy óriási és meglehetősen redundáns hálózatod van? Olyan, mint egy sejt vagy egy társadalom? Az ilyen rendszerekben nem marad egyetlen erős kölcsönhatás sem ezzel a definícióval!” Kekec, gratulálok! Ez a gondolatmenet szép volt. Ettől függetlenül azt hiszem, meg tudom védeni a

definíciót. A legbonyolultabb hálózatok is szép számmal tartalmaznak olyan erős kölcsönhatásokat, amelyek létfontosságúak. Az élesztő gének 20%-a nélkülözhetetlen az élesztő túléléséhez. További 40% különböző szuboptimális életfeltételek mellett válik azzá (Papp és mtsai, 2004). A feltétel nélkül létfontosságú kölcsönhatások száma viszonylag kicsi (20%), de ha visszaemlékszel a 3.4.-es fejezetre, a kötéseiről skálafüggetlen eloszlása van, ami azt jelenti, hogy az erős kölcsönhatások száma kicsi. Ha közelebbről megnézzük: még a 20% is ismerős. Úgy van! A Pareto-féle 80-20 szabály (Pareto, 1897) ugyancsak 20%-nál húzta meg az erős kölcsönhatások határvonalát. A Berlow (1999) definíció egészen jól viselkedik, ha közelebbről megvizsgáljuk.



Indirekt hatások, mint gyenge kapcsolatok. A gyenge kapcsolatok nem csak közvetlenek lehetnek. A közvetett hatások egyik szokásos példája a másodsomszéd-hatás. Ha a hálózatban minden hatás egyforma erősségű, akkor a második szomszéd (a szomszéd szomszédja) közvetett hatása nyilvánvalóan gyengébb, mint a közvetlen szomszédé. A közvetett hatásokat az ökológiai hálózatokban igen gyakran figyelembe veszik, mert a hálózat viszonylag kicsiny mérete miatt a hatásuk az adott élőlény túlélésére messze nem elhanyagolható, és figyelembe vétele nem bonyolítja túl a számításokat annyira, mint amennyire ugyanez a módszer tenné egy sok száz tagú hálózat esetén (McCann, 2000).



A gyenge kapcsolatok nem irányítottak. Az erős kölcsönhatások általában azt igénylik, hogy a hálózat mindkét kölcsönható eleme stabil legyen. Ha egy kölcsönhatás olyan, hogy a résztvevő partnerek reprodukálhatóan, gyakran és kiszámíthatóan vesznek benne részt, a kölcsönhatás inkább válik irányítottá, semmint egy olyan kapcsolat, ahol a partnerek kiszámíthatatlanul és ritkán találkoznak. A gyenge kapcsolatok irányultsága nem mindig jelentkezik, és időről időre a korábban megfigyeltnek az ellentettjére változik.²



A gyenge kapcsolatok olcsók. A gyenge kapcsolatoknak mind a kiépítése mind a fenntartása sokkal kevesebbe kerül a hálózatnak, mint az erős kölcsönhatásoké. Mind a kapcsolat intenzitása, mind átlagos időtartama a hálózatnak energiaspórolást jelent.



A gyenge kapcsolatok a múltunk maradványai.³ Vajon a gyenge kapcsolatok a kezdeti erős kölcsönhatások mellé települtek azokban a hálózatokban, amelyek már elég bonyolulttá váltak ahhoz, erre a rafinált stabilizálási formára is gondoljanak? Ez elég valószínűtlennek hangzik. Egy erős kölcsönhatás, egy magas affinitású kötés hosszasan kifejlődött, rendszereket feltételez, amelyben a két partner kölcsönösen adaptálódott már egymáshoz. A földi önszerveződés elején ezek a feltételek még nyilvánvalóan nem voltak adottak. Az élet a gyenge kapcsolatokból keletkezett. Az erős kölcsönhatásokat csak ez után találták fel eleink. Ez azt is jelentette, hogy a kezdet kezdetén nem a mai fogalmainknak megfelelő hálózatok voltak a Földön. A hálózatok nem voltak még annyira sem meghatározottak, mint amennyire ma azok, hanem állandóan keletkeztek, felbomlottak és átalakultak. A feltehetően széleskörűen elterjedt laterális géntranszfer jelensége (Woese, 1998; ami azt jelenti, hogy a földi élet elején a genetikai információ nem volt élőlényre porciózva, hanem állandó mozgásban volt az élőlények között, és így az egész Föld genetikai értelemben egy élőlénynek volt felfogható) is egyike a sok feltételezésnek, ami erre utal. A korai

²Az ötletért köszönettel tartozom Steták Attilának.

³Az ötletért köszönettel tartozom Buzsáki Györgynek.

hálózatokban a kötése erősség meglehetősen egyforma volt: ezek a hálózatok valószínűleg sokkal közelebb álltak a random gráfokhoz, mint a mai hálózataink. Ez a 4.4.-es fejezet megállapításával (a random gráf akkor keletkezik, ha a rendelkezésre álló források nagyok) úgy illik egybe, hogy a földi élet kezdetén rendelkezésre álló forrásokért még valószínűleg nagyon kevés hálózat vetélkedett.

5.3. Stabilitás: egy kezdő definíció

A hálózatok stabilitása legalább két szinten értelmezhető. Már itt, a bevezetésben mindkét fajta stabilitást definiálni fogom, hogy a könyv további részeiben a fogalmi elkülönülésük világosabb legyen.

A hálózat stabilitásának (azaz paraméter stabilitásának) definíciója: Egy hálózat akkor stabil, ha az eredeti állapotának kismértékű megzavarása után a hálózat paraméterei újra közelítenek az eredeti állapotban mért paraméterek felé.

Ez a definíció a Le Chatelier elvre hasonlít azzal a nagyon fontos különbséggel, hogy a komplex rendszerek szinte soha nincsenek a tradicionálisan értelmezett egyensúlyban. Így a komplex rendszerek esetén inkább robusztus viselkedésről beszélhetünk, amely az eredeti paraméter-sereg (attraktor) felé tendál a rendszerre ható kismértékű zavar után.

A hálózat ellenálló-képességének definíciója: a hálózat ellenállóképes, ha meg tudja őrizni törzshálóját és perkolációját azáltal, hogy a legtöbb eleme változatlanul kapcsolatban marad egymással.

A hálózat stabilitásának e szintjén a tét már nem az, hogy a hálózat, akárcsak közelítőleg, megtartja-e az eredeti állapotát. A stabilitás ezen értelmezésében a hálózat elhagyhatja az eredeti attraktort és egy teljesen más (kvázi)egyensúlyi állapotba billenhet át, sőt, gyökeresen meg is változtathatja a felépítését, pl. a skálafüggetlen foksám eloszlásból egy csillaghálóból, vagy random gráffá alakulva, ahogy a környezeti viszonyok mostohábbá vagy kedvezőbbé válnak (4.4. fejezet). A stabilitás e szintjén a hálózat az életéért küzd. Ha a hálózat hálózat marad, azaz az elemei minden behatás ellenére változatlanul kapcsolatban maradnak egymással, és ebből következően mind a törzsháló (a giant component), mind a hálózat körbejárhatósága, a perkoláció megmarad, azt úgy nevezem, hogy a hálózat ellenállóképes volt. A hálózatok ilyen értelemben vett ellenálló-képességét az ökoszisztémák esetén sok esetben rezilienciának is nevezik (Holling, 1973).



A relaxáció, mint a stabilitás mértéke. A hatékony relaxáció nagymértékben elősegíti a hálózat stabilitását. Ha a relaxáció gyors, például exponenciális, a hálózat nagy valószínűséggel elég stabil.



A zaj, mint a stabilitás mértéke. A hálózat szempontjából a zaj hálózatzavarnak tekinthető. Ha a hálózat stabilitása nagy, a gyors relaxáció a hálózatzavart (zajt) gyorsan disszipálja, lecsökkenti. A hálózatban tartósan fellépő magas zaj a legtöbb esetben a hálózat instabilitásának a jele.



A diverzitás, mint a stabilitás mértéke. A nehézkes relaxáció igen gyakran paraméter instabilitással jár együtt. Ha a relaxáció alacsony, a zavar által hordozott energia a hálózat egy bizonyos részén megreked, és segítheti ezt a részt abban, hogy egy olyan új helyi energiaminimumba lendüljön át, amely más körülmények között a régi energiaminimumot körülvevő aktiválási energia-„hegyek” miatt korábban lehetetlen lett volna. Ha az új energiaminimumba való átugrás megtörtént, a magas aktiválási energia miatt a hálózat e része ott is marad. Ha több, eredetileg egymással teljesen azonos hálózatot képzelünk el, a fentiekhez hasonló mechanizmussal e hálózatok más-más részei más-más végső állapotba „fagyhatnak be” a megfelelő energiájú zavar megérkezése után. Mivel annak az esélye, hogy a zavar a hálózat éppen melyik részén reked meg, eléggé véletlenszerű, a korábban egyforma hálózatok különbözni kezdenek. A paraméter instabilitás így a diverzitás megjelenéséhez vezetett. Azaz a magas diverzitásból kellő óvatossággal és körültekintéssel következtetni lehet az egyes hálózatok stabilitásának alacsony szintjére.



Egymásbaágyazottság: stabilitás a főhálózat felől. A 3.3.-as fejezetben megmutattam, hogy a főhálózat elemei maguk is hálózatok: azaz a hálózatok egymásbaágyazottak. Ha a főhálózatot alkotó alhálózatok nem stabilak, nem tudnak egymással erős kölcsönhatásokat kialakítani, és emiatt sok közülük a főhálózat építésében fel sem használható. A főhálózatnak tehát ki kell találnia olyan mechanizmusokat, amelyek (a) stabilizálják; (b) elkülönítik vagy (c) szétbontják az instabil alhálózatokat. A stresszfehérjék pontosan ezt a feladatsoprotot töltik be a sejten belül, ahogy azt majd a 7.1. fejezetben részletesen ismertetni fogom. Egy másik példaként a társadalmakban (a) a stabilizációt (a hosszú listának csak néhány elemét sorolva itt fel) a normák, orvosok, pszichológusok, szabályok, tanárok, törvények és a zárt közösségek pletykái segítik. (b) A társadalmi elkülönítés eszközei a bolondházak, börtönök, karanténok, kórházak, és végül, de nem utolsósorban a tudományos kutatóintézetek. Nagy szerencsénkre a szándékos szétbontás különböző módosatait (c) a legtöbb civilizált országban törvényen kívül helyezték a XXI. századra (a fejlődő országok jelentős része és az USA néhány tagállama ez alól kivétel).



Egymásbaágyazottság: stabilitás az alhálózat felől. A hálózatok nem csak az alhálózataikat, hanem a környezetüket is stabilizálni akarják.⁴ A környezet bármilyen paraméterének stabilizációja (gondoljon a T. Olvasó a lakására, és benne lévő fűtő és esetleg légkondicionáló berendezésekre) túlélési előnyt jelent. A szimbiózisok (Margulis, 1998), a főhálózat kialakításának ténye, és maga az önszerveződés folyamata is az alhálózatok környezetstabilizáló erőfeszítéseit tükrözik.



Mikor öli meg a főhálózat halála az alhálózatait is? Mikor válik az alhálózat annyira a főhálózat által szállított előnyök rabjává, hogy a főhálózat halála (szétesése) egyben az alhálózatok halálát (szétesését) is jelenti? (Kétségtelenül igaz ez egy élő szervezetre, ahol a benne élő alhálózatok – a sejtek – döntő többsége a főhálózat halálával elpusztul. Ugyanakkor a lazábban kötődő baktériumok tovább élnek, sőt, a szervezet szétbomlásával némelyikük még pótlólagos élelemforrásokhoz is jut. Ezzel ellentétben az egyes eróművek nem okvetlenül mennek tönkre, ha az áramhálózat darabjaira esik szét.)

⁴Az ötletért köszönettel tartozom Száraz Péternek.



A hálózatok stabilitása, mint a tudományos megismerés egyik

feltétele. Ahogy az 5.1.-es fejezetben már említettem, a hálózatok stabilitása nélkül a tudományos megismerési módszer nem fejlődött volna ki az emberiség történetében. Hálózatstabilitás nélkül nem lennének reprodukálható kísérleti eredmények, és nem lenne semmilyen esélyünk arra, hogy általánosítsuk az adott hálózat adott pillanatban megfigyelt viselkedésének bármely elemét.

5.4. Komplex rendszerek

A komplexitás fogalmának megértése a legkiválóbb elméket vonzotta a tudomány történetében és rendkívül erőteljes gondolatok forrása ma is. Valószínűleg ezzel összefüggésben a komplexitás fogalma igen nehezen definiálható: “Miközben úgy véljük, hogy felismerjük a komplexitást, ha a szemünk elé kerül, a komplexitás egy olyan tulajdonság, amit gyakran ösztönösen alkalmaznak, bármiféle, a fogalmi tisztázásra és a mérhetővé tételre irányuló kísérlet nélkül.” (Tononi és mtsai, 1998). Azért hogy ezeket a jogos vádakot elkerüljem, megpróbálok egy nagyon rövid összefoglalást adni a komplexitás fogalmának megragadására irányuló legfontosabb erőfeszítésekről mind a számszerű definíciók, mind a fogalmi összetevők terén.

A komplexitásnak, mint mérőszámnak a definíciója: a számszerű definíciókat érdemes a Kolmogorov-féle (1965) definícióval kezdeni: egy karaktersorozat *algoritmikus információjának komplexitása* annak a legrövidebb programnak a hosszával egyenlő, amely képes e karaktersorozat előállítására. A fenti definíció sajnos a teljesen véletlenszerű karaktersorozatokra igen magas értéket ad, ami e definíciónak egy nyilvánvaló gyengesége. Ennek kiküszöbölésére Murray Gell-Mann (1994; 1995) alkotta meg az *effektív komplexitás* fogalmát, ahol a minimalizált leírásnak nem az információt magát, hanem az információ regularitását kell visszaadnia. Egy ehhez hasonló definíció a *statisztikai komplexitás* definíciója, amely annak az információnak a hosszát jelöli, amely minimálisan szükséges a rendszer viselkedésének optimális előrejelzéséhez (Crutchfield, 1994).

A komplexitás fenti definícióinak értelmezéséhez két szélső esetet érdemes megvizsgálni: egy olyan rendszer, amely teljesen véletlenszerűen változik nyilvánvalóan kevésbé komplex. E rendszerre mind az effektív, mind a statisztikai komplexitás alacsony értéket ad, hiszen a rendszernek mind a regularitása, mind a jövőbeni viselkedése egyszerűen leírható. Ehhez hasonlóan a másik véglet, a teljesen szabályos (pl. szabályosan periodikus) rendszer is egyszerűen jellemezhető, hiszen a teljes leírását három paraméter (frekvencia, amplitúdó és fázis) megadja. A komplex rendszerekben e két tulajdonság keveredését figyelhetjük meg, amely leírásukat igen bonyolulttá teszi (Gell-Mann, 1994; Tononi és mtsai, 1998). A hálózatok komplexitása jelentkezhet a kapcsolatrendszerük szerkezetében, a kapcsolaterőségek elrendeződésében, a hálózatok dinamikájában és még sok-sok más hálózati jellemzőben. A jelen könyvben a komplexitást nem a fenti, számszerű értelmezésében használom,

mivel a gyenge kapcsolatok stabilizáló hatását még soha nem vizsgálták a számszerű komplexitás függvényében. Ez az izgalmas munka a jövő feladata.⁵



Növelik-e a gyenge kapcsolatok a komplexitást? A komplexitás fogalmának, mint számszerű jellemzőnek a használata a gyenge kapcsolatok hatására bekövetkező hálózatstabilizálásban azért is tűnik elég bonyolultnak, mert a gyenge kapcsolatok megváltozásával a komplexitás mértéke maga is megváltozhat. Ahogy a 2. táblázatban összefoglaltam, a gyenge kapcsolatok a hálózat integrációját okozzák. Ha a hálózat egy rendezetlen, de nem random hálózat (és nem egy teljesen szabályos hálózat, pl. egy rács, ahol két rész integrációja nem fogja megváltoztatni a rendszer komplexitását), a rendszer integritása és komplexitása szorosan összefüggnek. A gyenge kapcsolatok eltávolítása ez esetben minden bizonnyal a rendszer komplexitásának csökkenéséhez vezet. Ennek a feltételezésnek a bizonyítása is egy nagyon szép jövőbeli feladat.

A komplexitás, mint tulajdonság definíciója: ha nincs szükségünk a komplexitás matematikai definíciójára, mit tudunk mondani a komplexitás legfontosabb, definíciószerű tulajdonságairól? Gerald Edelman a következő rövid definícióját adta a komplexitásnak: „a komplex rendszer egy olyan rendszer, amely egymástól különböző kisebb részekkel rendelkezik, e részek specializált, de egymástól nem okvetlenül különböző funkciókat töltenek be, és e részek kölcsönhatásából a rendszer integrált válasza születik meg” (Wilkins, 2004). Ahogy a 4.6. fejezetben már említettem, a komplex és a komplikált egymással nem szinonim fogalmak. A komplex rendszerben a végső, integrált funkció nem okvetlenül következik sem a részek funkciójából, sem a részek pusztán összerakásából (Ottino, 2004).



A gyenge kapcsolatok stabilizálják az összes komplex rendszert. A gyenge kapcsolatok stabilizáló ereje a komplex rendszerekre igaz. Szándékosan nem azt írtam tehát: „A gyenge kapcsolatok stabilizálják a hálózatokat.” A gyenge kapcsolatok által okozott stabilizáció nem egy hálózati tulajdonság abban az értelemben, hogy igaz lenne minden hálózatra. Azok a hálózatok, amelyeknek a komplexitása alacsony, nem rendelkeznek gyenge kapcsolatokkal, mert a gyenge kapcsolatok és az erős kölcsönhatások egymással párhuzamos jelenléte kizárja mind a teljesen random, mind a teljesen szabályos hálózatokat. A gyenge kapcsolatok csak a komplex rendszereket képesek segíteni a stabilizáció folyamatában, mert az a rendszer, amelyben a gyenge kapcsolatok egyáltalán előfordulnak, már ettől önmagukban is komplexekké válnak.



Hogyan függ a gyenge kapcsolatok stabilizáló ereje a rendszer komplexitásától? A fentiekből számos további izgalmas kérdés is következik. Vajon van-e egy olyan komplexitási küszöbérték, ami alatt a gyenge kapcsolatok stabilizáló hatása már nem számottevő? Vajon lecsökken-e a gyenge kapcsolatok stabilizáló ereje, ahogy a komplexitás elhagy egy felső határt?

⁵Ha az Olvasónak bármilyen jó ötlete van ezzel kapcsolatban, örömmel várjuk jelentkezését a bevezetés végén található email címen.

5.5. Gyenge kapcsolatok mindenütt

A tudományos szóhasználatban a degenerált rendszerek nem a hülyegyerekek szerepét töltik be. Éppen ellenkezőleg: a degeneráció a komplex rendszerek stabilitásának egyik igen fontos eleme. Miért van ez? Ha egy rendszer degenerált, akkor a rendszer által elvégzett egyik vagy másik feladatot a rendszer nem egyféleképpen, hanem sokféleképpen is teljesíteni tudja. Ha egy vállalatnak fontos üzleti tárgyalása van, az üzlet nem szokott meghiúsulni azon, ha a tárgyalás reggelén az igazgató negyvenfokos lázzal ébred. Ha jó volt a vállalat szerkezete, belép a helyettes, és minden megy tovább. Egy jó vállalatnál pótolhatatlan ember nincs. A stabil vállalat működése tehát degenerált. A széleskörű elemzés azt mutatja, hogy minden kiegyensúlyozottan működő rendszer degenerált. “A degeneráltság nemcsak az evolúció által szelektált tulajdonság, hanem a szelekció folyamatának (a rendszerek stabil, kiegyensúlyozott növekedésének) előfeltétele, és egyben megkerülhetetlen terméke is” (Edelman és Gally, 2001).

Ebben a fejezetben azt mutatom meg, hogy a degeneráltság megjelenése törvényszerűen együtt jár a skálafüggetlen szerkezettel jellemezhető hálózatok és a gyenge kapcsolatok megjelenésével, és ezekkel együttesen stabilizálja a komplex rendszereket. A degeneráltság előfordulásának elképesztően szerteágazó esetei arra is nagyon jó példákat fognak adni, hogy a gyenge kapcsolatok megjelenése milyen sok esetben vezethet a rendszer fokozott stabilitásához. Hölgyeim és Uraim! Itt *minden és mindenki* degenerált! És ez jó.

Mint ahogy azt már a 3.1. fejezetben bemutattam, a degeneráltság kialakulása a skálafüggetlen hálózatok kialakulásának egyik igen fontos módjából egyértelműen következik. Ha a kezdeti hálózat megkettőződik, és a megkettőződés után a két rész elkezd különböző tulajdonságokat felvenni, és különböző módon válaszolni, de ennek ellenére még mindig képes ugyanannak a funkciónak az ellátására is: egy olyan skálafüggetlen rendszer jön létre, amely egyben degenerált. Ez a megkettőződéssel és divergenciával együtt járó fejlődés a természetben előforduló rendszerek nagyon sok elemére igaz. Degeneráltsághoz vezet az is, ha a hálózat elemei, néhány eleméből felépülő motívumai, vagy sok elemből kialakuló moduljai hasonló funkciók ellátására is képesek. Ezen hasonló elemek, motívumok, vagy modulok a hálózat többi részéből hasonló elemekhez kötődnek. (A vállalaton belül a sajtófőnök és a helyettese egyformán kapcsolatot kell, hogy tartson a vezérigazgatóval és a kifutófiúval is.) De ugyanakkor ezek a kapcsolatok nem lesznek egyforma erősek. (Kivételektől eltekintve a sajtófőnök a vezérigazgatóval, és a helyettese a kifutófiúval minden bizonnyal többször kerül kapcsolatba, semmint fordítva.) Kimondható tehát: minden hasonló elemből, motívumból, vagy modulból álló páros esetén egy vagy több gyenge kapcsolat születik. A degeneráltság törvényszerűen a gyenge kapcsolatok megjelenéséhez vezet.

A degeneráltság bemutatására az előzőekben megemlített vállalatok mellett természetesen számos más példa is hozható. Ezek egyikeként hadd említsem azt a bizonyított ténytet, hogy a gének megkettőződésével az egyedfejlődés stabilabbá válik (Wilkins, 1997). Az egyszerű megkettőződés redundanciát okoz. Ha tönkremegy az

első, van tartalék. Redundánsak vagyunk. Érdekes módon, ha a tartalék nem pont ugyanolyan, mint az első, azaz a redundancián, a gének megkettőződésén túl tényleges degeneráltság is fellép: a stabilizáló hatás nagyobb (Wagner, 2000; Kitami és Nadeau, 2002).



A degeneráltság a gyenge kapcsolatok miatt jobb, mint a redundancia. A fentiekben említettem, hogy a degeneráltság jobban stabilizál, mint a redundancia. Azaz: ha az eredetileg is a rendszer részét képező csereszabatos pótalkatrész ugyanolyan, mint az elődje, akkor kevésbé stabilis a rendszer, semmint ha a pótalkatrész kicsit különbözik. Ha a pótalkatrész pontosan ugyanolyan: az általa kialakított kapcsolatok is pontosan ugyanolyanok. Ha kicsit különbözik: több gyenge kapcsolat fog keletkezni, amikor munkába áll. Elképzelhető, hogy éppen a gyenge kapcsolatok megjelenése az, amelyik degenerált rendszerek fokozott stabilitását okozza a redundáns rendszerekhez képest.

A 3. táblázatban a degeneráltsággal párhuzamosan kialakuló gyenge kapcsolatokat mutatom be néhány hálózat esetén. Minden esetben megemlítem a közösen stabilizált tulajdonságot is.



A sejtszervecskék degeneráltsága, mint az eukarióták fokozott stabilitásának egyik lehetséges oka. Hadd részletezzek egy fontos példát külön is: a sejten belüli sejtszervecskék csak a tankönyvekben egyformák. A valóságban a mitokondriumok, az lizozómák más és más fehérje és RNS tartalommal, más környezettel, más károsodásokkal, más korral, stb., stb. bírnak. Mindazonáltal az összes mitokondrium és lizozóma helyel-közzel ugyanazokat a feladatokat látja el, és ugyanazokkal a sejtbeli alkotórészekkel áll kapcsolatban. Ez a hasonlóság és egyszersmind különbözőség számos gyenge kapcsolat fellépését hozza magával az adott sejtszervecske és a sejt többi része között. Minden bizonnyal az így kialakuló degeneráltság és gyenge kapcsolatok együttesen egy olyan pótlólagos stabilizáló erőt jelentettek, amely segítette az eukarióta szervezetek fennmaradását annak ellenére, hogy a bonyolultabb szerveződés rengeteg többletenergiát igényel és rengeteg új hibalehetőséget generál.

Örömmel állapíthatom meg, hogy a vállalt munka feléhez értem. Összefoglaltam a hálózatok számos tulajdonságát és a gyenge kapcsolatok hatását e tulajdonságokra. A könyv központi feltételezése („A gyenge kapcsolatok stabilizálják az összes komplex rendszert.”) megfogalmazásra került, és egy kezdeti definíciót adtam a feltételezésben szereplő összes fogalomra. Végezetül a degeneráltságot példaként használva bemutattam a hálózatok egy gazdag sorozatát, amelyeket valószínűleg mind-mind gyenge kapcsolatok stabilizálnak.

3. Táblázat. A degeneráltság, mint a gyenge kapcsolatok és a stabilizáció forrása a különböző hálózatokban

A degeneráltság forrása*	Gyenge kapcsolatok az alábbi partnerek között		A stabilizált funkció**
	A partner	B partner	
genetikus kód	tRNS	riboszómák	transzláció
génreguláció	transzkripció faktor	promóter régió	géntranszkripció
génreguláció	transzkripció faktor	adott gén transzkripciója	génhálózat
fehérje tekeredési formák	A fehérje	B fehérje	sejtes válasz
enzimfunkció	enzim	metabolikus út	metabolikus hálózat
struktúrfehérje	struktúrfehérje	citoszkeleton	sejtszerkezet
sejten belüli elhelyezkedés	fehérje	sejtszervecske specifikus kötőhely	sejtszervecske stabilizáció
sejtszervecske sokféleség	sejtszervecske	sejtszervecske funkció	sejtes válasz
szinaptikus plaszticitás	fehérje komplexek	plaszticitás	memória
sejtek a szerveken belül	sejt	sejtes funkció	szöveti funkció
jelátviteli utak	jel	válasz	jelátviteli hálózatok
immunsejtek	immunsejt	immunhatás	immunválasz
idegsejt kapcsolódás	idegsejt	funkció	idegválasz
szervfejlődés	kezdeti irányító sejt	környezet	testfelépítés
izomrostok	motorikus egység	összehúzódás	mozdulatok
csontok trabekuláris szerkezetének aszimmetriája	csontelemek	nyomásterhelés	csontstabilitás
érzékszervi elemek	jel	érzékszervi válasz	érzet
elemi viselkedési válaszok	viselkedés elemek	környezeti inger	viselkedés
kommunikációs egység	kommunikációs elem	jelentés	üzenet

*a legtöbb példa Edelman és Gally (2001) nagyszerű összefoglaló cikkéből való; a csontok aszimmetriája Fox és Keaveny (2001) munkája nyomán került a táblázatba.

**a legtöbb itt szereplő példa kísérletesen még nem került bebizonyításra

A könyv második részében hadd hívjam meg az Olvasót (és téged Kecec) egy izgalmas utazásra Hálóvilágba. Utazásunk során a gyenge kapcsolatokat fogjuk használni vezető fonál gyanánt (remélem, az utazás végére meg fogom tudni győzni az Olvasót, hogy ez a fonál is volt olyan hasznos, mint az, amelyik Thézeusznak segített egykoron) és a hálózatok egy gyönyörűségeen sokszínű világát fogjuk sorba látogatni vele. A gyenge kapcsolatok egy jó ürügyet fognak adni nekem arra, hogy sorra bemutassam ezeket a hálózatokat az Olvasónak, és felfedjem a viselkedésükben megbúvó, lenyűgöző egységet. Nincs más hátra: indulhatunk.